



การพัฒนาเตาเผาผลิตภาชนะรามิกขนาดเล็กที่ใช้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์จาก
แก๊สชีฟเฟอร์แบบไหลขวาง

DEVELOPMENT OF SMALL CERAMIC KILN EMPLOYING SYNGAS PROVIDED
BY BIOMASS CROSSDRAFT GASIFIER

ณัฐวัฒน์ อ้นสมศรี

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

2565

การพัฒนาเตาเผาผลิตภัณฑ์เซรามิกขนาดเล็กที่ใช้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์จาก
แก๊สซีพีเออร์แบบไหลขวาง



ณัฐวัฒน์ อ้นสมศรี

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ปีการศึกษา 2565

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

DEVELOPMENT OF SMALL CERAMIC KILN EMPLOYING SYNGAS PROVIDED
BY BIOMASS CROSSDRAFT GASIFIER



NATHAWAT UNSOMSRI

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of MASTER OF ENGINEERING
(Mechanical Engineering)

Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University

2022

Copyright of Srinakharinwirot University

ปริญญานิพนธ์

เรื่อง

การพัฒนาเตาเผาผลิตภัณฑ์เซรามิกขนาดเล็กที่ใช้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์จาก

แก๊สซีพีเออร์แบบไหลขวาง

ของ

ณัฐวัฒน์ อ้นสมศรี

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

(รองศาสตราจารย์ นายแพทย์ฉัตรชัย เอกปัญญาสกุล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์

..... ที่ปรึกษาหลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมมาส แก้วล้วน)

..... ประธาน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรัชย์ ณัฐฐ์ จันทร์ศรี)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สงกรานต์ วิริยะศาสตร์)

ชื่อเรื่อง	การพัฒนาเตาเผาผลิตภัณฑเซรามิกขนาดเล็กที่ใช้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์จากแก๊สซีพีเออร์แบบไหลขวาง
ผู้วิจัย	ณัฐวัฒน์ อันสมศรี
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ปีการศึกษา	2565
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมมาส แก้วล้วน

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาเครื่องผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์จากเศษไม้เพื่อใช้เป็นแหล่งความร้อนสำหรับเตาเผาเซรามิก โดยเครื่องผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์เป็นแบบอากาศไหลขวางมีหน้าตัด 0.25×0.25 เมตร และหัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 เมตร โดยเศษไม้ที่มีค่าความร้อนต่ำ (LHV) 15,887 kJ/kg ผลการทดสอบเครื่องโดยให้เครื่องทำงานได้ใน 2 ช่วง ช่วงเริ่มต้นที่อุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิกต่ำกว่า 400°C ให้ส่วนผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์จากเศษไม้ทำงานเป็นเตาเผาเศษไม้และส่วนเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ทำหน้าที่เป็นช่องทางไหลของแก๊สร้อน และเมื่ออุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิกสูงกว่า 400°C เป็นช่วงการทำงานแบบปกติ ผลการทดลองพบว่าอัตราการป้อนไม้และระดับไม้ในเตารวมถึงอัตราการป้อนอากาศส่วนที่หนึ่งส่งผลต่อการเผาไหม้เศษไม้และการผลิตแก๊สจากเศษไม้ ในช่วงอุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิกต่ำกว่า 400°C ค่าอัตราส่วนสมมูลอากาศส่วนแรกมีค่าอยู่ในช่วง 1.36 - 1.79 โดยจะมีค่าลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น และในช่วงที่อุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิกสูงกว่า 400°C ค่าอัตราส่วนสมมูลอากาศส่วนแรกมีค่าอยู่ในช่วง 0.33 - 0.61 โดยจะมีค่าลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น และมีการเติมอากาศส่วนที่ 2 เข้าไปเพื่อเผาแก๊สทำให้ค่าอัตราส่วนสมมูลรวมมีค่าอยู่ในช่วง 1.20 - 1.30 อุณหภูมิสูงสุดที่ทางออกจากเครื่องผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์มีค่า $1,152^{\circ}\text{C}$ ผลการวิเคราะห์การปลดปล่อยมลพิษจากไอเสียพบว่าในช่วงอุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิกสูงกว่า 400°C ปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) มีค่าต่ำกว่า 690 ppm และแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) มีค่าสูงสุดเท่ากับ 225 ppm ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานอยู่เล็กน้อย ตัวอย่างแก้วเซรามิกที่ได้เผาจากชุดทดลองให้สีคล้ำกว่าแก้วเซรามิกที่เผาด้วยเตาเผาไฟฟ้า ค่าการหดตัว ความหนาแน่น และการดูดซึมน้ำ 2.69% 1.71 mg/mL และ 18.51% ตามลำดับ

คำสำคัญ : แก๊สซีพีเออร์แบบไหลขวาง, แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์, แก๊สซีพีเคชั่น, เผาดิบ, ผลิตภัณฑเซรามิก

