

การเผาไหม้และการปล่อยก๊าซมลพิษของถ่านไม้ในเตาหุงต้ม ในครัวเรือนแบบต่างๆ

โดย

นายตรีกิตติ ไตรบุตร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการพลังงานและสิ่งแวดล้อม
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

การเผาไหม้และการปล่อยก๊าซมลพิษของถ่านไม้ในเตาหุงต้ม ในครัวเรือนแบบต่างๆ

โดย

นายตรีกิตติ ไตรบุตร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการพลังงานและสิ่งแวดล้อม
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ปีการศึกษา 2558
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

COMBUSTION CHARACTERISTICS AND POLLUTANT EMISSIONS OF THE BURNING OF CHARCOAL IN VARIOUS TYPES OF HOUSEHOLD COOKING STOVES

BY

MR. TREEKITTI TRIBOOT

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS
FOR THE DEGREE OF MASTER DEGREE OF ENGINEERING
ENERGY AND ENVIRONMENTAL TECHNOLOGY MANAGEMENT
DEPARTMENT OF CHEMICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING
THAMMASAT UNIVERSITY
ACADEMIC YEAR 2015

COPYRIGHT OF THAMMASAT UNIVERSITY

1557

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

วิทยานิพนธ์

ของ

นายตรีกิตติ ไตรบุตร

เรื่อง

การเผาไหม้และการปล่อยก๊าซมลพิษของถ่านไม้ในเตาหุงต้ม
ในครัวเรือนแบบต่างๆ

ได้รับการตรวจสอบและอนุมัติ ให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

เมื่อ วันที่ 13 พฤษภาคม พ.ศ. 2559

ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ _____

(รองศาสตราจารย์ ดร.ภาณุ ด่านวานิชกุล)

กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ _____

(รองศาสตราจารย์ ดร.สาธก ไชยกุลชื่นสกุล)

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ _____

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บรรพต ศิริณัฏสมบูรณ์)

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ _____

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชิดพงศ์ ประดิษฐสุวรรณ)

คณบดี _____

(รองศาสตราจารย์ ดร.ประภัสสร์ วังศกาญจน์)

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเผาไหม้และการปล่อยก๊าซมลพิษของถ่านไม้ในเตาหุงต้มในครัวเรือนแบบต่างๆ
ชื่อผู้เขียน	นายตรีกิตติ ไตรบุตร
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา/คณะ/มหาวิทยาลัย	เทคโนโลยีการจัดการพลังงานและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รองศาสตราจารย์ ดร.สาธก ไชยกุลชื่นสกุล
ปีการศึกษา	2558

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลของแบบของเตาหุงต้ม (เตาทรงกระบอก เตาทรงกรวย และเตาประสิทธิภาพสูง) ชนิดของถ่านไม้ (ถ่านไม้โกงกางและถ่านกะลาอัดไร้ควัน) และปริมาณของถ่านไม้ (600, 800, และ 1,000 g) ที่มีต่ออุณหภูมิการเผาไหม้ รูปแบบการใช้งาน (เวลาที่ใช้ในการจุดติดไฟของถ่านไม้ เวลาที่ใช้ในการทำให้น้ำเดือด และเวลารวมของการใช้งานทั้งหมด) ต่อค่าร้อยละการเผาไหม้สมบูรณ์ (% complete combustion) ต่อประสิทธิภาพการใช้งาน (% usage efficiency) และต่อการปล่อยก๊าซมลพิษ (CO และ NO_x) สำหรับการเผาไหม้ของถ่านไม้ในเตาหุงต้มแบบต่างๆ ผลการทดลอง พบว่า ในส่วนของอุณหภูมิการเผาไหม้ ถ่านไม้โกงกางมีอุณหภูมิการเผาไหม้ที่สูงกว่าของถ่านกะลาอัดไร้ควัน อุณหภูมิการเผาไหม้ของเตาประสิทธิภาพสูงมีค่าสูงที่สุด รองลงมาคือ เตาทรงกรวย และเตาทรงกระบอก ตามลำดับ และปริมาณถ่านไม้มีค่าอุณหภูมิการเผาไหม้เรียงลำดับจากมากไปน้อย ได้เป็น ปริมาณถ่านไม้ 1,000, 800, และ 600 g ตามลำดับ เมื่อพิจารณารูปแบบของการเผาไหม้ พบว่า ถ่านไม้โกงกางใช้เวลาในการจุดติดไฟ เวลาที่ทำให้น้ำเดือด และมีเวลารวมของการใช้งานทั้งหมด ที่สั้นกว่าของถ่านกะลาอัดไร้ควัน ในส่วนของแบบของเตาหุงต้ม พบว่า เตาประสิทธิภาพสูงใช้เวลาในการจุดติดไฟ เวลาที่ทำให้น้ำเดือด และมีเวลารวมของการใช้งานทั้งหมดที่สั้นที่สุด รองลงมาคือ เตาทรงกระบอก และเตาทรงกรวย ตามลำดับ ในแง่ของผลของปริมาณถ่านไม้ที่มีต่อเวลาในการจุดติดไฟและเวลาที่ทำให้น้ำเดือด พบว่า ปริมาณถ่านไม้ 600 g ใช้เวลานานที่สุด รองลงมาคือ ประมาณ 800 และ 1,000 g ตามลำดับ ถ่านไม้ปริมาณ 1,000 g มีเวลารวมของการใช้งานทั้งหมดสูงที่สุด รองลงมาคือ ปริมาณ 800 และ 600 g ตามลำดับ เมื่อพิจารณาชนิดของถ่านไม้ที่มีต่อร้อยละการเผาไหม้สมบูรณ์ พบว่า ถ่านไม้โกงกางและถ่านกะละอัดไร้ควันมีค่าเฉลี่ยของ

ร้อยละการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ประมาณร้อยละ 100 และ 88-96 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาแบบของเตาหุงต้มที่มีต่อประสิทธิภาพการใช้งาน พบว่า เตาประสิทธิภาพสูงมีประสิทธิภาพการใช้งานสูงที่สุด รองลงมาคือ เตาทรงกระบอก และเตาทรงกรวย ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยของค่าความเข้มข้นของการปล่อย CO ของเตาหุงต้มทั้ง 3 แบบ คือ เตาทรงกระบอก เตาทรงกรวย เตาประสิทธิภาพสูง มีค่าอยู่ในช่วง 659-710, 594-641, และ 521-581 ppm ตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยของการปล่อย NO_x ของเตาทรงกระบอก เตาทรงกรวย และเตาประสิทธิภาพสูง พบว่า มีค่าอยู่ในระดับเดียวกัน โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.9-6.7 ppm ผลของปริมาณถ่านไม้ที่ใช้ที่มีต่อการปล่อยก๊าซมลพิษ พบว่า ปริมาณถ่านไม้ 600 g มีค่าเฉลี่ยของการปล่อย CO มากที่สุด รองลงมาคือ ปริมาณ 1,000 และ 800 g ตามลำดับ สำหรับการปล่อย NO_x พบว่า ถ่านไม้ปริมาณ 800 g มีการปล่อย NO_x สูงสุด รองลงมาคือ ปริมาณ 600 และ 1,000 g ตามลำดับ เมื่อพิจารณาผลของชนิดของถ่านไม้ที่มีต่อการปล่อยก๊าซมลพิษ พบว่า ถ่านไม้โกงกางและถ่านกะลาอัดไร้ควันมีค่าเฉลี่ยของการปล่อย CO ไม่ต่างกันมากนัก คือ มีค่าอยู่ในช่วง 602-614 ppm แต่ค่าเฉลี่ยของการปล่อย NO_x ของถ่านไม้โกงกางมีค่าสูงกว่าของถ่านกะลาอัดไร้ควัน โดยมีค่าอยู่ในช่วง 2.7-6.5 และ 0.2-4.0 ppm ตามลำดับ ในแง่ของผลกระทบที่มีต่อสุขภาพมนุษย์ พบว่า การปล่อย CO ที่วัดได้ในงานวิจัยนี้ มีค่าอยู่ในช่วง 521-710 ppm ซึ่งที่ปริมาณระดับนี้ ส่งผลให้เกิดอาการคลื่นไส้ อาเจียน วิงเวียนศีรษะอย่างรุนแรง มีอาการหัวใจเต้นเร็วขึ้นผิดปกติและเริ่มเต้นผิดจังหวะ จนถึงหมดสติและเสียชีวิตได้ หากได้รับในปริมาณนี้ที่เวลานานเกินกว่า 3 ชั่วโมง ระดับความเข้มข้นของการปล่อย NO_x มีค่าอยู่ในช่วง 2.1-4.6 ppm ซึ่งปริมาณในระดับนี้ ส่งผลให้เกิดอาการแสบจมูกและระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจ

คำสำคัญ: ถ่านไม้, เตาหุงต้มในครัวเรือน, การเผาไหม้, การปล่อยก๊าซมลพิษ

Thesis Title	COMBUSTION AND POLLUTANT EMISSIONS FROM THE BURNING OF CHARCOAL IN VARIOUS TYPES OF HOUSEHOLD COOKING STOVES
Author	Mr. Treekitti Triboot
Degree	Master of Engineering
Department/Faculty/University	Energy and Environmental Technology Management Engineering Thammasat University
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Satok Chaikunchuensakun, Ph.D.
Academic Year	2015

ABSTRACT

This research studied the effects of the types of household cooking stoves (cylindrical-shape, conical-shape, and high-efficiency stoves), the types of charcoal (ordinary and smokeless charcoal), and the quantities of charcoal (600 800, and 1,000 g) on the combustion temperature; on the ignition time, water-boiling time, and overall usage time; on the percentage of complete combustion; and on the usage efficiency of the combustion of charcoal in various types of cooking stoves. The emissions of gaseous pollutants (CO and NO_x) from the combustion were also investigated. The experimental results revealed that the combustion temperature of ordinary charcoal was higher than that of smokeless charcoal. The combustion temperature of the high-efficiency stove was found to be highest, followed by those of conical-shape and cylindrical-shape, respectively. The combustion temperature of charcoal with the amount of 1,000 g was the highest one, followed by those of 800 and 600 g, respectively. The ignition, the water-boiling, and the overall usage times of ordinary charcoal were shorter than those of smokeless charcoal. The ignition, the water-boiling, and the overall usage times of the high-efficiency stove were the shortest one, followed by those of the cylindrical-shape and the conical-shape stoves, respectively.

The ignition and water-boiling times of charcoal with the amount of 600 g were found to be highest, whereas the overall usage time of charcoal with the amount of 1,000 g was the highest one. The average percentages of complete combustion of ordinary and smokeless charcoal were found to be 100 and 88-96%, respectively. When considering the usage efficiency, it was found that the high-efficiency stove gave the highest usage efficiency, followed by the cylindrical-shape and the conical-shape stoves, respectively. The average concentrations of CO emissions of the cylindrical-shape, conical-shape, and the high-efficiency stoves were 659-710, 594-641, and 521-581 ppm, respectively. The average concentrations of NO_x emissions of the cylindrical-shape, conical-shape, and high-efficiency stoves were found to be within the same range of 0.9-6.7 ppm. When determining the effect of the amount of charcoal on CO and NO_x emissions, it was found that the CO emission from the combustion of charcoal with the amount of 600 g was the highest one, followed by those of 1,000 and 800 g, respectively. However, the NO_x emission from the combustion of charcoal with the amount of 800 g was highest, followed by those of 600 and 1,000 g, respectively. When considering the types of charcoal on CO and NO_x emissions, it was found the average CO emission of ordinary charcoal was similar to that of smokeless charcoal (within the range of 602-614 ppm). However, it was found that the average emission of NO_x of ordinary charcoal was higher than that of smokeless charcoal (2.7-6.5 and 0.2-4.0, respectively). In the aspect of the effect of the amount of CO and NO_x emissions on the human health, it was found that the emissions of CO in this study were within the range of 521-710 ppm, which could result in nausea, vomiting, dizziness, severe headache, irregular heart beating, unconsciousness, or even fatal if exposed to CO with this range of concentration for more than 3 h. The amount of NO_x emissions from the experiments were found to in the range of 2.1-4.6 ppm. With this the level, it could cause irritation to the nostril and respiratory systems

Keywords: Charcoal, Household cooking stove, Combustion, Pollutant emissions

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่อง “การเผาไหม้และการปล่อยก๊าซมลพิษของถ่านไม้ในเตาหุงต้มในครัวเรือนแบบต่างๆ” จะสำเร็จลุล่วงไม่ได้ หากไม่ได้รับความอนุเคราะห์และความช่วยเหลือจากทุกท่าน ซึ่งผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สาธก ไชยกุลชื่นสกุล และผู้ช่วยศาสตราจารย์ โปรดปราน สิริธีรศาสน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความรู้ต่างๆ และชี้แนะแนวทางในการแก้ปัญหาต่างๆ อีกทั้งยังฝึกการเป็นนักวิจัยที่ดี พร้อมทั้งสอนวิธีการแก้ปัญหาเฉพาะหน้า ที่สามารถนำไปใช้ในการดำเนินชีวิตได้

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ทุกท่าน โดยเฉพาะรองศาสตราจารย์ ดร.ภาณุ ด่านวานิชกุล และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บรรพต ศิริณัฏสมบูรณ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชิดพงศ์ ประดิษฐสุวรรณ ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอกจากภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในการปรับปรุงงานวิจัยให้ดียิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ทุกท่าน ตลอดจนคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและเอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำวิจัย และให้การสนับสนุนในด้านต่างๆ รวมถึงค่าใช้จ่ายในการทำวิจัย และการนำเสนอผลงานวิจัยในการประชุมวิชาการ

ท้ายที่สุดนี้ ขอขอบคุณ คุณสองค์โฉม โอสถจันทร์ ที่คอยเป็นกำลังใจตลอดการทำงานวิจัยนี้ ส่งผลให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

นายตรีกิตติ ไตรบุตร

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	(1)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	(3)
กิตติกรรมประกาศ	(5)
สารบัญ	(6)
สารบัญตาราง	(9)
สารบัญภาพ	(11)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย	3
1.5 องค์ประกอบของรายงาน	4
บทที่ 2 วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 เตาหุงต้มในครัวเรือนหรือเตาอั้งโล่	5
2.1.1 การถ่ายเทความร้อน	7
2.1.2 การไหลของอากาศเข้าสู่ห้องเผาไหม้ของเตา	7

2.2 เชื้อเพลิงที่ใช้สำหรับการหุงต้มในครัวเรือน 7
2.2.1 ไม้ฟืน 8
2.2.2 ถ่านไม้ 8
2.3 การเผาไหม้และการปล่อยก๊าซมลพิษ 9
2.3.1 คาร์บอนมอนนอกไซด์ 10
2.3.2 ออกไซด์ของไนโตรเจน 11
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 11

บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย 15

3.1 วิธีการและขั้นตอนการศึกษา 15
3.2 การวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง 21

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล 23

4.1 ผลการวิเคราะห์ถ่านไม้ที่ใช้ในงานวิจัย 23
4.2 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ศึกษาในงานวิจัย 25
4.2.1 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของการเผาไหม้กับเวลา 25
4.2.2 ผลของแบบของเตาหุงต้ม และชนิดและปริมาณของถ่านไม้ ที่มีผลต่อระยะเวลาของการจุดติดไฟ การทำให้น้ำเดือด และเวลารวมของการใช้งานทั้งหมด 30
4.2.3 ผลของแบบของเตาหุงต้ม และชนิดและปริมาณของถ่านไม้ที่มีต่อร้อยละการเผาไหม้สมบูรณ์ (% complete combustion) 33
4.2.4 ผลของแบบของเตาหุงต้ม และชนิดและปริมาณของถ่านไม้ที่มีต่อประสิทธิภาพการใช้งาน (% usage efficiency) 35
4.2.5 ผลของแบบของเตาหุงต้ม และชนิดและปริมาณของถ่านไม้ที่มีต่อลักษณะการปล่อยและปริมาณของ CO และ NO_x 44
4.3 ผลของมลพิษจากการใช้งานเตาหุงต้มที่มีต่อสุขภาพของมนุษย์ 59

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะนำสำหรับงานวิจัยในอนาคต 61

5.1 สรุปผลการทดลอง 61
5.1.1 ผลการศึกษาในด้านอุณหภูมิของการเผาไหม้ 61
5.1.2 ผลการศึกษาในด้านรูปแบบในการใช้งานเตา ซึ่งเป็นระยะเวลา ในช่วงต่างๆ การใช้งานเตาหุงต้ม 61
5.1.3 ผลการศึกษาในด้านร้อยละการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ (% complete combustion) 62
5.1.4 ผลการศึกษาในด้านร้อยละประสิทธิภาพการใช้งาน (% usage efficiency) 63
5.1.5 ผลการศึกษาในด้านลักษณะการปล่อยและปริมาณของก๊าซมลพิษ (CO และ NO_x) 63
5.1.6 ผลการศึกษาในด้านผลกระทบที่มีต่อสุขภาพของมนุษย์ที่มาจากการปล่อยก๊าซมลพิษจากการใช้งานเตาหุงต้ม 64

5.2 ข้อเสนอแนะนำสำหรับการทำวิจัยในอนาคต 64

รายการอ้างอิง 65

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก ข้อมูลดิบ 67
ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณ 119
ข.1 การคำนวณหาร้อยละการเผาไหม้สมบูรณ์ (% complete combustion) 119
ข.2 การคำนวณหาประสิทธิภาพการใช้งาน (% usage efficiency) 120

ประวัติผู้เขียน 122

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	คุณสมบัติของถ่านไม้ที่ใช้ในงานวิจัย	9
2.2	ผลของปริมาณของก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) และออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) ที่มีต่อสุขภาพมนุษย์	11
4.1	ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) และค่าความร้อน (heating value) ของถ่านไม้โกงกางและถ่านกะลาอัดไร้ควัน	23
4.2	ระยะเวลาที่ใช้ในการจุดติดไฟของถ่านไม้ ระยะเวลาที่ใช้ในการทำให้น้ำเดือด และระยะเวลารวมของการใช้งานทั้งหมด ของการเผาไหม้ในเตาหุงต้ม ทรงกระบอก ทรงกรวย และเตาประสิทธิภาพสูง	30
4.3	ระยะเวลาที่ใช้ในการจุดติดไฟของถ่านไม้ ระยะเวลาที่ใช้ในการทำให้น้ำเดือด และระยะเวลารวมของการใช้งานทั้งหมด ของการเผาไหม้ของถ่านไม้โกงกางและถ่านไม้กะลาอัดไร้ควัน	31
4.4	ระยะเวลาที่ใช้ในการจุดติดไฟของถ่านไม้ ระยะเวลาที่ใช้ในการทำให้น้ำเดือด และระยะเวลารวมของการใช้งานทั้งหมด ของปริมาณของถ่านไม้ 600, 800, และ 1,000 g	32
4.5	ผลของเตาหุงต้มแบบต่างๆ ที่มีต่อร้อยละการเผาไหม้สมบูรณ์ (% complete combustion)	33
4.6	ผลของถ่านไม้ชนิดต่างๆ ที่มีต่อร้อยละการเผาไหม้สมบูรณ์ (% complete combustion)	34
4.7	ผลของปริมาณไม้ต่างๆ ที่มีต่อร้อยละการเผาไหม้สมบูรณ์ (% complete combustion)	35
4.8	ผลของแบบของเตาหุงต้มแบบต่างๆ ที่มีต่อประสิทธิภาพการใช้งาน (% usage efficiency)	37
4.9	ผลของชนิดของถ่านไม้ชนิดต่างๆ ที่มีต่อประสิทธิภาพการใช้งาน (% usage efficiency)	40

4.10 ผลของปริมาณถ่านไม้ที่มีต่อประสิทธิภาพการใช้งาน (% usage efficiency) 43
4.11 ภาพรวมของผลการศึกษาของตัวแปรต่างๆ ที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ 58
(ถ่านไม้ 2 ชนิด ที่ 3 ปริมาณของถ่านไม้ ในเตาหุงต้ม 3 แบบ)
4.12 ผลของปริมาณการปล่อยก๊าซ CO และ NO_x ที่มีต่อสุขภาพของมนุษย์ 59
โดยแบ่งตามแบบของเตาหุงต้มและชนิดของถ่านไม้

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	ส่วนประกอบของเตาหุงต้ม	6
2.2	เตาอั้งโล่ 3 ชนิด ที่ใช้ในงานวิจัย	6
3.1	เตาอั้งโล่ 3 ชนิด ที่ใช้ในงานวิจัย	16
3.2	ชนิดของถ่านไม้ที่ใช้ในงานวิจัย	17
3.3	ขี้ไต้จุดไฟ	17
3.4	หม้ออลูมิเนียมสำหรับใช้ทดสอบประสิทธิภาพการใช้งานด้วยการต้มน้ำ	18
3.5	เครื่องชั่งน้ำหนักแบบ digital ยี่ห้อ AFW รุ่น B30	18
3.6	เทอร์โมคัปเปิล	19
3.7	เครื่องวิเคราะห์ก๊าซมลพิษ	19
3.8	การจัดวางอุปกรณ์การทดลองสำหรับการทดสอบการเผาไหม้	20
4.1	อุณหภูมิการเผาไหม้ที่เวลาต่างๆ ของถ่านไม้ที่ปริมาณ 600 g ในเตาทรงกระบอก	26
4.2	อุณหภูมิการเผาไหม้ที่เวลาต่างๆ ของถ่านไม้ที่ปริมาณ 600 g ในเตาทรงกรวย	26
4.3	อุณหภูมิการเผาไหม้ที่เวลาต่างๆ ของถ่านไม้ที่ปริมาณ 600 g ในเตาประสิทธิภาพสูง	26
4.4	อุณหภูมิการเผาไหม้ที่เวลาต่างๆ ของถ่านไม้ที่ปริมาณ 800 g ในเตาทรงกระบอก	27
4.5	อุณหภูมิการเผาไหม้ที่เวลาต่างๆ ของถ่านไม้ที่ปริมาณ 800 g ในเตาทรงกรวย	27
4.6	อุณหภูมิการเผาไหม้ที่เวลาต่างๆ ของถ่านไม้ที่ปริมาณ 800 g ในเตาประสิทธิภาพสูง	28
4.7	อุณหภูมิการเผาไหม้ที่เวลาต่างๆ ของถ่านไม้ที่ปริมาณ 1,000 g ในเตาทรงกระบอก	28
4.8	อุณหภูมิการเผาไหม้ที่เวลาต่างๆ ของถ่านไม้ที่ปริมาณ 1,000 g ในเตาทรงกรวย	29

4.9	อุณหภูมิการเผาไหม้ที่เวลาต่างๆ ของถ่านไม้ที่ปริมาณ 1,000 g ในเตาประสิทธิภาพสูง	29
4.10	ประสิทธิภาพการใช้งาน (% usage efficiency) ของเตาหุงต้มแบบต่างๆ ที่ใช้ปริมาณถ่านไม้ 600, 800, และ 1,000 g สำหรับถ่านไม้โกงกาง	36
4.11	ประสิทธิภาพการใช้งาน (% usage efficiency) ของเตาหุงต้มแบบต่างๆ ที่ใช้ปริมาณถ่านไม้ 600, 800, และ 1,000 g สำหรับถ่านกะลาอัดไร้ควัน	36
4.12	ประสิทธิภาพการใช้งาน (% usage efficiency) ของเตาหุงต้มและ ถ่านไม้ชนิดต่างๆ ที่ปริมาณถ่านไม้ 600 g	39
4.13	ประสิทธิภาพการใช้งาน (% usage efficiency) ของเตาหุงต้มและ ถ่านไม้ชนิดต่างๆ ที่ปริมาณถ่านไม้ 800 g	39
4.14	ประสิทธิภาพการใช้งาน (% usage efficiency) ของเตาหุงต้มและ ถ่านไม้ชนิดต่างๆ ที่ปริมาณถ่านไม้ 1,000 g	40
4.15	ประสิทธิภาพการใช้งาน (% usage efficiency) ของถ่านไม้ ที่ปริมาณของถ่านไม้ในช่วง 600-1,000 g สำหรับเตาทรงกระบอก	41
4.16	ประสิทธิภาพการใช้งาน (% usage efficiency) ของถ่านไม้ ที่ปริมาณของถ่านไม้ในช่วง 600-1,000 g สำหรับเตาทรงกรวย	42
4.17	ประสิทธิภาพการใช้งาน (% usage efficiency) ของถ่านไม้ ที่ปริมาณของถ่านไม้ในช่วง 600-1,000 g สำหรับเตาประสิทธิภาพสูง	42
4.18	การปล่อยก๊าซมลพิษของการเผาไหม้ถ่านกะลาอัดไร้ควันปริมาณ 1,000 g ในเตาทรงกระบอก	44
4.19	การปล่อยก๊าซมลพิษของการเผาไหม้ถ่านกะลาอัดไร้ควันปริมาณ 800 g ในเตาทรงกระบอก	45
4.20	การปล่อยก๊าซมลพิษของการเผาไหม้ถ่านกะลาอัดไร้ควันปริมาณ 600 g ในเตาทรงกระบอก	45
4.21	การปล่อยก๊าซมลพิษของการเผาไหม้ถ่านไม้โกงกางปริมาณ 1,000 g ในเตาทรงกระบอก	46
4.22	การปล่อยก๊าซมลพิษของการเผาไหม้ถ่านไม้โกงกางปริมาณ 800 g ในเตาทรงกระบอก	46
4.23	การปล่อยก๊าซมลพิษของการเผาไหม้ถ่านไม้โกงกางปริมาณ 600 g ในเตาทรงกระบอก	47

4.24 การปล่อยก๊าซมลพิษของการเผาไหม้ถ่านกะลาอัดไร้ควันปริมาณ 1,000 g ในเตาทรงกรวย 47
4.25 การปล่อยก๊าซมลพิษของการเผาไหม้ถ่านกะลาอัดไร้ควันปริมาณ 800 g ในเตาทรงกรวย 48
4.26 การปล่อยก๊าซมลพิษของการเผาไหม้ถ่านกะลาอัดไร้ควันปริมาณ 600 g ในเตาทรงกรวย 48
4.27 การปล่อยก๊าซมลพิษของการเผาไหม้ถ่านไม้โกงกางปริมาณ 1,000 g ในเตาทรงกรวย 49
4.28 การปล่อยก๊าซมลพิษของการเผาไหม้ถ่านไม้โกงกางปริมาณ 800 g ในเตาทรงกรวย 49
4.29 การปล่อยก๊าซมลพิษของการเผาไหม้ถ่านไม้โกงกางปริมาณ 600 g ในเตาทรงกรวย 50
4.30 การปล่อยก๊าซมลพิษของการเผาไหม้ถ่านกะลาอัดไร้ควันปริมาณ 1,000 g ในเตาประสิทธิภาพสูง 50
4.31 การปล่อยก๊าซมลพิษของการเผาไหม้ถ่านกะลาอัดไร้ควันปริมาณ 800 g ในเตาประสิทธิภาพสูง 51
4.32 การปล่อยก๊าซมลพิษของการเผาไหม้ถ่านกะลาอัดไร้ควันปริมาณ 600 g ในเตาประสิทธิภาพสูง 51
4.33 การปล่อยก๊าซมลพิษของการเผาไหม้ถ่านไม้โกงกางปริมาณ 1,000 g ในเตาประสิทธิภาพสูง 52
4.34 การปล่อยก๊าซมลพิษของการเผาไหม้ถ่านไม้โกงกางปริมาณ 800 g เตาประสิทธิภาพสูง 52
4.35 การปล่อยก๊าซมลพิษของการเผาไหม้ถ่านไม้โกงกางปริมาณ 600 g ในเตาประสิทธิภาพสูง 53
4.36 ค่าเฉลี่ยของ CO และ NO_x สำหรับเตาหุงต้มชนิดต่างๆ 54
4.37 ค่าเฉลี่ยของ CO และ NO_x ของถ่านไม้ชนิดต่างๆ 55
4.38 ค่าเฉลี่ยของ CO และ NO_x สำหรับถ่านไม้ปริมาณต่างๆ 55

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

เตาอั้งโล่เป็นเตาหุงต้มในครัวเรือนที่ได้รับแบบอย่างมาจากประเทศจีน โดยเตาอั้งโล่มีทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ตามขนาดของหม้อหรือภาชนะที่ใช้หุงต้ม เป็นเตาใช้ได้สะดวกกว่าเตาหุงต้มแบบอื่นๆ เพราะเคลื่อนย้ายได้ง่าย และไม่เปลืองเนื้อที่ รวมทั้งสามารถตั้งวางบนพื้นเรือนได้ เพราะมีการบุฉนวนที่ก้นเตาเพื่อป้องกันไฟไหม้พื้น จึงเป็นที่นิยมใช้กันทั่วไปโดยเฉพาะในชนบทที่ยังใช้ฟืนและถ่านไม้เป็นเชื้อเพลิงในการหุงต้มอาหาร [1]

อนึ่ง ประเด็นที่น่าเป็นห่วงสำหรับการใช้เตาอั้งโล่ คือ โดยส่วนใหญ่แล้ว การใช้เตาอั้งโล่มักคำนึงถึงความสะดวกในการใช้งานและการมีกลิ่นและควันน้อยเป็นหลัก มักไม่ค่อยคำนึงถึงประสิทธิภาพของเตา และการปล่อยก๊าซมลพิษในระหว่างการเผาไหม้ [2] ซึ่งก๊าซมลพิษหลายชนิดเป็นก๊าซที่มองไม่เห็นหรือไม่มีกลิ่น อาทิเช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) โดยที่คาร์บอนมอนอกไซด์สามารถเข้าสู่ร่างกายได้ทางลมหายใจ ทำให้เนื้อเยื่อและเซลล์สมองขาดออกซิเจน และมีภาวะเลือดเป็นกรดเกิดพิษเฉียบพลัน โดยความเป็นพิษจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณก๊าซในอากาศที่หายใจเข้าไป ทั้งนี้ อาการที่เกิดขึ้นเมื่อร่างกายได้รับคาร์บอนมอนอกไซด์เข้าไป คือ เกิดผื่นแดงที่ผิวหนังและเยื่อบุ ปวดศีรษะ วิงเวียน คลื่นไส้ อาเจียน หมดสติ และอาจถึงตายได้ [3] ส่วนผู้ที่รับออกไซด์ของไนโตรเจนเข้าไปในร่างกายในปริมาณมากๆ จะมีอาการระคายเคืองของระบบทางเดินหายใจ ปอดอักเสบ หลอดลมตีบตัน และอาจเสียชีวิตได้ [4]

เมื่อพิจารณาถึงเชื้อเพลิงที่ใช้ พบว่า เชื้อเพลิงหลักที่ใช้สำหรับเตาหุงต้มในครัวเรือนในประเทศไทย คือ ถ่านไม้และไม้ฟืน โดยจากข้อมูลในปี 2557 พบว่า มีการใช้ไม้ฟืนและถ่านไม้ประมาณร้อยละ 27.4 และ 28.9 ตามลำดับ หรือคิดรวมกันเป็นประมาณร้อยละ 56.3 ของพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในสาขาบ้านอยู่อาศัย [5] แต่ถ่านไม้และไม้ฟืนที่ใช้กันอยู่ทั่วไป (หรือมีขายในท้องตลาด) มักมีคุณภาพต่ำ คือ มีควันมาก ควบคุมความแรงของไฟได้ยาก มอดเร็ว มีปริมาณเถ้ามาก และมีปริมาณสารระเหยได้ (volatile matter) ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็งในปริมาณที่สูง

ดังนั้น จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ ที่ประสงค์จะศึกษาถึงตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการเผาไหม้และการปล่อยก๊าซมลพิษจากการเผาไหม้ถ่านไม้ชนิดต่างๆ ในเตาหุงต้มในครัวเรือนหลายๆ รูปแบบ โดยงานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงรูปแบบและลักษณะการปล่อยก๊าซมลพิษที่สำคัญ อันได้แก่ คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) ในระหว่างการเผาไหม้ของถ่านไม้

ในเตาหุงต้มในครัวเรือนแบบต่างๆ และศึกษาถึงผลของตัวแปรต่างๆ อันได้แก่ แบบของเตาหุงต้ม ชนิดของถ่านไม้ และปริมาณของถ่านไม้ที่ใช้ในการหุงต้ม ที่มีต่อรูปแบบการใช้งานสำหรับการหุงต้มของเตาอั้งโล่แบบต่างๆ [อันประกอบด้วย เวลาที่ใช้ในการจุดติดไฟของถ่านไม้ เวลาที่ใช้ในการทำให้น้ำเดือด และเวลารวมของการใช้งานทั้งหมด (นับตั้งแต่ถ่านไม้เริ่มติดไฟจนกระทั่งราไฟ)] ร้อยละการเผาไหม้สมบูรณ์ (% complete combustion) ประสิทธิภาพการใช้งาน (% usage efficiency) และการปล่อยก๊าซมลพิษ (CO และ NO_x) ทั้งในแง่ปริมาณและลักษณะของการปล่อยก๊าซมลพิษทั้งสองชนิด ทั้งนี้ เพื่อนำไปใช้เป็นข้อมูลในการเลือกเตาหุงต้มและถ่านไม้ (ทั้งในแง่ของชนิดและปริมาณ) ให้ตรงกับวัตถุประสงค์ในการใช้งาน เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ และมีความปลอดภัยต่อผู้ใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาถึงผลของแบบของเตาหุงต้ม (หรือเตาอั้งโล่) และชนิดและปริมาณของถ่านไม้ ที่มีต่ออุณหภูมิการเผาไหม้

1.2.2 เพื่อศึกษาถึงผลของแบบของเตาหุงต้ม (หรือเตาอั้งโล่) และชนิดและปริมาณของถ่านไม้ ที่มีต่อรูปแบบการใช้งานสำหรับการหุงต้มของเตาหุงต้มแบบต่างๆ อันได้แก่ เวลาที่ใช้ในการจุดติดไฟของถ่านไม้ เวลาที่ใช้ในการทำให้น้ำเดือด และเวลารวมของการใช้งานทั้งหมด (นับตั้งแต่ถ่านไม้เริ่มติดไฟจนกระทั่งราไฟ)

1.2.3 เพื่อศึกษาถึงผลของแบบของเตาหุงต้ม และชนิดและปริมาณของถ่านไม้ ที่มีต่อร้อยละการเผาไหม้สมบูรณ์ (% complete combustion)

1.2.4 เพื่อศึกษาถึงผลของแบบของเตาหุงต้ม และชนิดและปริมาณของถ่านไม้ ที่มีต่อประสิทธิภาพการใช้งาน (% usage efficiency) ของเตาหุงต้มแบบต่างๆ

1.2.5 เพื่อศึกษาถึงผลของแบบของเตาหุงต้ม และชนิดและปริมาณของถ่านไม้ ที่มีต่อลักษณะการปล่อยและปริมาณ (หรือความเข้มข้น) ของก๊าซมลพิษ (CO และ NO_x) จากเตาหุงต้ม

1.2.6 เพื่อศึกษาผลของปริมาณการปล่อยก๊าซมลพิษจากการใช้งานเตาหุงต้มที่มีต่อสุขภาพของมนุษย์ (หรือผู้ใช้งาน)

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 แบบของเตาหุงต้มที่มีต่ออุณหภูมิการเผาไหม้ รูปแบบการใช้งาน ร้อยละของการเผาไหม้สมบูรณ์ ประสิทธิภาพการใช้งาน และการปล่อยก๊าซมลพิษ (เตาอั้งโล่ทรงกระบอก เตาอั้งโล่ทรงกรวย และเตาอั้งโล่ประสิทธิภาพสูง)

1.3.2 ชนิดของถ่านไม้ที่มีต่ออุณหภูมิการเผาไหม้ รูปแบบการใช้งาน ร้อยละของการเผาไหม้สมบูรณ์ ประสิทธิภาพการใช้งาน และการปล่อยก๊าซมลพิษ (ถ่านไม้โกงกางและถ่านกะลาอัดไร้ควัน)

1.3.3 ปริมาณของถ่านไม้ที่มีต่ออุณหภูมิการเผาไหม้ รูปแบบการใช้งาน ร้อยละของการเผาไหม้สมบูรณ์ ประสิทธิภาพการใช้งาน และการปล่อยก๊าซมลพิษ (600, 800, และ 1,000 g)

1.3.4 ชนิดของมลพิษที่ศึกษา คือ คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x)

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

1.4.1 ทราบถึงผลของแบบของเตาหุงต้ม และชนิดและปริมาณของถ่านไม้ ที่มีต่ออุณหภูมิการเผาไหม้

1.4.2 ทราบถึงผลของแบบของเตาหุงต้ม และชนิดและปริมาณของถ่านไม้ ที่มีต่อรูปแบบการใช้งานสำหรับการหุงต้มของเตาหุงต้มแบบต่างๆ อันได้แก่ เวลาที่ใช้ในการจุดติดไฟของถ่านไม้ เวลาที่ใช้ในการทำให้น้ำเดือด และเวลารวมของการใช้งานทั้งหมด (นับตั้งแต่ถ่านไม้เริ่มติดไฟจนกระทั่งราไฟ)

1.4.3 ทราบถึงผลของแบบของเตาหุงต้ม และชนิดและปริมาณของถ่านไม้ ที่มีต่อร้อยละการเผาไหม้สมบูรณ์ (% complete combustion)

1.4.4 ทราบถึงผลของแบบของเตาหุงต้ม และชนิดและปริมาณของถ่านไม้ ที่มีต่อประสิทธิภาพการใช้งาน (% usage efficiency) ของเตาหุงต้มแบบต่างๆ

1.4.5 ทราบถึงผลของแบบของเตาหุงต้ม และชนิดและปริมาณของถ่านไม้ ที่มีต่อลักษณะการปล่อยและปริมาณ (หรือความเข้มข้น) ของก๊าซมลพิษ (CO และ NO_x) จากเตาหุงต้ม

1.4.6 ทราบถึงผลของปริมาณการปล่อยก๊าซมลพิษ (CO และ NO_x) ที่มีต่อสุขภาพของมนุษย์หรือผู้ใช้งานเตาหุงต้ม

1.4.7 สามารถนำข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยนี้ไปใช้ในการเลือกใช้เตาหุงต้มเพื่อให้ตรงกับวัตถุประสงค์ในการใช้งาน มีประสิทธิภาพ และมีความปลอดภัยต่อผู้ใช้

1.5 องค์ประกอบของรายงาน

รายงานฉบับนี้ประกอบด้วย 5 บทหลัก ประกอบด้วย บทที่ 1 บทนำ ซึ่งกล่าวถึงที่มาและความสำคัญของงานวิจัยนี้ รวมทั้งแสดงวัตถุประสงค์ ขอบเขตของการวิจัย และประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย บทที่ 2 เป็นส่วนของวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง สำหรับรายละเอียดของวัสดุอุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย รวมทั้งขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย ได้แสดงไว้ในบทที่ 3 ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผลได้แสดงไว้ในบทที่ 4 ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์ถ่านไม้ที่ใช้ในงานวิจัย และผลของแบบของเตาหุงต้ม และชนิดและปริมาณของถ่านไม้ที่มีต่ออุณหภูมิการเผาไหม้ รูปแบบการใช้งานของเตาหุงต้ม ร้อยละการเผาไหม้สมบูรณ์ (% complete combustion) ประสิทธิภาพการใช้งาน (% usage efficiency) และลักษณะการปล่อยและปริมาณ (หรือความเข้มข้น) ของก๊าซมลพิษ (CO และ NO_x) จากเตาหุงต้ม รวมทั้งผลของปริมาณการปล่อยก๊าซมลพิษที่มีต่อสุขภาพมนุษย์ บทที่ 5 เป็นการสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต เพื่อเป็นแนวทางในการทำงานวิจัยชิ้นต่อไป และส่วนสุดท้ายเป็นส่วนของภาคผนวก ซึ่งประกอบด้วยรายละเอียดข้อมูลดิบของผลการวิจัย และตัวอย่างการคำนวณต่างๆ