Title	DEVELOPMENT OF SMALL CERAMIC KILN EMPLOYING SYNGAS PROVIDED BY BIOMASS CROSSDRAFT GASIFIER
Author	NATHAWAT UNSOMSRI
Degree	MASTER OF ENGINEERING
Academic Year	2022
Thesis Advisor	Assistant Professor Dr. Sommas Kaewluan

This research aims to develop a synthetic fuel gas gasifier and burner that could produce synthesized fuel gas from wood scraps to use as a heat source for ceramic kilns. The synthetic fuel gas gasifier was a cross-draft with a cross-sectional area of 0.25×0.25 meters, and the gasification nozzle had a diameter of 0.2 meters. The wood scraps used in the system had a low heating value (LHV) of 15,887 kJ/kg. The test results showed that when the machine was operated in two phases; during the initial phase where the temperature inside the ceramic kiln was below 400°C, the gas generation section worked as a wood scrap kiln and the gas burning section acted as a pathway for hot gas flow. During the second phase, when the temperature inside the ceramic kiln was above 400°C, the machine worked normally. The experimental results showed that the feeding rate of wood and the level of wood in the kiln, including the rate of air supply, affected the combustion of wood scraps and gas production. At temperatures below 400 °C in the kiln, the equivalence ratio of the first air supply component ranged from 1.36 to 1.79 and decreased as the temperature increased. At temperatures above 400 °C in the kiln, the equivalence ratio of the first air supply component ranged from 0.33-0.61 and decreased as the temperature increased. Air was then added to the second component to combust the gas, resulting in a total equivalence ratio of 1.20-1.30. The maximum temperature at the outlet of a synthetic fuel gas gasifier and burner was 1,152 °C. The analysis of the release of pollutants from exhaust gases showed that at temperatures above 400°C in the ceramic kiln, the amount of carbon monoxide (CO) was less than 690 ppm, and the maximum value of nitrogen oxides (NOx) was 225 ppm, slightly higher than the standard. The ceramic glass samples burned in the experiment were darker in color than those burned in the electric kiln. The shrinkage, density, and water absorption were 2.69%, 1.71 mg/mL, and 18.51%, respectively

Keyword : Crossdraft gasifier, Synthetic fuel gas, Gasification, Biscuit firing, Ceramic products

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความสามารถช่วยเหลือ และความเอาใจใส่อย่างดี ยิ่งตลอดจนการให้คำแนะนำ และข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับการปรับแก้ไขข้อบกพร่อง จากคณะกรรมการผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมมาส แก้วล้วน และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิทธิพันธ์ ท่อแก้ว ที่ได้ให้ความเมตตากรุณาเป็นที่ปรึกษาและให้ความช่วยเหลือชี้แนะแนวทางในสิ่งที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกาและการทำปริญญาานิพนธ์นี้ด้วยความเอาใจใส่ตลอดมา

รวมทั้ง รองศาสตราจารย์ ดร.สงกรานต์ วิริยะศาสตร์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรัช ญรัฐ จันทศรี ที่กรุณาให้ข้อเสนอแนะต่างๆ เพิ่มเติมแก่ผู้วิจัย ทำให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้มีความ สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่ได้กรุณาอบ ทุนระดับบัณฑิตศึกษาให้แก่ผู้วิจัยตลอดปีการศึกษา

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์และกรรมการบริหารหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒทุกท่าน ที่ได้ กรุณาประสิทธิ์ประสาทความรู้ต่างๆ ให้แก่ผู้วิจัย ตลอดจนให้ความช่วยเหลือในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณพี่ๆ และน้อง ๆ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล รวมถึงบุคคลอีกหลายท่านที่ไม่ได้ กล่าวนามไว้ ณ ที่นี้ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจให้กับผู้วิจัยมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอโน้มรำลึกถึงคุณของบิดามารดาและครูอาจารย์ ที่อบรมสั่งสอนให้ ความรู้เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนผู้วิจัยด้วยดีตลอดมา