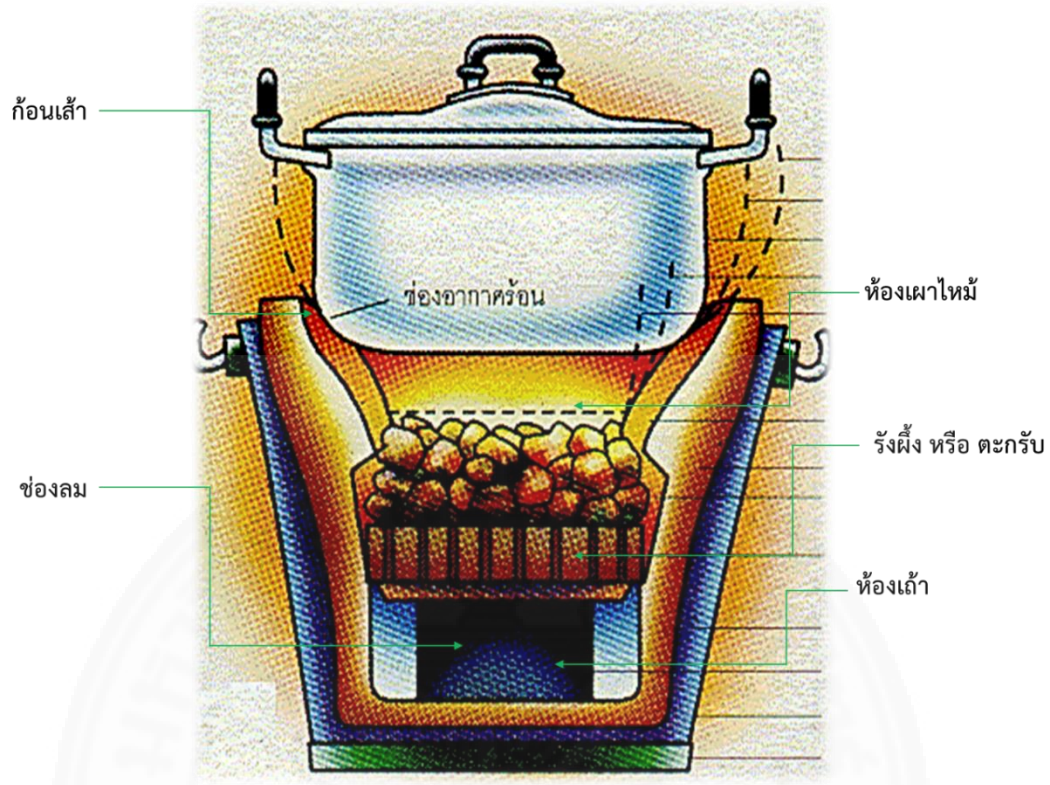
บทที่ 2
วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อศึกษาผลของแบบของเตาหุงต้ม (เตาอั้งโล่ทรงกระบอก เตาอั้งโล่ทรงกรวย และเตาอั้งโล่ทรงกรวยประสิทธิภาพสูง) ชนิดของถ่านไม้ (ถ่านไม้โกงกางและถ่านกะลาอัดไร้ควัน) และปริมาณของถ่านไม้ (600, 800, และ 1,000 g) ที่มีต่ออุณหภูมิการเผาไหม้ รูปแบบการเผาไหม้ (อันได้แก่ เวลาของการจุดติดไฟ เวลาที่ทำให้น้ำเดือด และเวลาการใช้งานทั้งหมด) ร้อยละของการเผาไหม้สมบูรณ์ (% complete combustion) ประสิทธิภาพการใช้งาน (% usage efficiency) และการปล่อยก๊าซมลพิษ (CO_2 และ NO_x) ซึ่งมีรายละเอียดของวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องสามารถนำเสนอได้เป็นลำดับ ดังนี้

2.1 เตาหุงต้มในครัวเรือนหรือเตาอั้งโล่ (Household Cooking Stove) [6]

เตาอั้งโล่มีต้นกำเนิดจากประเทศจีน โดยคำว่า “อั้งโล่” แปลว่า “เตาสีแดง” ทำมาจากดินเหนียว นำมาขึ้นรูปแล้วเผาไฟให้สุก มีรูปร่างเป็นทรงกรวยหรือทรงกระบอก ด้านบนเปิด ด้านล่างปิด มีการเสริมปากขอบเตาด้านบนด้วยดินปั้นเป็นก้อน (ก้อนเส้า) 3 ก้อน เพื่อรองรับน้ำหนักภาชนะในการหุงต้ม ภายในเตาแบ่งเป็น 2 ส่วน โดยมีรังผึ้ง (หรือตะกรับ) กั้นอยู่ เชื้อเพลิงจะวางอยู่บนรังผึ้ง โดยส่วนที่อยู่เหนือรังผึ้งหรือส่วนบนของเตา (ซึ่งเรียกว่า “ห้องเผาไหม้”) เป็นส่วนที่เกิดการเผาไหม้ และส่วนล่างของเตา (ซึ่งเรียกว่า “ห้องเถ้า”) มีช่องลมเพื่อเปิดให้อากาศเข้าไปเผาไหม้กับเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ และเถ้าที่เกิดจากการเผาไหม้จะตกผ่านรังผึ้งลงมาในส่วนนี้ รายละเอียดของเตาหุงต้มหรือเตาอั้งโล่ดังกล่าวข้างต้นเป็นไปดังแสดงในภาพที่ 2.1

เตาอั้งโล่ที่ใช้ในการหุงต้มในครัวเรือนมีหลายรูปแบบ เช่น เตาอั้งโล่ทรงกระบอก เตาอั้งโล่ทรงกรวย และเตาอั้งโล่ประสิทธิภาพสูง เป็นต้น ทั้งนี้ เตาอั้งโล่ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นไปดังแสดงในภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.1 ส่วนประกอบของเตาหุงต้ม [7]



ก) เตาทรงกระบอก ข) เตาทรงกรวย ค) เตาประสิทธิภาพสูง

ภาพที่ 2.2 เตาอั้งโล่ 3 ชนิด ที่ใช้ในงานวิจัย

การออกแบบเตาหุงต้ม ต้องคำนึงถึงความสามารถในการถ่ายเทความร้อนจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงในเตาหุงต้ม (ในห้องเผาไหม้) ไปสู่ภาชนะที่ใช้ในการหุงต้ม โดยเพื่อให้ได้เตาหุงต้มที่มีประสิทธิภาพสูง การออกแบบเตาหุงต้มควรพิจารณาถึงประเด็นต่างๆ ดังนี้ [8]

2.1.1 การถ่ายเทความร้อน

ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่ถ่ายเทไปสู่ภาชนะหุงต้มส่วนใหญ่เป็นความร้อนจากการแผ่รังสีความร้อน เนื่องจากเชื้อเพลิงซึ่งส่วนใหญ่คือถ่านไม้ซึ่งมีส่วนที่เป็นสารระเหยได้อยู่น้อย จึงไม่เกิดการถ่ายเทความร้อนในรูปแบบการพาความร้อนมากนัก ดังนั้น จึงมีข้อเสนอแนะในการออกแบบเตาหุงต้ม 3 ข้อ ดังนี้

2.1.1.1 ภาชนะหุงต้มที่วางอยู่เหนือเชื้อเพลิงควรอยู่ใกล้กับเชื้อเพลิงให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ ซึ่งจะช่วยให้ได้รับความร้อนจากการแผ่รังสีความร้อนมากที่สุด และช่วยให้เกิดการสูญเสียความร้อนน้อยที่สุด

2.1.1.2 ต้องมีระยะห่างระหว่างเชื้อเพลิงกับภาชนะที่เหมาะสม เพื่อให้อากาศเสียที่เกิดจากการเผาไหม้ไหลออกได้ ทั้งนี้ ช่องว่างระหว่างปากเตาและก้นภาชนะควรมีระยะไม่เกิน 1 cm

2.1.1.3 ควรบุฉนวนให้กับเตา เพื่อลดการสูญเสียความร้อนเนื่องจากการนำความร้อนผ่านผนังเตา โดยฉนวนที่ใช้อาจทำจากวัสดุราคาถูก อาทิเช่น ขี้เถ้า หรือทราย เป็นต้น

2.1.2 การไหลของอากาศเข้าสู่ห้องเผาไหม้ของเตา

เพื่อให้อากาศไหลเข้าสู่ห้องเผาไหม้ได้อย่างสะดวก รังผึ้งหรือตะกรับควรมีช่องรูประมาณร้อยละ 25-45 ของพื้นที่ทั้งหมด และควรมีความหนาประมาณ 3.5-4.0 cm เพื่อไม่ให้เกิดการสะสมความร้อนในตัวรังผึ้งมากจนเกินไป ทั้งนี้

2.1.2.1 ขนาดของรูของรังผึ้งต้องเหมาะสมกับขนาดของเชื้อเพลิงที่ใช้ โดยต้องมีขนาดใหญ่พอที่จะให้อากาศผ่านขึ้นไปยังห้องเผาไหม้ได้อย่างสะดวก ขณะเดียวกันก็ต้องไม่เล็กจนเกินไป จนกระทั่งเชื้อเพลิงที่เผาไหม้แล้วไม่สามารถผ่านลงมายังห้องเถ้าได้ จนเกิดการสะสมอยู่ในห้องเผาไหม้

2.1.2.2 ต้องมีอุปกรณ์ควบคุมปริมาณอากาศที่ไหลเข้าสู่เตาให้อยู่ในปริมาณที่เหมาะสม เช่น มีบานปรับอากาศที่ด้านหน้าของเตา (ช่องลม) เพื่อทำหน้าที่ในการควบคุมปริมาณของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ อันจะมีผลในการควบคุมอัตราการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง

2.2 เชื้อเพลิงที่ใช้สำหรับการหุงต้มในครัวเรือน

ดังที่ได้กล่าวแล้วในบทที่ 1 เชื้อเพลิงหลักที่ใช้ในเตาหุงต้มในครัวเรือนกันอย่างแพร่หลายในประเทศไทย คือ ไม้ฟืนและถ่านไม้ ซึ่งมีรายละเอียดของเชื้อเพลิงทั้ง 2 ชนิดนี้ ดังนี้

2.2.1 ไม้ฟืน [9]

เป็นเชื้อเพลิงที่มนุษย์ใช้มาเป็นเวลายาวนานหลายศตวรรษ จัดเป็นพลังงานหมุนเวียน (renewable energy) เนื่องจากเป็นพลังงานที่ได้จากการสังเคราะห์แสงของพืช ซึ่งสามารถปลูกทดแทนและนำมาใช้เป็นพลังงานได้ในระยะเวลา 5-10 ปี (ขึ้นกับชนิดของพืช) แม้ว่าในปัจจุบันจะมีพลังงานและเชื้อเพลิงใหม่อื่นๆ ให้เลือกใช้ แต่ไม้ฟืนก็ยังคงเป็นเชื้อเพลิงที่สำคัญที่ใช้อยู่ในประเทศต่างๆ แม้แต่ในประเทศที่เจริญแล้ว เพราะมีคุณลักษณะเฉพาะตัวและความเหมาะสมกับงาน เช่น ใช้ในเตาผิงในบ้าน หรือใช้ในการประกอบอาหาร เป็นต้น ในบางประเทศในยุโรปมีการปลูกป่าเพื่อนำไม้มาใช้เป็นเชื้อเพลิง เช่น ใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงผลิตกระแสไฟฟ้า เป็นต้น ในประเทศไทยยังคงมีการใช้ไม้ฟืนอยู่มาก ทั้งในการหุงต้ม ในอุตสาหกรรมขนาดเล็กในครัวเรือน และในอุตสาหกรรมขนาดเล็กอื่นๆ บางประเภท ไม้ฟืนมีส่วนประกอบสำคัญคือ เซลลูโลสและลิกนิน ส่วนที่เหลือเป็นยางเหนียวสีน้ำตาลและเถ้า ไม้ที่เพิ่งตัดมีความชื้นสูงประมาณร้อยละ 30-50 แต่เมื่อผึ่งแดดไว้ระยะหนึ่งจะมีความชื้นลดลงเหลือประมาณร้อยละ 10-15 ข้อดีของไม้ฟืนคือมีปริมาณเถ้าต่ำ แต่มีข้อเสียคือมีปริมาณความชื้นและสารระเหยได้ในปริมาณที่สูง ทำให้เกิดกลิ่นและควันมากในช่วงแรกของการเผาไหม้

2.2.2 ถ่านไม้ [9]

เป็นเชื้อเพลิงเก่าแก่ที่รู้จักและใช้กันมานาน จากงานวิจัยเพื่อศึกษาสมบัติของถ่านไม้ในประเทศไทย พบว่า ถ่านไม้มีค่าความร้อนระหว่าง 25.1-33.5 MJ/kg มีความชื้นประมาณร้อยละ 3-15 เถ้าประมาณร้อยละ 2-9 สารระเหยได้ประมาณร้อยละ 9-38 และคาร์บอนคงตัวประมาณร้อยละ 40-86 โดยค่าความร้อนของถ่านไม้มีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณคาร์บอนคงตัว ถ่านไม้ที่มีคุณภาพดีหรือถ่านไม้ที่มีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงสามารถใช้แทนถ่านโค้กในการหลอมและขึ้นรูปโลหะได้ ตลอดจนสามารถใช้เป็นตัวกรองกลิ่นและสีจากน้ำและก๊าซได้ดี ถ่านไม้อัดก้อนหรืออัดแท่งเป็นการนำเอาผงถ่านหรือเศษถ่านไม้ขนาดเล็กๆ มาปั้นหรืออัดให้เป็นก้อน โดยผงถ่านเหล่านี้อาจได้มาจากเศษวัสดุต่างๆ เช่น หญ้า ขี้เลื่อย เปลือกถั่วลิสง เป็นต้น นอกจากนี้ของเหลือทิ้งจากการเกษตรก็อาจนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านไม้อัดก้อน/แท่งได้เช่นกัน

ในงานวิจัยนี้ ใช้ถ่านไม้โกงกางและถ่านกะลาอัดไร้ควันเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งคุณสมบัติและลักษณะทางกายภาพของถ่านไม้ทั้ง 2 ชนิด สามารถแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของถ่านไม้ที่ใช้ในงานวิจัย [10]

ชนิดของถ่านไม้	รูปของถ่านไม้	คุณสมบัติของถ่านไม้
ถ่านไม้โกงกาง		1) มีค่าความร้อนประมาณ 25-27 MJ/kg 2) มีสารระเหยได้ประมาณร้อยละ 33-36 3) มีความชื้นประมาณร้อยละ 7 4) มีขนาดเล็กกว่าถ่านกะลาอัดไร้ควัน (2 x 3 x 2 cm^3 ต่อก้อน) 5) เมื่อหักจะเห็นสีดำมันวาวตรงบริเวณรอยหัก และเมื่อใช้นิ้วถูตรงรอยหักของถ่านจะไม่ค่อยมีสีดำติดนิ้ว 6) เมื่อจุดติดไฟ ถ่านจะไม่แตกประทุ มีควันเล็กน้อย ติดไฟนานกว่าถ่านไม้เนื้ออ่อน 7) ระยะเวลาใช้งานทั้งหมดประมาณ 40 min
ถ่านกะลาอัดไร้ควัน		1) มีค่าความร้อนประมาณ 19-20 MJ/kg 2) มีสารระเหยได้ประมาณร้อยละ 29-31 3) มีความชื้นประมาณร้อยละ 5 4) มีขนาดใหญ่กว่าถ่านไม้โกงกาง (5 x 10 x 3 cm^3 ต่อก้อน) 5) ไม่แตกประทุ อย่างเช่นถ่านไม้ทั่วไป 6) ประหยัด เพราะใช้ได้นาน ดับยาก เมื่อจุดติดแล้วทำให้ไม่เกิดการสูญเปล่า เนื่องจากถ่านจะเผาไหม้จนกว่าจะกลายเป็นเถ้า 7) ระยะเวลาใช้งานทั้งหมดประมาณ 80 min

2.3 การเผาไหม้และการปล่อยก๊าซมลพิษ

การเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาเคมีประเภทหนึ่งระหว่างสารต่างๆ ที่เผาไหม้ได้ กับออกซิเจนในอากาศ [11] เกิดเป็นสารประกอบของออกซิเจน (ออกไซด์) ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาเคมีประเภทนี้จะให้ความร้อนออกมา โดยทั่วไปเชื้อเพลิงประกอบด้วยธาตุและองค์ประกอบต่างๆ อันได้แก่ คาร์บอน (C)

ไฮโดรเจน (H) ออกซิเจน (O) ไนโตรเจน (N) กำมะถัน (S) น้ำ (H_2O) และเถ้า (ash) เป็นหลัก เมื่อเกิดการเผาไหม้ ธาตุต่างๆ จะเกิดปฏิกิริยาดังต่อไปนี้

$$C + O_2 \rightarrow CO_2 \quad (2.1)$$

$$H + ¼\ O_2 \rightarrow ½\ H_2O \quad (2.2)$$

$$C + ½\ O_2 \rightarrow CO \quad (2.3)$$

$$N + xO_2 \rightarrow NO_x \quad (2.4)$$

$$S + O_2 \rightarrow SO_2 \quad (2.5)$$

โดยปกติแล้ว การเผาไหม้เชื้อเพลิงจะก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์หลักคือ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และน้ำ (H_2O) ตามสมการที่ (2.1) และ (2.2) ตามลำดับ ส่วนสาร 3 ชนิดหลัง อันได้แก่ คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ที่เกิดจากสมการที่ (2.3)-(2.5) จัดเป็นมลพิษที่ก่อให้เกิดผลเสียต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม โดยมีรายละเอียดของมลพิษในส่วนของคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) ซึ่งเป็นมลพิษที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ ดังนี้

2.3.1 คาร์บอนมอนนอกไซด์ (Carbon Monoxide: CO)

คาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) เป็นก๊าซที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น พบมากในบริเวณที่มีการจราจรหนาแน่น กระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรม และการใช้เตาหุงต้มในบ้านเรือน เป็นต้น โดยมีผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์และสิ่งแวดล้อม คือ ส่งผลต่อระบบหัวใจและหลอดเลือด ทำให้เกิดอาการปวดศีรษะ และอาจถึงเสียชีวิตได้ อีกทั้งยังมีส่วนทำให้เกิดหมอกควันพิษ (smog) อีกด้วย [12]

คาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) เป็นก๊าซมลพิษที่เกิดขึ้นในสภาพการเผาไหม้ที่มีออกซิเจนไม่เพียงพอที่จะเปลี่ยนคาร์บอนทั้งหมดให้กลายเป็น CO_2 ได้ โดยคาร์บอนในเชื้อเพลิงบางส่วนอาจถูกเปลี่ยนเป็นคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) ซึ่งเรียกกรณีนี้ว่า การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (incomplete combustion) ทั้งนี้ CO จะเกิดมากเมื่อเกิดการผสมกันระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศที่ไม่ดีพอ และเมื่อเกิดการเผาไหม้ขณะที่มีอุณหภูมิต่ำ (เช่น ช่วงเริ่มต้นการเผาไหม้) [13]

2.3.2 ออกไซด์ของไนโตรเจน (Oxides of Nitrogen: NO_x)

ออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) เป็นก๊าซมลพิษที่มีแหล่งกำเนิดส่วนใหญ่มาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงในรถยนต์ โรงไฟฟ้า หรือโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ รวมถึงการเผาไหม้เชื้อเพลิง

ในอาคารบ้านเรือน (ในครัวเรือน) ผลกระทบของ NO_x ที่มีต่อสุขภาพของมนุษย์และสิ่งแวดล้อม ได้แก่ ทำให้เกิด smog ในระดับพื้นดิน ทำให้ปอดถูกทำลายและส่งผลโดยตรงกับระบบทางเดินหายใจ อีกทั้งยังสามารถทำปฏิกิริยากับสารอื่น (เช่น ไอน้ำ เป็นต้น) ในอากาศ เกิดเป็นฝนกรด ซึ่งมีผลต่อผลิตผลทางการเกษตร ตลอดจนเป็นอันตรายต่อสัตว์ที่อาศัยอยู่ในบริเวณนั้น นอกจากนี้ยังเป็นสารที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก (greenhouse effect) ส่งผลให้อุณหภูมิของโลกสูงขึ้น [14]

ออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) เกิดขึ้นจากก๊าซไนโตรเจน (N_2) ที่มีอยู่ในอากาศเป็นหลัก โดยพบว่า เมื่ออุณหภูมิการเผาไหม้ยิ่งเพิ่มสูงขึ้น N_2 จะแตกตัวเป็น N มากขึ้น และทำปฏิกิริยากับก๊าซซิเจน (O_2) เกิดเป็น NO_x มากขึ้นตามไปด้วย ในทางกลับกัน เมื่ออุณหภูมิการเผาไหม้ลดต่ำลง NO_x ก็จะเกิดน้อยลงตามไปด้วย นอกจากนี้ ยังพบว่าเมื่อมีการป้อนอากาศเกินพอ (excess air) ในปริมาณมาก จะส่งผลให้เกิด NO_x มากขึ้น [13]

ในทางทฤษฎี ความเป็นอันตรายของมลพิษเหล่านี้จะมีไม่มากนัก หากมีการทำให้ก๊าซเหล่านี้เกิดการกระจายออกไปในบรรยากาศอย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติ มลพิษเหล่านี้มักเกิดขึ้นในบริเวณหนึ่งๆ ที่มีพื้นที่หรือปริมาตรที่จำกัด ทำให้มีความเข้มข้นสูงจนถึงระดับที่ก่อให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมได้ [15]

ผลของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) ที่มีต่อสุขภาพมนุษย์ เป็นไปดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ผลของปริมาณของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) ที่มีต่อสุขภาพมนุษย์ [15]

ชนิดของก๊าซมลพิษ	ความเข้มข้น (ppm)	ระยะเวลาที่ได้รับก๊าซ	ผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์
CO	50-200	ทันที	มีอาการปวดศีรษะเล็กน้อยและอ่อนเพลีย
	200-400	5-10 min	มีอาการคลื่นไส้ อาเจียน วิงเวียนศีรษะอย่างรุนแรง และอาจถึงขั้นเป็นลม
	400-500	30 min	มีอาการหัวใจเต้นเร็วขึ้นผิดปกติ และเริ่มเต้นผิดจังหวะ
	690 ขึ้นไป	3 h	หมดสติ และอาจถึงขั้นเสียชีวิต
NO_x	0.7-2.0	10 min	มีอาการแสบจมูกและระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจ
	200-500	1 h	มีอาการปอดบวม หายใจไม่ออก ระบบหายใจล้มเหลว และอาจถึงขั้นเสียชีวิต

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาค้นคว้างานวิจัยต่างๆ ที่ผ่านมา พบว่า มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในด้านการศึกษารูปแบบการใช้งานของเตาหุงต้ม ประสิทธิภาพการใช้งาน และการปล่อยก๊าซมลพิษจากการเผาไหม้ในเตาหุงต้มในครัวเรือน ดังนี้

Bailis และคณะ [16] ได้แสดงวิธีการทดสอบประสิทธิภาพของเตาหุงต้มด้วยวิธีการต้มน้ำ (water-boiling test: WBT) โดยวัดอุณหภูมิเริ่มต้นและสุดท้าย มวลของน้ำที่หายไป และมวลของเชื้อเพลิงเริ่มต้น ทั้งนี้ ทำการแบ่งการทดสอบเป็น 3 ช่วง ประกอบด้วย ช่วงที่ให้พลังงานมาก (hot power) 2 ช่วง และช่วงที่ให้พลังงานน้อย (cold power) 1 ช่วง โดยช่วง hot power ช่วงที่ 1 เริ่มจากจุดเริ่มต้นที่อุณหภูมิห้อง (cold start) ซึ่งมีการจุดติดเตาและนำน้ำมาเติมใส่ในหม้อที่ตั้งไว้จนกระทั่งน้ำเดือด ช่วงที่ 2 ของช่วง hot power หรือที่เรียกว่า hot start เป็นช่วงที่มีการเติมน้ำเข้าไปในหม้อ และรอให้เกิดการเดือดอีกครั้ง จากนั้นเป็นช่วง cold power ซึ่งเป็นช่วงหลังจากน้ำเดือด (ในรอบที่ 2) และอุณหภูมิของน้ำลดลงจนถึงประมาณ 40 °C โดยในแต่ละช่วงได้ทำการวัดประสิทธิภาพของเตาหุงต้ม อัตราการเผาไหม้ และการปล่อยก๊าซมลพิษ ผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพของเตาหุงต้มแปรผันตรงกับอัตราการเผาไหม้ แต่แปรผกผันกับการปล่อยก๊าซมลพิษ อย่างมีนัยสำคัญ

Jetter และ Kariher [17] ทำการศึกษาหาประสิทธิภาพและการปล่อยมลพิษจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งในเตาหุงต้มในครัวเรือน โดยได้ทำการทดลองกับเตาหุงต้ม 10 แบบ และเชื้อเพลิงแข็งจำนวน 4 ชนิด ผลจากการศึกษาที่ได้ พบว่า ประสิทธิภาพของเตาจะสูงกว่า และการปล่อยมลพิษจะต่ำกว่า เมื่อทำการเผาไหม้ในที่โล่งแจ้ง เทียบเทียบกับการเผาไหม้ในครัวเรือนหรือในที่แคบ และพบว่า เตาหุงต้มที่ใช้ปริมาณเชื้อเพลิงน้อยมีแนวโน้มในการใช้ความร้อนในการทำให้น้ำเดือดที่น้อย และให้ประสิทธิภาพที่สูงกว่า อีกทั้งยังปล่อยมลพิษที่น้อยกว่าด้วย ทั้งนี้ ข้อมูลจากงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้ในการพัฒนาและออกแบบเตาให้มีประสิทธิภาพ และมีความปลอดภัยต่อผู้ใช้

Bhattacharya และคณะ [18] ทำการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก (สัดส่วนระหว่างปริมาณก๊าซเรือนกระจกแต่ละชนิดที่ปล่อยออกมาต่อปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้) จากเตาหุงต้มแบบต่างๆ ที่ใช้ในทวีปเอเชีย โดยใช้เชื้อเพลิงแข็ง 2 ชนิด คือ ไม้ฟืนและถ่านไม้ โดยศึกษาการปล่อยของก๊าซ CO_2, CH_4 และส่วนที่เผาไหม้ได้ที่ไม่ใช่มีเทน (TNMOC) ผลการศึกษา พบว่า TNMOC ของ CO_2 และ CH_4 ของไม้ฟืนมีค่าต่ำกว่าของถ่านไม้ ในส่วนของสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก พบว่า ของไม้ฟืนและถ่านไม้มีค่าใกล้เคียงกัน

Bhattacharya และคณะ [19] ทำการศึกษาผลของตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพและการปล่อยมลพิษในเตาหุงต้ม 3 แบบ จาก 3 ประเทศ (คือ เตาหุงต้มของประเทศไทย อินเดีย และเวียดนาม) โดยมีตัวแปรที่สนใจศึกษา คือ ปริมาณความชื้นของเชื้อเพลิง ขนาดของเชื้อเพลิง ขนาดของภาชนะที่ใช้ในการหุงต้ม และวิธีการจุดเตาหุงต้ม ผลการศึกษา พบว่า การเพิ่มขึ้นของปริมาณความชื้นของเชื้อเพลิงทำให้ประสิทธิภาพของเตาหุงต้มลดลง อีกทั้งยังทำให้การปล่อย CO เพิ่มขึ้น แต่ส่งผลให้การปล่อย NO_x ลดลง ร่วมการปล่อยก๊าซ CO_2 ที่ลดลงเล็กน้อย ขณะที่การปล่อย CH_4 ไม่ได้รับผลกระทบจากปริมาณความชื้นของเชื้อเพลิงอย่างมีนัยสำคัญ ขนาดเชื้อเพลิงไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเตาหุงต้ม แต่ส่งผลอย่างมากต่อการปล่อย CO โดยการปล่อย CO มีค่าสูงขึ้น เมื่อขนาดของเชื้อเพลิงใหญ่ขึ้น และขนาดของภาชนะที่ใช้ในการหุงต้มไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของเตาหุงต้มมากนัก นอกจากนี้ ยังพบว่า วิธีการจุดเตาหุงต้ม ซึ่งมีสองวิธีที่ทำการศึกษา คือ จุดที่ด้านบน (ห้องเผาไหม้ของเตาหุงต้มอยู่ด้านบน) และจุดที่ด้านล่าง (ห้องเผาไหม้ของเตาหุงต้มอยู่ด้านล่างหรืออยู่ติดพื้น) ของเตาหุงต้ม ให้ผลที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญต่อการปล่อย CO และ NO_x

Zhang และคณะ [20] ทำการศึกษาการหาค่าการปล่อยคาร์บอนมอนนอกไซด์ (emission factor of CO) ที่เกิดจากการใช้เตาหุงต้ม (4 ขนาด) สำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงชนิดต่างๆ จำนวน 56 ชนิด ในประเทศจีนและประเทศอินเดีย และพบว่า การปล่อย CO จากการเผาไหม้ถ่านหินมีค่าอยู่ในช่วง 3.0×10^{-2} g/kg ของเชื้อเพลิง และการปล่อย CO จากการเผาไหม้ถ่านไม้มีค่าอยู่ในช่วง 2.8×10^{-2} g/kg ทั้งนี้ ค่าการปล่อย CO จากเตาหุงต้มทั้ง 4 ขนาด มีค่าใกล้เคียงกัน

Gupta และคณะ [21] ทำการศึกษาการเปรียบเทียบผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมและประสิทธิภาพทางความร้อนของการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวภาพ (biofuels) ในการประกอบอาหารในประเทศที่กำลังพัฒนา 5 ประเทศ โดยใช้วิธี WBT (water-boiling test) เพื่อทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อน ส่วนการศึกษาผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม ทำการศึกษาโดยมีหลักการคือเชื้อเพลิงจะถูกเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ภายในเตาหุงต้ม และอากาศหรือก๊าซที่ไหลเวียนภายในเตาหุงต้มจะถูกนำมาตรวจวัดอนุภาคโดยใช้วิธี RSP (respirable suspended particulates: RSP) ผลการทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวภาพ พบว่า มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนอยู่ในช่วงร้อยละ 10-15 และมีระดับของอนุภาคจากการทดสอบด้วยวิธี RSP อยู่ในช่วง 0.27-0.77 g

อนึ่ง ในงานวิจัยที่กล่าวถึงข้างต้น เป็นการศึกษาการเผาไหม้ในเตาหุงต้มมีลักษณะที่แตกต่างไปจากรูปแบบการใช้เตาหุงต้มในประเทศไทย โดยเฉพาะในประเด็นที่การใช้เตาหุงต้มในประเทศไทยมักเป็นการใช้เตาโดยไม่มีระบบดูดควันหรือระบบป้องกันก๊าซมลพิษที่มาจากการเผาไหม้ ดังนั้น งานวิจัยนี้ จึงมุ่งเน้นทำการทดลองในสภาวะที่ใกล้เคียงกับการใช้งานเตาหุงต้มของประเทศไทยให้มากที่สุด เพื่อใช้เป็นแนวทางในการเลือกใช้แบบของเตาหุงต้ม ตลอดจนชนิดและปริมาณของ

เชื้อเพลิงให้ตรงกับวัตถุประสงค์ที่ต้องการและมีความปลอดภัยต่อผู้ใช้งาน โดยในงานวิจัยนี้ จะเน้นศึกษาถึงอุณหภูมิการเผาไหม้ รูปแบบการใช้งานของการหุงต้มในเตาหุงต้มแบบต่างๆ (อันได้แก่ เวลาที่ใช้ในการจุดติดไฟของถ่านไม้ เวลาที่ใช้ในการทำให้น้ำเดือด และเวลารวมของการใช้งานทั้งหมด) ร้อยละการเผาไหม้สมบูรณ์ (% complete combustion) ประสิทธิภาพการใช้งาน (% usage efficiency) ของเตาหุงต้ม ลักษณะการปล่อยและปริมาณ (ความเข้มข้น) ของการปล่อยก๊าซมลพิษ (CO และ NO_x) ในระหว่างการใช้งานเตาหุงต้ม

บทที่ 3
วิธีการดำเนินการวิจัย

ในบทนี้ได้นำเสนอวิธีการดำเนินงานวิจัย เพื่อศึกษาผลของแบบของเตาหุงต้ม (เตาทรงกระบอก เตาทรงกรวย และเตาประสิทธิภาพสูง) ชนิดของถ่านไม้ (ถ่านไม้โกงกางและถ่านกะลาอัดไร้ควัน) และปริมาณของถ่านไม้ (600, 800, และ 1,000 g) ที่มีต่ออุณหภูมิการเผาไหม้ รูปแบบการเผาไหม้ (ซึ่งประกอบด้วย เวลาของการจุดติดไฟ เวลาที่ทำให้น้ำเดือด และเวลาการใช้งานทั้งหมด) ร้อยละของการเผาไหม้สมบูรณ์ (% complete combustion) ประสิทธิภาพการใช้งาน (% usage efficiency) และการปล่อยก๊าซมลพิษ (CO และ NO_x) ซึ่งมีรายละเอียดของวิธีการดำเนินงานวิจัย ดังนี้

3.1 วิธีการและขั้นตอนการศึกษา

3.1.1 ศึกษาทฤษฎี งานวิจัย และข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

3.1.2 กำหนดประเด็นที่ต้องการศึกษา ซึ่งประกอบด้วย

3.1.2.1 การศึกษาผลของแบบของเตาหุงต้ม (หรือเตาอั้งโล่) และชนิดและปริมาณของถ่านไม้ ที่มีต่ออุณหภูมิการเผาไหม้

3.1.2.2 การศึกษาผลของแบบของเตาหุงต้ม (หรือเตาอั้งโล่) และชนิดและปริมาณของถ่านไม้ ที่มีต่อรูปแบบการใช้งานสำหรับการหุงต้มของเตาหุงต้มแบบต่างๆ อันได้แก่ เวลาที่ใช้ในการจุดติดไฟของถ่านไม้ เวลาที่ใช้ในการทำให้น้ำเดือด และเวลารวมของการใช้งานทั้งหมด (นับตั้งแต่ถ่านไม้เริ่มติดไฟจนกระทั่งราไฟ)

3.1.2.3 การศึกษาผลของแบบของเตาหุงต้ม และชนิดและปริมาณของถ่านไม้ ที่มีต่อร้อยละการเผาไหม้สมบูรณ์ (% complete combustion)

3.1.2.4 การศึกษาผลของแบบของเตาหุงต้ม และชนิดและปริมาณของถ่านไม้ ที่มีต่อประสิทธิภาพการใช้งาน (% usage efficiency) ของเตาหุงต้มแบบต่างๆ

3.1.2.5 การศึกษาผลของแบบของเตาหุงต้ม และชนิดและปริมาณของถ่านไม้ ที่มีต่อลักษณะการปล่อยและปริมาณ (หรือความเข้มข้น) ของก๊าซมลพิษ (CO และ NO_x)

3.1.2.6 การศึกษาผลของปริมาณการปล่อยก๊าซมลพิษจากการใช้งานเตาหุงต้มที่มีต่อสุขภาพของมนุษย์

3.1.3 กำหนดขอบเขตของตัวแปรที่เกี่ยวข้องในงานวิจัย ซึ่งประกอบด้วย

3.1.3.1 แบบของเตาหุงต้มที่มีต่ออุณหภูมิการเผาไหม้ รูปแบบการใช้งาน ร้อยละของการเผาไหม้สมบูรณ์ ประสิทธิภาพการใช้งาน และการปล่อยก๊าซมลพิษ (เตาทรงกระบอก เตาทรงกรวย และเตาประสิทธิภาพสูง)

3.1.3.2 ชนิดของถ่านไม้ที่มีต่ออุณหภูมิการเผาไหม้ รูปแบบการใช้งาน ร้อยละของการเผาไหม้สมบูรณ์ ประสิทธิภาพการใช้งาน และการปล่อยก๊าซมลพิษ (ถ่านไม้โกงกางและถ่านกะลาอัดไร้ควันแท่งไร้ควัน)

3.1.3.3 ปริมาณของถ่านไม้ที่มีต่ออุณหภูมิการเผาไหม้ รูปแบบการใช้งาน ร้อยละของการเผาไหม้สมบูรณ์ ประสิทธิภาพการใช้งาน และการปล่อยก๊าซมลพิษ (600, 800, และ 1,000 g โดยที่ปริมาณดังกล่าวได้มาจากค่าเฉลี่ยของปริมาณถ่านไม้ที่ปริมาตร 1/2, 3/4, และ 5/6 ของห้องเผาไหม้ ตามลำดับ)

3.1.3.4 ชนิดของมลพิษที่ศึกษา (CO และ NO_x)

3.1.4 จัดหาวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งประกอบด้วย

3.1.4.1 เตาอั้งโล่ 3 ชนิด (ซื้อจากตลาดไท จังหวัดปทุมธานี) อันได้แก่

(1) เตาอั้งโล่ธรรมดา แบบที่ 1 ซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกระบอก

(2) เตาอั้งโล่ธรรมดา แบบที่ 2 ซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกรวย

(3) เตาอั้งโล่ประสิทธิภาพสูง (ทรงกรวย)

ดังแสดงในภาพที่ 3.1



ก) เตาทรงกระบอก



ข) เตาทรงกรวย



ค) เตาประสิทธิภาพสูง

ภาพที่ 3.1 เตาอั้งโล่ 3 ชนิด ที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.4.2 ถ่านไม้โกงกางและถ่านกะลาอัดไร้ควันแท่งไร้ควัน (ซื้อจากโรงเผาถ่านเทพธาดา จังหวัดปทุมธานี) ดังแสดงในภาพที่ 3.2



ก. ถ่านไม้โกงกาง ข. ถ่านกะลาอัดไร้ควัน

ภาพที่ 3.2 ชนิดของถ่านไม้ที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.4.3 ขี้ไต้จุดไฟ ใช้สำหรับจุดถ่านไม้ให้ติดไฟ (ซื้อจากตลาดไท จังหวัดปทุมธานี) ดังแสดงในภาพที่ 3.3



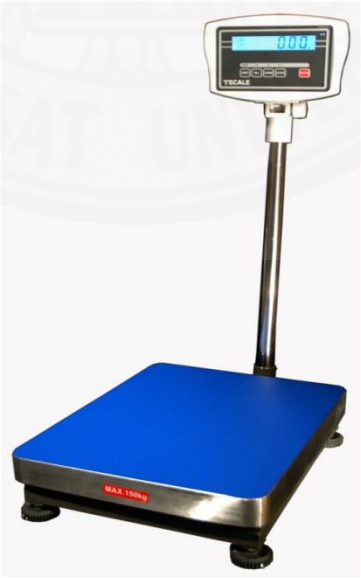
ภาพที่ 3.3 ขี้ไต้จุดไฟ

3.1.4.4 หม้ออลูมิเนียม ตราจระเข้ ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ปากหม้อเท่ากับ 30 cm ใช้สำหรับใส่น้ำเพื่อเอาไว้ใช้หาประสิทธิภาพการใช้งานด้วยวิธีการต้มน้ำ (water-boiling test: WBT) ดังแสดงในภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4 หม้ออลูมิเนียมสำหรับใช้ทดสอบประสิทธิภาพการใช้งานด้วยการต้มน้ำ

3.1.4.5 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบ digital ยี่ห้อ AFW รุ่น B30 รับน้ำหนักได้สูงสุด 30 kg และมีความละเอียดถึงทศนิยมตำแน่งที่สาม ใช้สำหรับชั่งน้ำหนักถ่านไม้ในระหว่างการเผาไหม้ ดังแสดงในภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบ digital ยี่ห้อ AFW รุ่น B30

3.1.4.6 เทอร์โมคัปเปิล ยี่ห้อ LEGA รุ่น LK-02L ดังแสดงในภาพที่ 3.6 ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิของก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้ ที่บริเวณปากเตา



ภาพที่ 3.6 เทอร์โมคัปเปิล

3.1.4.7 เครื่องวิเคราะห์ก๊าซมลพิษ ยี่ห้อ Madur รุ่น GA-40T PLUS ดังแสดงในภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3.7 เครื่องวิเคราะห์ก๊าซมลพิษ

3.1.4.8 อุปกรณ์อื่นๆ ที่จำเป็นในการทดลอง เช่น stand และ clamp (สำหรับยึดที่วัดก๊าซและเทอร์โมคัปเปิล) กระบอกตวงน้ำ (สำหรับวัดปริมาตรน้ำ) พัดลมขนาดเล็ก (สำหรับพัดอากาศให้เข้าสู่ห้องเผาไหม้) เป็นต้น

3.1.5 ทำการทดลองเพื่อหาอุณหภูมิการเผาไหม้ รูปแบบการใช้งานของเตาหุงต้ม ร้อยละการเผาไหม้สมบูรณ์ ประสิทธิภาพการใช้งาน และลักษณะการปล่อยและปริมาณของก๊าซมลพิษ โดยมีวิธีการและขั้นตอน ดังนี้