ณัฐวัฒน์ อันสมศรี

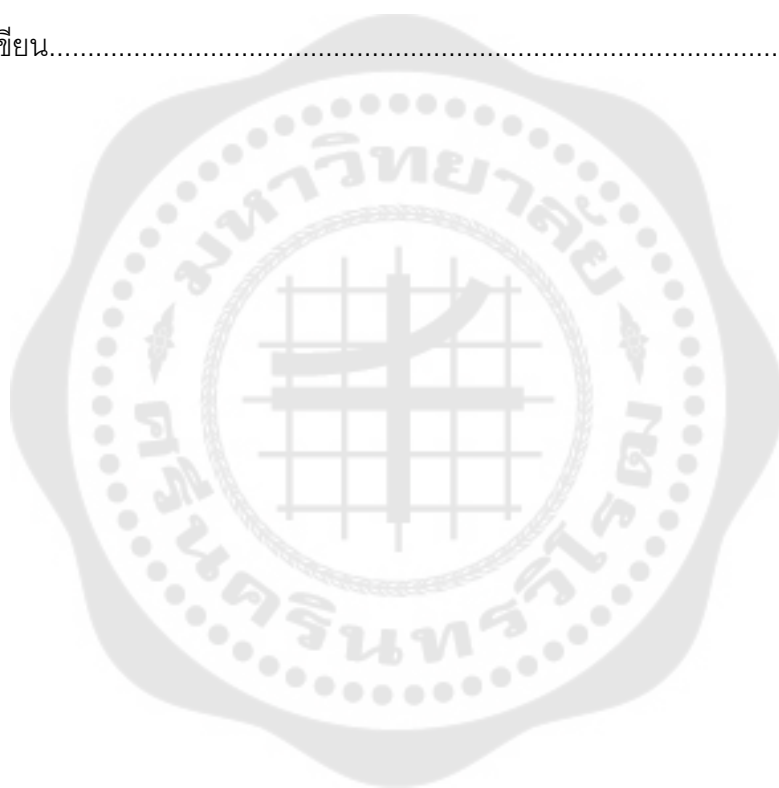
สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูปภาพ	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตโครงงานวิศวกรรม	3
1.4 ประโยชน์ที่จะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและบทปริทัศน์วรรณกรรม	4
2.1 เครื่องผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์	4
2.1.1 ชีวมวล	4
2.1.2 กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน	6
2.1.3 ทฤษฎีและการคำนวณการเผาไหม้.....	9
2.1.4 อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง	11
2.1.5 ค่าความร้อนเชื้อเพลิง.....	12
2.1.6 อัตราส่วนอากาศสมมูลสำหรับกระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์	13
2.1.7 อัตราการป้อนอากาศเพื่อเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์.....	14
2.1.8 อัตราส่วนอากาศสมมูลสำหรับกระบวนการเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์.....	14

2.1.9 สมดุลพลังงานของระบบ	15
2.1.10 การออกแบบเครื่องผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์.....	16
2.1.11 เครื่องผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แบบไหลขวาง	16
2.2 เตาเผาผลิตก๊าซเซรามิก.....	17
2.2.1 ผลิตก๊าซเซรามิก	17
2.2.2 ชนิดเตาเผาผลิตก๊าซเซรามิก.....	18
2.2.3 ส่วนประกอบของเตาเผาผลิตก๊าซเซรามิก.....	19
2.2.4 วัสดุทนไฟและอุปกรณ์สำหรับใช้ในการเผาเซรามิก	20
2.2.5 การเผาผลิตก๊าซเซรามิก	24
2.2.6 การเกิดปฏิกิริยาในเนื้อของผลิตก๊าซเซรามิกระหว่างการเผา	27
2.2.7 การสูญเสียความร้อนในเตาเผา	32
2.2.8 ทฤษฎีการนำความร้อนแบบหลายชั้น	32
2.2.9 วิธีการวิเคราะห์สมบัติของแก้วเซรามิก.....	34
2.3 ระบบควบคุมการทำงาน	34
2.4 มาตรฐานคุณภาพอากาศที่ระบายออกสำหรับโรงงานอุตสาหกรรม	37
2.5 บทปริทัศน์วรรณกรรม	39
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	42
3.1 ออกแบบและสร้างเตาเผาผลิตก๊าซเซรามิก	42
3.2 หลักการทำงานของชุดเตาเผาเซรามิก	47
3.3 วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง	50
3.3.1 การเตรียมตัวอย่างแก้วเซรามิกสำหรับเผาดิบ.....	50
3.3.2 เครื่องมือการวัด	51
3.3.3 ตำแหน่งติดตั้งเครื่องมือวัด.....	53

3.3.4 วิธีการทดลอง	53
3.3.5 วิธีการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	54
3.4 เงื่อนไขการทดลอง	55
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน	57
4.1 ผลการศึกษาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อเตาผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์	57
ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเศษไม้	57
ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอากาศและไม้เชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าสู่เตาผลิตและเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์	58
ผลการปลดปล่อยแก๊สมลพิษจากเตาผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์.....	62
4.2 ผลการศึกษากาไรใช้แก๊สร้อนจากเตาผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์เพื่อเผาบิสกิต .	64
ผลการเร่งอุณหภูมิในการเผาต่อสมบัติตัวอย่างแก้วเซรามิกหลังเผา.....	64
ผลการเร่งอุณหภูมิในการเผาบิสกิตโดยใช้โปรแกรม PLC.....	70
4.3 ผลการการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์.....	71
ผลการการวิเคราะห์ต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์.....	71
ผลการเปรียบเทียบระยะเวลาความคุ้มทุน	72
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	75
สรุปผลการทดลอง	75
อภิปรายผลการทดลอง.....	77
ข้อเสนอแนะ	79
บรรณานุกรม	80
ภาคผนวก.....	82
ภาคผนวก ก ไดอะแกรมการทำงานและคู่มือการเผาผลิตภัณฑ์เซรามิก.....	83
ภาคผนวก ข โปรแกรม PLC.....	89

ภาคผนวก ค ตารางบันทึกผลการทดลอง	107
ภาคผนวก ง ตัวอย่างรายการคำนวณ.....	178
ภาคผนวก จ ตารางบันทึกผลการวัดไอเสีย.....	182
ภาคผนวก ฉ ขั้นตอนการเตรียมวัสดุและวิธีการหล่อแก้วผลิตภัณฑ์เซรามิก.....	184
ภาคผนวก ช แบบชุดเตาเผาผลิตภัณฑ์เซรามิก	187
ภาคผนวก ซ ผลงานตีพิมพ์.....	194
ประวัติผู้เขียน.....	208



สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง 1 คุณสมบัติทางเคมีของซีเมนต์.....	5
ตาราง 2 แสดงสมการการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง.....	9
ตาราง 3 แสดงสมการการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้เชื้อเพลิงแก๊ส.....	11
ตาราง 4 แสดงปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง.....	11
ตาราง 5 ข้อมูลผลิตภัณฑ์จนวนทนไฟเซรามิกไฟเบอร์.....	24
ตาราง 6 ยานการวัดอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลชนิดต่าง ๆ.....	26
ตาราง 7 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการเผาบรรยากาศออกซิเดชันและรีดักชัน.....	31
ตาราง 8 ค่ามาตรฐานคุณภาพอากาศที่ระบายออกสำหรับโรงงานอุตสาหกรรม.....	37
ตาราง 9 แสดงการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณและการวิเคราะห์ธาตุเคมี.....	57
ตาราง 10 แสดงอัตราการปนเปื้อนอากาศและปริมาณเชื้อเพลิงสำหรับเตาผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิง สังเคราะห์.....	60
ตาราง 11 แสดงอัตราการใช้ไม้เชื้อเพลิงในการทดลอง.....	66
ตาราง 12 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของแก้วผลิตภัณฑ์เซรามิกตัวอย่างที่ผ่านการเผาปกติ....	68
ตาราง 13 แสดงการเปรียบเทียบการวิเคราะห์ต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์.....	72
ตาราง 14 แสดงรายการราคาต้นทุนสำหรับสร้างชุดเตาเผาเซรามิก.....	72