เพื่อศึกษารูปแบบการใช้งานของการหุงต้มในเตาหุงต้มแบบต่างๆ และชนิดและปริมาณของถ่านไม้ ที่มีต่ออุณหภูมิการเผาไหม้ รูปแบบการใช้งาน (อันได้แก่ การจุดติดไฟของถ่านไม้ เวลาที่ใช้ในการทำให้น้ำเดือด และเวลารวมของการใช้งานทั้งหมด) ร้อยละการเผาไหม้สมบูรณ์ (% complete combustion) ประสิทธิภาพการใช้งาน (% usage efficiency) และลักษณะการปล่อยและปริมาณของก๊าซมลพิษ (CO และ NO_x) ในระหว่างการใช้งาน ในสภาวะการใช้งานจริง ได้ทำการจัดวางอุปกรณ์การทดลองต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 3.8 และมีขั้นตอนและวิธีการทดลอง ดังนี้



ภาพที่ 3.8 การจัดวางอุปกรณ์การทดลองสำหรับการทดสอบการเผาไหม้

(1) ติดตั้งเครื่องวัดก๊าซมลพิษในระยะที่คนปกติใช้เตา (ประมาณ 40 cm ห่างจากตัวเตา ที่บริเวณเหนือลม)

(2) ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลที่ระยะความสูง 1 cm จากปากเตา เพื่อวัดอุณหภูมิของเตาและน้ำในหม้อ

(3) จุดติดไฟโดยใช้ขี้ไต้ประมาณ 4 g เท่าๆ กันในทุกการทดลอง โดยวางขี้ไต้ไว้ใต้ถ่านไม้ ซึ่งขี้ไต้จะเป็นเชื้อไฟในการจุดติดไฟ

(4) ใส่ถ่านไม้ ซึ่งได้ชั่งน้ำหนักไว้ก่อนแล้วลงไปในเตา เริ่มจับเวลาเพื่อหาเวลาจุดติดไฟ (เริ่มจากเมื่อเริ่มใส่ถ่านไม้จนกระทั่งถ่านไม้ลุกติดไฟทั่วทั้งเตา)

(5) เมื่อถ่านไม้จุดติดไฟแล้ว ให้วางหม้อที่ได้ใส่น้ำมวล 3,000 g ซึ่งได้วัดอุณหภูมิของน้ำเตรียมไว้แล้ว บนปากเตา

(6) เมื่อน้ำในหม้อเดือด ให้เปิดฝาหม้อออก

(7) เมื่อเปิดฝาออกแล้ว ทำการต้มน้ำต่อไป จนกว่าอุณหภูมิของถ่านไม้ถึงจุดที่ถ่านไม้ราไฟ (อุณหภูมิ ณ บริเวณปากเตาลดลงเหลือประมาณ 90 °C) จึงหยุดทำการทดลอง ทั้งนี้บันทึกระยะเวลาที่ใช้ในการทำให้น้ำเดือด อุณหภูมิของน้ำเดือด และระยะเวลาทั้งหมดของการใช้เตาไว้ด้วย (ตั้งแต่วางหม้อจนถึงสิ้นสุดการทดลอง)

(8) ยกหม้อออกจากเตา ตั้งทิ้งไว้จนน้ำในหม้อเย็นลง (ปิดฝาระหว่างรอให้เย็น) วัดปริมาตรน้ำในหม้อหลังการทดลองด้วยกระบอกตวงขนาด 1,000 mm เพื่อนำไปคำนวณหาค่าประสิทธิภาพการใช้งานของเตา พร้อมทั้งชั่งน้ำหนักของถ่านไม้ที่เหลือจากการเผาไหม้หลังการทดลอง เพื่อนำไปคำนวณหาร้อยละการเผาไหม้สมบูรณ์ (% complete combustion)

(9) ทำการทดลองซ้ำตามข้อ (1)-(8) แต่เปลี่ยนชนิดของเตาหุงต้มชนิดของถ่านไม้ และปริมาณของถ่านไม้

ทั้งนี้ ในระหว่างการเผาไหม้ นับตั้งแต่เมื่อถ่านไม้จุดติดไฟจนถ่านไม้ราไฟ ทำการวัดความเข้มข้นของ CO และ NO_x ทุกๆ 1 min

3.2 การวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

3.2.1 การพิจารณาผลของแบบของเตาหุงต้ม และชนิดและปริมาณของถ่านไม้ ที่มีต่ออุณหภูมิการเผาไหม้ รูปแบบการใช้งานสำหรับการหุงต้มของเตาหุงต้มแบบต่างๆ (อันได้แก่ เวลาที่ใช้ในการจุดติดไฟของถ่านไม้ เวลาที่ใช้ในการทำให้น้ำเดือด และเวลารวมของการใช้งานทั้งหมด) ร้อยละการเผาไหม้สมบูรณ์ (% complete combustion) และประสิทธิภาพการใช้งาน (% usage efficiency) ทำได้โดยทำการเปรียบเทียบผลที่ได้ในแต่ละการทดลองที่มีการใช้ถ่านไม้ชนิดและ

ปริมาณต่างๆ และเตาหุงต้มแบบต่างๆ จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้มาคำนวณผลความคลาดเคลื่อน (error) ด้วยวิธีทางสถิติแบบ t-test ด้วยความเชื่อมั่นร้อยละ 95

3.2.2 การคำนวณค่าร้อยละการเผาไหม้สมบูรณ์ (% complete combustion) ซึ่งคำนวณโดยเปรียบเทียบปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ไปจริงในระหว่างการเผาไหม้ [$m_{initial} - m_{actual}$] กับปริมาณเชื้อเพลิงที่เผาไหม้จนเหลือแต่เถ้า (ash) [$m_{initial} - m_{ash}$] ที่ได้จากการวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) ตามสมการที่ (3.1) ทั้งนี้ $m_{initial}$ คือ มวลเริ่มต้นของตัวอย่างถ่านไม้

$$\%\ \text{complete combustion} = \frac{(m_{\text{initial}} - m_{\text{actual}})}{(m_{\text{initial}} - m_{\text{ash}})} \times 100 \tag{3.1}$$

3.2.3 การคำนวณประสิทธิภาพการใช้งานของเตาหุงต้ม (% usage efficiency) [ด้วยวิธีการต้มน้ำ water-boiling test: WBT] [9] เป็นไปตามสมการที่ (3.2) [22]

$$\eta = \frac{m_{w_i} c_{p_w} (T_b - T_i) + m_{\text{evap}} h_{fg}}{m_f \times HV_f} \tag{3.2}$$

โดยที่

m_{w_i} = มวลของน้ำเริ่มต้น (kg)

c_{p_w} = ความร้อนจำเพาะของน้ำ (kJ/kg-K)

T_b = อุณหภูมิของน้ำเดือด (K)

T_i = อุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำ (K)

m_{evap} = มวลของน้ำที่ระเหยกลายเป็นไอ (kg)

h_{fg} = ค่าความร้อนของการเปลี่ยนสถานะ (กลายเป็นไอ) ของน้ำ (kJ/kg)

m_f = มวลของเชื้อเพลิงที่ใช้ (kg)

HV_f = ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่ใช้ (kJ/kg)

3.2.4 การพิจารณาผลของแบบของเตาหุงต้ม และชนิดและปริมาณของถ่านไม้ ที่มีต่อลักษณะการปล่อยและปริมาณ (หรือความเข้มข้น) ของก๊าซมลพิษชนิดต่างๆ ทำได้โดยการนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาเขียนเป็นกราฟหรือตาราง และทำการเปรียบเทียบผลที่ได้ในแต่ละการทดลองที่มีการใช้ถ่านไม้ชนิดต่างๆ และเตาหุงต้มแบบต่างๆ นอกจากนี้ ยังได้ศึกษาผลหรืออันตรายของปริมาณการปล่อยก๊าซมลพิษ (CO และ NO_X) ที่มีต่อสุขภาพของมนุษย์ (ผู้ใช้งาน) ด้วย

บทที่ 4
ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลของแบบของเตาหุงต้ม (เตาทรงกระบอก เตาทรงกรวย และเตาประสิทธิภาพสูง) ชนิดของถ่านไม้ (ถ่านไม้โกงกางและถ่านกะลาอัดไร้ควัน) และปริมาณของถ่านไม้ (600, 800, และ 1,000 g) ที่มีต่ออุณหภูมิการเผาไหม้ ระยะเวลาที่ใช้ในการจุดติดไฟของถ่านไม้ เวลาที่ใช้ในการทำให้น้ำเดือด และเวลารวมของการใช้งานทั้งหมด ต่อร้อยละการเผาไหม้สมบูรณ์ (% complete combustion) ต่อประสิทธิภาพการใช้งาน (% usage efficiency) และต่อลักษณะของการปล่อยและปริมาณ (หรือความเข้มข้น) ของก๊าซมลพิษ (CO และ NO_x) จากเตาหุงต้ม ซึ่งมีผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล ดังนี้

4.1 ผลการวิเคราะห์ถ่านไม้ที่ใช้ในงานวิจัย

ผลการวิเคราะห์ถ่านไม้ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นผลการวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) และผลการวิเคราะห์ค่าความร้อน (heating value) ซึ่งได้ส่งไปทำการวิเคราะห์ที่สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย โดยมีผลการวิเคราะห์เป็นไปดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) และค่าความร้อน (heating value) ของถ่านไม้โกงกางและถ่านกะลาอัดไร้ควัน

คุณสมบัติ	ถ่านไม้โกงกาง		ถ่านกะลาอัดไร้ควัน	
	As-received basis	Dry basis	As-received basis	Dry basis
● ความชื้น (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	6.4	-	4.8	-
● เถ้า (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	2.5	2.6	27.3	28.7
● สารระเหยได้ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	33.5	35.8	29.7	31.2
● คาร์บอนคงตัว (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	57.6	61.6	38.2	40.1
● Net heating value (MJ/kg)	24.7	26.4	18.4	19.3
● Gross heating value (MJ/kg)	25.6	27.4	19.0	20.0

เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์แบบประมาณระหว่างถ่านไม้โกงกางและถ่านกะลาอัดไร้ควัน ดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่า ถ่านไม้โกงกางมีค่าความร้อนสูงกว่าของถ่านกะลาอัดไร้ควัน ทั้งนี้ สามารถอธิบายได้จากร้อยละของส่วนที่เผาไหม้ได้ ซึ่งประกอบด้วยสารระเหยได้และคาร์บอนคงตัว โดยถ่านไม้โกงกางมีร้อยละของส่วนที่เผาไหม้ได้ร้อยละ 91.1 (33.5 + 57.6) ซึ่งสูงกว่าของถ่านกะลาอัดไร้ควัน ซึ่งมีส่วนที่เผาไหม้ได้ร้อยละ 67.9 (29.7 + 38.2)

นอกจากนี้ จากการสังเกตอุณหภูมิในระหว่างการเผาไหม้ ดังแสดงในภาพที่ 4.1-4.9 พบว่า ถ่านไม้โกงกางมีอุณหภูมิของการเผาไหม้สูงกว่าของถ่านกะลาอัดไร้ควัน อันน่าจะเป็นผลโดยตรงมาจากค่าความร้อน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 25.6 และ 19.0 MJ/kg ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับตารางที่ 2.1 คือ ค่าความร้อนของถ่านไม้โกงกางและถ่านกะลาอัดไร้ควันจะอยู่ในช่วง 25-27 และ 19-20 MJ/kg ตามลำดับ ประกอบกับถ่านไม้โกงกางมีปริมาณของส่วนที่เผาไหม้ได้ที่สูงกว่าดังที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณของกลิ่นและควันในช่วงแรกของการเผาไหม้ พบว่า ถ่านไม้โกงกางมีปริมาณของกลิ่นและควันสูงกว่าของถ่านกะลาอัดไร้ควัน ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณสารระเหยได้และความชื้นในถ่านไม้ทั้งสอง โดยที่ถ่านไม้โกงกางมีปริมาณสารระเหยได้และความชื้นสูงกว่าของถ่านกะลาอัดไร้ควัน คือ มีปริมาณสารระเหยได้ ร้อยละ 33.5 และ 29.7 ตามลำดับ และความชื้นร้อยละ 6.4 และ 4.8 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับตารางที่ 2.1 คือ ปริมาณสารระเหยได้ของถ่านไม้โกงกางและถ่านกะลาอัดไร้ควันอยู่ในช่วงร้อยละ 33-36 และ 29-31 ตามลำดับ ในส่วนของปริมาณความชื้นของถ่านไม้โกงกางและถ่านกะลาอัดไร้ควันมีค่าประมาณร้อยละ 7 และ 5 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาปริมาณเถ้าหลังการเผาไหม้สิ้นสุดลง พบว่า เถ้าของถ่านไม้โกงกางมีปริมาณน้อยและขนาดที่เล็กกว่าเถ้าของถ่านกะลาอัดไร้ควัน ซึ่งเป็นผลโดยตรงจากขนาดของถ่านไม้โกงกางที่มีขนาดเล็ก โดยผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับตารางที่ 2.1 คือ ขนาดของถ่านไม้โกงกางเล็กกว่าขนาดของถ่านกะลาอัดไร้ควัน (ขนาด 2 x 3 x 2 cm^3 และขนาด 5 x 10 x 3 cm^3 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 2.1) ประกอบกับถ่านกะลาอัดไร้ควันมีการใช้ตัวประสาน (binder) ซึ่งเป็นสารอนินทรีย์ เพื่อทำให้เศษถ่านที่นำมาอัดก้อนหรือแท่งยึดติดกันเป็นก้อนหรือแท่ง ดังนั้นหลังสิ้นสุดการเผาไหม้จึงพบเถ้าในปริมาณที่มากกว่าของถ่านไม้โกงกาง

นอกจากนี้ ในส่วนระยะเวลาของการใช้งานทั้งหมด พบว่า เตาหุงต้มที่ใช้ถ่านไม้โกงกางมีระยะเวลาของการใช้งานทั้งหมดที่สั้นกว่าเตาหุงต้มที่ใช้ถ่านกะลาอัดไร้ควัน คือ มีระยะเวลารวมของการใช้งานทั้งหมดเฉลี่ยประมาณ 64 x 10^{-3} และ 86 x 10^{-3} min/g ตามลำดับ (จะได้อธิบายรายละเอียดของการคำนวณระยะเวลาของการใช้งานทั้งหมดในภายหลัง) ซึ่งสามารถอธิบายได้จากการสะสมความร้อนที่มีอยู่ในก้อนเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ไม่หมด (หรือเถ้า) ของถ่านกะลาอัดไร้ควันภายในเตาหุงต้มที่ยังคงร้อนอยู่ ขณะที่ถ่านไม้โกงกางไม่มีการสะสมของเถ้า จึงทำให้ถ่านกะลาอัด

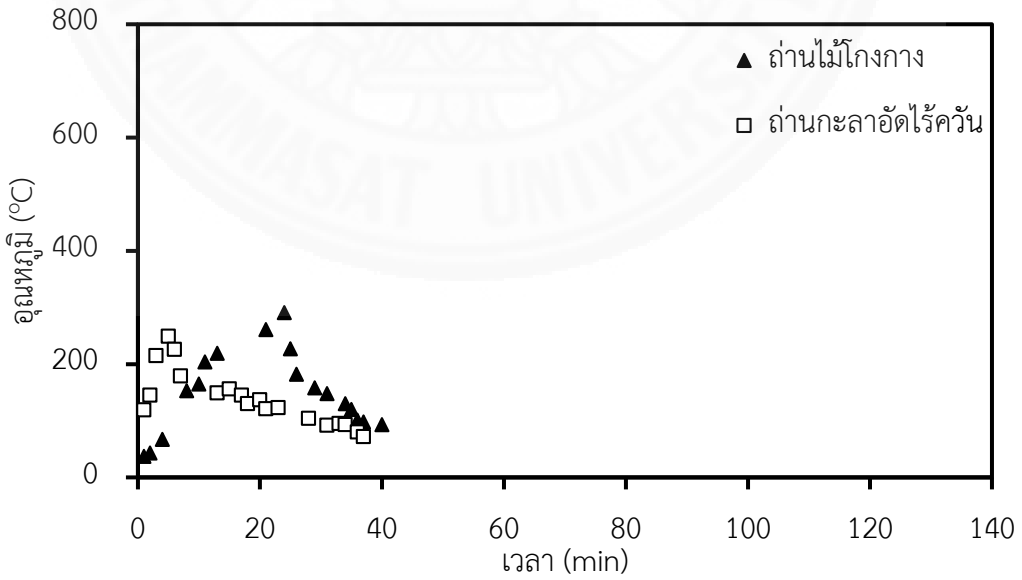
ไร้ควันมีระยะเวลาใช้งานทั้งหมดที่ยาวนานกว่าของถ่านไม้โกงกาง ซึ่งสอดคล้องกับตารางที่ 2.1 คือ ระยะเวลารวมของการใช้งานทั้งหมดของถ่านกะลาอัดไร้ควันนานกว่าถ่านไม้โกงกาง

4.2 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ศึกษาในงานวิจัย

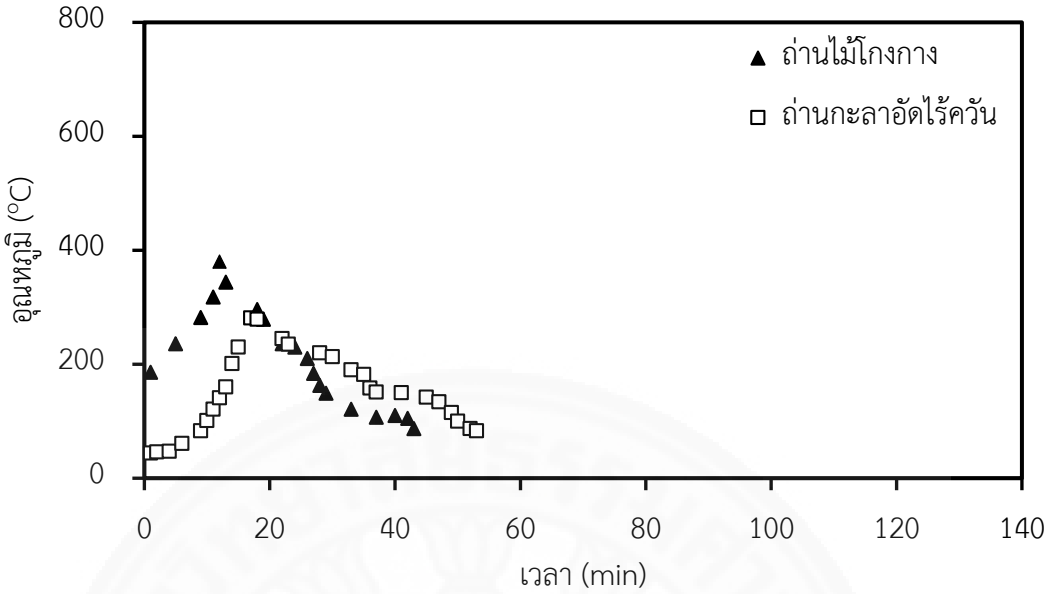
ในการศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ อันได้แก่ แบบของเตาหุงต้ม ปริมาณของถ่านไม้ และชนิดของถ่านไม้ ที่มีต่ออุณหภูมิการเผาไหม้ ระยะเวลาของการจุดติดไฟ เวลาที่ทำให้น้ำเดือด และเวลาการใช้งานทั้งหมด ต่อร้อยละการเผาไหม้สมบูรณ์ (% complete combustion) ต่อประสิทธิภาพการใช้งาน (% usage efficiency) และต่อการปล่อยก๊าซมลพิษ (CO และ NO_x) พบว่า ได้ผลการศึกษา ดังนี้

4.2.1 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของการเผาไหม้กับเวลา

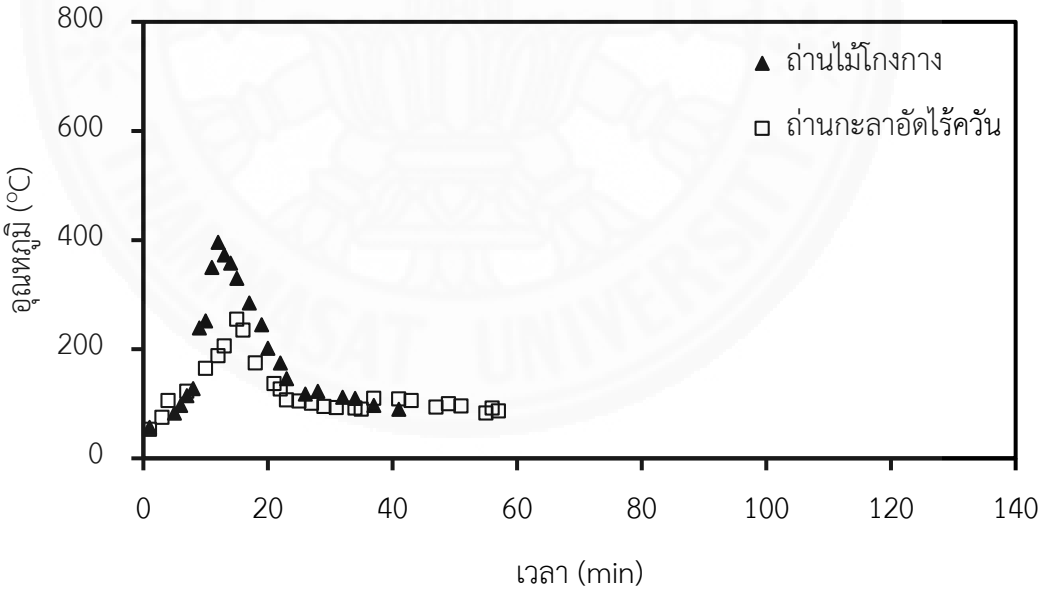
ในการศึกษาถึงผลของแบบของเตาหุงต้ม และชนิดและปริมาณของถ่านไม้ ที่มีต่ออุณหภูมิการเผาไหม้ที่เวลาต่างๆ ในเตาหุงต้มทั้ง 3 แบบ คือ เตาทรงกระบอก เตาทรงกรวย และเตาประสิทธิภาพสูง และที่ปริมาณของถ่านไม้ต่างๆ (600, 800, และ 1,000 g) พบว่า เป็นไปดังแสดงในภาพที่ 4.1-4.9



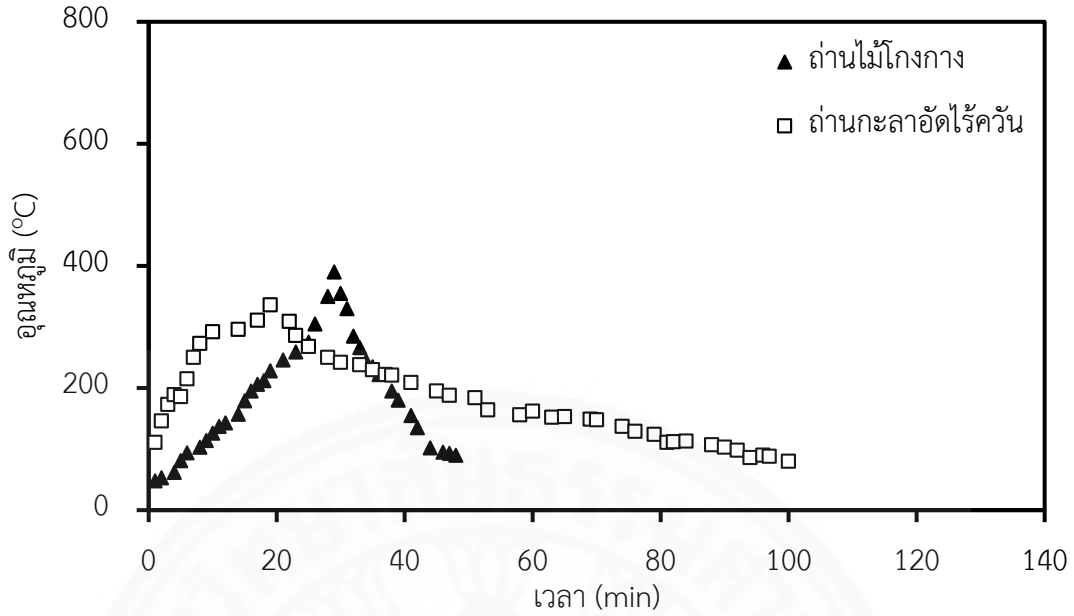
ภาพที่ 4.1 อุณหภูมิการเผาไหม้ที่เวลาต่างๆ ของถ่านไม้ที่ปริมาณ 600 g ในเตาทรงกระบอก



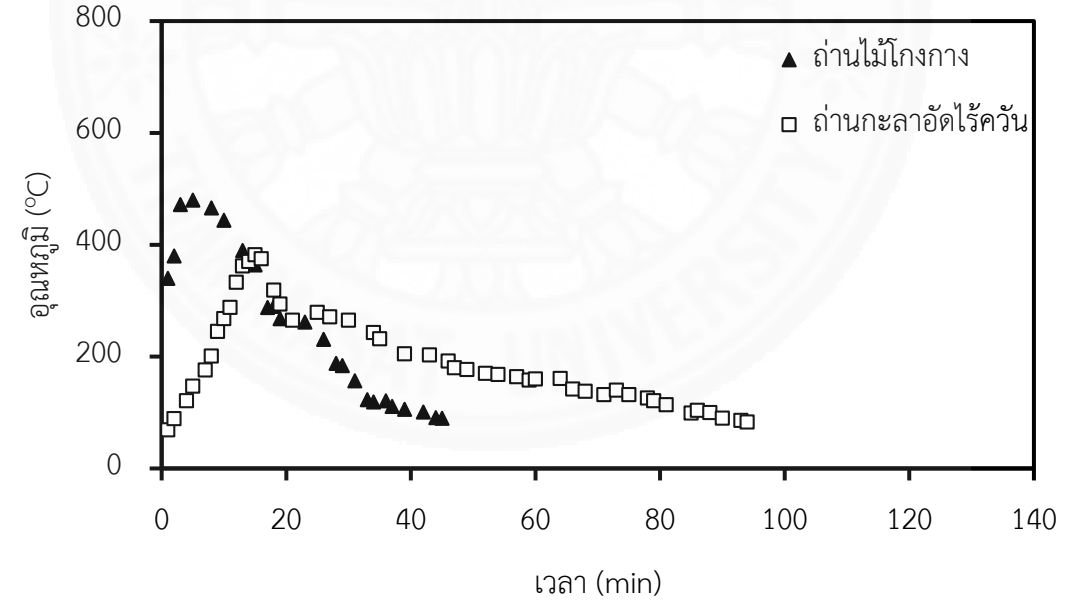
ภาพที่ 4.2 อุณหภูมิการเผาไหม้ที่เวลาต่างๆ ของถ่านไม้ที่ปริมาณ 600 g ในเตาทรงกรวย



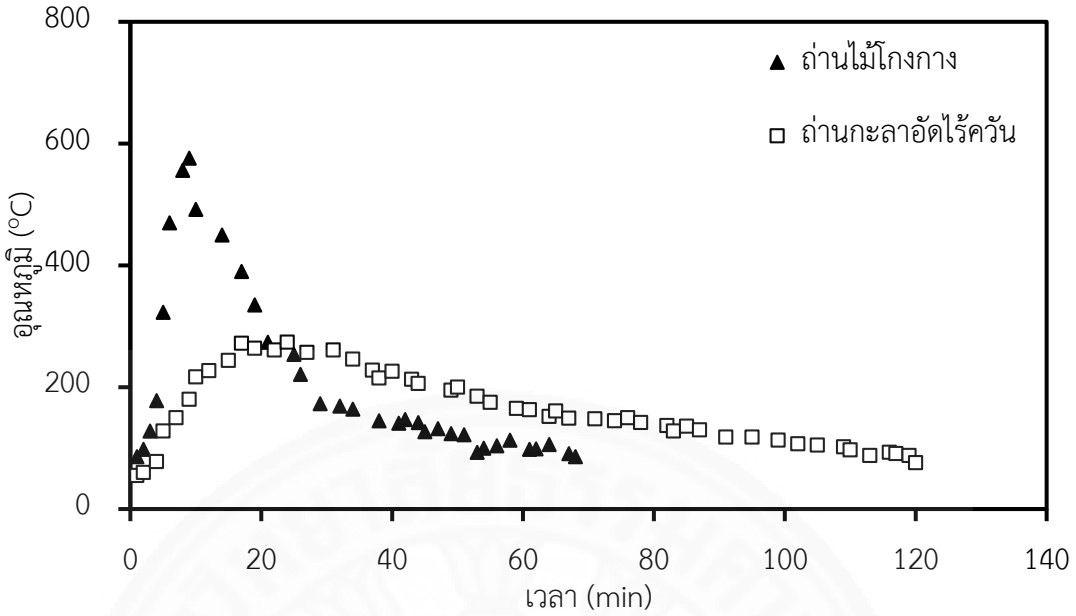
ภาพที่ 4.3 อุณหภูมิการเผาไหม้ที่เวลาต่างๆ ของถ่านไม้ที่ปริมาณ 600 g ในเตาประสิทธิภาพสูง



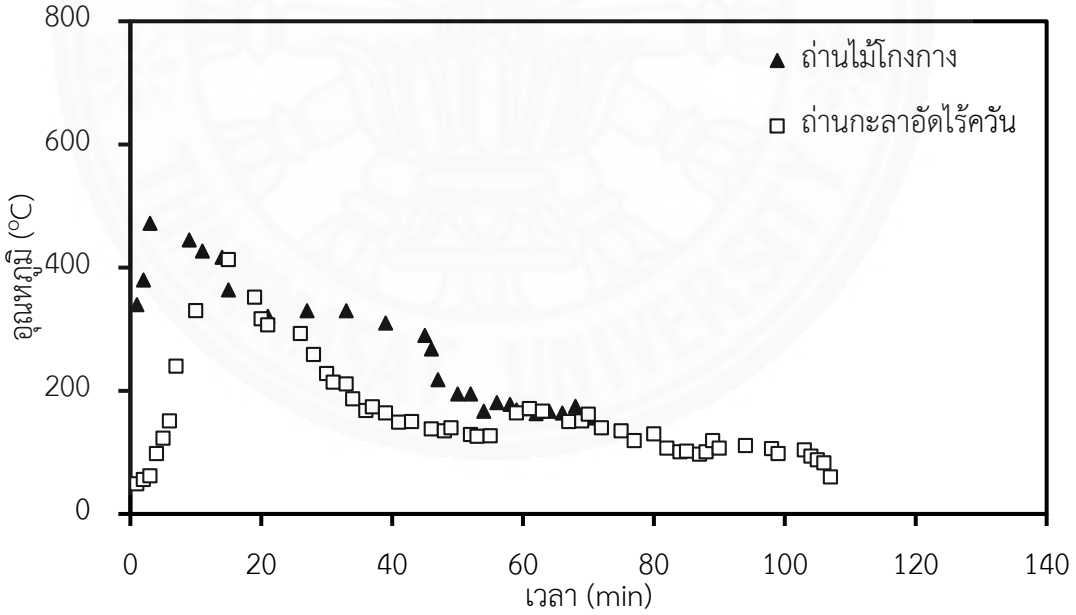
ภาพที่ 4.4 อุณหภูมิการเผาไหม้ที่เวลาต่างๆ ของถ่านไม้ที่ปริมาณ 800 g ในเตาทรงกระบอก



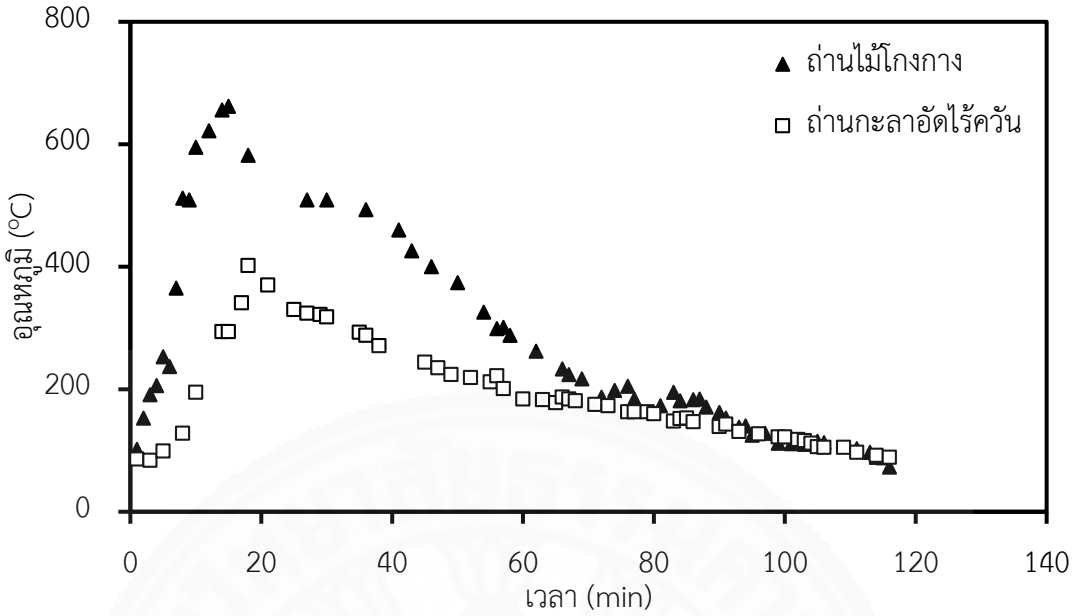
ภาพที่ 4.5 อุณหภูมิการเผาไหม้ที่เวลาต่างๆ ของถ่านไม้ที่ปริมาณ 800 g ในเตาทรงกรวย



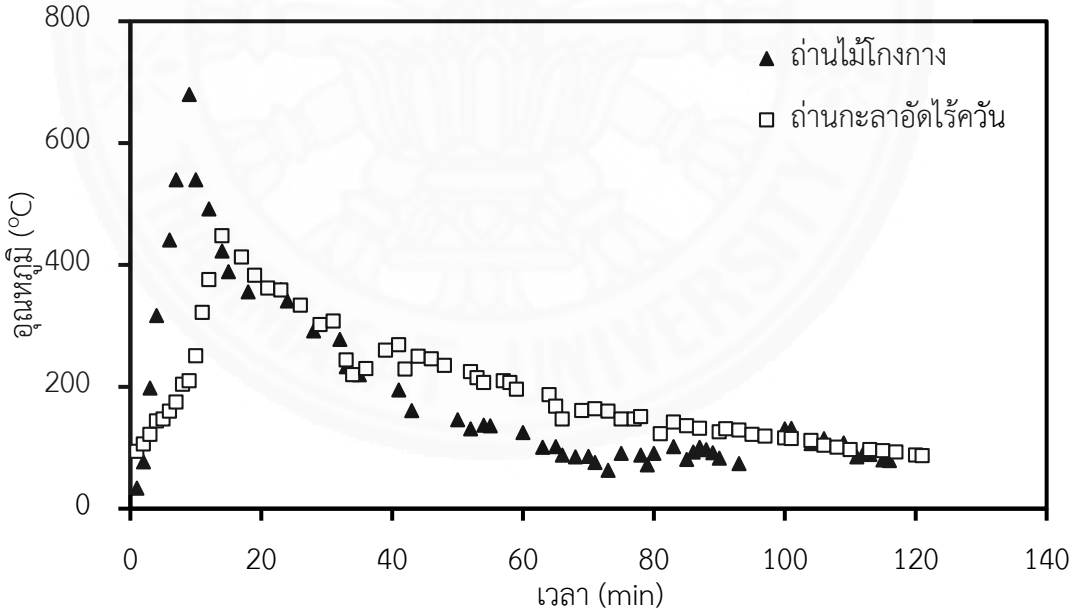
ภาพที่ 4.6 อุณหภูมิการเผาไหม้ที่เวลาต่างๆ ของถ่านไม้ที่ปริมาณ 800 g ในเตาประสิทธิภาพสูง



ภาพที่ 4.7 อุณหภูมิการเผาไหม้ที่เวลาต่างๆ ของถ่านไม้ที่ปริมาณ 1,000 g ในเตาทรงกระบอก



ภาพที่ 4.8 อุณหภูมิการเผาไหม้ที่เวลาต่างๆ ของถ่านไม้ที่ปริมาณ 1,000 g ในเตาทรงกรวย



ภาพที่ 4.9 อุณหภูมิการเผาไหม้ที่เวลาต่างๆ ของถ่านไม้ที่ปริมาณ 1,000 g ในเตาประสิทธิภาพสูง

จากภาพที่ 4.1-4.9 พบว่า โดยรวมแล้ว ถ่านไม้โกงกางมีอุณหภูมิการเผาไหม้สูงกว่าของถ่านกะลาอัดไร้ควัน โดยมีค่าอยู่ในช่วง 260-680 และ 250-450 °C ตามลำดับ

ในแง่แบบของเตา พบว่า อุณหภูมิการเผาไหม้ของเตาหุงต้มทั้ง 3 แบบ สามารถเรียงตามลำดับจากมากไปหาน้อย ได้เป็น เตาประสิทธิภาพสูง เตาทรงกรวย และเตาทรงกระบอก ตามลำดับ โดยมีค่าอยู่ในช่วง 280-680, 260-660, และ 250-480 °C ตามลำดับ

ในเชิงของปริมาณถ่านไม้ พบว่า อุณหภูมิการเผาไหม้สามารถเรียงตามลำดับจากมากไปหาน้อย ได้เป็น ปริมาณถ่านไม้ 1,000, 800, และ 600 g โดยมีค่าอุณหภูมิการเผาไหม้อยู่ในช่วง 500-700, 300-600, และ 300-400 °C ตามลำดับ

4.2.2 ผลของแบบของเตาหุงต้ม และชนิดและปริมาณของถ่านไม้ ที่มีผลต่อระยะเวลาของการจุดติดไฟ เวลาการทำให้น้ำเดือด และเวลารวมของการใช้งานทั้งหมด

ในการศึกษาถึงผลของแบบของเตาหุงต้ม และชนิดและปริมาณของถ่านไม้ ที่มีต่อระยะเวลาที่ใช้ในการจุดติดไฟของถ่านไม้ เวลาที่ใช้ในการทำให้น้ำเดือด และเวลารวมของการใช้งานทั้งหมด ในเตาหุงต้มทั้ง 3 แบบ คือ เตาทรงกระบอก เตาทรงกรวย และเตาประสิทธิภาพสูง พบว่าเป็นไปดังแสดงในตารางที่ 4.2-4.4

อนึ่ง เนื่องจากได้ทำการทดลองที่ปริมาณถ่านไม้ต่างๆ กัน ดังนั้น เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบข้อมูลของเวลาบนฐานของมวลที่เท่ากัน จึงทำการหารเวลาที่วัดได้ด้วยมวลของถ่านไม้ (ทำให้หน่วยของเวลาจึงเป็น min/g ของถ่านไม้)

ตารางที่ 4.2 ระยะเวลาที่ใช้ในการจุดติดไฟของถ่านไม้ ระยะเวลาที่ใช้ในการทำให้น้ำเดือด และระยะเวลารวมของการใช้งานทั้งหมด ของการเผาไหม้ในเตาหุงต้มทรงกระบอก ทรงกรวย และเตาประสิทธิภาพสูง

แบบของเตาหุงต้ม	เวลาที่ใช้ในการจุดติดไฟของถ่านไม้ (10^{-3} min/g)	เวลาที่ใช้ในการทำให้น้ำเดือด (10^{-3} min/g)	เวลารวมของการใช้งานทั้งหมด (10^{-3} min/g)
1. เตาทรงกระบอก	3.00 – 13.33	7.00 – 31.67	71.67 – 146.25
2. เตาทรงกรวย	6.67 – 10.00	7.00 – 25.00	60.00 – 119.00
3. เตาประสิทธิภาพสูง	2.50 – 7.00	6.25 – 14.00	60.00 – 90.00