ตาราง 15 เปรียบเทียบระยะเวลาความคุ้มทุน 74



สารบัญรูปภาพ

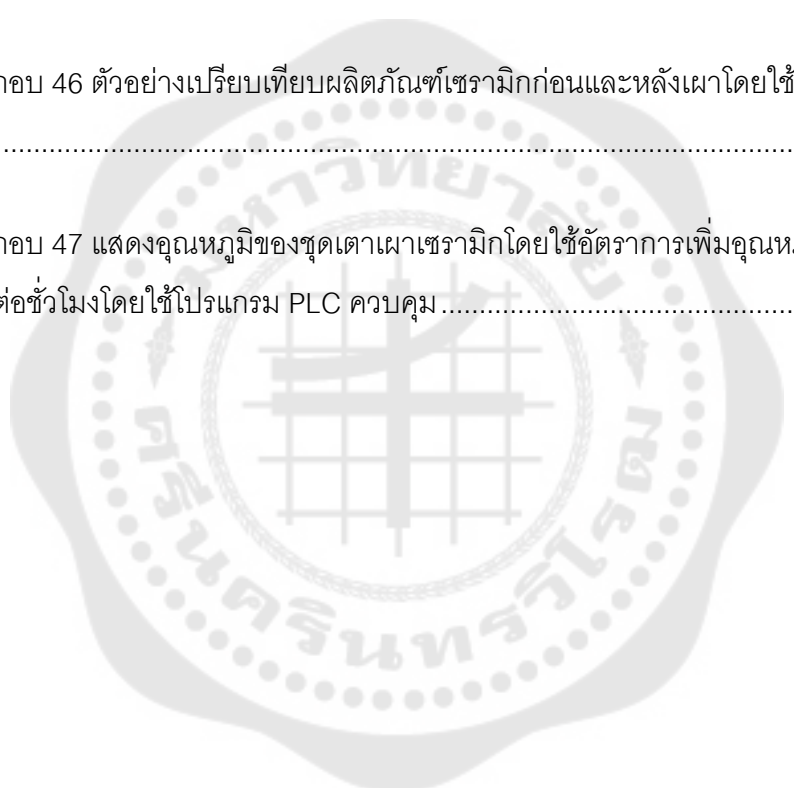
หน้า

ภาพประกอบ 1 กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันจากชีวมวล	6
ภาพประกอบ 2 เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แบบไหลขวาง(Crossdraft gasifier).....	16
ภาพประกอบ 3 เตาที่เปิดด้านบน (Top loaders kiln).....	18
ภาพประกอบ 4 เตาที่เปิดด้านหน้า (Front loaders kiln).....	18
ภาพประกอบ 5 เตายกหรือเตาครอบ (Top hats kiln).....	18
ภาพประกอบ 6 เตารถเข็นหรือเตาชัตเติล (Car kilns or Shuttle Kiln)	19
ภาพประกอบ 7 เตาที่เปิด-ปิดฝา (Clam shells kiln)	19
ภาพประกอบ 8 วัสดุทนไฟสำหรับรองรับเผาชนิดกล่อง	20
ภาพประกอบ 9 วัสดุอุปกรณ์ทนไฟและแผ่นรองรับ.....	21
ภาพประกอบ 10 วัสดุทนไฟรองรับเผาจาน/ชาม	21
ภาพประกอบ 11 อิฐฉนวนทนไฟ	22
ภาพประกอบ 12 คอนกรีตทนไฟชนิดฉนวนทนไฟ.....	23
ภาพประกอบ 13 การวิเคราะห์ช่วงอุณหภูมิที่มีการเกิดปฏิกิริยาในเนื้อดินวัตถุดิบ	29
ภาพประกอบ 14 กราฟการดูดกลืนและคายความร้อนที่เกิดขึ้นในสารต่าง ๆ	29
ภาพประกอบ 15 เครื่องวิเคราะห์สมบัติทางการขยายตัวทางความร้อน	31

ภาพประกอบ 16 การสูญเสียความร้อนในเตาเผา.....	32
ภาพประกอบ 17 การนำความร้อนแบบหลายชั้น	33
ภาพประกอบ 18 ไดอะแกรมการทำงานพีแอลซี.....	35
ภาพประกอบ 19 (ก) แบบเตาเผาผลิตภัณฑ์เซรามิกที่ทำงานร่วมกับเครื่องผลิตและเผาแก๊ส เชื้อเพลิงสังเคราะห์ (ข) เตาเผาผลิตภัณฑ์เซรามิกและเครื่องผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่ สร้างเสร็จ	43
ภาพประกอบ 20 เตาผลิตและเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์.....	44
ภาพประกอบ 21 เตาเผาเซรามิก.....	45
ภาพประกอบ 22 พัดลมป้อนอากาศ (Air fan part)	46
ภาพประกอบ 23 พัดลมดูดไอเสีย (Exhaust fan part).....	46
ภาพประกอบ 24 รอกไฟฟ้า (Electric hoist)	47
ภาพประกอบ 25 ส่วนประกอบของชุดเตาเผาเซรามิก (1) เตาเผาเซรามิก, (2) เตาผลิตและเผา แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์, (3) พัดลมป้อนอากาศ, (4) พัดลมดูดไอเสีย, (5) รอกไฟฟ้า	47
ภาพประกอบ 26 แสดงระดับความหนาของชั้นเชื้อเพลิง (ก) แสดงปริมาณระดับชั้นเชื้อเพลิงช่วงที่ 1 (Combustion) ของการเผาปิสิกิต (ข) แสดงปริมาณระดับชั้นเชื้อเพลิงช่วงที่ 2 (Gasification) ของการเผาปิสิกิต.....	49
ภาพประกอบ 27 ตัวอย่างแก้วเซรามิกที่ได้จากกระบวนการหล่อ	50
ภาพประกอบ 28 ตัวอย่างการจัดเรียงแก้วเซรามิกในเตาเผา	51
ภาพประกอบ 29 เทอร์โมคัปเปิล Type K.....	51

ภาพประกอบ 30 เครื่องชั่งดิจิตอล	51
ภาพประกอบ 31 โรตามีเตอร์.....	52
ภาพประกอบ 32 เครื่องวิเคราะห์แก๊ส	52
ภาพประกอบ 33 ตำแหน่งติดตั้งเครื่องมือวัด.....	53
ภาพประกอบ 34 แสดงกราฟควบคุมอุณหภูมิมาตรฐานในการเผาปิสิกิต	56
ภาพประกอบ 35 แสดงปริมาณอากาศและเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าสู่ระบบในช่วง Combustion	58
ภาพประกอบ 36 เตาผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่ทำงานในช่วงที่ 1 (Wood combustion).....	59
ภาพประกอบ 37 เตาผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่ทำงานในช่วงที่ 2 (Wood gasification and syngas combustion).....	60
ภาพประกอบ 38 แสดงปริมาณอากาศและเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าสู่ระบบในช่วง Gasification	61
ภาพประกอบ 39 แสดงอัตราส่วนสมมูล (Equivalence ratio) ของการทดลองเผาปิสิกิตที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 160 °C/hr.....	61
ภาพประกอบ 40 แสดงปริมาณแก๊สไอเสียที่ปล่อยออกจากชุดเตาเผาเซรามิกที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 163 °C/hr.....	63
ภาพประกอบ 41 แสดงปริมาณแก๊สไอเสียที่ปล่อยออกจากชุดเตาเผาเซรามิก เมื่อคำนวณอากาศส่วนเกินที่ร้อยละ 7	63
ภาพประกอบ 42 แสดงอุณหภูมิของชุดเตาเผาเซรามิกเมื่ออัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง.....	67