หมายเหตุ 3.00 – 13.33 หมายถึง 3.00 – 13.33 × 10^{-3} min/g

จากการศึกษาช่วงเวลาที่ใช้ในการจุดติดไฟ เวลาที่ใช้ในการทำให้น้ำเดือด และเวลารวมของการใช้งานทั้งหมด ของถ่านไม้ในเตาหุงต้มแบบต่างๆ พบว่า โดยเฉลี่ยแล้ว เตาประสิทธิภาพสูงใช้เวลาสำหรับการจุดติดไฟ การทำให้น้ำเดือด และการใช้งานทั้งหมดน้อยที่สุด ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากการออกแบบเตา โดยเตาประสิทธิภาพสูงได้ออกแบบให้มีขนาดช่องลมที่ปากเตาเล็ก ทำให้เป็นการจำกัดอากาศที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้ให้มีปริมาณที่เหมาะสม ไม่มากจนเกินไป ส่งผลให้อุณหภูมิของการเผาไหม้สูงที่สุด ออกแบบให้รูของรังผึ้งมีจำนวนมาก ขนาดเล็ก และมีความลึกมากกว่าของเตาอีก 2 แบบ ซึ่งส่งผลให้อากาศสามารถไหลเข้าสู่ห้องเผาไหม้อย่างกระจายตัว และอย่างรวดเร็ว จนทำให้การผสมกันระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงเป็นไปอย่างดี (อยู่ในสภาวะการไหลแบบปั่นป่วน) การเผาไหม้จึงเป็นไปอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้เวลาที่ทำให้น้ำเดือด เวลาการจุดติดไฟ และเวลารวมของการใช้งานทั้งหมด ของเตาประสิทธิภาพสูงสั้นกว่าเตาทรงกรวยและเตาทรงกระบอก

ตารางที่ 4.3 ระยะเวลาที่ใช้ในการจุดติดไฟของถ่านไม้ ระยะเวลาที่ใช้ในการทำให้น้ำเดือด และระยะเวลารวมของการใช้งานทั้งหมด ของการเผาไหม้ของถ่านไม้โกงกางและถ่านไม้กะลาอัดไร้ควัน

ชนิดของถ่านไม้	เวลาที่ใช้ในการจุดติดไฟของถ่านไม้ (10^{-3} min/g)	เวลาที่ใช้ในการทำให้น้ำเดือด (10^{-3} min/g)	เวลารวมของการใช้งานทั้งหมด (10^{-3} min/g)
1. ถ่านไม้โกงกาง	2.50 – 7.00	5.00 – 10.00	63.33 – 93.00
2. ถ่านกะลาอัดไร้ควัน	6.67 – 13.33	6.25 – 14.00	86.67 – 119.00

หมายเหตุ 2.50 – 7.00 หมายถึง 2.50 – 7.00 × 10^{-3} min/g

เมื่อพิจารณาตารางที่ 4.3 ที่แสดงผลของชนิดของถ่านไม้ที่มีต่อทั้ง 3 ช่วงเวลา พบว่า โดยเฉลี่ยแล้ว ถ่านไม้โกงกางใช้เวลาสั้นกว่าในการจุดติดไฟ ซึ่งเป็นผลมาจากลักษณะของเชื้อเพลิงที่มีขนาดเล็ก ส่งผลให้มีพื้นผิวสัมผัสในการติดไฟที่ดี และการที่มีสารที่ระเหยได้มากกว่า จึงทำให้จุดติดไฟได้เร็วกว่า

ในส่วนของช่วงเวลาที่ทำให้น้ำเดือด พบว่า โดยเฉลี่ยแล้ว ถ่านไม้โกงกางใช้เวลาในการทำให้น้ำเดือดที่สั้นกว่า เนื่องจากถ่านไม้โกงกางมีค่าความร้อนที่สูงกว่า ประกอบกับมีปริมาณสารระเหยได้ที่มากกว่า จึงทำให้เกิดการเผาไหม้อย่างรวดเร็ว หรือในอัตราการเผาไหม้ที่สูง

และเมื่อพิจารณาช่วงเวลารวมของการใช้งานทั้งหมด พบว่า โดยเฉลี่ยแล้ว ถ่านกะลาอัดไร้ควันใช้เวลานานกว่า เนื่องจากมีเถ้ามากกว่า เพราะมีการเติมตัวประสาน ดังที่ได้

กล่าวแล้ว ในหัวข้อที่ 4.1 ซึ่งเถ้าเป็นแหล่งกักเก็บความร้อนในถ่านกะลาอัดไร้ควัน นอกจากนี้ การเติมตัวประสานส่งผลให้ความร้อนถูกปลดปล่อยออกมาจากถ่านกะลาอัดไร้ควันอย่างช้าๆ แต่สม่ำเสมอ [23] จึงเป็นสาเหตุให้ถ่านกะลาอัดไร้ควันมีช่วงเวลาการใช้งานทั้งหมดที่นานกว่าถ่านไม้โกงกาง

ตารางที่ 4.4 ระยะเวลาที่ใช้ในการจุดติดไฟของถ่านไม้ ระยะเวลาที่ใช้ในการทำให้น้ำเดือด และระยะเวลารวมของการใช้งานทั้งหมด ของปริมาณของถ่านไม้ 600, 800, และ 1,000 g

ปริมาณของถ่านไม้	เวลาที่ใช้ในการจุดติดไฟของถ่านไม้ (10^{-3} min/g)	เวลาที่ใช้ในการทำให้น้ำเดือด (10^{-3} min/g)	เวลารวมของการใช้งานทั้งหมด (10^{-3} min/g)
1. 600 g	8.33 – 10.00	15.00 – 26.67	41.67 – 71.67
2. 800 g	3.75 – 6.25	8.75 – 11.25	82.50 – 97.50
3. 1,000 g	3.00 – 6.00	8.00 – 11.00	90.00 – 106.00

หมายเหตุ 8.33 – 10.00 หมายถึง 8.33 – 10.00 × 10^{-3} min/g

จากตารางที่ 4.4 พบว่า โดยเฉลี่ยแล้ว ปริมาณถ่านไม้ 1,000 g มีช่วงเวลาที่ใช้ในการจุดติดไฟของถ่านไม้ และช่วงเวลาทำให้น้ำเดือดสั้นที่สุด รองลงมา คือ ปริมาณถ่านไม้ 800 และ 600 g ตามลำดับ ซึ่งน่าจะมีสาเหตุมาจากการที่มีปริมาณความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงรวมสูงสุด

ในส่วนของระยะเวลาของการใช้งานทั้งหมด พบว่า ถ่านไม้ที่ปริมาณ 1,000 g มีระยะเวลาใช้งานที่นานมากที่สุด รองลงมาคือปริมาณถ่านไม้ที่ 800 และ 600 g ตามลำดับ โดยปัจจัยที่ส่งผลโดยตรงต่อระยะเวลารวมของการใช้งานทั้งหมด คือ ปริมาณถ่านไม้ที่เพิ่มขึ้น ทำให้มีเถ้าเหลืออยู่มากขึ้น (โดยเฉพาะถ่านกะลาอัดไร้ควัน) จึงมีการสะสมความร้อนมากขึ้น ส่งผลให้มีช่วงเวลาของการใช้งานทั้งหมดที่สูงขึ้น

เมื่อพิจารณาในภาพรวมถึงความเหมาะสมในการใช้งานของเตาหุงต้มแบบต่างๆ ที่ใช้ถ่านไม้ชนิดและปริมาณต่างๆ พบว่า

สำหรับการผัดอาหาร ซึ่งเป็นการประกอบอาหารในกระทะด้วยความร้อนสูง น้ำมันน้อย และระยะเวลาสั้น โดยมีการคนอาหาร พลิกกลับไปมาอย่างรวดเร็ว จึงจำเป็นที่ต้องใช้ระยะเวลาเพียงเล็กน้อยประมาณ 3-5 min ในการประกอบอาหาร โดยเน้นถึงการทำให้ร้อนโดยเร็ว ดังนั้น จึงควรเลือกใช้เตาประสิทธิภาพสูงหรือเตาทรงกระบอกที่ใช้ถ่านไม้โกงกางปริมาณ 800-1,000 g

ในส่วนของการทอดอาหาร ซึ่งเป็นการประกอบอาหารให้สุกด้วยการใช้น้ำมันร้อนในปริมาณที่ท่วมอาหาร ทั้งนี้ อาหารที่ทอดจะจมอยู่ในน้ำมันตลอดระยะเวลาของการทอด โดยต้องใช้ระยะเวลาและไฟปานกลาง (ประมาณ 10-15 min) ในการประกอบอาหาร เน้นให้อาหารสุกให้ทั่วถึงโดยใช้เวลาไม่มากนัก ดังนั้น จึงควรเลือกใช้เตาทรงกระบอกหรือเตาทรงกรวยที่ใช้ถ่านกะลาอัดไร้ควันปริมาณ 600-800 g

ในส่วนของการแกง/ต้มอาหาร ซึ่งเป็นการประกอบอาหารให้สุกด้วยน้ำเดือดที่ต้องใช้ระยะเวลาและไฟสม่ำเสมอตลอดการประกอบอาหารประมาณ 30-45 min เน้นการดึงรสชาติของอาหารให้ออกมาผสมอยู่ในน้ำได้มากที่สุด ดังนั้น จึงควรเลือกใช้เตาประสิทธิภาพสูงที่ใช้ถ่านกะลาอัดไร้ควันปริมาณ 800-1,000 g

ในส่วนของการตุ๋น/เคี่ยวอาหาร ซึ่งเป็นการประกอบอาหารให้สุกในน้ำหรือการต้ม ใช้ความร้อนไม่ถึงจุดเดือด ใช้กับอาหารที่ต้องการให้สุกแบบค่อยเป็นค่อยไป เพื่อป้องกันอาหารแข็งและเหนียว การทำอาหารแบบนี้ น้ำที่ใช้ต้มจะมีอิทธิพลต่อรสชาติของอาหารมาก ดังนั้น การทำอาหารชนิดนี้จะต้องมีการปรุงรสน้ำที่จะมาทำด้วยการใส่เครื่องปรุงรสลงไปด้วย เป็นการประกอบอาหารที่ต้องใช้ระยะเวลาและไฟสม่ำเสมอตลอดการประกอบอาหารประมาณ 60 min ขึ้นไป ดังนั้น จึงควรเลือกใช้เตาทรงกระบอกหรือเตาทรงกรวยที่ใช้ถ่านกะลาอัดไร้ควันปริมาณ 800-1,000 g

4.2.3 ผลของแบบของเตาหุงต้ม ชนิดและปริมาณของถ่านไม้ที่มีต่อร้อยละการเผาไหม้สมบรูณ์ (% complete combustion)

ร้อยละการเผาไหม้สมบูรณ์ (% complete combustion) คือ การเปรียบเทียบปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ไปจริงในระหว่างการเผาไหม้กับปริมาณเชื้อเพลิงที่เผาไหม้จนเหลือแต่เถ้า ผลการทดลองที่ได้ พบว่า ร้อยละการเผาไหม้สมบรูณ์ (% complete combustion) ของเตาหุงต้มทั้ง 3 แบบ (เตาทรงกระบอก เตาทรงกรวย และเตาประสิทธิภาพสูง) ที่ปริมาณของถ่านไม้ต่างๆ กัน (600, 800, และ 1,000 g) สำหรับถ่านไม้โกงกางและถ่านกะลาอัดไร้ควัน เป็นไปดังแสดงในตารางที่ 4.5-4.7

ตารางที่ 4.5 ผลของเตาหุงต้มแบบต่างๆ ที่มีต่อร้อยละการเผาไหม้สมบูรณ์ (% complete combustion)

แบบของเตา	% complete combustion
1. เตาทรงกระบอก	98.5 ± 4.6
2. เตาทรงกรวย	95.5 ± 4.1
3. เตาประสิทธิภาพสูง	95.0 ± 5.0

จากตารางที่ 4.5 เมื่อพิจารณาผลในทางสถิติ พบว่า ร้อยละการเผาไหม้สมบูรณ์ (% complete combustion) ของเตาหุงต้มทั้ง 3 แบบ มีค่าใกล้เคียงกัน คือ อยู่ในช่วงร้อยละ 90-100

อย่างไรก็ตาม สามารถเรียงลำดับจากมากไปน้อยได้ดังนี้ เตาทรงกระบอก เตาทรงกรวย และเตาประสิทธิภาพสูง ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากเวลาการใช้งานทั้งหมดของเตาทรงกระบอกที่ยาวนานมากที่สุด (ดังแสดงในตารางที่ 4.2) จึงทำให้เกิดการเผาไหม้ได้มากที่สุด

ตารางที่ 4.6 ผลของถ่านไม้ชนิดต่างๆ ที่มีต่อร้อยละการเผาไหม้สมบูรณ์ (% complete combustion)

ชนิดของถ่านไม้	% complete combustion
1. ถ่านไม้โกงกาง	100.0
2. ถ่านกะลาอัดไร้ควัน	91.7 ± 3.9

จากตารางที่ 4.6 เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่า ร้อยละการเผาไหม้สมบูรณ์ (% complete combustion) ของถ่านไม้โกงกางมีค่าสูงกว่าถ่านกะลาอัดไร้ควันอย่างมีนัยสำคัญ คือ มีค่าประมาณร้อยละ 100 และ 88-96 ตามลำดับ

เหตุผลที่ร้อยละการเผาไหม้สมบูรณ์ (% complete combustion) ของถ่านไม้โกงกางสูงกว่าถ่านกะลาอัดไร้ควันน่าจะเป็นผลมาจากถ่านไม้โกงกางมีส่วนที่เผาไหม้ได้ (สารที่ระเหยได้ + คาร์บอนคงตัว) ถึงร้อยละ 91.1 (33.5 + 57.6) ส่วนถ่านกะลาอัดไร้ควันอยู่ที่ 67.9 (29.7 + 38.2) นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาผลของปริมาณเถ้าจากตารางที่ 4.1 พบว่า ปริมาณเถ้าของถ่านไม้โกงกางมีค่าต่ำกว่าปริมาณเถ้าของกะลาอัดไร้ควันถึง 10 เท่า (ร้อยละ 2.5 และ 27.3 ตามลำดับ) ซึ่งน่าจะทำให้อากาศสามารถผ่านชั้นเถ้าเข้าไปทำปฏิกิริยาการเผาไหม้กับเชื้อเพลิงที่ยังไม่ได้เผาไหม้ได้ง่ายกว่า

ตารางที่ 4.7 ผลของปริมาณไม้ต่างๆ ที่มีต่อร้อยละการเผาไหม้สมบูรณ์ (% complete combustion)

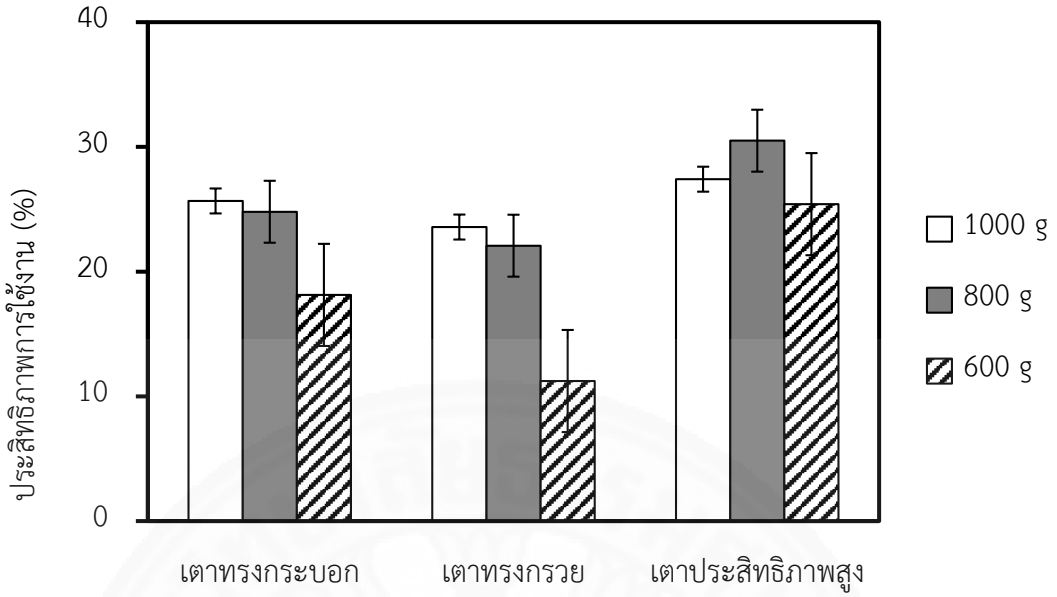
ปริมาณของถ่านไม้	% complete combustion
1. 600 g	100.0
2. 800 g	93.9 ± 4.5
3. 1,000 g	93.4 ± 4.8

จากตารางที่ 4.7 เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่า ร้อยละการเผาไหม้สมบูรณ์ (% complete combustion) ของถ่านไม้ปริมาณ 800 และ 1,000 g มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก โดยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 85-95 แต่ถ่านไม้ปริมาณ 600 g มีค่าร้อยละการเผาไหม้สมบูรณ์ (% complete combustion) ที่สูงกว่า โดยอยู่ในช่วงร้อยละ 97-100

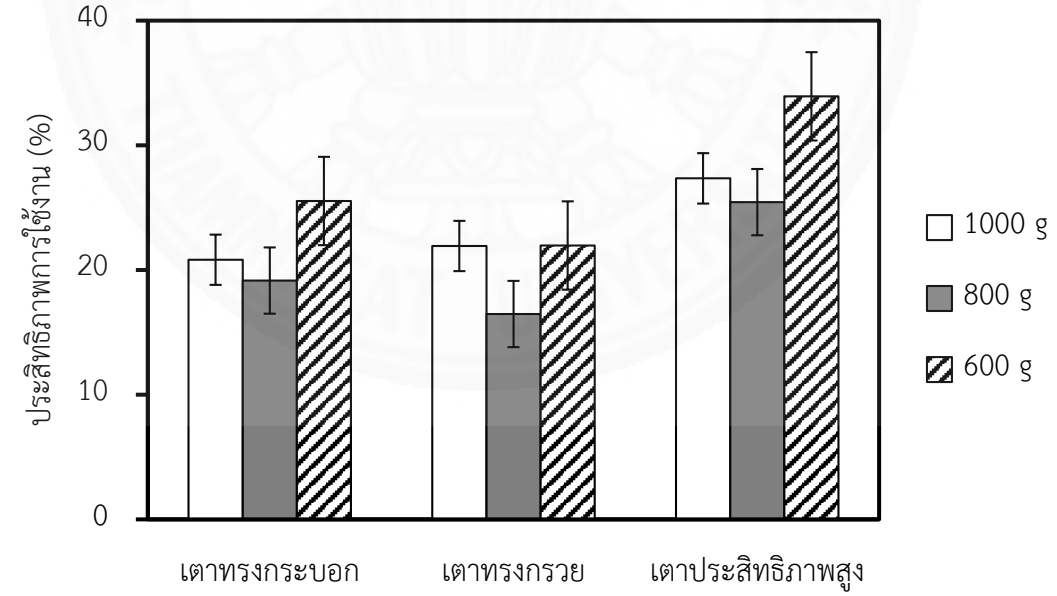
สาเหตุที่ปริมาณถ่านไม้ 600 g มีค่าเฉลี่ยของร้อยละการเผาไหม้สมบูรณ์ (% complete combustion) สูงที่สุด น่าจะเนื่องมาจากที่ปริมาณนี้ มีปริมาตรประมาณครึ่งหนึ่งของห้องเผาไหม้ ทำให้อากาศมีโอกาสผสมกับถ่านไม้ได้ดีกว่าหรือสามารถผ่านเข้าไปทำปฏิกิริยาการเผาไหม้กับส่วนที่ยังไม่ได้เผาไหม้ที่อยู่ภายในถ่านไม้ได้ดีกว่าที่ปริมาณของถ่านไม้ 800 และ 1,000 g

4.2.4 ผลของแบบของเตาหุงต้ม และชนิดและปริมาณของถ่านไม้ที่มีต่อประสิทธิภาพการใช้งาน (% usage efficiency)

ประสิทธิภาพการใช้งาน (% usage efficiency) คือ การเปรียบเทียบความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์ (เช่น นำไปต้มน้ำ) กับความร้อนทั้งหมดที่ได้รับจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง (ดังแสดงในสมการที่ 3.2) ซึ่งผลการทดลอง พบว่า ประสิทธิภาพการใช้งาน (% usage efficiency) ของเตาหุงต้มทั้ง 3 แบบ (เตาทรงกระบอก เตาทรงกรวย และเตาประสิทธิภาพสูง) ที่ปริมาณของถ่านไม้ต่างๆ กัน (600, 800, และ 1,000 g) สำหรับถ่านไม้โกงกางและถ่านกะลาอัดไร้ควัน เป็นไปดังแสดงในภาพที่ 4.10-4.11



ภาพที่ 4.10 ประสิทธิภาพการใช้งาน (% usage efficiency) ของเตาหุงต้มแบบต่างๆ ที่ใช้ปริมาณถ่านไม้ 600, 800, และ 1,000 g สำหรับถ่านไม้โกงกาง



ภาพที่ 4.11 ประสิทธิภาพการใช้งาน (% usage efficiency) ของเตาหุงต้มแบบต่างๆ ที่ใช้ปริมาณถ่านไม้ 600, 800, และ 1,000 g สำหรับถ่านกะลาอัดไร้ควัน

จากภาพที่ 4.10-4.11 พบว่า ประสิทธิภาพการใช้งานของถ่านไม้โกงกางและถ่านกะลาอัดไร้ควันมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก โดยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 25-30 และ 25-34 ตามลำดับ สำหรับเตาประสิทธิภาพสูง มีค่าอยู่ช่วงร้อยละ 18-26 และ 19-26 ตามลำดับ สำหรับเตาทรงกระบอก และมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 11-24 และ 17-22 ตามลำดับ สำหรับเตาทรงกรวย

ค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพการใช้งานของเตาชนิดต่างๆ ซึ่งเฉลี่ยจากปริมาณถ่านไม้ทั้ง 3 ค่า พบว่าเป็นไปดังแสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ผลของแบบของเตาหุงต้มแบบต่างๆ ที่มีต่อประสิทธิภาพการใช้งาน (% usage efficiency)

แบบของเตา	% usage efficiency
1. เตาทรงกระบอก	24.4 ± 3.0
2. เตาทรงกรวย	18.7 ± 3.6
3. เตาประสิทธิภาพสูง	28.0 ± 3.0

เมื่อพิจารณาภาพที่ 4.10-4.11 และตารางที่ 4.8 ร่วมกัน พบว่า โดยรวมแล้วเตาประสิทธิภาพสูงมีประสิทธิภาพการใช้งานที่สูงสุด โดยมีค่าเฉลี่ยประมาณร้อยละ 28 รองลงมาซึ่งเป็นเตาทรงกระบอก ซึ่งมีประสิทธิภาพการใช้งานเฉลี่ยประมาณร้อยละ 24 และเตาทรงกรวย ซึ่งมีประสิทธิภาพการใช้งานเฉลี่ยประมาณร้อยละ 19

ทั้งนี้ เป็นผลมาจากการออกแบบเตาหุงต้ม ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยเหตุผลดังต่อไปนี้

(1) เมื่อพิจารณาช่องอากาศที่ด้านหน้าของเตา (ซึ่งช่องนี้จะมีผลต่อปริมาณของอากาศที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้) พบว่า เตาประสิทธิภาพสูงมีขนาดช่องอากาศเล็กที่สุด จึงเป็นการจำกัดอากาศไม่ให้เข้าสู่ห้องเผาไหม้มากจนเกินไป เพราะเมื่อมีอากาศที่มากเกินไป จะทำให้อุณหภูมิของการเผาไหม้ลดลง ขณะที่เตาทรงกรวยและเตาทรงกระบอกมีขนาดของช่องนี้ที่ใหญ่กว่า ทำให้อากาศเข้าสู่ห้องเผาไหม้มาก อุณหภูมิของการเผาไหม้จึงค่อนข้างต่ำ (ผลของอุณหภูมิการเผาไหม้ของเตาหุงต้มแบบต่างๆ แสดงไว้ในภาพที่ 4.1-4.9) ด้วยเหตุนี้เตาประสิทธิภาพสูงจึงมีประสิทธิภาพที่สูงที่สุด

(2) เมื่อพิจารณาลักษณะของห้องเผาไหม้ พบว่า เตาประสิทธิภาพสูงมีห้องเผาไหม้ที่ใหญ่ ทำให้ถ่านไม้กระจายตัวในห้องเผาไหม้ได้ดีกว่า (ไม่เกิดการอัดแน่น) ห้องเผาไหม้ของเตาทรงกรวยและเตาทรงกระบอก ซึ่งมีขนาดห้องเผาไหม้ที่เล็กกว่า และจากการที่ถ่านไม้หรือเชื้อเพลิงกระจายตัวได้ดีในห้องเผาไหม้ จะส่งผลให้ถ่านไม้สามารถผสมกับอากาศได้ดี ทำให้มี

ประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่สูง และส่งผลให้มีความร้อนไปใช้ในการให้ความร้อนแก่น้ำและทำให้น้ำเดือดได้มากขึ้น

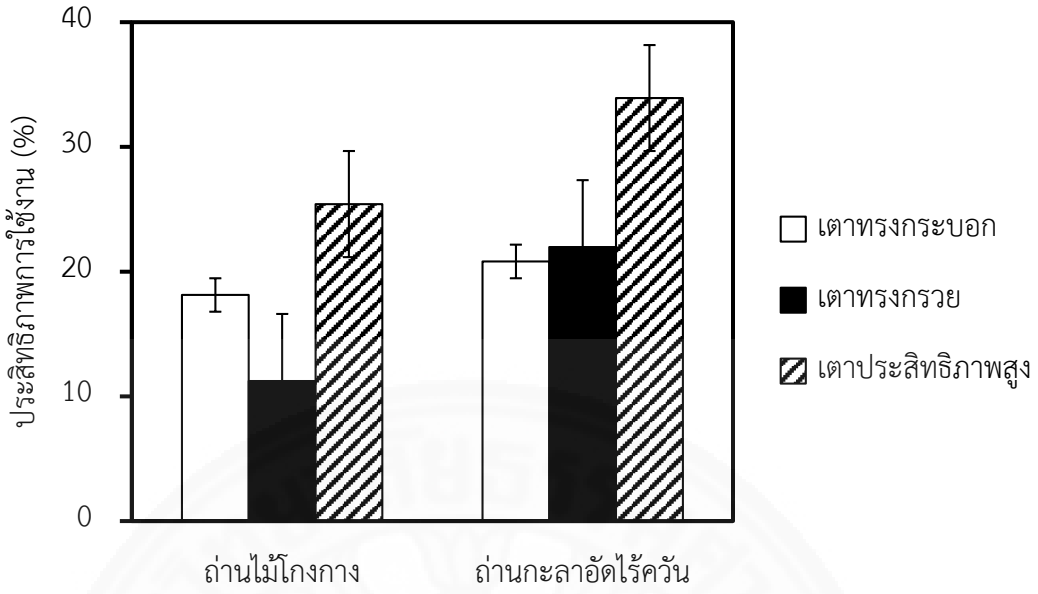
(3) เมื่อพิจารณาลักษณะของรังผึ้ง พบว่า เตาประสิทธิภาพสูงมีรังผึ้งที่เล็ก มีจำนวนมากที่สุด และลึกที่สุด (รังผึ้งหรือตะกรับมีช่องรูประมาณร้อยละ 40 ของพื้นที่ทั้งหมดและมีความลึกประมาณ 3 cm) ทำให้สามารถดูดอากาศได้ดี เป็นผลให้อากาศสามารถไหลเข้าสู่ห้องเผาไหม้ได้รวดเร็วและทั่วถึง โดยรูของรังผึ้งที่มีขนาดเล็กจะทำให้การเคลื่อนที่ของอากาศเร็วขึ้น ทำให้อากาศและเชื้อเพลิงผสมกันได้ดี (ในลักษณะการผสมแบบปั่นป่วน) ขณะที่รังผึ้งของเตาทรงกรวยและเตาทรงกระบอกมีลักษณะคล้ายๆ กัน คือ มีรูรังผึ้งที่น้อยกว่ามีขนาดใหญ่กว่าและมีความหนาของรังผึ้งที่บางกว่าของเตาประสิทธิภาพสูง ทำให้อากาศเข้าสู่ห้องเผาไหม้ด้วยอัตราการไหลที่ช้ากว่า และอากาศผสมกับเชื้อเพลิงได้ไม่ดีเท่ากับเตาประสิทธิภาพสูง

(4) เมื่อพิจารณาความสูงของเชิงเทิน หรือระยะจากขอบด้านบนของเตาจนถึงก้นของหม้อที่วางอยู่บนปากเตา พบว่า เตาประสิทธิภาพสูงมีช่องว่างระหว่างของเตากับก้นหม้อน้อยที่สุด โดยมีระยะประมาณ 1-2 cm ทำให้ได้รับความร้อนจากการแผ่รังสีจากถ่านไม้มายังเตามากที่สุด และมีการสูญเสียความร้อนน้อยกว่าเตาทรงกระบอกและเตาทรงกรวย ซึ่งมีระยะระหว่างขอบเตากับก้นหม้อที่มากกว่า

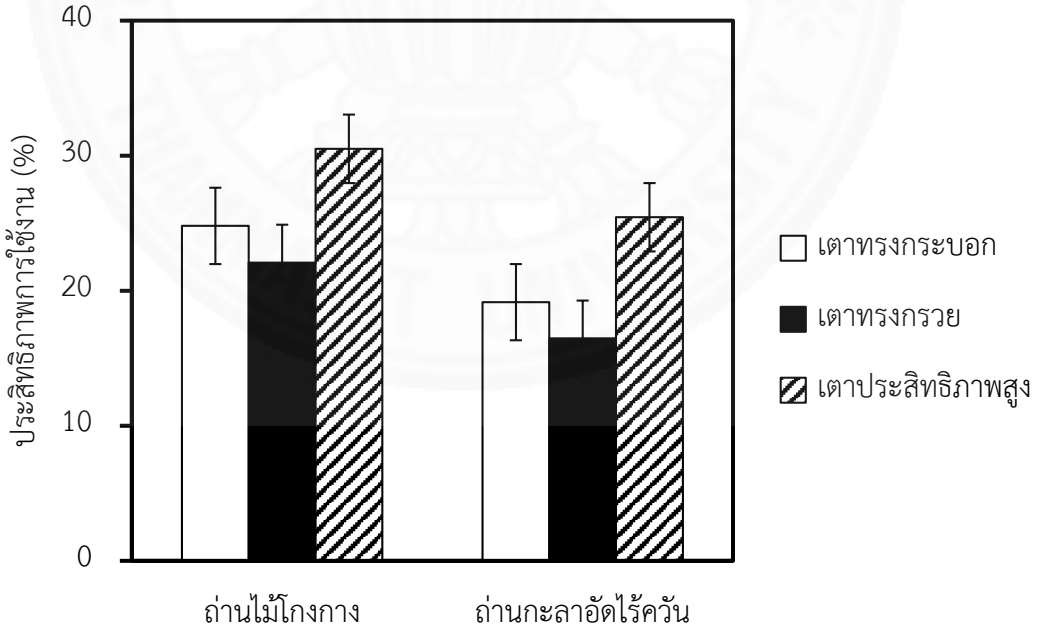
ประสิทธิภาพของถ่านไม้ 2 ชนิด (ถ่านไม้โกงกางและถ่านกะลาอัดไร้ควัน) ที่ปริมาณถ่านไม้ 600, 800, และ 1,000 g เป็นไปดังแสดงในภาพที่ 4.12, 4.13, และ 4.14 ตามลำดับ ซึ่งพบว่า ถ่านกะลาอัดไร้ควันที่ปริมาณถ่านไม้ 600 g มีประสิทธิภาพการใช้งานสูงกว่าถ่านไม้โกงกาง โดยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 21-34 และช่วงร้อยละ 12-25 ตามลำดับ

ที่ปริมาณถ่านไม้ 800 g พบว่า ประสิทธิภาพการใช้งานของถ่านไม้โกงกางสูงกว่าของถ่านกะลาอัดไร้ควัน โดยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 23-30 และช่วงร้อยละ 16-25 ตามลำดับ

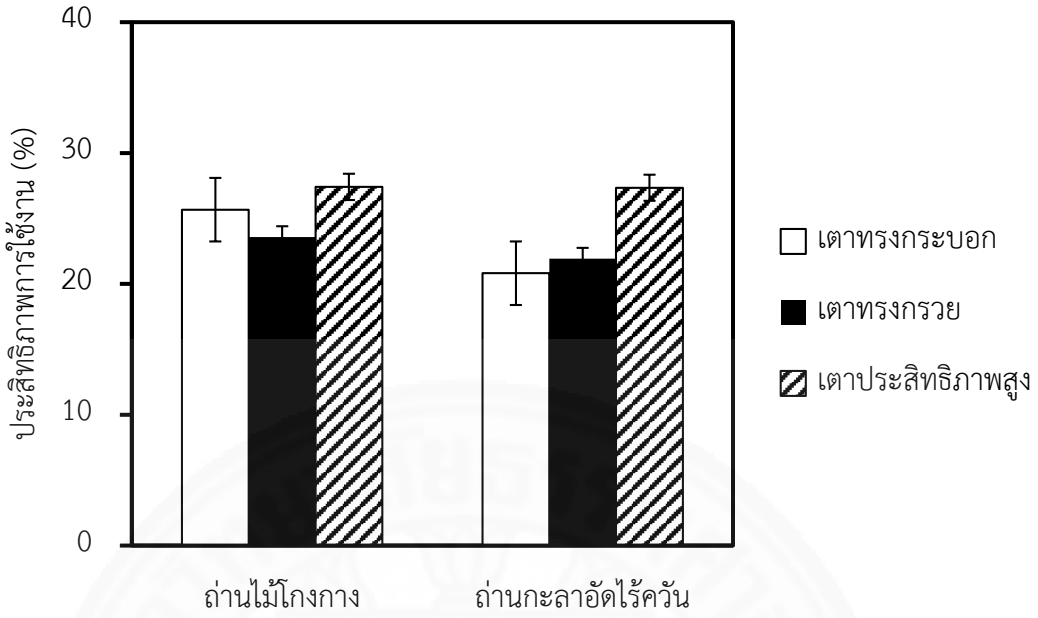
ที่ปริมาณถ่านไม้ 1,000 g พบว่า ประสิทธิภาพการใช้งานของถ่านไม้โกงกางสูงกว่าถ่านกะลาอัดไร้ควัน โดยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 24-27 และช่วงร้อยละ 20-27 ตามลำดับ



ภาพที่ 4.12 ประสิทธิภาพการใช้งาน (% usage efficiency) ของเตาหุงต้มและถ่านไม้ชนิดต่างๆ ที่ปริมาณถ่านไม้ 600 g



ภาพที่ 4.13 ประสิทธิภาพการใช้งาน (% usage efficiency) ของเตาหุงต้มและถ่านไม้ชนิดต่างๆ ที่ปริมาณถ่านไม้ 800 g



ภาพที่ 4.14 ประสิทธิภาพการใช้งาน (% usage efficiency) ของเตาหุงต้มและถ่านไม้ชนิดต่างๆ ที่ปริมาณถ่านไม้ 1,000 g

ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการใช้งานสำหรับถ่านไม้โกงกางและถ่านกะลาอัดไร้ควันที่ปริมาณของถ่านไม้ต่างๆ กัน (600, 800, และ 1,000 g) ในเตาหุงต้มทั้ง 3 แบบ เป็นไปดังแสดงในตารางที่ 4.9

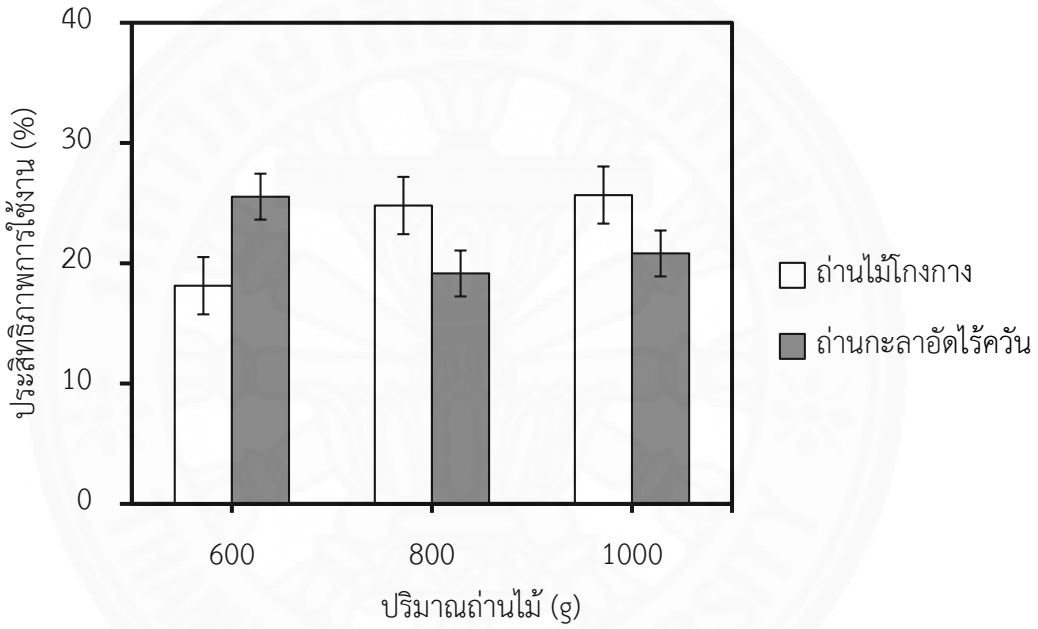
ตารางที่ 4.9 ผลของชนิดของถ่านไม้ชนิดต่างๆ ที่มีต่อประสิทธิภาพการใช้งาน (% usage efficiency)

ชนิดของถ่านไม้	% usage efficiency
1. ถ่านไม้โกงกาง	23.3 ± 3.2
2. ถ่านกะลาอัดไร้ควัน	22.9 ± 3.0

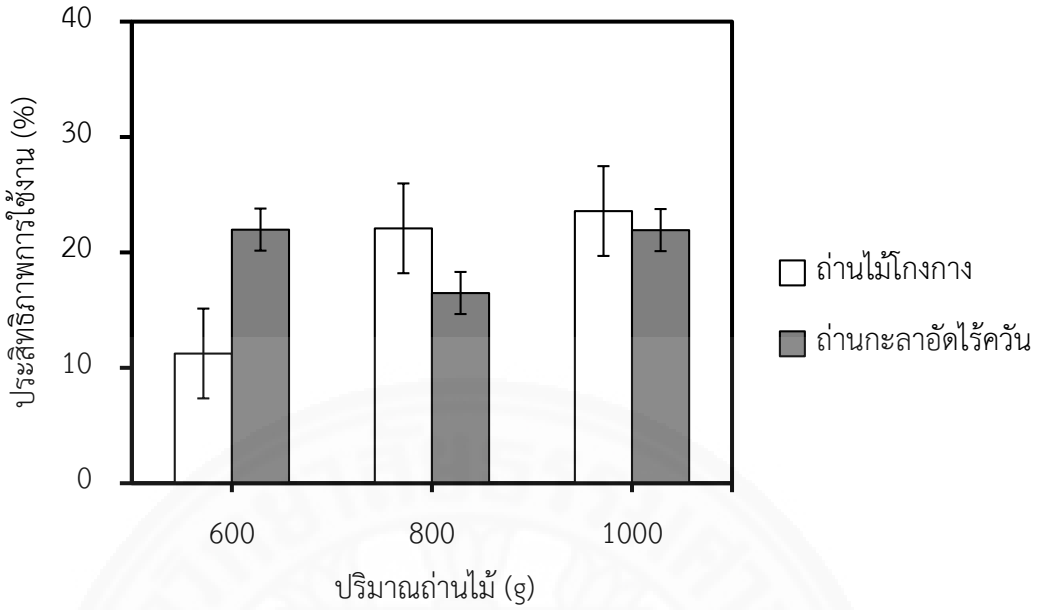
จากตารางที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่า ประสิทธิภาพการใช้งานของถ่านไม้ ทั้งถ่านไม้โกงกางและถ่านกะลาอัดไร้ควัน มีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเฉลี่ยประมาณร้อยละ 20-27 สำหรับถ่านไม้โกงกาง และร้อยละ 20-26 สำหรับถ่านกะลาอัดไร้ควัน แสดงว่าชนิดของถ่านไม้มีผลต่อประสิทธิภาพการใช้งาน (% usage efficiency) น้อยมาก

ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากในส่วนการศึกษาในเชิงประสิทธิภาพในการใช้งานนั้น จะพิจารณาถึงความสามารถในการทำให้น้ำในหม้อระเหยออกไปให้ได้มากที่สุด ดังนั้น ถ่านไม้โกงกางที่มีระยะเวลาการจุดติดไฟ การทำให้น้ำเดือด และการใช้งานทั้งหมดที่สั้น ขณะที่ถ่านกะลาอัดไร้ควันที่มีระยะเวลาของการจุดติดไฟ การทำให้น้ำเดือด และการใช้งานทั้งหมดที่นานกว่า จึงมีประสิทธิภาพในการใช้งานที่ใกล้เคียงกัน

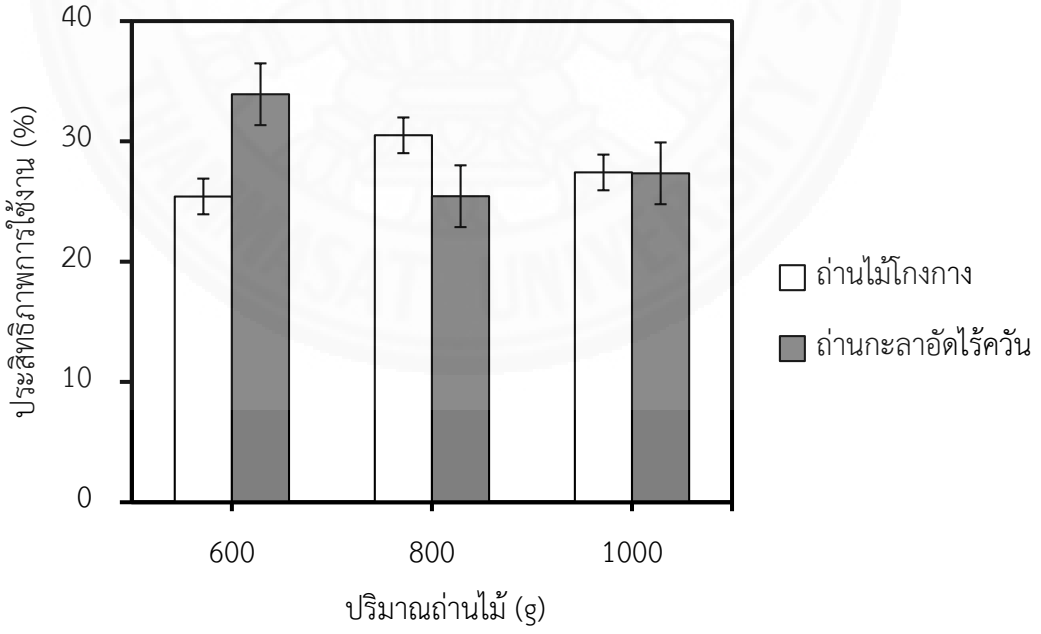
ภาพที่ 4.15-4.17 แสดงประสิทธิภาพการใช้งานของถ่านไม้ 2 ชนิด (ถ่านไม้โกงกางและถ่านกะลาอัดไร้ควัน) ของเตาแบบต่างๆ สำหรับปริมาณถ่านไม้ชนิดต่างๆ



ภาพที่ 4.15 ประสิทธิภาพการใช้งาน (% usage efficiency) ของถ่านไม้ ที่ปริมาณของถ่านไม้ในช่วง 600-1,000 g สำหรับเตาทรงกระบอก



ภาพที่ 4.16 ประสิทธิภาพการใช้งาน (% usage efficiency) ของถ่านไม้ ที่ปริมาณของถ่านไม้ในช่วง 600-1,000 g สำหรับเตาทรงกรวย



ภาพที่ 4.17 ประสิทธิภาพการใช้งาน (% usage efficiency) ของถ่านไม้ ที่ปริมาณของถ่านไม้ในช่วง 600-1,000 g สำหรับเตาประสิทธิภาพสูง

สำหรับเตาทรงกระบอก ดังแสดงในภาพที่ 4.15 พบว่า ถ่านไม้ปริมาณ 1,000 g มีประสิทธิภาพสูงที่สุด โดยอยู่ในช่วงร้อยละ 20-25 รองลงมาเป็นถ่านไม้ปริมาณ 800 และ 600 g ตามลำดับ โดยมีประสิทธิภาพอยู่ในช่วงร้อยละ 19-25 และ 17-25 ตามลำดับ

สำหรับเตาทรงกรวย ดังแสดงในภาพที่ 4.16 พบว่า ถ่านไม้ปริมาณ 1,000 g มีประสิทธิภาพสูงที่สุด โดยอยู่ในช่วงร้อยละ 22-23 รองลงมาเป็นถ่านไม้ปริมาณ 800 และ 600 g ตามลำดับ โดยมีประสิทธิภาพอยู่ในช่วงร้อยละ 17-22 และร้อยละ 12-21 ตามลำดับ

สำหรับเตาประสิทธิภาพสูง ดังแสดงภาพที่ 4.17 พบว่า ถ่านไม้ปริมาณ 600 g มีประสิทธิภาพสูงที่สุด โดยอยู่ในช่วงร้อยละ 25-32 รองลงมาเป็นถ่านไม้ปริมาณ 800 และ 1,000 g ตามลำดับ โดยอยู่ในช่วงร้อยละ 25-30 และร้อยละ 26-27 ตามลำดับ

ทั้งนี้ จากผลการทดลอง พบว่า เตาประสิทธิภาพสูงมีแนวโน้มที่แตกต่างไปจากของเตาทรงกระบอกและเตาทรงกรวย นั่นคือพบว่า ยิ่งใช้เชื้อเพลิง (ถ่านไม้) ในปริมาณที่น้อย ยิ่งมีประสิทธิภาพสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่าการใช้เตาประสิทธิภาพสูงส่งผลให้เกิดการประหยัดเชื้อเพลิง

ค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพการใช้งาน (% usage efficiency) ที่ปริมาณของถ่านไม้ต่างๆ กัน (600, 800, และ 1,000 g) สำหรับถ่านไม้โกงกางและถ่านกะลาอัดไร้ควัน ในเตาหุงต้มแบบต่างๆ เป็นไปดังแสดงในตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ผลของปริมาณถ่านไม้ที่มีต่อประสิทธิภาพการใช้งาน (% usage efficiency)

ปริมาณของถ่านไม้	% usage efficiency
1. 600 g	22.2 ± 4.6
2. 800 g	23.2 ± 3.7
3. 1,000 g	24.0 ± 2.7

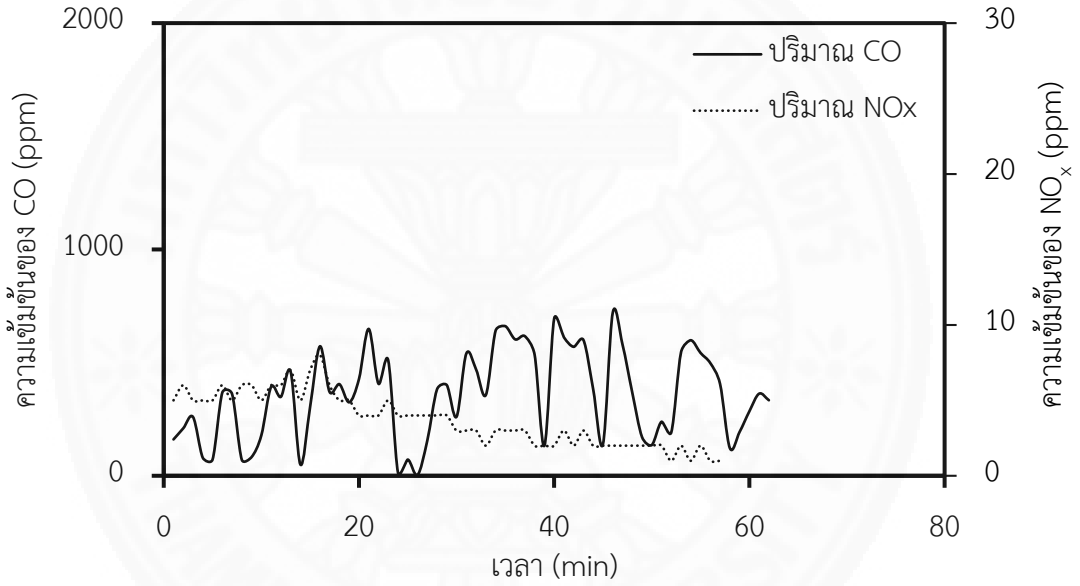
จากตารางที่ 4.10 เมื่อทำการเฉลี่ยค่าประสิทธิภาพการใช้งานสำหรับทุกชนิดของถ่านไม้และทุกแบบของเตา พบว่า ปริมาณของถ่านไม้ที่ต่างกันไม่ส่งผลให้มีประสิทธิภาพการใช้งานที่ต่างกันมากนัก แต่สามารถเรียงตามลำดับได้เป็นร้อยละ 18-27, 20-27, และ 21-27 สำหรับถ่านไม้ปริมาณ 600, 800, และ 1,000 g ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

โดยประสิทธิภาพการใช้งานที่เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากที่ปริมาณถ่าน 1,000 g มีช่วงเวลารวมของการใช้งานทั้งหมดมากที่สุด รองลงมาเป็นปริมาณถ่านไม้ 800 g และ 600 g นั่นคือ มีช่วงของระยะเวลาการใช้งานทั้งหมดในช่วง 42×10^{-3}-72×10^{-3}, 82×10^{-3}-98×10^{-3}, และ

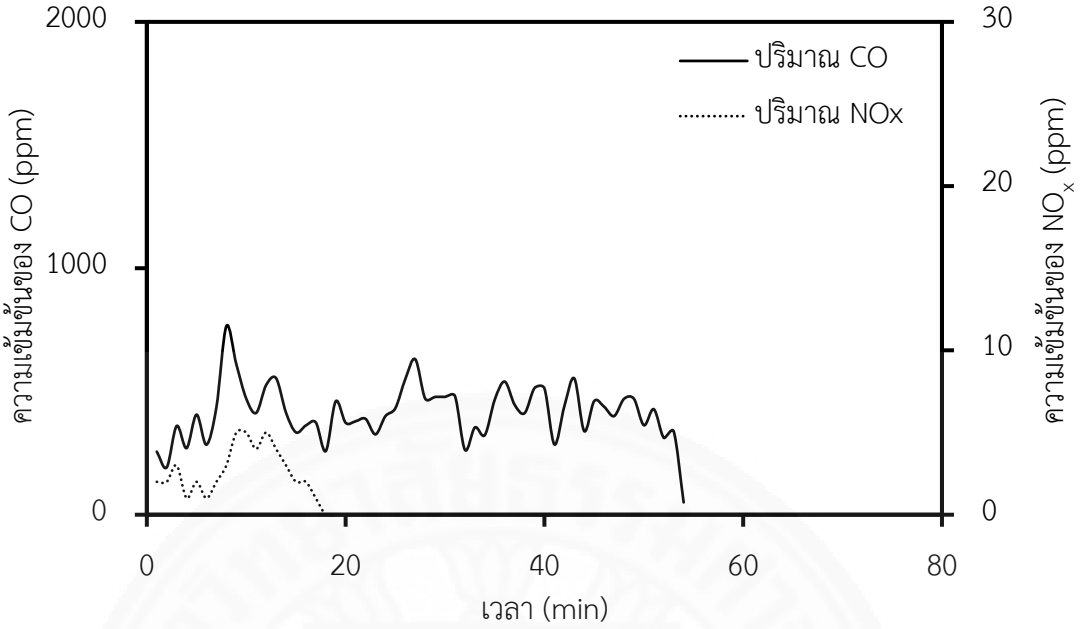
90×10^{-3}-106×10^{-3} min/g ตามลำดับ เมื่อมีช่วงเวลาการใช้งานทั้งหมดที่ยาวนานมากขึ้น จึงสามารถทำให้ปริมาณน้ำในหม้อลดลงไปได้มากขึ้น ประสิทธิภาพการใช้งานจึงสูงขึ้น

4.2.5 ผลของแบบของเตาหุงต้ม และชนิดและปริมาณของถ่านไม้ ที่มีต่อลักษณะการปล่อยและปริมาณของ CO และ NO_x

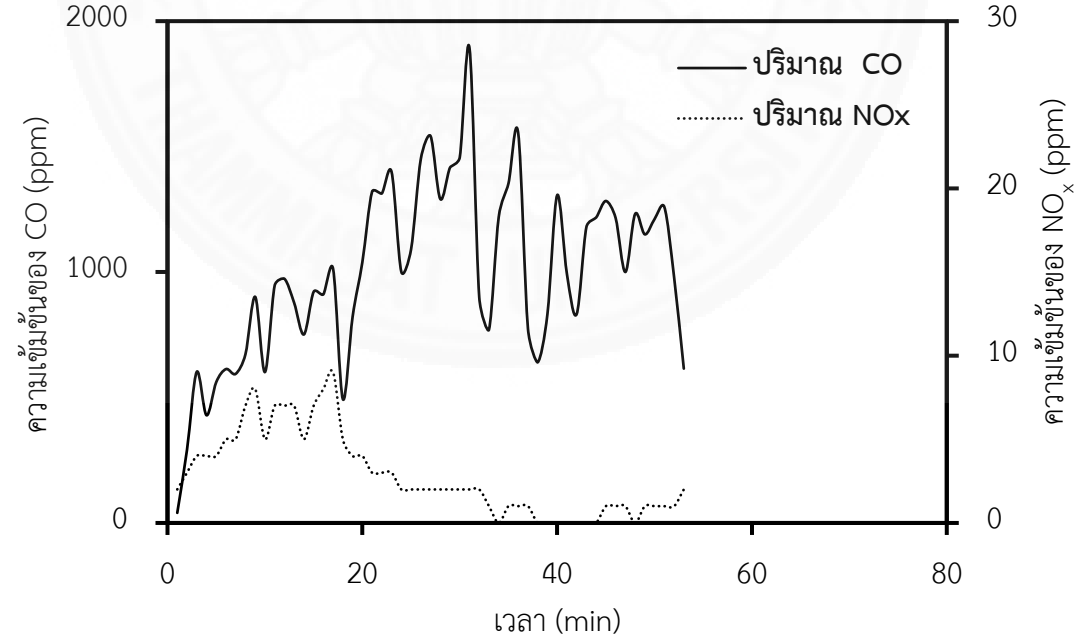
ลักษณะการปล่อยก๊าซมลพิษ CO และ NO_x ของเตาหุงต้มทั้ง 3 แบบ (เตาทรงกระบอก เตาทรงกรวย และเตาประสิทธิภาพสูง) ที่ปริมาณของถ่านไม้ต่างๆ กัน (600, 800, และ 1,000 g) สำหรับถ่านไม้โกงกางและถ่านกะลาอัดไร้ควัน เป็นไปดังแสดงในภาพที่ 4.18-4.35



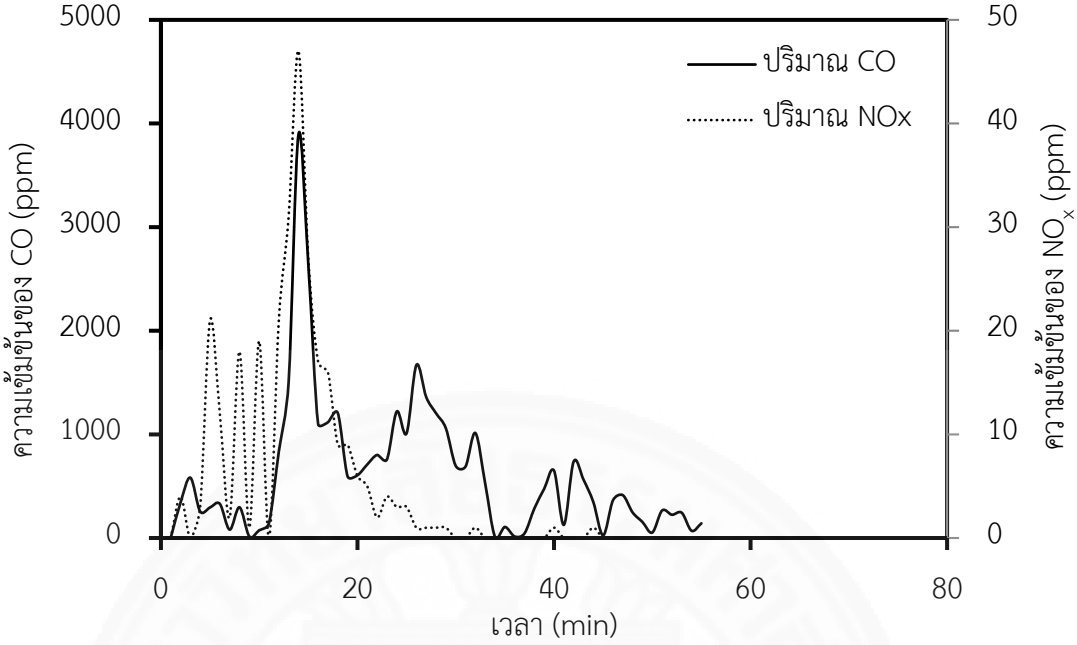
ภาพที่ 4.18 การปล่อยก๊าซมลพิษของการเผาไหม้ถ่านกะลาอัดไร้ควันปริมาณ 1,000 g ในเตาทรงกระบอก



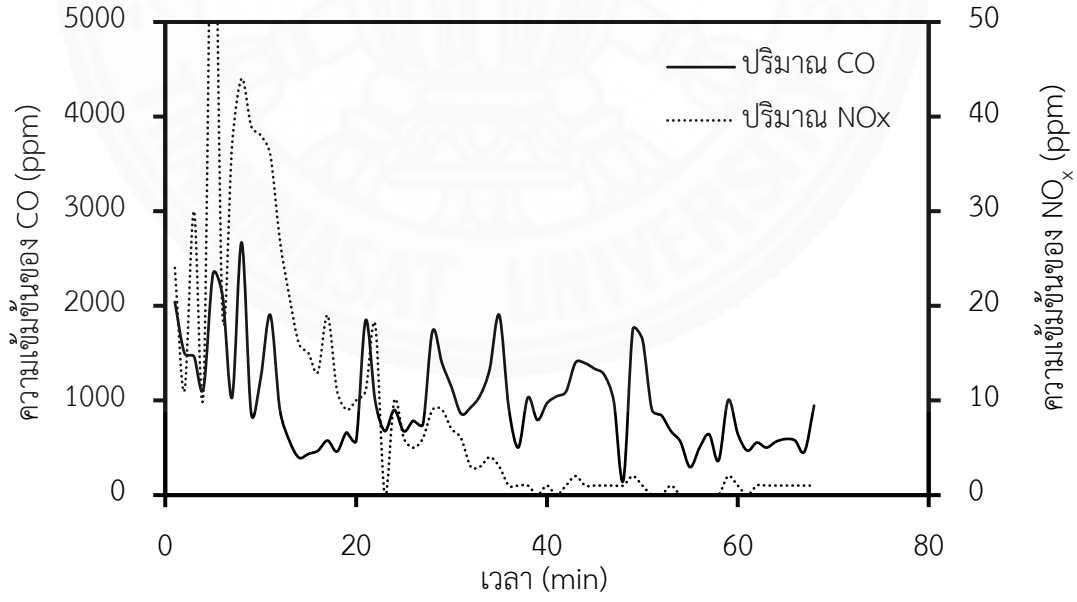
ภาพที่ 4.19 การปล่อยก๊าซมลพิษของการเผาไหม้ถ่านกะลาอัดไร้ควันปริมาณ 800 g ในเตาทรงกระบอก



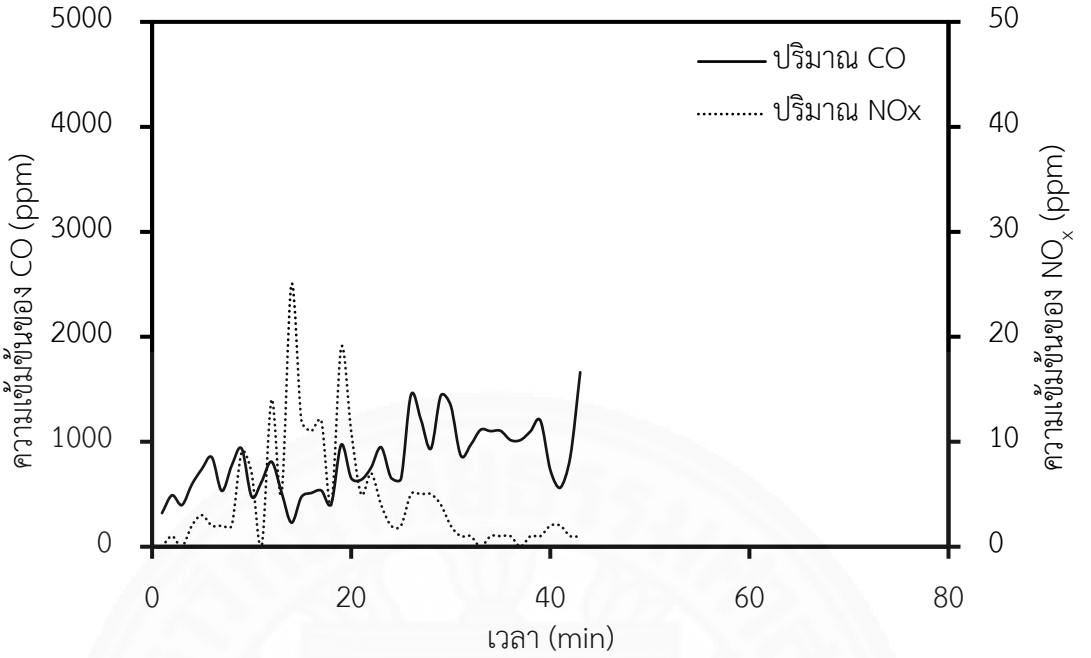
ภาพที่ 4.20 การปล่อยก๊าซมลพิษของการเผาไหม้ถ่านกะลาอัดไร้ควันปริมาณ 600 g ในเตาทรงกระบอก



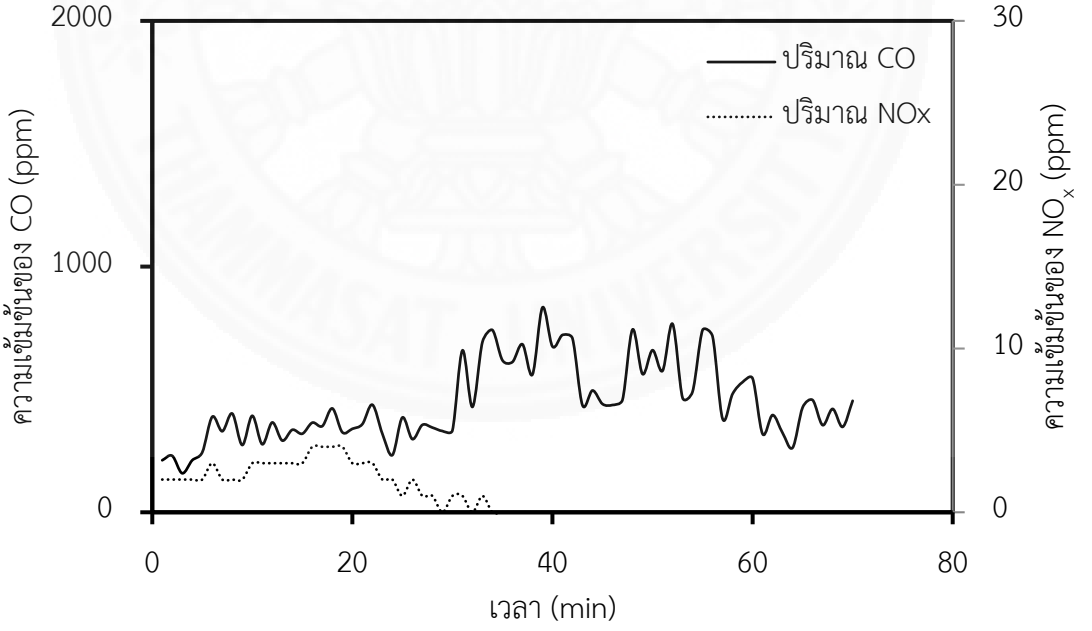
ภาพที่ 4.21 การปล่อยก๊าซมลพิษของการเผาไหม้ถ่านไม้โกงกางปริมาณ 1,000 g ในเตาทรงกระบอก



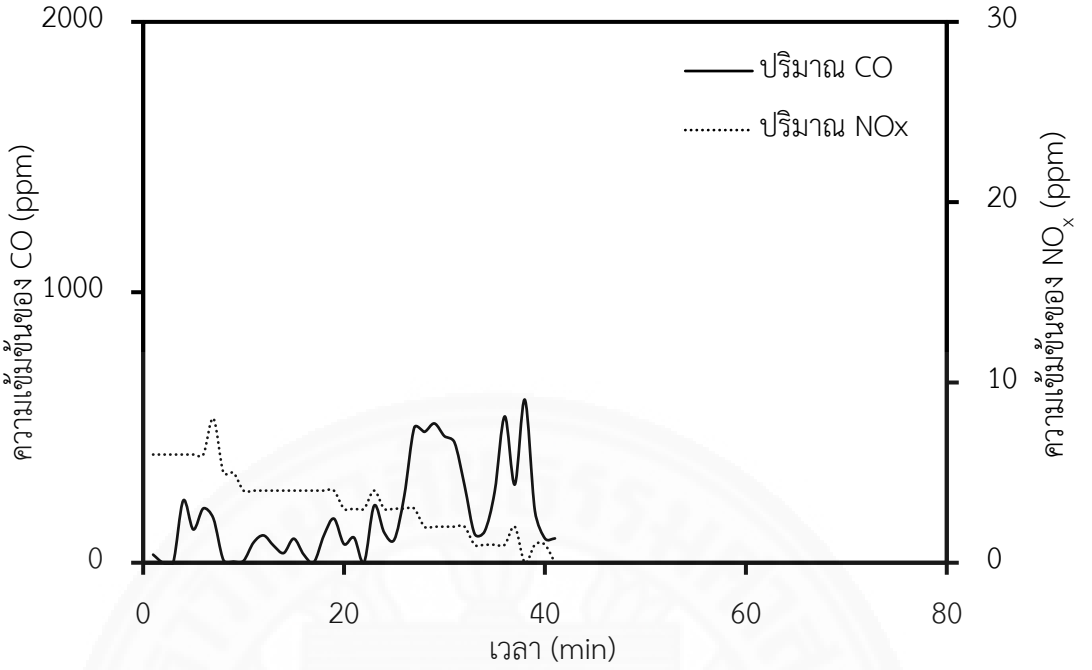
ภาพที่ 4.22 การปล่อยก๊าซมลพิษของการเผาไหม้ถ่านไม้โกงกางปริมาณ 800 g ในเตาทรงกระบอก



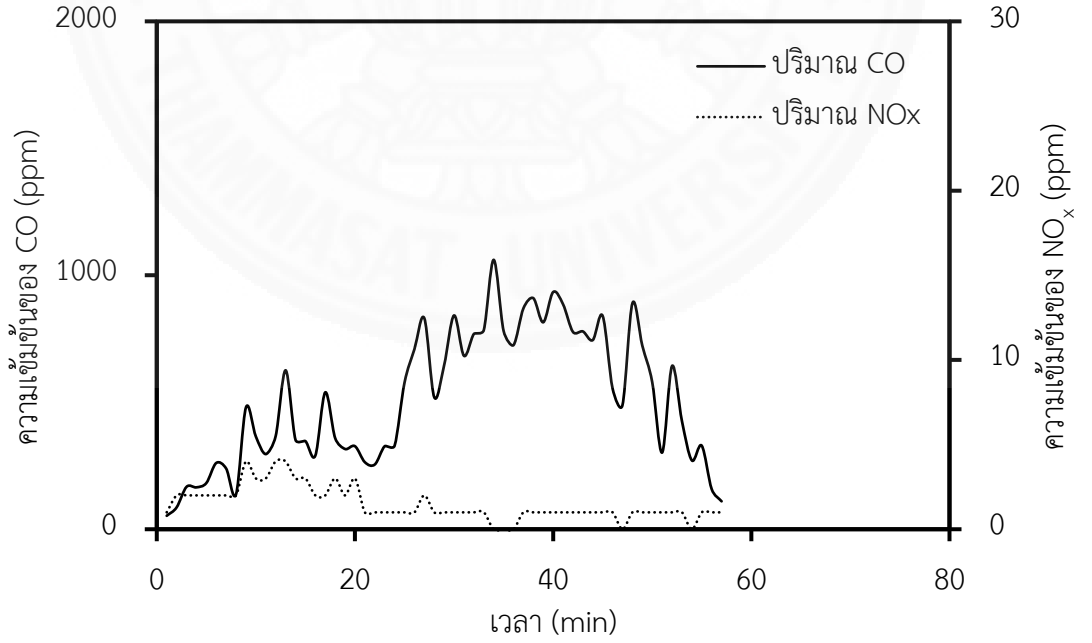
ภาพที่ 4.23 การปล่อยก๊าซมลพิษของการเผาไหม้ถ่านไม้โกงกางปริมาณ 600 g ในเตาทรงกระบอก



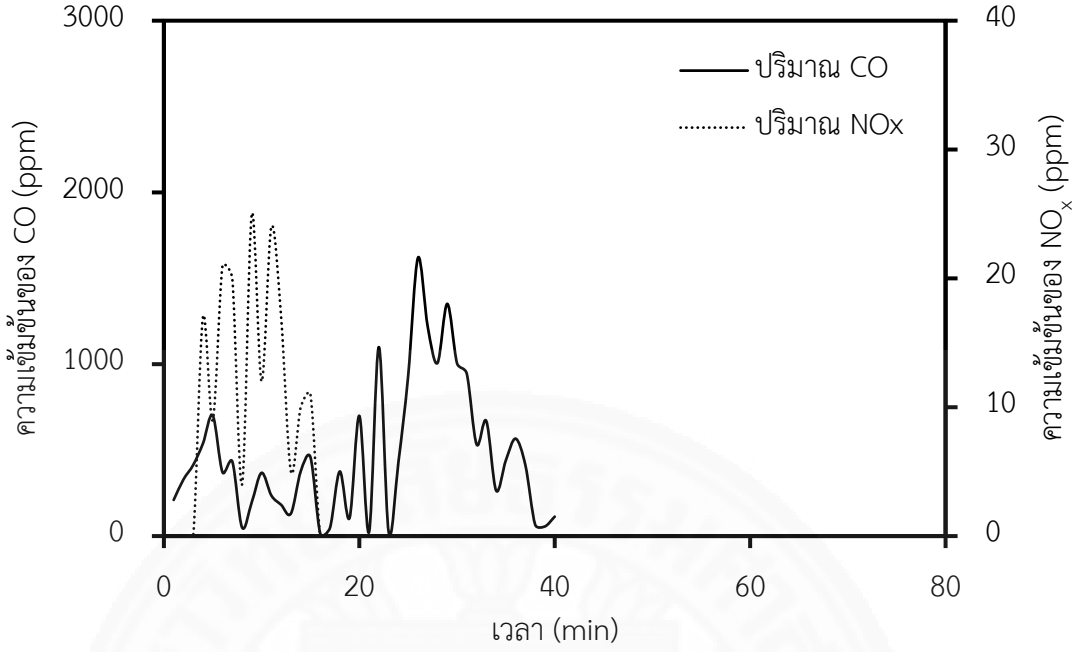
ภาพที่ 4.24 การปล่อยก๊าซมลพิษของการเผาไหม้ถ่านกะลาอัดไร้ควันปริมาณ 1,000 g ในเตาทรงกรวย



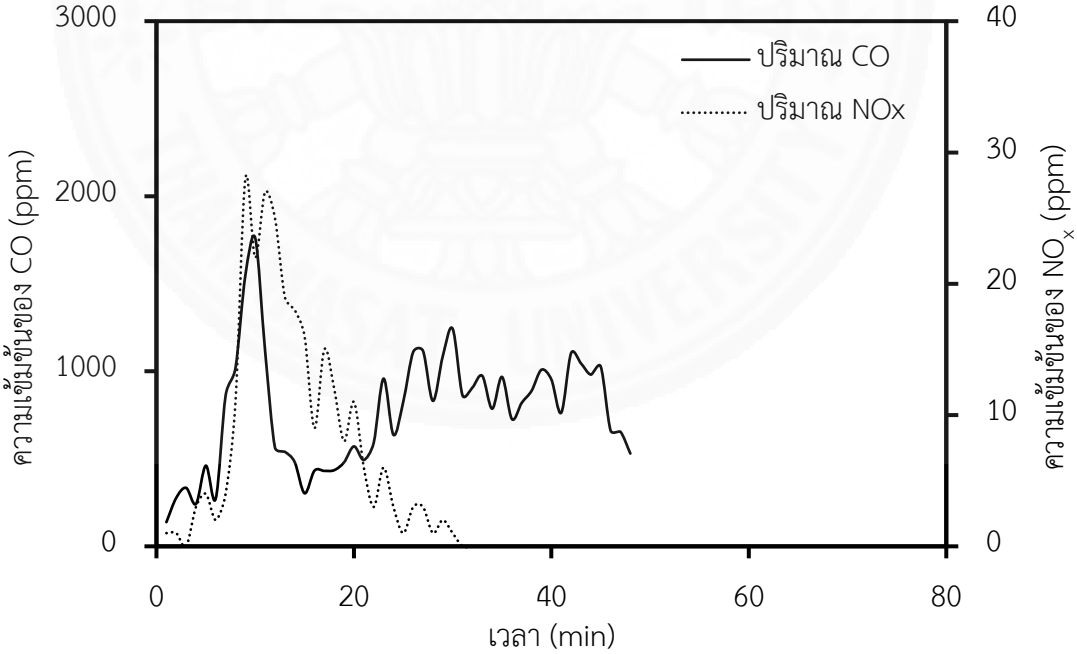
ภาพที่ 4.25 การปล่อยก๊าซมลพิษของการเผาไหม้ถ่านกะลาอัดไร้ควันปริมาณ 800 g ในเตาทรงกรวย



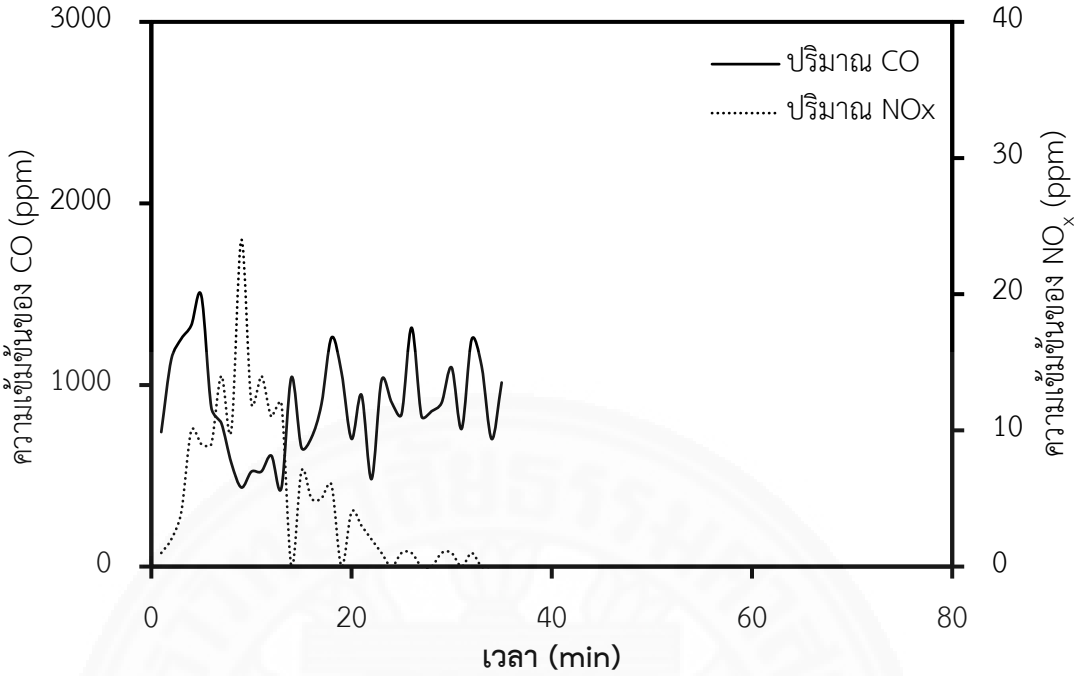
ภาพที่ 4.26 การปล่อยก๊าซมลพิษของการเผาไหม้ถ่านกะลาอัดไร้ควันปริมาณ 600 g ในเตาทรงกรวย



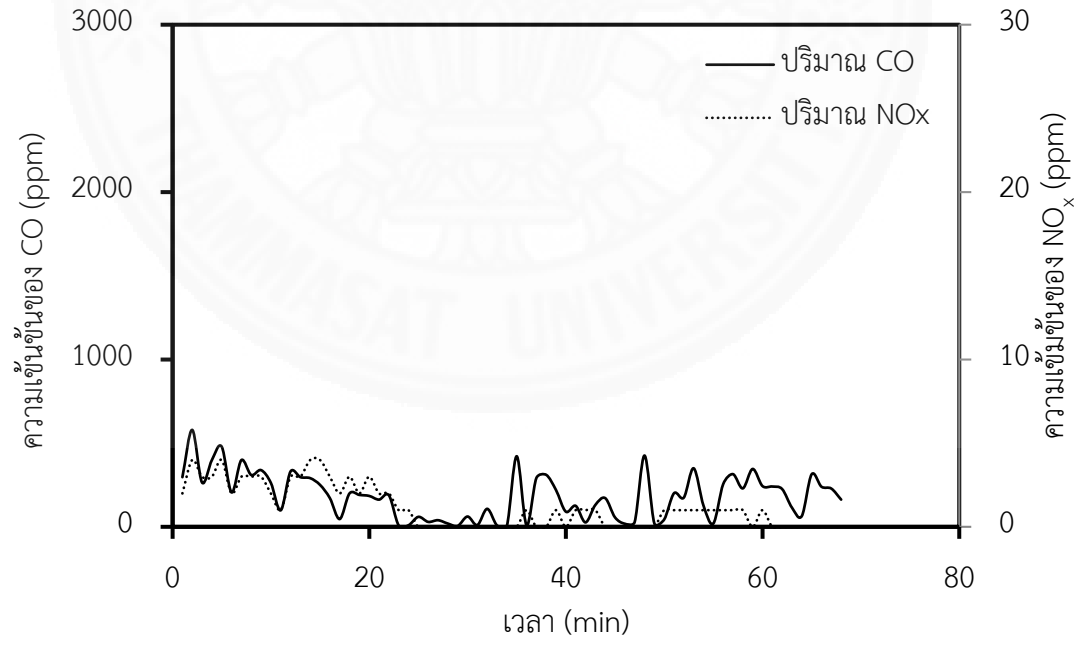
ภาพที่ 4.27 การปล่อยก๊าซมลพิษของการเผาไหม้ถ่านไม้โกงกางปริมาณ 1,000 g ในเตาทรงกรวย



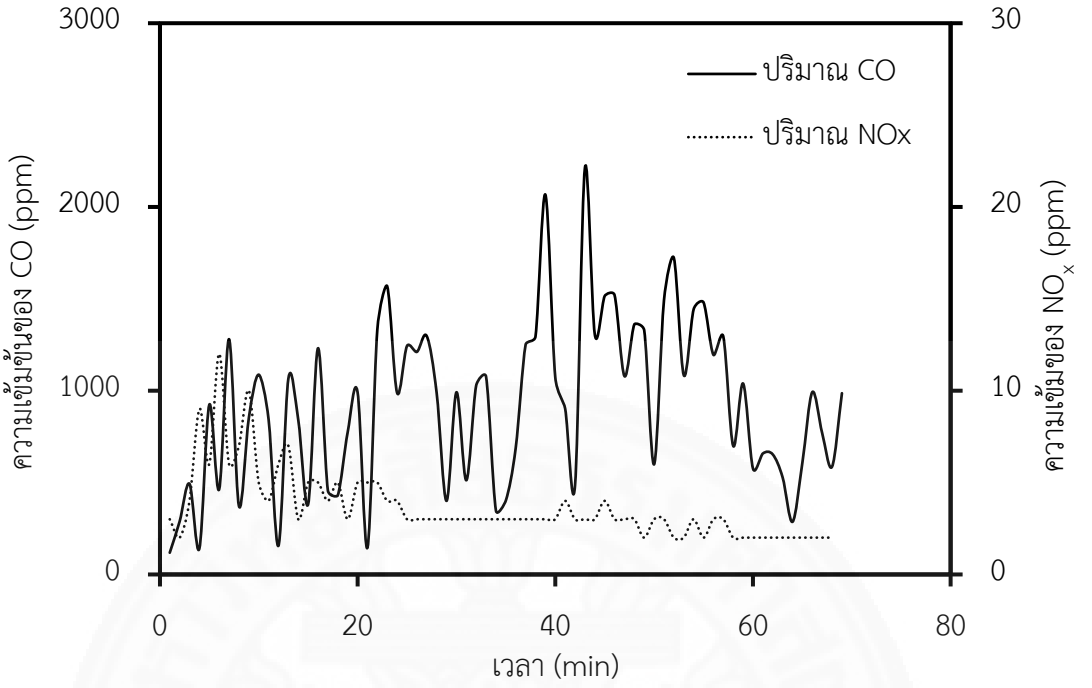
ภาพที่ 4.28 การปล่อยก๊าซมลพิษของการเผาไหม้ถ่านไม้โกงกางปริมาณ 800 g ในเตาทรงกรวย