ภาพประกอบ 43 แสดงอุณหภูมิของชุดเตาเผาเซรามิกเมื่ออัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 136 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง.....	67
ภาพประกอบ 44 แสดงอุณหภูมิของชุดเตาเผาเซรามิกเมื่ออัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 163 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง.....	68
ภาพประกอบ 45 ตัวอย่างเปรียบเทียบผลิตภัณฑ์เซรามิกก่อนและหลังเผาโดยใช้เตาเผาแบบไฟฟ้า.....	69
ภาพประกอบ 46 ตัวอย่างเปรียบเทียบผลิตภัณฑ์เซรามิกก่อนและหลังเผาโดยใช้เตาจากชุดการทดลอง.....	69
ภาพประกอบ 47 แสดงอุณหภูมิของชุดเตาเผาเซรามิกโดยใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมงโดยใช้โปรแกรม PLC ควบคุม.....	71



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในประเทศไทยมีการผลิตผลิตภัณฑ์เซรามิกอยู่หลากหลายชนิด เช่น เครื่องสุขภัณฑ์ เครื่องใช้บนโต๊ะอาหาร ลูกถ้วยไฟฟ้า เป็นต้น โดยมีทั้งอุตสาหกรรมเซรามิกขนาดเล็ก ขนาดกลาง และขนาดใหญ่ การผลิตและการจำหน่ายผลิตภัณฑ์เซรามิกในประเทศไทยมีแนวโน้มฟื้นตัวดีขึ้น หลังจากวิกฤตการณ์การแพร่ระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 มีมูลค่าการส่งออกสินค้าในปี 2564 ในกลุ่มผลิตภัณฑ์เซรามิกมีมูลค่ากว่า 359 ล้านดอลลาร์สหรัฐ เพิ่มขึ้นร้อยละ 23.93 เมื่อเทียบกับปี 2563 (กรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ, 2565) แต่ผู้ประกอบการยังคงต้องเจอกับปัญหาราคาเชื้อเพลิงแก๊สแอลพีจี (LPG) ที่มีแนวโน้มสูงขึ้นอันเนื่องมาจากราคาภายในประเทศ และราคาในตลาดโลกพุ่งสูงขึ้น เป็นผลพวงมาจากสงครามระหว่างรัสเซียและยูเครน ซึ่งเป็นประเทศผู้ส่งออกน้ำมันดิบรายใหญ่ของโลก จากปัจจัยข้างต้น ส่งผลกระทบต่อการผลิตของอุตสาหกรรมเซรามิกในประเทศไทย โดยเฉพาะอุตสาหกรรมเซรามิกขนาดเล็ก และขนาดกลาง ที่มีผลต่อขีดความสามารถในการแข่งขันในอุตสาหกรรมเซรามิกเป็นอย่างมาก ซึ่งต้องแข่งขันกับสินค้าจากประเทศคู่แข่ง โดยเฉพาะสินค้าจากประเทศจีน ที่มีข้อได้เปรียบทั้งในด้านวัตถุดิบ ราคาเชื้อเพลิง และมีกำลังการผลิตเซรามิกที่ใหญ่ที่สุดในโลก สามารถผลิตสินค้าได้หลายมาตรฐานหลายรูปแบบ สอดคล้องกับ (กิตติศักดิ์, 2558) ได้สำรวจอุตสาหกรรมเซรามิกในจังหวัดลำปางซึ่งเป็นจังหวัดที่ผลิตผลิตภัณฑ์เซรามิกที่ใหญ่ที่สุดในประเทศ ผลการศึกษาพบว่าปัญหามากที่สุดคือราคาของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาผลิตภัณฑ์เซรามิกมีค่าเฉลี่ย 4.48 รองลงมาคือปัญหาการลดต้นทุนการผลิตมีค่าเฉลี่ย 4.16 และปัญหาที่พบน้อยคือราคาของเครื่องจักรมีค่าเฉลี่ย 2.56

ในปัจจุบันการผลิตผลิตภัณฑ์เซรามิกต้องใช้พลังงานเชื้อเพลิงจากแก๊สแอลพีจี (LPG) ซึ่งมีราคาสูงทำให้ผู้ประกอบการต้องหาพลังงานทางเลือกเพื่อลดต้นทุนในการผลิต ในขณะเดียวกันของเสียที่ได้จากการเกษตรมีการเหลือทิ้งในปริมาณมาก จึงเหมาะแก่การนำไปแปรรูปเป็นพลังงานทางเลือกได้อย่างหลากหลาย (กฤษฎางค์, อุษา, กฤตยชญ์, และ กิตติโชติ, 2562) ปัจจุบันมีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับด้านพลังงานชีวมวล โดยการใช้ของเสียจากการแปรรูปทางการเกษตรหรือเศษวัสดุที่เหลือใช้จากธรรมชาติ เช่น (ธนาพล, สุริฉาย, ปรีดิ์ปวีณ, และ ภาณุวัฒน์, 2558) ได้ศึกษาวิจัยเรื่องพลังงานทดแทนชุมชนจากเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งจากทางมะพร้าว เช่นเดียวกับ (ลดาวัลย์, 2559) ได้ศึกษาการนำเศษฟางข้าวผสมเศษลำไยเหลือทิ้งมาผลิตเป็นก้อนเชื้อเพลิง และ (สมมาส, 2556) ใช้ไม้ยูคาลิปตัสเป็นเชื้อเพลิง เปรียบเทียบเตาชีวมวล