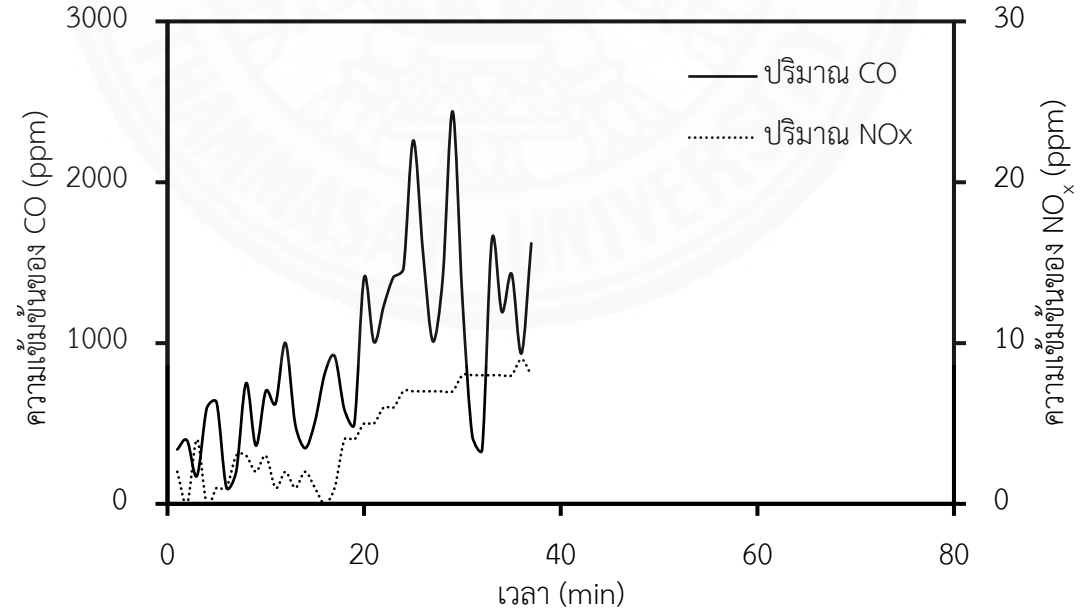
ภาพที่ 4.29 การปล่อยก๊าซมลพิษของการเผาไหม้ถ่านไม้โกงกางปริมาณ 600 g ในเตาทรงกรวย



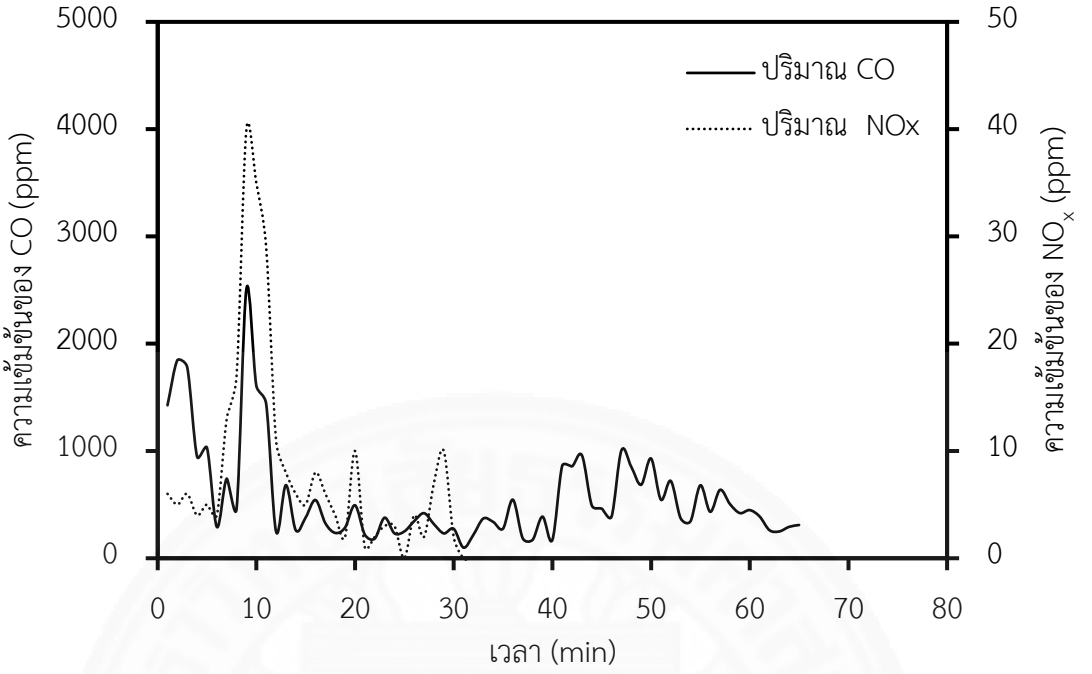
ภาพที่ 4.30 การปล่อยก๊าซมลพิษของการเผาไหม้ถ่านกะลาอัดไร้ควันปริมาณ 1,000 g ในเตาประสิทธิภาพสูง



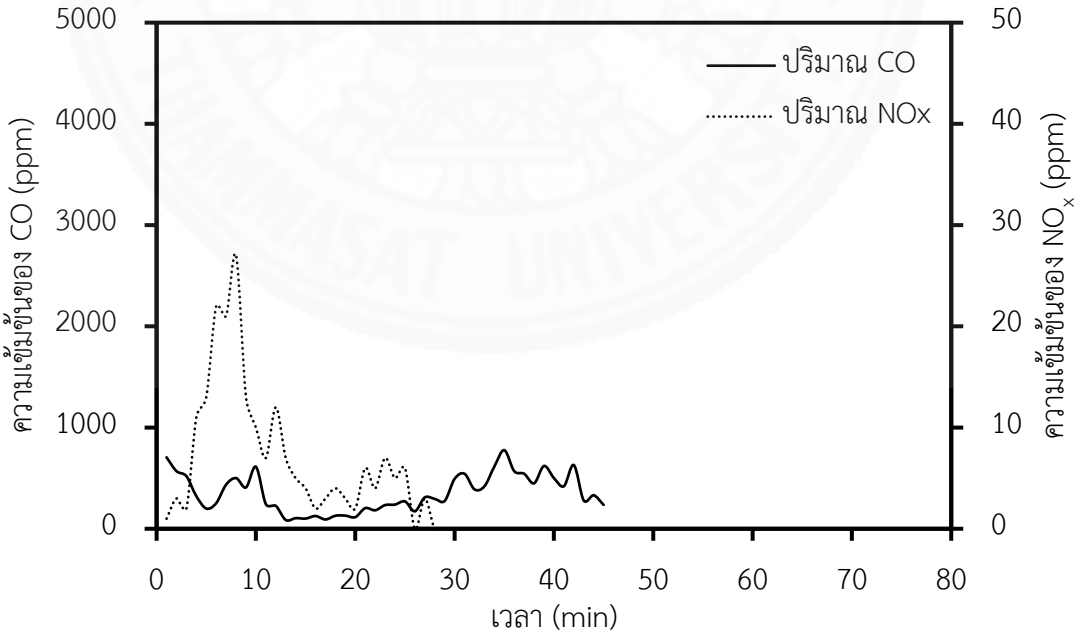
ภาพที่ 4.31 การปล่อยก๊าซมลพิษของการเผาไหม้ถ่านกะลาอัดไร้ควันปริมาณ 800 g ในเตาประสิทธิภาพสูง



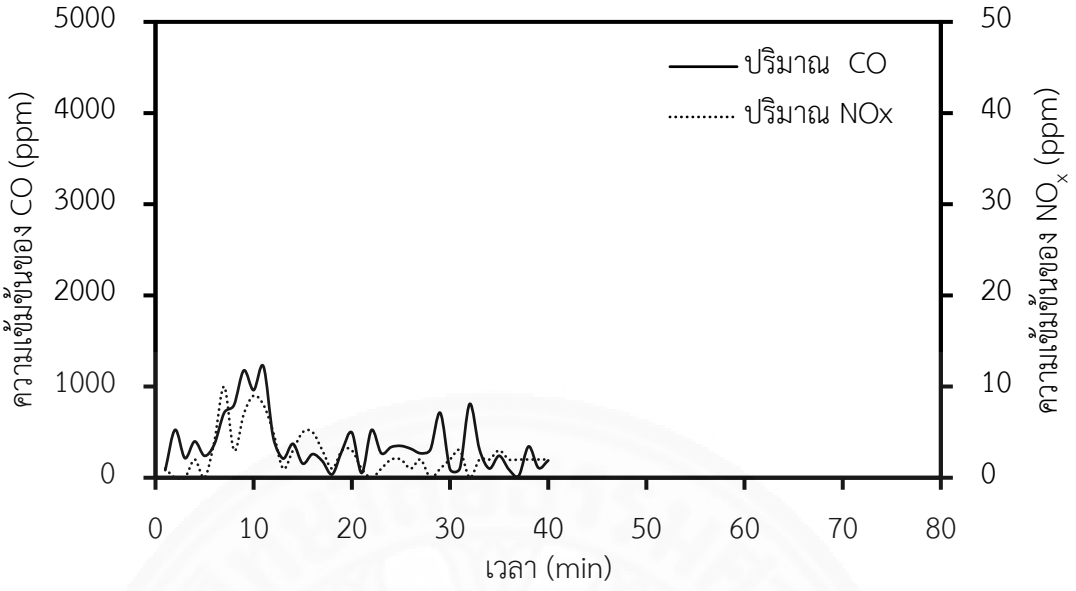
ภาพที่ 4.32 การปล่อยก๊าซมลพิษของการเผาไหม้ถ่านกะลาอัดไร้ควันปริมาณ 600 g ในเตาประสิทธิภาพสูง



ภาพที่ 4.33 การปล่อยก๊าซมลพิษของการเผาไหม้ถ่านไม้โกงกางปริมาณ 1,000 g ในเตาประสิทธิภาพสูง



ภาพที่ 4.34 การปล่อยก๊าซมลพิษของการเผาไหม้ถ่านไม้โกงกางปริมาณ 800 g ในเตาประสิทธิภาพสูง



ภาพที่ 4.35 การปล่อยก๊าซมลพิษของการเผาไหม้ถ่านไม้โกงกางปริมาณ 600 g ในเตาประสิทธิภาพสูง

เมื่อพิจารณาภาพที่ 4.18-4.35 ในกรณีของลักษณะการปล่อยก๊าซคาร์บอน-มอนอกไซด์ (CO) พบว่า ในช่วงแรกมีการปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ในปริมาณที่ต่ำ แต่จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนถึงจุดที่น้ำเดือด หลังจากนั้น จะค่อยๆ ลดลง

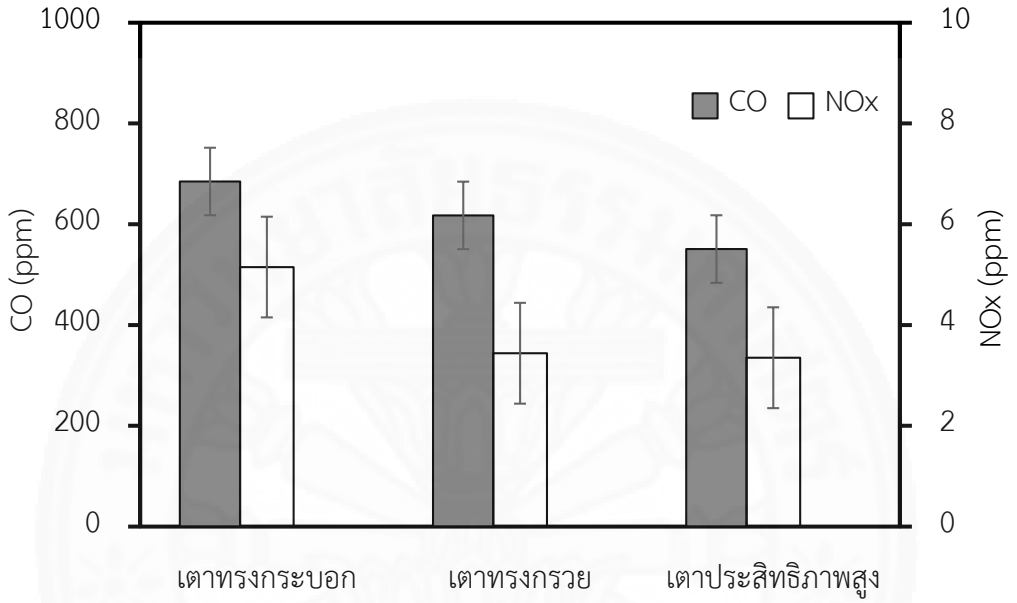
ส่วนลักษณะการปล่อยของออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) พบว่า ส่วนใหญ่มีการปล่อยออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) ในระดับที่สูงในช่วงแรก และจะค่อยๆ ลดลงเรื่อยๆ จนถ่านไม้ราไฟ เช่นเดียวกับก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

เมื่อนำข้อมูลการทดลองจากภาพที่ 4.18-4.35 มาหาค่าเฉลี่ยตามแบบของเตาหุงต้ม ชนิดของถ่านไม้ และปริมาณของถ่านไม้ พบว่า เป็นไปดังแสดงในภาพที่ 4.36, 4.37, และ 4.38 ตามลำดับ

จากภาพที่ 4.36 พบว่า เตาทรงกระบอกมีค่าเฉลี่ยของการปล่อย CO สูงสุด โดยมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 659-710 ppm รองลงมา คือ เตาทรงกรวย และเตาประสิทธิภาพสูง ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 594-641 และ 521-581 ppm ตามลำดับ

เหตุผลที่ทำให้เตาประสิทธิภาพสูงมีค่าเฉลี่ยของการปล่อย CO น้อยที่สุด น่าจะเป็นเพราะการออกแบบเตาที่มีลักษณะที่เอื้ออำนวยต่อการเผาไหม้ การเผาไหม้จึงค่อนข้างสมบูรณ์และมีประสิทธิภาพสูง และในช่วงระยะเวลาที่ใช้งาน เตาประสิทธิภาพสูงจะมีอุณหภูมิของก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้ที่สูงกว่าของเตาทรงกรวยและเตาทรงกระบอก ดังแสดงในภาพที่ 4.1-4.9 อุณหภูมิที่สูงขึ้นจะแปรผกผันกับปริมาณ CO ที่ปล่อยออกมา

เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยของการปล่อย NO_x พบว่า เตาทุกชนิดมีค่าเฉลี่ยของการปล่อย NO_x ที่ใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตาม สามารถเรียงลำดับจากมากไปหาน้อยได้เป็น เตาทรงกระบอก เตาทรงกรวย และเตาประสิทธิภาพสูง โดยมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 1.9-6.7, 1.3-5.5, และ 0.9-5.3 ppm ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 4.36

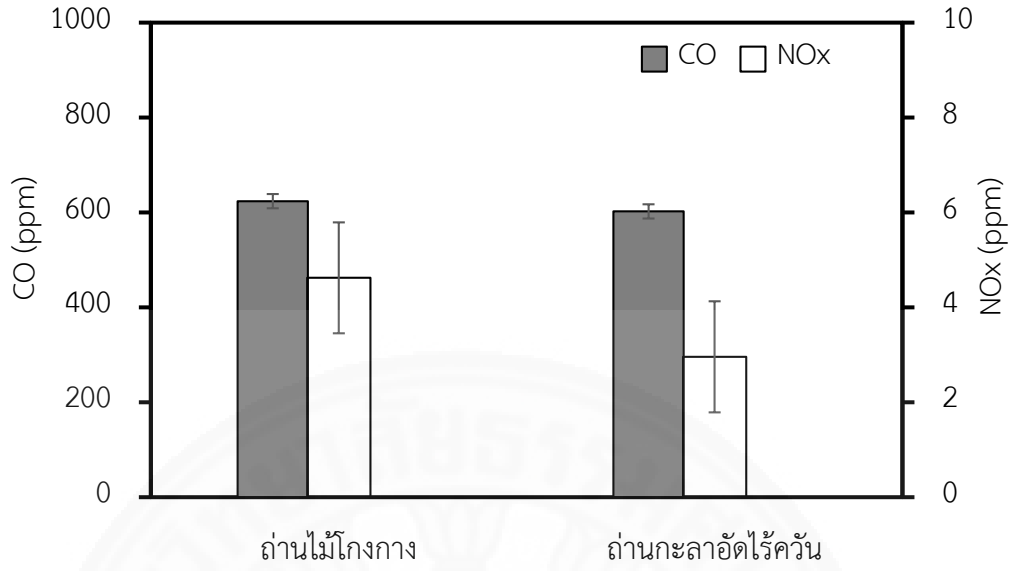


ภาพที่ 4.36 ค่าเฉลี่ยของ CO และ NO_x สำหรับเตาหุงต้มชนิดต่างๆ

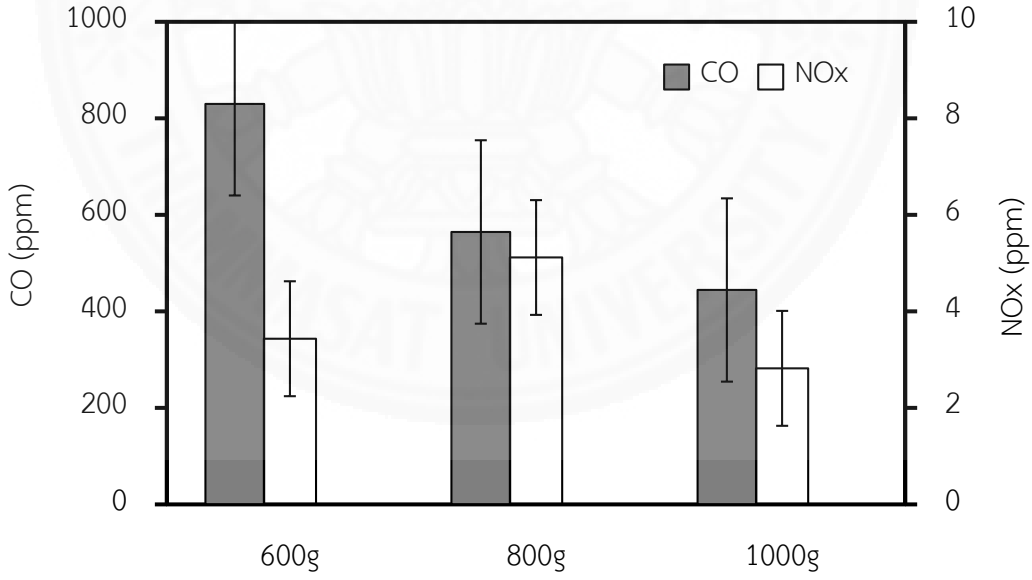
จากภาพที่ 4.37 ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของค่าความเข้มข้นของ CO และ NO_x ของถ่านไม้ทั้ง 2 ชนิด คือ ถ่านไม้โกงกางและถ่านกะลาอัดไร้ควัน พบว่า ถ่านไม้ทั้ง 2 ชนิดมีปริมาณการปล่อย CO ใกล้เคียงกัน โดยมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 596-632 และ 579-626 ppm สำหรับถ่านไม้โกงกางและถ่านกะลาอัดไร้ควัน ตามลำดับ

และเมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยของการปล่อย NO_x พบว่า ถ่านไม้โกงกางมีค่าเฉลี่ยของการปล่อย NO_x สูงกว่าของถ่านกะลาอัดไร้ควัน โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 2.7-6.5 และ 0.2-4.0 ppm ตามลำดับ

การปล่อย NO_x ที่สูงกว่าของถ่านไม้โกงกางเป็นผลจากการที่ถ่านไม้โกงกางมีอุณหภูมิเฉลี่ยของก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้สูงกว่าถ่านกะลาอัดไร้ควัน คือ ดังแสดงในภาพที่ 4.1-4.9 ซึ่งอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะแปรผันตรงกับปริมาณ NO_x ที่ปล่อยออกมา



ภาพที่ 4.37 ค่าเฉลี่ยของ CO และ NO_x ของถ่านไม้ชนิดต่างๆ



ภาพที่ 4.38 ค่าเฉลี่ยของ CO และ NO_x สำหรับถ่านไม้ปริมาณต่างๆ

จากภาพที่ 4.38 ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของค่าความเข้มข้นของ CO และ NO_x ของถ่านไม้ทั้ง 3 ปริมาณ คือ ปริมาณ 600, 800, และ 1,000 g พบว่า ค่าการปล่อย CO ในถ่านไม้ทั้ง 3 ปริมาณ มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ นั่นคือ ที่ปริมาณถ่านไม้ 600 g มีค่าการปล่อย CO อยู่ในช่วง 690-970 ppm ที่ปริมาณถ่านไม้ 800 g มีค่าการปล่อย CO อยู่ในช่วง 330-490 ppm และที่ปริมาณถ่านไม้ 1,000 g มีค่าการปล่อย CO อยู่ในช่วง 500-630 ppm

สำหรับการปล่อย NO_x นั้น ที่ปริมาณถ่านไม้ 800 g มีการปล่อย NO_x สูงสุด คือ อยู่ในช่วง 4.8-5.3 ppm ขณะที่ปริมาณถ่านไม้ 600 และ 1,000 g มีการปล่อย NO_x ใกล้เคียงกัน (อยู่ในช่วงเดียวกัน) คือ อยู่ในช่วง 2.9-3.9 ppm และ 1.1-4.5 ppm ตามลำดับ

สาเหตุที่ถ่านไม้ปริมาณ 600 g มีค่าเฉลี่ยของ CO สูง น่าจะเป็นเพราะว่าปริมาณของถ่านไม้ 600 g อาจน้อยเกินไป ทำให้อุณหภูมิในการเผาไหม้ไม่สูงพอที่จะเกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ได้ ดังแสดงในภาพที่ 4.1-4.9 จึงทำให้เกิด CO ขึ้นมาก แต่เมื่อพิจารณาถ่านไม้ที่มีปริมาณ 800 และ 1,000 g ซึ่งน่าจะเพียงพอที่จะทำให้มีอุณหภูมิของการเผาไหม้ที่สูงพอที่จะทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ พบว่า ถ่านไม้ที่ปริมาณ 800 g มีค่าเฉลี่ย CO ต่ำกว่าของถ่านไม้ที่มีปริมาณ 1,000 g ซึ่งอาจเป็นเพราะถ่านไม้ที่ปริมาณ 800 g มีช่องว่างของถ่านไม้ในเตามากกว่าที่ปริมาณ 1,000 g ทำให้อากาศสัมผัสกับเชื้อเพลิงได้ดี จึงมีการปล่อย CO ลดลง

ในส่วนของการปล่อย NO_x ถ่านไม้ปริมาณ 800 g มีค่าเฉลี่ยของ NO_x สูง เป็นผลเนื่องมาจากที่ปริมาณถ่านไม้ 800 g มีช่องว่างที่เหมาะสม ดังที่กล่าวไว้แล้วข้างต้น ทำให้อากาศสัมผัสกับเชื้อเพลิงได้ดี การเผาไหม้จึงเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ อุณหภูมิของการเผาไหม้จึงสูง ดังแสดงในภาพที่ 4.1-4.9 เมื่ออุณหภูมิสูงจึงส่งผลให้การปล่อย NO_x สูงตามไปด้วย

เมื่อพิจารณาภาพรวมของผลของตัวแปรต่างๆ ที่ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้ อันได้แก่ เตาหุงต้มทั้ง 3 แบบ (เตาทรงกระบอก เตาทรงกรวย และเตาประสิทธิภาพสูง) ที่ใช้ปริมาณของถ่านไม้ต่างๆ กัน (600, 800, และ 1,000 g) สำหรับถ่านไม้โกงกางและถ่านกะลาอัดไร้ควัน ที่มีต่อระยะเวลาที่ใช้ในการจุดติดไฟของถ่านไม้ เวลาที่ใช้ในการทำให้น้ำเดือด และเวลารวมของการใช้งานทั้งหมด ต่อร้อยละการเผาไหม้สมบูรณ์ (% complete combustion) ต่อประสิทธิภาพการใช้งาน (% usage efficiency) และปริมาณ (หรือความเข้มข้น) ของการปล่อยก๊าซมลพิษ (CO และ NO_x) โดยให้ตัวแปรทุกตัวมีค่าน้ำหนักความสำคัญเท่ากัน มีผลการวิเคราะห์เป็นไปดังแสดงในตารางที่ 4.11

ทั้งนี้ มีเกณฑ์การให้คะแนนแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่

ในส่วนแรก คือ ผลตัวของแปรต่างๆ ที่มีต่อระยะเวลาที่ใช้ในการจุดติดไฟของถ่านไม้ และเวลาที่ใช้ในการทำให้น้ำเดือด ซึ่งจะให้ 3 คะแนน สำหรับตัวแปรที่ใช้ระยะเวลาน้อยที่สุด (คะแนนจะลดลงตามเวลาที่มากขึ้น) และเวลารวมของการใช้งานทั้งหมด ซึ่งจะให้ 3 คะแนน สำหรับตัวแปรที่ใช้ระยะเวลามากที่สุด (คะแนนจะลดลงตามเวลาที่น้อยลง)

ส่วนที่สอง คือ ผลตัวของแปรที่มีต่อร้อยละการเผาไหม้สมบูรณ์ (% complete combustion) และต่อประสิทธิภาพการใช้งาน (% usage efficiency) ซึ่งจะให้ 3 คะแนน สำหรับตัวแปรที่มี % complete combustion หรือ % usage efficiency ที่สูงที่สุด (คะแนนจะลดลงตาม % complete combustion หรือ % usage efficiency ที่ต่ำลง)

ส่วนสุดท้าย คือ ผลตัวของแปรที่มีต่อปริมาณ (หรือความเข้มข้น) ของการปล่อยก๊าซมลพิษ (CO และ NO_x) ซึ่งจะให้ 3 คะแนน สำหรับตัวแปรที่มีปล่อยก๊าซมลพิษ (CO และ NO_x) น้อยที่สุด (คะแนนจะลดลงตามปริมาณการปล่อยมลพิษที่เพิ่มขึ้น)

ผลการพิจารณาผลของตัวแปรต่างๆ ในภาพรวม เมื่อแบ่งตามแบบของเตา พบว่า เตาประสิทธิภาพสูงมีผลการประเมินที่ดีที่สุด คือมีคะแนน 17 คะแนน รองลงมาเป็นเตาทรงกรวย และเตาทรงกระบอก คือ มีคะแนน 13 และ 12 คะแนน ตามลำดับ แสดงว่า เตาประสิทธิภาพสูงมีคุณสมบัติที่ครอบคลุมหัวข้อที่ทำการประเมินเป็นส่วนใหญ่ นั่นคือ ใช้เวลาไม่มากในการจุดติดไฟและทำให้น้ำเดือด มี % usage efficiency ที่สูง และปล่อยก๊าซมลพิษ (CO และ NOx) ที่ต่ำกว่าเตาแบบอื่นๆ

ในส่วนชนิดของถ่านไม้ พบว่า ถ่านไม้โกงกางมีผลการประเมินที่ดีกว่าถ่านกะลาอัดไร้ควัน คือมีคะแนน 15 และ 13 คะแนน ตามลำดับ แสดงว่าถ่านไม้โกงกางมีคุณสมบัติที่ครอบคลุมหัวข้อที่ทำการประเมินมากกว่า นั่นคือ ใช้เวลาไม่มากในการจุดติดไฟและทำให้น้ำเดือด และมี % complete combustion และ % usage efficiency ที่สูงกว่า

สุดท้าย ในส่วนปริมาณของถ่านไม้ต่างๆ พบว่า ที่ปริมาณถ่านไม้ 800 และ 1,000 g มีผลการประเมินที่เท่ากัน คือ มีคะแนน 16 คะแนน ขณะที่ปริมาณถ่านไม้ 600 g มีคะแนน 10 คะแนน แสดงว่าที่ปริมาณถ่านไม้ 800 และ 1,000 g มีคุณสมบัติที่ครอบคลุมหัวข้อที่ทำการประเมินเป็นส่วนใหญ่ นั่นคือ ใช้เวลาไม่มากในการจุดติดไฟและทำให้น้ำเดือด มี % complete combustion และ % usage efficiency ที่สูง

ตารางที่ 4.11 ภาพรวมของผลการศึกษาของตัวแปรต่างๆ ที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ (ถ่านไม้ 2 ชนิด ที่ 3 ปริมาณของถ่านไม้ ในเตาหุงต้ม 3 แบบ)

ตัวแปรที่ศึกษา		เวลาที่ใช้ในการจุดติดเตาหุงต้ม			เวลาที่ใช้ในการทำให้น้ำเดือด			เวลาใช้งานเตาหุงต้มทั้งหมด			% complete combustion			% efficiency			ปริมาณของ CO			ปริมาณของ NO_x			ผลการประเมิน
		น้อย	กลาง	มาก	น้อย	กลาง	มาก	น้อย	กลาง	มาก	น้อย	กลาง	มาก	น้อย	กลาง	มาก	น้อย	กลาง	มาก	น้อย	กลาง	มาก	
ตัวแปร		3	2	1	3	2	1	1	2	3	1	2	3	1	2	3	3	2	1	3	2	1	
ประเภทของเตาหุงต้ม	1. เตาทรงกระบอก			✪			✪			✪			✪		✪				✪			✪	12
	2. เตาทรงกรวย		✪			✪			✪			✪		✪				✪			✪		13
	3. เตาประสิทธิภาพสูง	✪			✪			✪			✪					✪	✪			✪			17
ชนิดของถ่านไม้	1. ถ่านไม้โกงกาง	✪			✪			✪					✪			✪			✪			✪	15
	2. ถ่านกะลาอัดไร้ควัน			✪			✪			✪	✪			✪			✪			✪			13
ปริมาณของถ่านไม้	1. 600 g			✪			✪	✪					✪	✪					✪		✪		10
	2. 800 g	✪			✪				✪			✪			✪		✪					✪	16
	3. 1000 g		✪			✪				✪	✪					✪		✪		✪			16

4.3 ผลของก๊าซมลพิษจากการใช้งานเตาหุงต้มที่มีต่อสุขภาพของมนุษย์

ผลของการปล่อยก๊าซมลพิษ CO และ NO_x ของเตาหุงต้มทั้ง 3 แบบ (เตาทรงกระบอก เตาทรงกรวย และเตาประสิทธิภาพสูง) ที่ปริมาณของถ่านไม้ต่างๆ กัน (600, 800, และ 1,000 g) สำหรับถ่านไม้โกงกางและถ่านกะลาอัดไร้ควัน ที่มีต่อสุขภาพของมนุษย์ มีผลการวิเคราะห์เป็นไปดังแสดงในตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ผลของปริมาณการปล่อยก๊าซ CO และ NO_x ที่มีต่อสุขภาพของมนุษย์ โดยแบ่งตามแบบของเตาหุงต้มและชนิดของถ่านไม้

ก๊าซมลพิษที่ทำการศึกษา	ปริมาณความเข้มข้นของก๊าซมลพิษสูงสุดที่มนุษย์รับได้ และผลกระทบต่อสุขภาพที่เกิดขึ้นหากได้รับก๊าซมลพิษเป็นเวลานาน (ppm)		ปริมาณความเข้มข้นของก๊าซมลพิษจากการเผาไหม้ในเตาหุงต้มทั้ง 3 แบบ และ ถ่านไม้ 2 ชนิด (ppm)		ผลกระทบต่อสุขภาพของผู้ใช้ที่ปริมาณการปล่อยที่วัดได้ในงานวิจัยนี้
CO	690 [12,15] หมดสติภายใน 2 ชั่วโมง และเป็นอันตรายถึงชีวิตหลังจาก 3 ชั่วโมง	แบบของเตาหุงต้ม	• เตาทรงกระบอก	684.8	มีอาการหัวใจเต้นเร็วขึ้นผิดปกติ และเริ่มเต้นผิดจังหวะ จนถึงขั้นเป็นลม (หากได้รับก๊าซมลพิษติดต่อกันเป็นเวลาประมาณ 3 ชั่วโมง)
			• เตาทรงกรวย	617.4	
			• เตาประสิทธิภาพสูง	550.7	
		ชนิดของถ่านไม้	• ถ่านไม้โกงกาง	613.7	
			• ถ่านกะลาอัดไร้ควัน	602.3	
NO_x	200 [14-15] อาการปอดบวม หายใจไม่ออก ระบบหายใจล้มเหลว จนอาจเสียชีวิตได้	แบบของเตาหุงต้ม	• เตาทรงกระบอก	3.8	มีอาการแสบจมูกและระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจ
			• เตาทรงกรวย	3.4	
			• เตาประสิทธิภาพสูง	3.1	
		ชนิดของถ่านไม้	• ถ่านไม้โกงกาง	4.6	
			• ถ่านกะลาอัดไร้ควัน	2.1	

ความเข้มข้นของ CO และ NO_x ของเตาหุงต้มทั้ง 3 แบบ คือ เตาทรงกระบอก เตาทรงกรวย เตาประสิทธิภาพสูง และถ่านไม้ทั้ง 2 ชนิด คือ ถ่านไม้โกงกางและถ่านกะลาอัดไร้ควัน ซึ่งเฉลี่ยจากทั้งชนิดและปริมาณของถ่านที่ใช้ ดังแสดงในภาพที่ 4.36-4.38 พบว่า เตาทรงกระบอก เตาทรงกรวย และเตาประสิทธิภาพสูง มีค่าเฉลี่ยของการปล่อย CO อยู่ในช่วง 659-710, 594-641, และ 521-581 ppm ตามลำดับ ถ้าพิจารณาตามชนิดของถ่านไม้ พบว่า ถ่านไม้โกงกางและถ่านกะลาอัดไร้ควันมีค่าการปล่อย CO ในช่วง 596-623 และ 579-626 ppm ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่ามีค่าใกล้เคียง 690 ppm อันเป็นค่าสูงที่สุดที่มนุษย์รับได้ ดังนั้น จึงไม่ควรอยู่หน้าเตาติดต่อกันนานเป็นระยะเวลาเกินกว่า 2-3 ชั่วโมง มิเช่นนั้นอาจถึงขั้นหมดสติหรือเสียชีวิตได้ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.12

เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยของการปล่อย NO_x พบว่า เตาทุกแบบและถ่านไม้ทุกชนิดมีค่าเฉลี่ยของการปล่อย NO_x ที่ใกล้เคียงกัน โดยที่เตาทรงกระบอก และเตาทรงกรวย และเตาประสิทธิภาพสูง มีค่าการปล่อย NO_x ในช่วง 1.9-6.7, 1.3-5.5, และ 0.9-5.3 ppm ตามลำดับและเมื่อพิจารณาตามชนิดของถ่านไม้ พบว่า การปล่อย NO_x ของถ่านไม้โกงกางและถ่านกะลาอัดไร้ควันมีค่าในช่วง 2.7-6.5 และ 0.2-4.0 ppm ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าค่าเฉลี่ยของการปล่อย NO_x มีปริมาณนี้ที่ส่งผลให้เกิดอาการแสบจมูกและระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.12

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

จากการศึกษาผลของแบบของเตาหุงต้ม (เตาทรงกระบอก เตาทรงกรวย และเตาประสิทธิภาพสูง) ชนิดของถ่านไม้ (ถ่านไม้โกงกางและถ่านกะลาอัดไร้ควัน) และปริมาณของถ่านไม้ (600, 800, และ 1,000 g) ที่มีต่ออุณหภูมิการเผาไหม้ ระยะเวลาที่ใช้ในการจุดติดไฟของถ่านไม้ เวลาที่ใช้ในการทำให้น้ำเดือด และเวลารวมของการใช้งานทั้งหมด ต่อร้อยละการเผาไหม้สมบูรณ์ (% complete combustion) ต่อประสิทธิภาพการใช้งาน (% usage efficiency) ต่อลักษณะการปล่อยและปริมาณ (หรือความเข้มข้น) ของก๊าซมลพิษ (CO และ NO_x) จากเตาหุงต้ม สามารถสรุปผลการทดลอง ได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 ผลการศึกษาในด้านอุณหภูมิของการเผาไหม้

เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิการเผาไหม้จากชนิดถ่านไม้ พบว่า โดยรวมแล้วถ่านไม้โกงกางมีอุณหภูมิการเผาไหม้สูงกว่าของถ่านกะลาอัดไร้ควัน โดยมีค่าอยู่ในช่วง 260-680 และ 250-450 °C ตามลำดับ

ในแง่แบบของเตา พบว่า อุณหภูมิการเผาไหม้ของเตาหุงต้มทั้ง 3 แบบ สามารถเรียงตามลำดับจากมากไปหาน้อย ได้เป็นเตาประสิทธิภาพสูง เตาทรงกรวย และเตาทรงกระบอก ตามลำดับ โดยมีค่าอยู่ในช่วง 280-680, 260-660, และ 250-480 °C ตามลำดับ

ในเชิงของปริมาณถ่านไม้ พบว่า อุณหภูมิการเผาไหม้สามารถเรียงตามลำดับจากมากไปหาน้อย ได้เป็น ปริมาณถ่านไม้ 1,000, 800, และ 600 g มีค่าอุณหภูมิการเผาไหม้อยู่ในช่วง 500-700, 300-600, และ 300-400 °C ตามลำดับ

5.1.2 ผลการศึกษาในด้านรูปแบบในการใช้งานเตาหุงต้ม ซึ่งเป็นระยะเวลาในช่วงต่างๆ การใช้งานเตาหุงต้ม

โดยสามารถแบ่งการพิจารณาได้เป็น 3 ช่วง คือ

(1) ช่วงเวลาที่ใช้ในการจุดติดไฟ พบว่า ถ่านไม้โกงกางใช้เวลาน้อยกว่าของถ่านกะลาอัดไร้ควัน คือ อยู่ในช่วง 2.50×10^{-3}-7.00×10^{-3} และ 6.67×10^{-3}-13.33×10^{-3} min/g ตามลำดับ ในส่วนของแบบของเตาหุงต้ม สามารถเรียงตามลำดับจากน้อยไปหามาก ได้เป็น เตา

ประสิทธิภาพสูง เตาทรงกระบอก และเตาทรงกรวย มีระยะเวลาการจุดติดไฟอยู่ในช่วง 2.50×10^{-3}-7.00×10^{-3}, 3.00×10^{-3}-13.33×10^{-3}, และ 6.67×10^{-3}-10.00×10^{-3} min/g ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาตามปริมาณถ่านไม้ที่ใช้ พบว่า ปริมาณถ่านไม้ 600 g มีการใช้เวลามากที่สุด รองลงมาเป็นปริมาณถ่าน 800 และ 1,000 g ตามลำดับ คือ อยู่ในช่วง 8.33×10^{-3}-10.00×10^{-3} , 3.75×10^{-3}-6.25×10^{-3}, และ 3.00×10^{-3}-6.00×10^{-3} min/g ตามลำดับ

(2) ช่วงเวลาที่น้ำเดือด พบว่า ถ่านไม้โกงกางใช้เวลาน้อยกว่าของถ่านกะลาอัดไร้ควัน คือ อยู่ในช่วง 5.00×10^{-3}-10.00×10^{-3} และ 6.25×10^{-3}-14.00×10^{-3} min/g ตามลำดับ ในส่วนของแบบของเตาหุงต้มสามารถเรียงตามลำดับจากน้อยไปหามาก ได้เป็น เตาประสิทธิภาพสูง เตาทรงกรวย และเตาทรงกระบอก มีระยะเวลาที่ทำให้น้ำเดือดอยู่ในช่วง 6.25×10^{-3}-14.00×10^{-3}, 7.00×10^{-3}-25.00×10^{-3}, และ 7.00×10^{-3}-31.67×10^{-3} min/g ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาตามปริมาณถ่านไม้ที่ใช้ พบว่า ปริมาณถ่านไม้ 600 g มีการใช้เวลามากที่สุด รองลงมาเป็นปริมาณถ่านไม้ 800 และ 1,000 g ตามลำดับ โดยมีค่าอยู่ในช่วง 15.00×10^{-3}-26.67×10^{-3}, 8.75×10^{-3}-11.25×10^{-3}, และ 8.00×10^{-3}-11.00×10^{-3} min/g ตามลำดับ

(3) ช่วงเวลาการใช้งานทั้งหมด พบว่า ถ่านไม้โกงกางใช้เวลาน้อยกว่าของถ่านกะลาอัดไร้ควัน คือ อยู่ในช่วง 63.33×10^{-3}-93.00×10^{-3} และ 86.67×10^{-3}-119.00×10^{-3} min/g ตามลำดับ ในส่วนของแบบของเตาหุงต้มสามารถเรียงตามลำดับจากน้อยไปหามาก ได้เป็น เตาประสิทธิภาพสูง เตาทรงกรวย และเตาทรงกระบอก มีระยะเวลาการใช้งานทั้งหมดอยู่ในช่วง 60.00×10^{-3}-90.00×10^{-3}, 60.00×10^{-3}-119.00×10^{-3}, และ 71.67×10^{-3}-146.25×10^{-3} min/g ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาตามปริมาณถ่านไม้ที่ใช้ พบว่า ปริมาณถ่านไม้ 600 g มีการใช้เวลาน้อยที่สุด รองลงมาเป็นปริมาณถ่าน 800 และ 1,000 g คือ อยู่ในช่วง 41.67×10^{-3}-71.67×10^{-3}, 82.50×10^{-3}-97.50×10^{-3}, และ 90.00×10^{-3}-106.00×10^{-3} min/g ตามลำดับ

5.1.3 ผลการศึกษาในด้านร้อยละการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ (% complete combustion)

ผลของ % complete combustion ของเตาหุงต้มทั้ง 3 แบบ สามารถเรียงตามลำดับจากน้อยไปหามาก ได้เป็น เตาประสิทธิภาพสูง เตาทรงกรวย และเตาทรงกระบอก ตามลำดับ โดยมีค่าประมาณร้อยละ 90-100, 91-100, และ 94-100 ตามลำดับ

ในแง่ชนิดของถ่านไม้ พบว่า ถ่านไม้โกงกางมี % complete combustion สูงกว่าถ่านกะลาอัดไร้ควัน โดยมีค่าประมาณร้อยละ 100 และ 88-96 ตามลำดับ

ในเชิงของปริมาณถ่านไม้ พบว่า สามารถเรียงตามลำดับจากน้อยไปหามากได้เป็น ปริมาณถ่านไม้ 1000, 800, และ 600 g มีค่า % complete combustion ประมาณร้อยละ 88-98, 89-98, และ 100 ตามลำดับ

5.1.4 ผลการศึกษาในด้านร้อยละประสิทธิภาพการใช้งาน (% usage efficiency)

เมื่อพิจารณาแบบของเตาที่มีต่อประสิทธิภาพการใช้งาน (% usage efficiency) พบว่า เตาประสิทธิภาพสูงมีประสิทธิภาพการใช้งานสูงที่สุด รองลงมา คือเตาทรงกระบอกและเตาทรงกรวย ตามลำดับ โดยมีค่าประมาณร้อยละ 25-31, 21-28, และ 15-22 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาปริมาณถ่านไม้ที่ใช้ที่มีต่อประสิทธิภาพการใช้งาน พบว่า ปริมาณของถ่านไม้ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการใช้งาน นั่นคือ ถ่านไม้ในทุกปริมาณมีค่าประสิทธิภาพการใช้งานใกล้เคียงกัน โดยอยู่ในช่วงร้อยละ 22-23

และเมื่อพิจารณาชนิดของถ่านไม้ที่มีต่อประสิทธิภาพการใช้งาน พบว่า ชนิดของถ่านไม้แทบไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการใช้งานเช่นเดียวกัน นั่นคือ ถ่านไม้ทั้ง 2 ชนิดมีค่าประสิทธิภาพการใช้งานใกล้เคียงกัน โดยอยู่ในช่วงร้อยละ 22-24

5.1.5 ผลการศึกษาในด้านลักษณะการปล่อยและปริมาณของก๊าซมลพิษ (CO และ NO_x)

ผลของลักษณะการปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) นั้น ในช่วงแรกมีการปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ในปริมาณที่ต่ำ แต่จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงจุดที่น้ำเดือด หลังจากนั้น (ในช่วงท้ายๆ) จะค่อยๆ ลดลง ในส่วนลักษณะของออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) พบว่าส่วนใหญ่มีการปล่อยออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) ในระดับที่สูงในช่วงแรก และจะค่อยๆ ลดลงจนถ่านไม้ราไฟ

เมื่อพิจารณาถึงแบบของเตาหุงต้มที่มีต่อปริมาณการปล่อยก๊าซมลพิษ พบว่าเตาทรงกระบอก เตาทรงกรวย และเตาประสิทธิภาพสูง มีปริมาณการปล่อย CO ในช่วง 659-710, 594-641, และ 521-581 ppm ตามลำดับแต่สำหรับ NO_x พบว่า แบบของเตาหุงต้มไม่มีผลต่อค่าเฉลี่ยของการปล่อย NO_x มากนัก คือ มีค่าอยู่ในช่วง 0.9-6.7 ppm

เมื่อพิจารณาปริมาณถ่านไม้ที่มีต่อปริมาณการปล่อยก๊าซมลพิษ พบว่า ที่ปริมาณถ่านไม้ 600 g มีค่าเฉลี่ยของการปล่อย CO มากที่สุด รองลงมาคือที่ปริมาณ 1,000 และ 800 g ตามลำดับ โดยมีค่าในช่วง 690-970, 500-630, และ 330-490 ppm ตามลำดับ แต่สำหรับ NO_x พบว่า ที่ปริมาณ 800 g การปล่อย NO_x สูงสุด รองลงมาคือ ที่ปริมาณ 600 และ 1,000 g มีค่าอยู่ในช่วง 4.8-5.3, 2.9-3.9, และ 1.1-4.5 ppm ตามลำดับ

และเมื่อพิจารณาชนิดของถ่านไม้ที่มีต่อปริมาณการปล่อยก๊าซมลพิษ พบว่าถ่านไม้โกงกางและถ่านกะลาอัดไร้ควันมีค่าเฉลี่ยของการปล่อย CO ไม่ต่างกันมากนัก คือ มีค่าอยู่ในช่วง 602-614 ppm แต่การปล่อย NO_x ของถ่านไม้โกงกางมีค่าสูงกว่าของถ่านกะลาอัดไร้ควัน โดยมีค่าอยู่ในช่วง 2.7-6.5 และ 0.2-4.0 ppm ตามลำดับ

5.1.6 ผลการศึกษาในด้านผลกระทบที่มีต่อสุขภาพของมนุษย์ที่มาจากการปล่อยก๊าซมลพิษจากการใช้งานเตาหุงต้ม

ปริมาณการปล่อย CO มีค่าอยู่ในช่วง 521-710 ppm ซึ่งที่ปริมาณระดับนี้ส่งผลให้เกิดอาการ คลื่นไส้ อาเจียน วิงเวียนศีรษะอย่างรุนแรง มีอาการหัวใจเต้นเร็วขึ้นผิดปกติและเริ่มเต้นผิดจังหวะ จนถึงหมดสติและเสียชีวิตได้ หากได้รับในปริมาณนี้ที่เวลานานเกินกว่า 3 ชั่วโมง

เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยของการปล่อย NO_x พบว่า ปริมาณการปล่อย NO_x มีค่าในช่วง 2.1-4.6 ppm ซึ่งในปริมาณนี้จะส่งผลให้เกิดอาการแสบจมูกและระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจ

5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการทำวิจัยในอนาคต

เพื่อให้การศึกษาเรื่องการเผาไหม้และการปล่อยก๊าซมลพิษของถ่านไม้ในเตาหุงต้มในครัวเรือนแบบต่างๆ สอดคล้องกับรูปแบบการใช้งานจริงมากขึ้น จึงควรทำศึกษาเพิ่มเติม ดังนี้

5.2.1 ควรทำการทดสอบในที่อับอากาศ เพื่อศึกษารูปแบบการปล่อยก๊าซมลพิษ อัตราการเผาไหม้ และประสิทธิภาพการใช้งาน ที่เหมาะสม และ/หรือ คล้ายกับการใช้เตาของชาวบ้านในชนบท ซึ่งมักทำการหุงต้มในห้องครัวแคบๆ

5.2.2 ควรมีการศึกษาการปล่อยของมลพิษอื่นๆ ด้วย เช่น สารประกอบไฮโดรเจนคาร์บอน (unburned hydrocarbon) สารจำพวกไดออกซิน (dioxin) และเขม่า (soot) เป็นต้น

5.2.3 ควรมีการศึกษาการใช้งานเตาหุงต้มในรูปแบบต่อเนื่องเป็นระยะเวลานาน เพื่อให้สอดคล้องกับการใช้งานเพื่อการค้า ที่ต้องอยู่หน้าเตาและสูดดมก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้ตลอดทั้งวัน

รายการอ้างอิง

1. ความเป็นมาของเตาอั้งโล่ [อินเทอร์เน็ต]. นครปฐม: กลุ่มชุมชนหมู่บ้านภูมิ; 2556. [สืบค้นเมื่อวันที่ 26 ธ.ค. 2556]. จาก: http://www.otoptoday.com/wisdom/212/เตาอั้งโล่ (บ้านภูมิ).

2. ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์-ก๊าซอันตรายที่มองไม่เห็น [อินเทอร์เน็ต]. กรุงเทพฯ: ศูนย์วิจัยและพัฒนาการป้องกันและจัดการภัยพิบัติ, สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์; 2555. [สืบค้นเมื่อวันที่ 19 ธ.ค. 2557]. จาก: http://dpm.nida.ac.th/main/index.php/articles/chemical-hazards/item/124-ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์-ก๊าซอันตรายที่มองไม่เห็น.

3. ข้อมูลทั่วไปและอันตรายที่เกิดจากก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) [อินเทอร์เน็ต]. 2553. สืบค้นเมื่อวันที่ 19 ธ.ค. 2557]. จาก: http://www.thaieditorial.com/ข้อมูลทั่วไปและอันตราย.

4. พูนศักดิ์ สักกทัตติยกุล. ปฏิกิริยาเคมีในชีวิตประจำวัน [อินเทอร์เน็ต]. 2552. [สืบค้นเมื่อวันที่ 19 ธ.ค. 2557]. จาก: http://www.thaigoodview.com/node/19702.

5. กรมพลังงานพัฒนาทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. รายงานพลังงานของประเทศไทย 2557: [กรุงเทพฯ]: 2558.

6. บัญญัติ สีสม, มาร์คัส เอ็ม เชอร์แมน. การประชุมสัมมนาทางวิชาการเรื่องเตาเศรษฐกิจและเชื้อเพลิงถ่าน: ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับเตาหุงต้มและเชื้อเพลิงที่ใช้, กรุงเทพฯ: กระทรวงศึกษาธิการ, สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี; 2524.

7. การใช้เตาถ่าน [อินเทอร์เน็ต]. 2551. [สืบค้นเมื่อวันที่ 19 ธ.ค. 2557]. จาก: http://www.geocities.ws/justsaveourworld/howto/howto_2charcoalbrazier.htm.

8. สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. ถ่าน: การผลิตที่ถูกวิธีและประโยชน์, สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, , [กรุงเทพฯ]: 2544.

9. บุศยรัตน์ พันธ์เครือบุตร. ไม้ฟืนและถ่านไม้ [อินเทอร์เน็ต]. 2545. [สืบค้นเมื่อวันที่ 28 ส.ค. 2556]. จาก: http://www.school.net.th/library/create-web/1,000/science/1,0000-6478.html.

10. คุณสมบัติของถ่านไม้ [อินเทอร์เน็ต]. 2552. [สืบค้นเมื่อวันที่ 26 ธ.ค. 2557]. จาก: http://www.charcoalthai.com/index.php.

11. กัญจนา บุณยเกียรติ. เชื้อเพลิงและการเผาไหม้. พิมพ์ครั้งที่ 1. [กรุงเทพฯ]: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2544.

12. คาร์บอนมอนนอกไซด์ (Carbon monoxide: CO) [อินเทอร์เน็ต]. 2557. [สืบค้นเมื่อวันที่ 1 ม.ค. 2558]. จาก: http://hpe4.anamai.moph.go.th/hia/co.php.

13. สมรัฐ เกิดสุวรรณ. การเผาไหม้และการควบคุมมลพิษ. พิมพ์ครั้งที่ 1. [ปทุมธานี]: สำนักพิมพ์สกายบุ๊กส์; 2549.

14. ออกไซด์ของไนโตรเจน (Oxides of nitrogen: NOx) [อินเทอร์เน็ต]. 2557. [สืบค้นเมื่อวันที่ 1 ม.ค. 2558]. จาก: http://hpe4.anamai.moph.go.th/hia/nox.php.

15. มลพิษทางอากาศที่สำคัญ [อินเทอร์เน็ต]. 2549. [สืบค้นเมื่อวันที่ 1 ม.ค. 2558]. จาก: http://www.thaigoodview.com/node/47289.

16. Bailis R, Ogle D, Still D, Smith KR, Edwards R. The water boiling test (WBT) version 1.5: Report Submitted to University of California-Berkeley. USA: 2009.

17. Jetter JJ, Kariher P. Solid-fuel household cook stoves: Characterization of performance and emissions. Biomass and Bioenergy. 2008;33:294-305.

18. Bhattacharya SC, Albina DO, Abdul-Salam P. Emission factors of wood and charcoal-fired cook-stoves. Biomass and Bioenergy. 2002;23:435-469.

19. Bhattacharya SC, Albina DO, Abdul-Salam P. Effects of selected parameters on performance and emission of biomass-fired cook stoves. Biomass and Bioenergy. 2002;23:387-395.

20. Zhang J, Smith KR, Uma R, Ma Y, Kishore VVN, Lata K, et al. Carbon monoxide from cook stoves in developing countries 1. Emission factors. Chemosphere: Global Change. 1999;1:353-366.

21. Gupta S, Saksena S, R.Shankar V, Joshi V. Emission factors and thermal efficiencies of cooking biofuels from five countries. Biomass and Bioenergy. 1998; 14:547-559.

22. Volunteers in Technical Assistance (VITA). Testing the efficiency of wood-burning cook-stoves: International standards. Virginia, USA: Arlington; 1985.

23. ศิริชัย ต่อสกุล, กุลฑล ทองศรี, จงกล สุภารัตน์. การพัฒนาถ่านอัดแท่งจากกากมะพร้าวเป็นพลังงานทดแทน: การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการ, ปทุมธานี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี; 2555.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
ข้อมูลดิบ

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลดิบสำหรับการเผาไหม้ถ่านไม้โกงกาง ปริมาณ 1,000 g ในเตาทรงกระบอก (เตาดำ) โดยมีอุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำ 28 °C ปริมาณน้ำตอนเริ่มต้น 3,000 มิลลิลิตร และปริมาณน้ำตอนสุดท้าย 200 มิลลิลิตร

Time	Concentration (ppm)			T (Pot)	Mass (kg)
(min)	CO	NO	NO_x	(°C)	(Pot)
1	-2	0	1	102	15.560
2	341	4	4	153	15.550
3	582	0	0	191	15.540
4	255	3	3	206	15.520
5	294	21	33	253	15.495
6	329	12	13	237	15.475
7	80	2	2	365	15.445
8	296	18	19	512	15.415
9	15	1	1	509	15.380
10	74	19	20	595	15.325
11	143	0	0	490	15.280
12	834	21	22	622	15.225
13	1504	31	33	607	15.155
14	3894	47	50	656	15.075
15	2643	27	28	662	14.950
16	1098	17	18	472	14.860
17	1117	16	17	564	14.805
18	1206	9	9	582	14.720
19	594	9	9	351	14.655
20	605	6	7	347	14.590
21	709	5	5	364	14.525
22	801	2	2	433	14.445
23	757	4	4	451	14.389
24	1220	3	4	426	14.320
25	1010	3	3	502	14.260
26	1669	1	1	463	14.180
27	1359	1	1	509	14.130
28	1203	1	1	440	14.040

Time	Concentration (ppm)			T (Pot)	Mass (kg)
(min)	CO	NO	NO_x	(°C)	(Pot)
29	1058	1	1	444	13.995
30	696	0	0	509	13.925
31	689	0	0	393	13.855
32	1013	1	1	438	13.790
33	525	0	0	423	13.725
34	10	0	0	407	13.660
35	106	0	0	403	13.580
36	14	-1	-1	493	13.350
37	44	0	0	423	13.460
38	284	0	0	455	13.405
39	474	0	0	326	13.340
40	650	1	1	392	13.285
41	126	0	0	460	13.220
42	737	0	0	442	13.160
43	563	0	0	426	13.110
44	347	1	1	374	13.060
45	25	-1	-1	363	13.005
46	363	0	0	400	12.960
47	413	0	0	268	12.920
48	246	0	0	304	12.875
49	154	0	0	352	12.840
50	52	-1	-1	374	12.800
51	265	0	0	300	12.765
52	224	-1	-1	284	12.735
53	243	0	0	295	12.700
54	69	-1	-1	326	12.665
55	141	-1	-1	264	12.635
56				299	12.610
57				301	12.585
58				288	12.545
59				210	12.520
60				242	12.475
61				227	12.460
62				262	12.440
63				224	12.410
64				231	12.400
65				261	12.380
66				233	12.360

Time	Concentration (ppm)			T (Pot)	Mass (kg)
(min)	CO	NO	NO_x	(°C)	(Pot)
67				224	12.340
68				205	12.315
69				217	12.305
70				228	12.290
71				175	12.260
72				187	12.250
73				191	12.235
74				198	12.225
75				214	12.210
76				205	12.195
77				184	12.160
78				169	12.155
79				174	12.150
80				169	12.130
81				173	12.125
82				191	12.115
83				195	12.105
84				181	12.095
85				179	12.085
86				183	12.070
87				184	12.065
88				171	12.055
89				150	12.045
90				162	12.030
91				153	12.020
92				154	12.010
93				138	12.005
94				140	11.995
95				125	11.990
96				116	11.980
97				128	11.975
98				128	11.970
99				112	11.965
100				116	11.960
101				111	11.955
102				115	11.950
103				110	11.940
104				115	11.935

Time	Concentration (ppm)			T (Pot)	Mass (kg)
(min)	CO	NO	NO_x	(°C)	(Pot)
105				115	11.930
106				113	11.930
107				105	11.925
108				105	11.920
109				106	11.915
110				103	11.910
111				103	11.905
112				100	11.900
113				97	11.900
114				89	11.880
115				88	11.880

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลดิบสำหรับการเผาไหม้ถ่านไม้โกงกาง ปริมาณ 1,000 g ในเตาทรงกรวย (เตาแดง) โดยมีอุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำ 29 °C ปริมาณน้ำตอนเริ่มต้น 3,000 มิลลิลิตร และปริมาณน้ำตอนสุดท้าย 470 มิลลิลิตร

Time	Concentration (ppm)			T (Pot)	Mass (kg)
(min)	CO	NO	NO_x	(°C)	(Pot)
1	210	-1	-1	34	12.890
2	329	-1	-2	35	12.840
3	414	-2	-2	35	12.785
4	539	17	18	317	12.710
5	702	9	9	498	12.680
6	371	21	20	441	12.625
7	434	20	19	540	12.555
8	50	4	4	552	12.480
9	198	25	24	680	12.360
10	368	12	12	540	12.250
11	236	24	23	478	12.145
12	182	17	16	492	12.060
13	131	5	5	436	11.975
14	376	10	10	423	11.880
15	459	11	10	389	11.795
16	15	-1	-1	310	11.710
17	48	1	1	291	11.615
18	376	-1	-1	356	11.540
19	105	-3	-3	272	11.445
20	700	-1	-1	232	11.365
21	23	-3	-3	235	11.310
22	1100	-1	-1	271	11.235
23	24	-3	-3	380	11.150
24	429	-2	-2	341	11.075
25	932	-2	-2	229	11.000
26	1620	-3	-2	445	10.930
27	1219	-3	-3	509	10.855
28	1007	-5	-4	292	10.785
29	1352	-3	-3	191	10.720
30	1006	-4	-4	223	10.660
31	945	-4	-4	273	10.600
32	534	-4	-4	278	10.545

Time (min)	Concentration (ppm)			T (Pot) (°C)	Mass (kg) (Pot)
	CO	NO	NO_x		
33	669	-5	-4	233	10.485
34	265	-6	-6	187	10.430
35	441	-6	-5	220	10.380
36	567	-5	-5	215	10.345
37	412	-6	-6	302	10.300
38	66	-7	-6	330	10.265
39	56	-7	-7	314	10.220
40	113	-7	-7	264	10.175
41				195	10.140
42				236	10.100
43				161	10.065
44				143	10.025
45				99	9.960
46				91	9.970
47				84	9.955
48				92	9.930
49				82	9.895
50				146	9.875
51				101	9.870
52				131	9.855
53				113	9.835
54				137	9.820
55				136	9.805
56				98	9.780
57				82	9.760
58				82	9.750
59				93	9.740
60				125	9.725
61				148	9.710
62				72	9.695
63				101	9.680
64				76	9.665
65				102	9.645
66				88	9.640
67				67	9.635
68				85	9.620
69				123	9.620
70				86	9.600

Time	Concentration (ppm)			T (Pot)	Mass (kg)
(min)	CO	NO	NO_x	(°C)	(Pot)
71				76	9.600
72				73	9.585
73				63	9.580
74				73	9.580
75				91	9.575
76				75	9.565
77				74	9.555
78				88	9.555
79				72	9.540
80				91	9.535
81				107	9.535
82				97	9.530
83				102	9.530
84				100	9.525
85				81	9.520
86				93	9.515
87				101	9.510
88				97	9.500
89				92	9.495
90				83	9.495
91				82	9.490
92				83	9.480
93				74	9.470

ตารางที่ ก.3 ข้อมูลดิบสำหรับการเผาไหม้ถ่านไม้โกงกาง ปริมาณ 1,000 g ในเตาประสิทธิภาพสูง โดยมีอุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำ 28 °C ปริมาณน้ำตอนเริ่มต้น 3,000 มิลลิลิตร และปริมาณน้ำตอนสุดท้าย 0 มิลลิลิตร

Time	Concentration (ppm)			T (Pot)	Mass (kg)
(min)	CO	NO	NO_x	(°C)	(Pot)
1	1426	6	6	340	14.180
2	1846	5	5	380	14.150
3	1780	6	7	472	14.195
4	946	4	4	350	14.060
5	1030	5	5	443	14.000
6	242	4	5	391	13.985
7	742	13	14	385	13.895
8	463	17	17	466	13.825
9	2512	40	42	445	13.750
10	1610	35	32	444	13.650
11	1439	29	31	427	13.505
12	250	11	12	350	13.410
13	682	8	8	372	13.295
14	261	6	6	417	13.199
15	380	5	6	364	13.050
16	543	8	9	337	12.910
17	326	6	6	288	12.785
18	236	4	6	290	12.630
19	287	2	3	268	12.540
20	494	10	10	367	12.445
21	220	1	1	321	12.325
22	183	2	3	289	12.175
23	378	3	3	262	12.065
24	232	3	3	277	11.975
25	256	-1	-1	282	11.855
26	346	4	4	231	11.735
27	420	2	2	195	12.625
28	318	7	7	188	11.510
29	232	10	10	184	11.435
30	275	2	2	163	11.350
31	44	-3	-3	157	11.260
32	219	-1	-1	143	11.150

Time	Concentration (ppm)			T (Pot)	Mass (kg)
(min)	CO	NO	NO_x	(°C)	(Pot)
33	370	7	7	123	11.105
34	334	-1	-1	119	11.065
35	276	1	1	132	11.025
36	546	4	4	321	10.980
37	186	-5	-5	337	10.920
38	172	-5	-5	310	10.865
39	388	0	0	333	10.750
40	171	-2	-2	300	10.705
41	862	-1	-2	312	10.665
42	857	-4	-4	321	10.615
43	959	-5	-5	317	10.595
44	442	-4	-4	319	10.565
45	463	-6	-7	290	11.525
46	388	-6	-6	268	11.500
47	1005	-6	-7	218	11.465
48	852	-6	-6	193	11.450
49	685	-6	-6	174	11.420
50	930	-6	-6	195	11.465
51	546	-6	-6	188	11.450
52	721	-7	-7	195	11.440
53	373	-7	-7	196	11.440
54	345	-7	-8	167	11.420
55	680	-6	-6	189	11.415
56	433	-7	-7	181	11.400
57	635	-6	-7	193	11.390
58	505	-6	-7	178	11.375
59	421	-7	-7	169	11.370
60	449	-7	-7	176	11.365
61	390	-8	-8	171	11.330
62	262	-7	-8	163	11.330
63	250	-7	-7	160	11.320
64	293	-7	-7	167	11.315
65	310	-8	-8	164	11.305
66				164	11.300
67				170	11.295
68				175	11.290
69				169	11.280
70				156	11.275

Time	Concentration (ppm)			T (Pot)	Mass (kg)
(min)	CO	NO	NO_x	(°C)	(Pot)
71				160	11.265
72				147	11.260
73				146	11.225
74				143	11.215
75				131	11.200
76				125	11.200
77				131	11.200
78				132	11.195
79				112	11.160
80				103	11.160
81				107	11.175
82				115	11.165
83				115	11.165
84				107	11.150
85				106	11.160
86				108	11.150
87				101	11.115
88				85	11.140
89				91	11.135
90				89	11.125
91				78	11.110
92				80	11.105
93				79	11.100

ตารางที่ ก.4 ข้อมูลดิบสำหรับการเผาไหม้ถ่านไม้โกงกาง ปริมาณ 800 g ในเตาทรงกระบอก (เตาดำ) โดยมีอุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำ 28 °C ปริมาณน้ำตอนเริ่มต้น 3,000 มิลลิลิตร และปริมาณน้ำตอนสุดท้าย 900 มิลลิลิตร

Time	Concentration (ppm)			T (Pot)	Mass (kg)
(min)	CO	NO	NO_x	(°C)	(Pot)
1	2039	24	23	86	15.380
2	1501	11	11	98	15.360
3	1465	30	30	128	15.330
4	1126	11	12	178	15.320
5	2339	72	73	323	15.285
6	2106	19	20	470	15.250
7	1031	37	39	428	15.215
8	2669	44	46	556	15.165
9	866	39	41	576	15.130
10	1240	38	43	492	15.075
11	1903	36	38	334	15.030
12	909	27	28	303	14.970
13	576	21	22	302	14.890
14	396	16	17	224	14.805
15	435	15	16	229	14.710
16	469	13	13	197	14.635
17	576	19	20	178	14.540
18	460	11	12	199	14.460
19	662	9	9	335	14.360
20	572	10	10	218	14.290
21	1848	11	11	274	14.205
22	994	18	19	180	14.125
23	676	0	0	178	14.055
24	900	10	10	186	13.980
25	674	6	6	254	13.910
26	786	5	5	221	13.845
27	746	6	6	263	13.775
28	1730	9	9	201	13.710
29	1394	9	9	173	13.645
30	1140	7	8	141	13.585
31	860	6	2	179	13.520
32	926	3	3	169	13.475

Time	Concentration (ppm)			T (Pot)	Mass (kg)
(min)	CO	NO	NO_x	(°C)	(Pot)
33	1053	3	3	213	13.420
34	1331	4	4	164	13.370
35	1902	3	3	164	13.330
36	919	1	2	164	13.240
37	503	1	1	196	13.195
38	1031	1	1	145	13.150
39	794	0	0	137	13.120
40	970	1	1	130	13.085
41	1043	0	0	141	13.055
42	1094	1	1	147	13.025
43	1400	2	2	156	12.995
44	1393	1	1	142	12.970
45	1334	1	1	127	12.940
46	1272	1	1	131	12.915
47	994	1	1	132	12.895
48	153	1	1	118	12.870
49	1751	2	2	124	12.850
50	1648	1	1	121	12.830
51	903	0	0	122	12.815
52	843	0	0	109	12.790
53	675	1	1	93	12.765
54	562	0	0	100	12.760
55	295	0	0	90	12.740
56	502	0	0	104	12.725
57	642	0	0	104	12.710
58	366	0	0	113	12.695
59	1004	2	2	108	12.680
60	648	1	0	107	12.665
61	470	0	0	98	12.650
62	555	1	1	99	12.640
63	502	1	1	99	12.635
64	564	1	1	106	12.620
65	592	1	1	104	12.610
66	577	1	1	94	12.595
67	460	1	1	91	12.585
68	945	1	1	86	12.575
69	224	0	0		
70	451	1	1		

Time (min)	Concentration (ppm)			T (Pot) (°C)	Mass (kg) (Pot)
	CO	NO	NO_x		
71	475	1	1		
72	421	1	1		
73	336	0	0		
74	272	0	0		
75	350	1	2		
76	347	1	2		
77	215	1	0		
78	258	1	1		
79	268	1	1		
80	270	0	0		

ตารางที่ ก.5 ข้อมูลดิบสำหรับการเผาไหม้ถ่านไม้โกงกาง ปริมาณ 800 g ในเตาทรงกรวย (เตาแดง) โดยมีอุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำ 31 °C ปริมาณน้ำตอนเริ่มต้น 3,000 มิลลิลิตร และปริมาณน้ำตอนสุดท้าย 1,180 มิลลิลิตร

Time	Concentration (ppm)			T (Pot)	Mass (kg)
(min)	CO	NO	NO_x	(°C)	(Pot)
1	138	1	1	48	12.785
2	277	1	1	53	12.780
3	334	0	0	60	12.770
4	242	3	2	62	12.705
5	461	4	6	81	12.655
6	272	2	2	94	12.625
7	861	4	4	101	12.585
8	1019	11	12	103	12.525
9	1548	28	29	114	12.495
10	1761	22	23	126	12.430
11	1117	27	28	137	12.360
12	564	25	26	143	12.270
13	540	19	20	149	12.190
14	481	18	19	157	12.135
15	303	16	17	179	12.050
16	432	9	10	195	11.990
17	431	15	16	206	11.920
18	435	12	13	212	11.845
19	480	8	9	228	11.795
20	571	11	11	235	11.720
21	493	6	7	246	11.650
22	591	3	4	253	11.600
23	958	6	6	259	11.540
24	637	3	4	264	11.485
25	827	1	3	275	11.415
26	1110	3	2	268	11.305
27	1116	3	3	270	11.285
28	831	1	1	277	11.190
29	1086	2	2	258	11.165
30	1243	1	1	236	11.130
31	862	0	0	232	11.085
32	907	0	0	229	11.015

Time	Concentration (ppm)			T (Pot)	Mass (kg)
(min)	CO	NO	NO_x	(°C)	(Pot)
33	974	-1	-1	218	10.980
34	786	0	0	205	10.940
35	968	0	0	189	10.910
36	727	0	0	170	10.875
37	820	0	0	166	10.850
38	889	0	0	153	10.825
39	1009	0	0	139	10.800
40	953	0	0	134	10.780
41	763	0	0	126	10.750
42	1104	0	0	118	10.735
43	1045	-1	-1	107	10.710
44	981	0	0	102	10.685
45	1027	0	0	99	10.670
46	661	0	0	95	10.650
47	654	0	0	93	10.630
48	530	0	0	90	10.615
49	373	0	0		
50	506	0	0		
51	254	0	0		
52	377	0	0		
53	384	0	0		
54	345	0	0		
55	502	0	0		
56	377	0	0		
57	289	0	0		
58	379	1	1		
59	397	0	0		
60	359	0	0		
61	230	0	0		
62	415	0	0		
63	373	-1	-1		
64	435	1	1		
65	341	0	0		
66	429	0	0		
67	345	0	0		
68	239	0	0		
69	190	0	0		
70	182	0	0		

ตารางที่ ก.6 ข้อมูลดิบสำหรับการเผาไหม้ถ่านไม้โกงกาง ปริมาณ 800 g ในเตาประสิทธิภาพสูง โดยมีอุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำ 29 °C ปริมาณน้ำตอนเริ่มต้น 3,000 มิลลิลิตร และปริมาณน้ำตอนสุดท้าย 370 มิลลิลิตร

Time	Concentration (ppm)			T (Pot)	Mass (kg)
(min)	CO	NO	NO_x	(°C)	(Pot)
1	705	1	1	340	13.970
2	569	3	4	380	13.920
3	519	2	3	472	13.860
4	322	11	11	350	13.790
5	200	13	15	443	13.715
6	253	22	22	391	13.620
7	436	21	22	385	13.450
8	500	27	23	466	13.295
9	408	13	14	445	13.135
10	612	10	11	444	12.990
11	243	7	7	427	12.840
12	226	12	13	350	12.685
13	87	7	7	372	12.535
14	105	5	5	417	12.385
15	101	4	4	364	12.235
16	126	2	2	337	12.105
17	92	3	3	288	11.930
18	129	4	4	290	11.835
19	130	3	3	268	11.720
20	115	2	2	367	11.620
21	204	6	6	321	11.525
22	183	4	4	289	11.435
23	234	7	7	262	11.345
24	239	5	6	277	11.270
25	270	6	6	282	11.195
26	173	-1	-1	231	11.130
27	310	3	3	195	11.080
28	295	0	0	188	11.035
29	275	-2	-2	184	10.995
30	493	-1	-1	163	10.950
31	543	-1	-1	157	10.925
32	389	-1	-1	143	10.900

Time	Concentration (ppm)			T (Pot)	Mass (kg)
(min)	CO	NO	NO_x	(°C)	(Pot)
33	419	-1	-1	123	10.875
34	615	-1	-1	119	10.855
35	776	-2	-2	132	10.840
36	569	-2	-2	121	10.825
37	543	-3	-3	111	10.810
38	449	-3	-3	108	10.795
39	620	-3	-3	106	10.780
40	500	-3	-3	104	10.770
41	420	-3	-3	111	10.760
42	629	-3	-3	101	10.750
43	279	-3	-3	108	10.740
44	331	-3	-3	91	10.730
45	236	-4	-4	90	10.725
46	171	-3	-4		
47	295	-4	-4		

ตารางที่ ก.7 ข้อมูลดิบสำหรับการเผาไหม้ถ่านไม้โกงกาง ปริมาณ 600 g ในเตาทรงกระบอก (เตาดำ) โดยมีอุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำ 28 °C ปริมาณน้ำตอนเริ่มต้น 3,000 มิลลิลิตร และปริมาณน้ำตอนสุดท้าย 1,990 มิลลิลิตร

Time	Concentration (ppm)			T (Pot)	Mass (kg)
(min)	CO	NO	NO_x	(°C)	(Pot)
1	321	0	0	186	15.120
2	490	1	1	264	15.085
3	397	0	0	284	15.050
4	594	2	2	282	15.025
5	740	3	3	236	14.990
6	853	2	2	145	14.915
7	532	2	2	114	14.895
8	773	2	2	234	14.850
9	935	9	9	282	14.810
10	477	7	7	249	14.765
11	619	0	0	318	14.705
12	810	14	15	380	14.660
13	521	5	5	344	14.580
14	229	25	26	261	14.485
15	474	12	12	271	14.435
16	512	11	12	270	14.375
17	535	12	12	264	14.295
18	410	4	4	296	14.230
19	972	19	19	279	14.195
20	654	11	11	249	14.140
21	638	5	5	241	14.105
22	754	7	8	236	14.055
23	948	4	4	257	14.010
24	657	2	2	230	13.970
25	647	2	2	249	13.930
26	1445	5	5	210	13.895
27	1212	5	5	184	13.865
28	934	5	5	163	13.825
29	1440	4	4	149	13.810
30	1344	2	2	121	13.780
31	869	1	1	172	13.755
32	970	1	1	151	13.740

Time	Concentration (ppm)			T (Pot)	Mass (kg)
(min)	CO	NO	NO_x	(°C)	(Pot)
33	1114	0	0	121	13.720
34	1101	1	1	102	13.700
35	1104	1	1	103	13.680
36	1016	1	1	111	13.670
37	1016	0	0	107	13.655
38	1099	1	1	108	13.640
39	1202	1	1	95	13.635
40	730	2	2	110	13.610
41	562	2	1	102	13.600
42	854	1	1	105	13.590
43	1662	1	1	87	13.575
44	1382	1	1		
45	969	1	1		
46	1031	1	1		
47	629	1	1		
48	531	2	2		
49	178	0	0		
50	353	1	1		
51	792	0	0		
52	397	1	1		
53	201	1	1		
54	300	1	1		
55	449	0	0		
56	170	2	1		
57	273	1	1		
58	322	1	1		
59	106	1	1		
60	325	1	1		
61	495	0	0		
62	197	1	1		
63	140	1	1		
64	182	1	1		
65	157	1	1		
66	178	1	1		
67	202	1	1		
68	255	1	1		
69	138	1	1		
70	142	1	1		

Time (min)	Concentration (ppm)			T (Pot) (°C)	Mass (kg) (Pot)
	CO	NO	NO_x		
71	104	1	1		
72	182	1	1		
73	89	2	2		
74	166	1	1		
75	119	1	1		
76	129	1	1		
77	65	1	1		

ตารางที่ ก.8 ข้อมูลดิบสำหรับการเผาไหม้ถ่านไม้โกงกาง ปริมาณ 600 g ในเตาทรงกรวย (เตาแดง) โดยมีอุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำ 28 °C ปริมาณน้ำตอนเริ่มต้น 3,000 มิลลิลิตร และปริมาณน้ำตอนสุดท้าย 2,485 มิลลิลิตร

Time	Concentration (ppm)			T (Pot)	Mass (kg)
(min)	CO	NO	NO_x	(°C)	(Pot)
1	741	1	1	53	12.570
2	1141	2	2	48	12.460
3	1255	4	5	75	12.440
4	1329	10	12	106	12.430
5	1493	9	10	103	12.395
6	876	9	10	105	12.365
7	791	14	15	99	12.355
8	571	10	10	101	12.310
9	436	24	16	104	12.305
10	523	12	13	165	12.280
11	524	14	15	153	12.250
12	611	11	12	188	12.230
13	433	12	12	206	12.220
14	1043	0	9	162	12.175
15	656	7	0	218	12.170
16	710	5	6	203	12.130
17	895	5	5	164	12.075
18	1261	6	6	175	12.030
19	1071	0	0	104	11.980
20	704	4	4	101	11.950
21	946	3	3	137	11.890
22	482	2	2	127	11.835
23	1026	1	1	107	11.740
24	906	0	0	126	11.715
25	839	1	1	105	11.675
26	1316	1	1	102	11.630
27	827	0	0	101	11.615
28	856	0	0	93	11.600
29	902	1	1	95	11.560
30	1097	1	1	93	11.550
31	759	0	1	93	11.485
32	1251	1	1	97	11.430

Time	Concentration (ppm)			T (Pot)	Mass (kg)
(min)	CO	NO	NO_x	(°C)	(Pot)
33	1104	0	0	95	11.380
34	703	0	0	92	11.355
35	1014	0	0	90	11.330
36	915	1	1		
37	753	0	0		
38	712	0	0		
39	939	0	0		
40	916	1	1		
41	884	1	1		
42	979	1	1		
43	779	1	1		
44	745	1	1		
45	840	1	1		
46	554	1	1		
47	489	1	2		
48	919	1	1		
49	723	1	1		
50	579	2	2		
51	313	1	1		
52	643	1	1		
53	426	1	1		
54	271	1	1		
55	329	1	1		
56	279	2	2		
57	241	2	2		
58	172	2	2		
59	207	2	2		

ตารางที่ ก.9 ข้อมูลดิบสำหรับการเผาไหม้ถ่านไม้โกงกาง ปริมาณ 600 g ในเตาประสิทธิภาพสูง โดยมีอุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำ 27 °C ปริมาณน้ำตอนเริ่มต้น 3,000 มิลลิลิตร และปริมาณน้ำตอนสุดท้าย 1,500 มิลลิลิตร