ขนาด 20 kW กับเตาแก๊สหุงต้มชนิดหัวเร่งประสิทธิภาพต่ำ และประสิทธิภาพสูง เป็นต้น ซึ่งในปัจจุบันมีผู้ที่สนใจประยุกต์ใช้แก๊สชีววมวลเป็นแหล่งพลังงานให้กับการผลิตผลิตภัณฑ์เซรามิก เช่น (กฤษฎางค์ และคนอื่น ๆ, 2562) ได้ศึกษาการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์จากเตาชีววมวลแบบไหลขึ้นโดยใช้ซังข้าวโพดเป็นเชื้อเพลิงในการเผาเม็ดมะยมดินเผา รวมถึง (วรรณุช, 2559) ได้ศึกษาการผลิตผลิตภัณฑ์เซรามิกแบบบิสกิตโดยใช้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์จากชีววมวล สามารถควบคุมให้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตลอดช่วงของการเผา ให้มีลักษณะใกล้เคียงกับกราฟควบคุมอุณหภูมิการเผาบิสกิตและพบว่าระบบผลิตแก๊สเชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนตลอดช่วงระยะเวลาการเผามีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเครื่องผลิตแก๊สเชื้อเพลิงมีสภาวะการทำงานที่มีเสถียรภาพ โดยมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนเฉลี่ยร้อยละ 73.14 เครื่องผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์เป็นส่วนสำคัญในการผลิตเป็นแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ (วิรัตน์, 2565) สร้างเตาชีววมวลแบบอากาศไหลขึ้น โดยใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิง อุณหภูมิเปลวไฟที่ผลิตได้อยู่ที่ 416-684 องศาเซลเซียส ใกล้เคียงกับ (กฤษฎางค์ และคนอื่น ๆ, 2562) ใช้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์จากเตาชีววมวลแบบอากาศไหลขึ้น โดยใช้ซังข้าวโพดเป็นเชื้อเพลิงในการเผาเม็ดมะยมดินเผา สามารถทำอุณหภูมิสูงสุดของเตาอยู่ที่ 716.1 องศาเซลเซียส (กำพล, 2562) ศึกษาการใช้เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แบบอากาศไหลขวางโดยออกแบบให้ทำงานร่วมกับถัง 200 ลิตรเพื่อผลิตถ่านและน้ำส้มควันไม้คุณภาพ โดยสามารถสร้างแก๊สร้อนที่มีปริมาณออกซิเจนต่ำที่ระดับอุณหภูมิสูงถึง 1,000 องศาเซลเซียสให้กับระบบเผาถ่านขนาด 200 ลิตร เช่นเดียวกับ (ณัฐวัฒน์, 2563) ออกแบบและสร้างเครื่องผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แบบอากาศไหลขวางและห้องผสมเพื่อทำอากาศร้อนสำหรับอบไม้ยางพารา โดยสามารถทำอุณหภูมิของแก๊สร้อนได้ถึง 982.3 องศาเซลเซียส โดยใช้ PLC ในการควบคุมการทำงานของเครื่องสามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งไม้พาลาได้ร้อยละ 70 เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แบบอากาศไหลขวางนอกจากจะได้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่มีอุณหภูมิสูง ยังมีข้อได้เปรียบในเรื่องการเริ่มระบบของเตาและการเร่งเครื่องเตาซึ่งสามารถทำได้ดีกว่าเตาผลิตแก๊สแบบไหลขึ้นและเตาผลิตแก๊สแบบไหลลง ใช้เวลาเพียง 5-10 นาที (วีรัชย์, 2553)

จากปัญหาดังกล่าวผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะพัฒนาเตาเผาผลิตภัณฑ์เซรามิกขนาดเล็ก ที่ทำงานร่วมกับเครื่องผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แบบอากาศไหลขวางและหัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ โดยใช้เศษไม้เหลือใช้ทางการเกษตรเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งช่วยลดต้นทุนเชื้อเพลิงในการผลิตผลิตภัณฑ์เซรามิก และลดปริมาณเศษไม้เหลือใช้ทางการเกษตร ตลอดจนส่งเสริมให้

ผู้ประกอบการผลิตภัณฑ์เซรามิกขนาดเล็กได้ต่อยอดนำเครื่องเผาผลิตภัณฑ์เซรามิกขนาดเล็กไปประยุกต์ใช้ได้เนื่องจากราคาไม่สูงมากนัก

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ด้วยเตาแก๊สซีฟเฮอร์แบบไหลขวางที่ทำงานร่วมกับหัวเบิร์นเนอร์
2. ศึกษาการใช้แก๊สร้อนจากเตาผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์เพื่อเผาผลิตภัณฑ์เซรามิกด้วยเตาเผาขนาดเล็ก