Time	Concentration (ppm)			T (Pot)	Mass (kg)
(min)	CO	NO	NO_x	(°C)	(Pot)
1	83	1	1	37	13.780
2	525	0	0	43	13.775
3	215	0	0	44	13.770
4	398	2	2	67	13.760
5	240	0	0	65	13.725
6	367	4	4	78	13.685
7	712	10	10	73	13.670
8	796	3	4	153	13.610
9	1176	7	8	222	13.590
10	960	9	9	165	13.550
11	1220	8	8	204	13.505
12	439	5	5	271	13.455
13	210	1	1	219	13.415
14	372	3	4	168	13.335
15	155	5	6	198	13.295
16	259	5	5	145	13.200
17	182	3	3	134	13.125
18	37	1	1	108	13.040
19	297	3	3	191	13.005
20	496	3	4	224	12.990
21	52	1	2	261	12.960
22	523	0	0	233	12.860
23	268	1	1	189	12.770
24	336	2	1	291	12.680
25	349	2	2	227	12.590

Time	Concentration (ppm)			T (Pot)	Mass (kg)
(min)	CO	NO	NO_x	(°C)	(Pot)
26	318	1	1	182	12.510
27	268	2	2	128	12.445
28	309	0	0	157	12.375
29	712	1	1	158	12.330
30	93	2	2	152	12.270
31	103	3	3	148	12.225
32	809	0	0	143	12.180
33	309	2	2	120	12.120
34	101	2	2	130	12.095
35	241	3	3	120	12.045
36	90	2	2	101	12.030
37	23	2	2	98	11.970
38	343	2	2	89	11.945
39	108	2	2	108	11.900
40	190	2	2	93	11.870
41	98	2	2		

ตารางที่ ก.10 ข้อมูลดิบสำหรับการเผาไหม้ถ่านกะลาอัดไร้ควัน ปริมาณ 1,000 g ในเตาทรงกระบอก (เตาดำ) โดยมีอุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำ 31 °C ปริมาณน้ำตอนเริ่มต้น 3,000 มิลลิลิตร และปริมาณน้ำตอนสุดท้าย 1,460 มิลลิลิตร

Time	Concentration (ppm)			T (Pot)	Mass (kg)
(min)	CO	NO	NO_x	(°C)	(Pot)
1	161	-3	-3	86	15.570
2	210	-2	-2	105	15.550
3	260	-3	-3	84	15.485
4	80	-3	-3	173	15.425
5	72	-3	-3	99	15.395
6	368	-2	-2	79	15.360
7	362	-3	-3	93	15.305
8	71	-2	-2	128	15.295
9	83	-2	-2	225	15.255
10	179	-3	-3	195	15.185
11	393	-2	-2	183	15.150
12	349	-2	-2	167	15.100
13	460	-1	-1	181	15.050
14	50	-3	-3	294	15.000
15	306	-1	-1	294	14.940
16	572	0	0	284	14.890
17	370	-2	-2	341	14.840
18	405	-3	-3	402	14.775
19	325	-3	-3	335	14.725
20	427	-4	-4	324	14.670
21	649	-4	-4	273	14.620
22	407	-4	-4	275	14.570
23	510	-3	-3	271	14.520
24	14	-4	-4	265	14.480
25	72	-4	-4	231	14.440
26	4	-4	-4	275	14.395
27	155	-4	-4	324	14.365
28	382	-4	-4	338	14.325
29	401	-4	-4	322	14.295
30	261	-5	-5	318	14.265
31	540	-5	-5	313	14.230
32	470	-5	-5	275	14.205

Time	Concentration (ppm)			T (Pot)	Mass (kg)
(min)	CO	NO	NO_x	(°C)	(Pot)
33	357	-6	-6	302	14.170
34	641	-5	-5	278	14.145
35	661	-5	-5	293	14.115
36	603	-5	-5	288	14.095
37	617	-5	-5	259	14.065
38	535	-6	-6	271	14.045
39	133	-6	-6	218	14.020
40	694	-6	-6	197	14.000
41	612	-5	-5	190	13.970
42	570	-6	-6	156	13.950
43	600	-5	-5	186	13.930
44	382	-6	-6	230	13.910
45	140	-6	-6	244	13.870
46	720	-6	-6	223	13.850
47	581	-6	-6	235	13.830
48	369	-6	-6	221	13.815
49	172	-6	-6	224	13.795
50	136	-6	-6	217	13.775
51	239	-6	-6	201	13.760
52	192	-7	-7	219	13.745
53	546	-6	-6	187	13.725
54	599	-7	-7	199	13.715
55	543	-6	-6	212	13.695
56	498	-7	-7	222	13.685
57	406	-7	-7	201	13.670
58	123			190	13.650
59	194			184	13.640
60	285			184	13.620
61	363			184	13.615
62	334			180	13.600
63				183	13.585
64				194	13.575
65				178	13.565
66				187	13.550
67				184	13.540
68				181	13.530
69				189	13.520
70				189	13.510

Time	Concentration (ppm)			T (Pot)	Mass (kg)
(min)	CO	NO	NO_x	(°C)	(Pot)
71				175	13.500
72				176	13.490
73				173	13.485
74				173	13.470
75				170	13.460
76				163	13.455
77				163	13.445
78				161	13.435
79				163	13.430
80				160	13.420
81				158	13.410
82				159	13.405
83				148	13.395
84				152	13.385
85				153	13.385
86				147	13.380
87				148	13.370
88				142	13.360
89				138	13.355
90				139	13.345
91				143	13.345
92				138	13.340
93				131	13.335
94				129	13.325
95				133	13.310
96				127	13.305
97				128	13.305
98				125	13.295
99				122	13.295
100				122	13.290
101				121	13.285
102				118	13.280
103				116	13.275
104				112	13.270
105				106	13.265
106				105	13.260
107				103	13.260
108				102	13.255

Time	Concentration (ppm)			T (Pot)	Mass (kg)
(min)	CO	NO	NO_x	(°C)	(Pot)
109				105	13.250
110				99	13.245
111				97	13.240
112				95	13.240
113				93	13.235
114				92	13.235
115				90	13.230
116				89	13.225

ตารางที่ ก.11 ข้อมูลดิบสำหรับการเผาไหม้กะลาอัดไร้ควัน ปริมาณ 1,000 g ในเตาทรงกรวย (เตาแดง) โดยมีอุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำ 29 °C ปริมาณน้ำตอนเริ่มต้น 3,000 มิลลิลิตร และปริมาณน้ำตอนสุดท้าย 1,390 มิลลิลิตร

Time	Concentration (ppm)			T (Pot)	Mass (kg)
(min)	CO	NO	NO_x	(°C)	(Pot)
1	212	2	2	94	12.925
2	230	2	2	106	12.915
3	159	2	2	122	12.905
4	212	2	2	144	12.890
5	244	2	2	147	12.875
6	389	3	3	160	12.855
7	330	2	2	175	12.840
8	402	2	2	204	12.825
9	274	2	2	210	12.800
10	393	3	3	251	12.780
11	277	3	3	322	12.755
12	366	3	3	376	12.730
13	292	3	3	400	12.705
14	336	3	3	448	12.680
15	320	3	3	404	12.650
16	365	4	4	402	12.620
17	351	4	4	413	12.590
18	423	4	4	427	12.560
19	326	4	4	383	12.520
20	340	3	3	382	12.485
21	359	3	3	362	12.445
22	438	3	3	373	12.400
23	320	2	2	359	12.355
24	233	2	2	348	12.305
25	386	1	1	346	12.260
26	298	2	2	334	12.215
27	356	1	1	321	12.165
28	345	1	1	324	12.120
29	331	0	0	302	12.080
30	333	1	1	308	12.040
31	659	1	1	308	12.000
32	429	0	0	295	11.960

Time (min)	Concentration (ppm)			T (Pot) (°C)	Mass (kg) (Pot)
	CO	NO	NO_x		
33	693	1	1	244	11.925
34	742	0	0	220	11.890
35	619	0	0	249	11.850
36	612	0	0	230	11.820
37	684	0	0	239	11.785
38	561	-1	-1	237	11.750
39	834	0	0	260	11.720
40	675	0	0	271	11.680
41	722	-1	-1	269	11.655
42	708	-1	-1	229	11.630
43	436	0	0	240	11.600
44	496	-1	-1	250	11.750
45	441	-1	-1	244	11.545
46	437	-1	-1	246	11.520
47	458	-1	-1	245	11.495
48	744	-2	-2	235	11.470
49	563	-2	-2	223	11.445
50	660	-2	-2	229	11.415
51	576	-1	-1	231	11.390
52	767	-2	-2	225	11.375
53	466	-1	-1	215	11.355
54	491	-2	-2	207	11.335
55	742	-2	-2	206	11.315
56	716	-2	-2	205	11.290
57	381	-2	-2	210	11.275
58	482	-2	-2	207	11.250
59	530	-2	-2	196	11.240
60	545	-2	-2	201	11.220
61	319	-2	-2	196	11.200
62	396	-1	-1	191	11.185
63	323	-2	-2	188	11.170
64	263	-1	-1	187	11.150
65	427	-2	-2	168	11.135
66	457	-2	-2	147	11.120
67	355	-3	-3	134	11.105
68	421	-2	-2	127	11.085
69	348	-3	-3	161	11.075
70	454	-3	-3	165	11.065

Time	Concentration (ppm)			T (Pot)	Mass (kg)
(min)	CO	NO	NO_x	(°C)	(Pot)
71	454	-3		164	11.045
72	378	-3		164	11.035
73	496	-3		160	11.025
74	465	-3		159	11.010
75	513	-3		147	11.000
76	487	-3		151	10.985
77	439	-3		147	10.970
78	489	-2		151	10.960
79	432	-2		149	10.950
80	327	-2		119	10.940
81	427	-2		123	10.930
82	425	-2		123	10.920
83				142	10.910
84				141	10.900
85				136	10.890
86				133	10.880
87				132	10.875
88				126	10.865
89				119	10.860
90				126	10.850
91				131	10.840
92				132	10.830
93				129	10.825
94				127	10.820
95				122	10.810
96				120	10.800
97				119	10.795
98				117	10.785
99				120	10.780
100				116	10.775
101				115	10.765
102				115	10.765
103				115	10.755
104				112	10.750
105				108	10.745
106				104	10.740
107				102	10.730
108				101	10.725

Time	Concentration (ppm)			T (Pot)	Mass (kg)
(min)	CO	NO	NO_x	(°C)	(Pot)
109				100	10.720
110				97	10.715
111				96	10.710
112				99	10.705
113				97	10.700
114				95	10.695
115				95	10.690
116				92	10.690
117				93	10.685
118				91	10.670
119				91	10.670

ตารางที่ ก.12 ข้อมูลดิบสำหรับการเผาไหม้กะลาอัดไร้ควัน ปริมาณ 1,000 g ในเตาประสิทธิภาพสูง โดยมีอุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำ 29 °C ปริมาณน้ำตอนเริ่มต้น 3,000 มิลลิลิตร และปริมาณน้ำตอนสุดท้าย 940 มิลลิลิตร

Time	Concentration (ppm)			T (Pot)	Mass (kg)
(min)	CO	NO	NO_x	(°C)	(Pot)
1	297	2	2	49	14.300
2	579	4	4	56	14.295
3	265	3	3	62	14.280
4	399	3	3	98	14.260
5	479	4	4	123	14.245
6	206	2	2	151	14.220
7	399	3	3	240	14.185
8	310	3	3	138	14.150
9	339	3	3	170	14.100
10	263	2	2	330	14.065
11	99	1	1	315	14.000
12	331	3	3	276	13.965
13	297	3	3	311	13.925
14	291	4	4	334	13.870
15	251	4	4	413	13.775
16	172	3	3	346	13.655
17	47	2	2	328	13.555
18	200	3	3	312	13.450
19	191	2	2	352	13.360
20	185	3	3	317	13.275
21	163	2	2	307	13.185
22	189	2	2	243	13.105
23	9	1	1	266	13.035
24	10	1	1	230	12.965
25	60	0	0	247	12.895
26	30	0	0	293	12.825
27	40	-1	-1	249	12.775
28	20	0	0	259	12.715
29	6	0	0	233	12.665
30	62	0	0	228	12.620
31	11	-1	-1	214	12.560
32	108	0	0	234	12.525

Time	Concentration (ppm)			T (Pot)	Mass (kg)
(min)	CO	NO	NO_x	(°C)	(Pot)
33	9	0	0	211	12.485
34	6	0	0	187	12.430
35	422	0	0	157	12.375
36	11	1	1	168	12.335
37	291	0	0	174	12.315
38	311	0	0	166	12.300
39	220	1	1	164	12.270
40	91	0	0	157	12.235
41	126	1	1	149	12.215
42	27	1	1	155	12.185
43	131	1	1	150	12.150
44	172	0	0	133	12.120
45	57	0	0	136	12.105
46	19	0	0	138	12.080
47	29	0	0	130	12.060
48	426	0	0	135	12.040
49	21	0	0	140	12.020
50	44	1	1	121	12.000
51	201	1	1	124	11.975
52	175	1	1	129	11.960
53	350	1	1	126	11.940
54	127	1	1	125	11.925
55	20	1	1	127	11.910
56	255	1	1	117	11.890
57	315	1	1	119	11.875
58	230	1	1	164	11.855
59	346	0	0	164	11.830
60	244	1	1	182	11.815
61	241	0	0	171	11.805
62	226	0	0	172	11.790
63	115	0	0	167	11.780
64	65	0	0	174	11.765
65	314	0	0	173	11.750
66	240	0	0	174	11.735
67	229	0	0	150	11.720
68	163	-1	-1	124	11.705
69				151	11.700
70				162	11.690

Time	Concentration (ppm)			T (Pot)	Mass (kg)
(min)	CO	NO	NO_x	(°C)	(Pot)
71				145	11.680
72				140	11.670
73				127	11.665
74				147	11.650
75				135	11.645
76				127	11.640
77				119	11.635
78				119	11.625
79				125	11.615
80				130	11.610
81				121	11.605
82				107	11.600
83				107	11.590
84				101	11.580
85				102	11.575
86				100	11.570
87				97	11.565
88				101	11.560
89				119	11.555
90				107	11.545
91				100	11.540
92				104	11.535
93				108	11.530
94				111	11.525
95				102	11.520
96				98	11.515
97				92	11.510
98				106	11.505
99				98	11.500
100				104	11.495
101				100	11.490
102				87	11.485
103				104	11.480
104				94	11.475
105				88	11.470
106				83	11.470
107				60	11.465

ตารางที่ ก.13 ข้อมูลดิบสำหรับการเผาไหม้กะลาอัดไร้ควัน ปริมาณ 800 g ในเตาทรงกระบอก (เตาดำ) โดยมีอุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำ 30 °C ปริมาณน้ำตอนเริ่มต้น 3,000 มิลลิลิตร และปริมาณน้ำตอนสุดท้าย 1,950 มิลลิลิตร

Time	Concentration (ppm)			T (Pot)	Mass (kg)
(min)	CO	NO	NO_x	(°C)	(Pot)
1	256	2	2	55	15.415
2	192	2	2	60	15.405
3	360	3	3	65	15.400
4	270	1	1	78	15.390
5	406	2	2	128	15.370
6	284	1	1	154	15.355
7	436	2	2	150	15.335
8	765	3	3	153	15.320
9	611	5	5	180	15.300
10	471	5	5	217	15.280
11	413	4	4	197	15.265
12	526	5	5	227	15.235
13	554	4	4	254	15.215
14	414	3	3	234	15.195
15	334	2	2	244	15.175
16	362	2	2	246	15.150
17	374	1	1	272	15.125
18	258	0	0	251	15.100
19	460	0	0	264	15.075
20	373	0	0	264	15.050
21	379	0	0	267	15.025
22	389	0	0	261	14.995
23	326	-1	-1	262	14.970
24	400	-1	-1	274	14.945
25	432	-1	-1	258	14.915
26	550	-1	-1	258	14.895
27	631	-1	-1	257	14.865
28	471	-1	-1	262	14.830
29	478	-1	-1	255	14.810
30	478	-2	-2	256	14.790
31	481	-1	-1	261	14.755
32	263	-1	-1	251	14.730

Time (min)	Concentration (ppm)			T (Pot) (°C)	Mass (kg) (Pot)
	CO	NO	NO_x		
33	354	-1	-1	243	14.710
34	323	-2	-2	246	14.685
35	467	-2	-2	238	14.640
36	540	-2	-2	238	14.620
37	446	-1	-1	228	14.615
38	412	-2	-2	215	14.595
39	514	-2	-2	220	14.575
40	512	-2	-2	226	14.555
41	285	-2	-2	211	14.535
42	440	-2	-2	199	14.520
43	553	-2	-2	213	14.500
44	339	-2	-2	206	14.485
45	461	-2	-2	204	14.460
46	438	-2	-2	181	14.450
47	400	-2	-2	180	14.430
48	470	-2	-2	197	14.415
49	470	-2	-2	195	14.400
50	363	-2	-2	200	14.385
51	428	-2	-2	147	14.360
52	312	-2	-2	173	14.355
53	338	-2	-2	185	14.335
54	50	-1	-1	170	14.325
55				175	14.305
56				178	14.300
57				163	14.280
58				172	14.265
59				165	14.260
60				176	14.245
61				163	14.230
62				153	14.220
63				151	14.205
64				152	14.195
65				161	14.185
66				132	14.175
67				149	14.165
68				156	14.150
69				142	14.140
70				141	14.135

Time (min)	Concentration (ppm)			T (Pot) (°C)	Mass (kg) (Pot)
	CO	NO	NO_x		
71				148	14.120
72				145	14.120
73				140	14.100
74				145	14.095
75				149	14.085
76				150	14.075
77				144	14.070
78				142	14.060
79				141	14.055
80				147	14.045
81				140	14.040
82				137	14.030
83				128	14.020
84				134	14.015
85				136	14.010
86				135	14.000
87				130	13.990
88				124	13.985
89				122	13.980
90				117	13.975
91				118	13.965
92				119	13.960
93				122	13.955
94				119	13.950
95				118	13.940
96				117	13.935
97				114	13.930
98				113	13.925
99				113	13.920
100				112	13.915
101				113	13.910
102				107	13.905
103				108	13.900
104				106	13.890
105				105	13.885
106				102	13.880
107				102	13.875
108				106	13.875

Time (min)	Concentration (ppm)			T (Pot) (°C)	Mass (kg) (Pot)
	CO	NO	NO_x		
109				102	13.865
110				97	13.865
111				97	13.860
112				92	13.855
113				88	13.850
114				91	13.845
115				93	13.840
116				93	13.840
117				91	13.835
118				88	13.835
119				88	13.820

ตารางที่ ก.14 ข้อมูลดิบสำหรับการเผาไหม้กะลาอัดไร้ควัน ปริมาณ 800 g ในเตาทรงกรวย (เตาแดง) โดยมีอุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำ 29 °C ปริมาณน้ำตอนเริ่มต้น 3,000 มิลลิลิตร และปริมาณน้ำตอนสุดท้าย 2,150 มิลลิลิตร

Time	Concentration (ppm)			T (Pot)	Mass (kg)
(min)	CO	NO	NO_x	(°C)	(Pot)
1	30	-3	-3	111	12.750
2	0	-3	-3	146	12.745
3	1	-3	-3	173	12.730
4	230	-3	-3	189	12.715
5	123	-3	-3	186	12.700
6	201	-3	-3	215	12.680
7	164	-1	-1	250	12.650
8	10	-4	-4	273	12.640
9	4	-4	-4	292	12.620
10	7	-5	-5	292	12.590
11	75	-5	-5	321	12.570
12	101	-5	-5	302	12.545
13	63	-5	-5	268	12.515
14	36	-5	-5	296	12.495
15	89	-5	-5	288	12.465
16	30	-5	-5	294	12.435
17	2	-5	-5	311	12.415
18	101	-5	-5	307	12.395
19	163	-5	-5	336	12.365
20	69	-6	-6	325	12.340
21	93	-6	-6	302	12.315
22	2	-6	-6	309	12.290
23	211	-5	-5	286	12.265
24	112	-6	-6	277	12.235
25	85	-6	-6	268	12.210
26	247	-6	-6	238	12.175
27	500	-6	-6	242	12.140
28	484	-7	-7	250	12.125
29	515	-7	-7	227	12.100
30	468	-7	-7	242	12.075
31	445	-7	-7	233	12.055
32	286	-7	-7	219	12.015

Time	Concentration (ppm)			T (Pot)	Mass (kg)
(min)	CO	NO	NO_x	(°C)	(Pot)
33	107	-8	-8	238	12.005
34	116	-8	-8	222	11.975
35	263	-8	-8	230	11.955
36	541	-8	-8	195	11.945
37	289	-7	-7	222	11.935
38	603	-9	-9	221	11.910
39	192	-8	-8	214	11.895
40	90	-8	-8	214	11.875
41	90	-9	-9	209	11.845
42				212	11.840
43				194	11.800
44				184	11.790
45				195	11.780
46				178	11.765
47				188	11.745
48				187	11.725
49				188	11.715
50				180	11.710
51				184	11.690
52				176	11.670
53				164	11.640
54				167	11.655
55				170	11.645
56				173	11.635
57				170	11.620
58				156	11.610
59				157	11.590
60				162	11.580
61				161	11.575
62				132	11.565
63				152	11.550
64				162	11.545
65				153	11.535
66				158	11.525
67				141	11.510
68				143	11.510
69				149	11.500
70				148	11.490

Time	Concentration (ppm)			T (Pot)	Mass (kg)
(min)	CO	NO	NO_x	(°C)	(Pot)
71				137	11.480
72				131	11.460
73				133	11.455
74				137	11.455
75				135	11.445
76				129	11.440
77				129	11.435
78				125	11.420
79				124	11.410
80				118	11.405
81				111	11.385
82				112	11.380
83				115	11.380
84				113	11.380
85				111	11.375
86				111	11.370
87				107	11.365
88				107	11.365
89				106	11.360
90				103	11.355
91				94	11.345
92				98	11.340
93				92	11.340
94				86	11.330
95				92	11.325
96				90	11.320
97				88	11.320
98				89	11.315
99				86	11.315
100				80	11.310

ตารางที่ ก.15 ข้อมูลดิบสำหรับการเผาไหม้กะลาอัดไร้ควัน ปริมาณ 800 g ในเตาประสิทธิภาพสูง โดยมีอุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำ 30 °C ปริมาณน้ำตอนเริ่มต้น 3,000 มิลลิลิตร และปริมาณน้ำตอนสุดท้าย 1,540 มิลลิลิตร

Time	Concentration (ppm)			T (Pot)	Mass (kg)
(min)	CO	NO	NO_x	(°C)	(Pot)
1	118	3	3	69	13.985
2	288	2	2	89	13.970
3	493	4	4	112	13.960
4	141	9	9	121	13.945
5	923	6	6	147	13.930
6	463	12	12	168	13.915
7	1280	6	6	176	13.895
8	372	7	7	201	13.870
9	851	10	10	245	13.855
10	1087	5	5	268	13.815
11	843	4	4	288	13.860
12	156	6	6	333	13.775
13	1065	7	7	362	13.750
14	841	3	3	370	13.715
15	381	5	5	382	13.695
16	1231	5	5	375	13.665
17	456	4	4	370	13.630
18	430	5	5	319	13.570
19	774	3	3	294	13.535
20	992	5	5	285	13.490
21	145	5	5	265	13.445
22	1332	5	5	275	13.400
23	1568	4	4	301	13.365
24	988	4	4	298	13.320
25	1243	3	3	279	13.285
26	1211	3	3	277	13.240
27	1297	3	3	271	13.200
28	988	3	3	270	13.160
29	400	3	3	273	13.120
30	991	3	3	265	13.095
31	512	3	3	255	13.060
32	1028	3	3	235	13.030

Time	Concentration (ppm)			T (Pot)	Mass (kg)
(min)	CO	NO	NO_x	(°C)	(Pot)
33	1076	3	3	245	12.995
34	347	3	3	243	12.965
35	402	3	3	232	12.930
36	689	3	3	206	12.900
37	1250	3	3	187	12.865
38	1295	3	3	214	12.835
39	2067	3	3	205	12.810
40	1073	3	3	207	12.775
41	902	4	4	207	12.750
42	484	3	3	196	12.720
43	2213	3	3	203	12.695
44	1306	3	3	196	12.670
45	1515	4	4	199	12.645
46	1520	3	3	192	12.620
47	1079	3	3	180	12.600
48	1361	3	3	178	12.575
49	1328	2	2	177	12.555
50	599	3	3	180	12.535
51	1493	3	3	178	12.515
52	1722	2	2	170	12.495
53	1084	2	2	175	12.460
54	1443	3	3	168	12.450
55	1480	2	2	170	12.430
56	1195	3	3	161	12.410
57	1294	3	3	164	12.390
58	699	2	2	162	12.375
59	1039	2	2	158	12.360
60	576	2	2	160	12.345
61	658	2	2	156	12.330
62	653	2	2	149	12.315
63	528	2	2	162	12.290
64	286	2	2	161	12.280
65	609	2	2	161	12.270
66	992	2	2	142	12.255
67	769	2	2	135	12.245
68	586	2	2	138	12.230
69		2	2	127	12.215
70		2	2	122	12.200

Time	Concentration (ppm)			T (Pot)	Mass (kg)
(min)	CO	NO	NO_x	(°C)	(Pot)
71				132	12.190
72				141	12.180
73				140	12.165
74				137	12.155
75				132	12.145
76				128	12.140
77				126	12.130
78				126	12.120
79				121	12.110
80				120	12.100
81				114	12.090
82				110	12.085
83				95	12.075
84				101	12.070
85				99	12.060
86				104	12.055
87				103	12.045
88				100	12.035
89				96	12.030
90				90	12.025
91				85	12.020
92				93	12.010
93				86	12.005
94				83	12.000

ตารางที่ ก.16 ข้อมูลดิบสำหรับการเผาไหม้กะลาอัดไร้ควัน ปริมาณ 600 g ในเตาทรงกระบอก (เตาดำ) โดยมีอุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำ 32 °C ปริมาณน้ำตอนเริ่มต้น 3,000 มิลลิลิตร และปริมาณน้ำตอนสุดท้าย 2,320 มิลลิลิตร

Time	Concentration (ppm)			T (Pot)	Mass (kg)
(min)	CO	NO	NO_x	(°C)	(Pot)
1	40	2	2	44	15.230
2	291	3	3	46	15.130
3	602	4	4	47	15.120
4	429	4	4	47	15.115
5	561	4	4	56	15.110
6	613	5	5	61	15.110
7	594	5	5	89	15.095
8	672	7	7	96	15.080
9	901	8	8	83	15.060
10	601	5	5	101	15.055
11	946	7	7	121	15.045
12	973	7	7	141	15.030
13	877	7	7	160	15.015
14	751	5	6	201	15.000
15	921	7	7	210	14.965
16	911	8	8	211	14.940
17	1012	9	9	281	14.915
18	493	5	5	279	14.895
19	821	4	4	221	14.830
20	1039	4	4	207	14.820
21	1320	3	3	216	14.810
22	1313	3	3	217	14.780
23	1399	3	3	221	14.750
24	1001	2	2	226	14.720
25	1090	2	2	218	14.690
26	1450	2	2	237	14.665
27	1542	2	2	231	14.635
28	1291	2	2	238	14.605
29	1416	2	2	200	14.580
30	1457	2	2	213	14.555
31	1892	2	2	207	14.525
32	899	2	2	205	14.505

Time	Concentration (ppm)			T (Pot)	Mass (kg)
(min)	CO	NO	NO_x	(°C)	(Pot)
33	770	1	1	190	14.485
34	1219	0	1	187	14.465
35	1353	1	1	182	14.440
36	1553	1	1	158	14.420
37	774	1	1	151	14.400
38	640	0	0	149	14.385
39	832	0	0	128	14.350
40	1306	0	0	138	14.345
41	992	0	0	150	14.325
42	832	0	0	147	14.315
43	1179	0	0	145	14.305
44	1217	0	0	136	14.290
45	1283	1	1	142	14.270
46	1215	1	1	133	14.260
47	1,000	1	1	134	14.250
48	1231	0	0	133	14.235
49	1150	1	1	115	14.180
50	1211	1	1	100	14.180
51	1259	1	1	90	14.165
52	980	1	1	87	14.160
53	615	2	2	83	14.145
54	710	2	2		
55	1022	1	1		
56	1156	1	1		
57	936	1	1		
58	800	1	1		
59	771	1	1		
60	702	1	1		
61	840	1	1		
62	830	1	1		
63	627	1	1		

ตารางที่ ก.17 ข้อมูลดิบสำหรับการเผาไหม้กะลาอัดไร้ควัน ปริมาณ 600 g ในเตาทรงกรวย (เตาแดง) โดยมีอุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำ 29 °C ปริมาณน้ำตอนเริ่มต้น 3,000 มิลลิลิตร และปริมาณน้ำตอนสุดท้าย 2,250 มิลลิลิตร

Time	Concentration (ppm)			T (Pot)	Mass (kg)
(min)	CO	NO	NO_x	(°C)	(Pot)
1	53	1	1	57	12.580
2	86	2	2	64	12.575
3	167	2	2	86	12.560
4	165	2	2	75	12.525
5	182	2	2	83	12.450
6	261	2	3	97	12.490
7	239	2	3	74	12.480
8	138	2	2	128	12.470
9	480	4	4	239	12.440
10	365	3	4	252	12.400
11	296	3	3	350	12.380
12	367	4	4	396	12.355
13	626	4	4	373	12.325
14	352	3	3	358	12.300
15	347	3	3	303	12.270
16	290	2	2	219	12.240
17	539	2	2	231	12.220
18	359	3	3	215	12.185
19	316	2	2	236	12.160
20	327	3	3	202	12.130
21	264	1	1	232	12.090
22	255	1	1	175	12.055
23	327	1	1	146	12.030
24	329	1	1	202	12.010
25	577	1	1	200	11.960
26	709	1	1	118	11.955
27	831	2	2	123	11.935
28	520	1	1	123	11.915
29	646	1	1	110	11.885
30	842	1	1	121	11.870
31	683	1	1	135	11.850
32	769	1	1	128	11.830

Time (min)	Concentration (ppm)			T (Pot) (°C)	Mass (kg) (Pot)
	CO	NO	NO_x		
33	784	1	1	123	11.815
34	1061	0	0	124	11.785
35	781	0	0	118	11.755
36	725	0	0	108	11.735
37	870	1	1	110	11.720
38	910	1	1	111	11.715
39	815	1	1	112	11.700
40	934	1	1	112	11.690
41	886	1	1	109	11.670
42	777	1	1	111	11.650
43	779	1	1	106	11.645
44	745	1	1	104	11.630
45	840	1	1	99	11.620
46	554	1	1	100	11.605
47	489	0	0	94	11.590
48	890	1	1	99	11.580
49	723	1	1	100	11.570
50	579	1	1	104	11.560
51	302	1	1	96	11.540
52	643	1	1	90	11.535
53	426	1	1	91	11.525
54	271	0	0	96	11.510
55	329	1	1	83	11.495
56	158	1	1	92	11.480
57	110	1	1	87	11.485
58	172	1	1		
59	103	1	1		

ตารางที่ ก.18 ข้อมูลดิบสำหรับการเผาไหม้กะลาอัดไร้ควัน ปริมาณ 600 g ในเตาประสิทธิภาพสูง โดยมีอุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำ 28 °C ปริมาณน้ำตอนเริ่มต้น 3,000 มิลลิลิตร และปริมาณน้ำตอนสุดท้าย 1,950 มิลลิลิตร

Time	Concentration (ppm)			T (Pot)	Mass (kg)
(min)	CO	NO	NO_x	(°C)	(Pot)
1	338	2	2	119	13.755
2	394	0	0	209	13.700
3	173	4	4	215	13.685
4	594	0	0	150	13.660
5	630	1	2	249	13.630
6	101	1	1	226	13.600
7	203	3	2	179	13.570
8	751	3	3	121	13.535
9	362	2	2	116	13.495
10	701	3	3	100	13.470
11	625	1	2	114	13.410
12	1001	2	2	112	13.340
13	493	1	1	149	13.290
14	346	2	2	131	13.250
15	510	1	1	156	13.210
16	810	0	0	104	13.195
17	919	1	1	145	13.115
18	585	4	5	130	13.075
19	494	4	5	152	13.035
20	1407	5	5	137	12.995
21	1006	5	5	121	12.965
22	1232	6	6	118	12.935
23	1412	6	6	123	12.905
24	1463	7	7	153	12.880
25	2260	7	7	131	12.845
26	1555	7	7	127	12.820
27	1010	7	7	107	12.800
28	1406	7	7	104	12.780
29	2441	7	7	126	12.755
30	1269	8	8	106	12.730
31	421	8	8	92	12.710
32	337	8	9	93	12.690

Time	Concentration (ppm)			T (Pot)	Mass (kg)
(min)	CO	NO	NO_x	(°C)	(Pot)
33	1645	8	8	95	12.675
34	1194	8	8	93	12.660
35	1430	8	9	92	12.640
36	935	9	9	80	12.625
37	1620	8	9	72	12.615
38	292	9	9		
39	1534	9	9		
40	1565	8	9		
41	874	9	9		
42	1515	9	9		
43	496	9	9		
44	1446	9	9		
45	1199	9	10		
46	635	10	10		
47	1412	9	9		
48	942	9	9		
49	934	10	10		
50	754	9	9		
51	267	9	10		

ภาคผนวก ข
ตัวอย่างการคำนวณ

ข.1 การคำนวณหาร้อยละการเผาไหม้สมบูรณ์ (% complete combustion)

การคำนวณร้อยละการเผาไหม้สมบูรณ์ (% complete combustion) สามารถคำนวณโดยใช้สมการที่ (3.1) ดังนี้

$$\%\ \text{complete combustion} = \frac{(m_{\text{initial}} - m_{\text{actual}})}{(m_{\text{initial}} - m_{\text{ash}})} \times 100 \qquad (3.1)$$

โดยที่สมการที่ (3.2) เป็นการเปรียบเทียบปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ไปจริงในระหว่างการเผาไหม้ [$m_{initial} - m_{actual}$] กับปริมาณเชื้อเพลิงที่เผาไหม้จนเหลือแต่เถ้า (ash) [$m_{initial} - m_{ash}$] ที่ได้จากการวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) ตามสมการที่ (3.1) ทั้งนี้ $m_{initial}$ คือ มวลเริ่มต้นของตัวอย่างถ่านไม้

ข้อมูลการทดลอง

จากการทดสอบค่าร้อยละการเผาไหม้สมบูรณ์ (% complete combustion) ของการเผาไหม้ถ่านไม้โกงกาง (ซึ่งมีเถ้าร้อยละ 2.6 จากตารางที่ 4.1) ปริมาณ 1,000 g (1.0 kg) ในเตาทรงกระบอก (เตาดำ) พบว่า มีข้อมูลต่างๆ ดังนี้

- $m_{initial}$ 1,000 g
- m_{actual} 25.65 g
- m_{ash} 26 g (ปริมาณของเถ้าที่เหลือตามทฤษฎี)

เมื่อนำข้อมูลต่างๆ มาคำนวณ โดยใช้สมการที่ (3.1) จะสามารถคำนวณค่าร้อยละการเผาไหม้สมบูรณ์ (% complete combustion) ได้ดังนี้

$$\%\ \text{complete combustion} = \frac{(1{,}000 - 25.65)\ \text{g}}{(1{,}000 - 26.00)\ \text{g}} \times 100$$

$$\%\ \text{complete combustion} = \frac{974.35}{974.00} \times 100 = 100\%$$

ข.2 การคำนวณหาประสิทธิภาพการใช้งาน (% usage efficiency) ของเตาอั้งโล่

การคำนวณประสิทธิภาพของเตาอั้งโล่ สามารถคำนวณโดยใช้สมการที่ (3.2) ดังนี้

$$\eta = \frac{m_{w_i} c_{p_w} \left(T_b - T_i\right) + m_{\text{evap}} h_{fg}}{m_f \times HV_f} \tag{3.2}$$

โดยที่

m_{w_i} = มวลของน้ำเริ่มต้น (kg)

c_{p_w} = ความร้อนจำเพาะของน้ำ (kJ/kg-K)

T_b = อุณหภูมิของน้ำเดือด (K)

T_i = อุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำ (K)

m_{evap} = มวลของน้ำที่ระเหยกลายเป็นไอ (kg)

h_{fg} = ค่าความร้อนของการเปลี่ยนสถานะ (กลายเป็นไอ) ของน้ำ (kJ/kg)

m_f = มวลของเชื้อเพลิงที่ใช้ (kg)

HV_f = ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่ใช้ (kJ/kg)

เมื่อพิจารณาสมการที่ (3.2) พบว่า สามารถแบ่งพจน์ต่างๆ ออกได้เป็น 3 พจน์ คือ

- $m_{w_i} c_{p_w} \left(T_b - T_i\right)$ เป็นพจน์ของพลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนอุณหภูมิของน้ำ (sensible heat)
- $m_{\text{evap}} h_{fg}$ เป็นพจน์ของพลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะของน้ำ (latent heat) จากของเหลวให้กลายเป็นไอ
- $m_f h_f$ เป็นพจน์ของพลังงานที่ได้จากเชื้อเพลิง หรือพลังงานที่ใส่เข้าไปในระบบ (energy input)

ดังนั้น สมการข้างต้นจึงเป็นการเปรียบเทียบพลังงานหรือความร้อนที่นำไปใช้งานกับพลังงานหรือความร้อนทั้งหมดที่ใส่เข้าไปในระบบ ซึ่งเรียกสัดส่วนนี้ว่า ประสิทธิภาพ (efficiency หรือ ประสิทธิภาพการใช้งาน (usage efficiency)

ข้อมูลการทดลอง

จากการทดสอบหาประสิทธิภาพด้วยการต้มน้ำ (water-boiling test) ของการเผาไหม้ถ่านไม้โกงกาง [ซึ่งมีค่าความร้อน (heating value) เท่ากับ 24,700 kJ/kg] ปริมาณ 1,000 g (1.0 kg) ในเตาทรงกระบอก (เตาดำ) พบว่า มีข้อมูลต่างๆ ดังนี้

- อุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำ 28 °C
- อุณหภูมิของน้ำเดือด 99 °C
- น้ำหนักของน้ำเริ่มต้น 3,000 g (3.0 kg) (ปริมาตร 3,000 mL)
- น้ำหนักของน้ำที่เหลืออยู่ 200 g (0.20 kg) (ปริมาตร 200 mL)

เมื่อนำข้อมูลต่างๆ มาคำนวณ โดยใช้สมการที่ (3.2) โดยใช้ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ เท่ากับ 4.187 kJ/kg-°C และใช้ค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ เท่ากับ 2,256 kJ/kg จะสามารถคำนวณประสิทธิภาพหรือประสิทธิภาพการใช้งาน ได้ดังนี้

$$\eta = \frac{\left\{(3.0\text{ kg})\left(4.187\ \frac{\text{kJ}}{\text{kg-}^{\circ}\text{C}}\right)\left[(99\,^{\circ}\text{C} - 28\,^{\circ}\text{C})\right]\right\} + \left[(3.0\text{ kg}) - (0.20\text{ kg})\right]\left(2{,}256\ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right)}{(1.0\text{ kg})\left(24{,}700\ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right)}$$

$$= \frac{891.8\text{ kJ} + 6{,}316.8\text{ kJ}}{24{,}700\text{ kJ}}$$

$$= \frac{7{,}208.6\text{ kJ}}{24{,}700\text{ kJ}}$$

$$\eta = 0.292 = 29.2\%$$

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายตรีกิตติ ไตรบุตร
วันเดือนปีเกิด	27 ธันวาคม 2531
วุฒิการศึกษา	ปีการศึกษา 2554: วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี) มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ตำแหน่ง	วิศวกร บริษัท ไทยบริดจสโตน จำกัด

ผลงานทางวิชาการ

1. ตรีกิตติ ไตรบุตร, โปรดปราน สิริธีรศาสน์, สาธก ไชยกุลชื่นสกุล. การเผาไหม้และการปลดปล่อยก๊าซมลพิษของถ่านไม้ในเตาหุงต้มแบบต่างๆ. การประชุมวิชาการระดับชาติ “วิทยาศาสตร์วิจัย” ครั้งที่ 7; 31 มี.ค. 58; คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร; 2558. บทความหมายเลข CH-O-018.
2. ตรีกิตติ ไตรบุตร, โปรดปราน สิริธีรศาสน์, สาธก ไชยกุลชื่นสกุล. การเผาไหม้และการปลดปล่อยก๊าซมลพิษของถ่านไม้ในเตาหุงต้มแบบต่างๆ. การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24; จังหวัดเชียงใหม่; 2557 บทความหมายเลข NA-EM-001.

ประสบการณ์ทำงาน	2555-ปัจจุบัน: วิศวกร บริษัท ไทยบริดจสโตน จำกัด