1.3 ขอบเขตโครงการวิศวกรรม

1. เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์เป็นแก๊สซีฟเฮอร์แบบไหลขวางที่มีพื้นที่หน้าตัดเตาขนาด 25×25 เซนติเมตร ที่ต่ออยู่กับหัวเบิร์นเนอร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 20 เซนติเมตร
2. เตาเผาเซรามิกขนาดเล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 81 เซนติเมตร สูง 100 เซนติเมตร
3. เชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลองสำหรับผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์เป็นเศษไม้ที่เหลือจากกระบวนการผลิตพาเลทไม้
4. ศึกษาอัตราส่วนอากาศที่ใช้เผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ต่ออากาศที่ใช้ผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่มีผลต่ออุณหภูมิแก๊สร้อนและไอเสีย
5. ศึกษากราฟอุณหภูมิการเผาผลิตภัณฑ์เซรามิกเมื่อควบคุมเตาผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ด้วย PLC

1.4 ประโยชน์ที่จะได้รับ

1. ได้สภาวะที่เหมาะสมในการทำงานของเตาผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่ใช้เชื้อเพลิงชีวมวล
2. ได้คุณลักษณะของเตาเผาผลิตภัณฑ์เซรามิกขนาดเล็กแบบเปิดบนที่ทำงานร่วมกับเตาผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์

บทที่ 2

ทฤษฎีและบทปริทัศน์วรรณกรรม

2.1 เครื่องผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์

2.1.1 ชีวมวล

ชีวมวล ถือว่าเป็นอินทรีย์วัตถุอย่างหนึ่งที่ได้มาจากสิ่งมีชีวิต อาทิเช่น สัตว์ และพืช ชีวมวลจึงมีความหมายรวมถึงวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น ชังข้าวโพด เศษไม้ มูลสัตว์ และวัสดุที่เหลือจากโรงงานแปรรูปผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร ส่วนเชื้อเพลิงฟอสซิลมีที่มาจากซากพืช และซากสัตว์ ซึ่งมีความแตกต่างกันที่ระยะเวลาสำหรับกระบวนการเกิดในขณะที่เชื้อเพลิงฟอสซิลต้องใช้ระยะเวลาที่ยาวนานกว่ามากในการแปรสภาพจากซากพืช และซากสัตว์ ภายใต้สภาวะความดันสูงรวมถึงอุณหภูมิที่ต่างกัน จึงไม่อาจนับได้ว่าเชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นชีวมวล

แหล่งที่มาของชีวมวล

ชีวมวล ส่วนมากแล้วเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีอยู่ในปริมาณที่มาก เช่น แกลบที่ได้จากโรงงานสีข้าว ชานอ้อยที่ได้จากโรงงานผลิตน้ำตาล ชังข้าวโพดที่ได้จากโรงงานแปรรูปอาหารสัตว์ กากปาล์มได้จากโรงงานผลิตน้ำมัน และเศษไม้ที่ได้จากโรงงานอุตสาหกรรมแปรรูปไม้ต่าง ๆ เป็นต้น ซึ่งผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ที่กล่าวมานั้นล้วนเป็นของที่เหลือจากกระบวนการผลิตที่ไม่ตรงวัตถุประสงค์ของโรงงานทั้งสิ้น

องค์ประกอบและสมบัติอื่น ๆ ของชีวมวล

องค์ประกอบของชีวมวลหรือสสารทั่วไปจะแบ่งคุณสมบัติดังนี้

คุณสมบัติของชีวมวลจากการวิเคราะห์โดยประมาณ (Proximate Analysis) ได้แก่

- ความชื้น (Moisture)
- คาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon)
- สารระเหย (Volatile Matter)
- ี่เถ้า (Ash)

คุณสมบัติของชีวมวลจากการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) ได้แก่

- ธาตุไฮโดรเจน (H)
- ธาตุออกซิเจน (O)
- ธาตุคาร์บอน (C)
- ธาตุไนโตรเจน (N)
- ธาตุซัลเฟอร์ (S)

คุณสมบัติอื่น ๆ

- ค่าความร้อนสูง (Higher heating value, HHV)
- ค่าความร้อนต่ำ (Lower heating value, LHV)

ตาราง 1 คุณสมบัติทางเคมีของชีวมวล

Proximate Analysis	แกลบ	ฟางข้าว	ชานอ้อย	ใบอ้อย	ไม้ยางพารา	ทะลายปาล์ม	ลำต้นปาล์ม	ทางปาล์ม	ซังข้าวโพด	ลำต้นข้าวโพด
ความชื้น	12.0	10.0	50.7	9.2	45.0	58.6	48.4	78.4	40.0	41.7
ขี้เถ้า	12.7	10.4	1.4	6.1	1.6	2.0	1.2	0.7	0.9	3.7
สารระเหย	56.5	60.7	42.0	67.8	45.7	30.5	38.7	16.3	45.4	46.5
คาร์บอนคงตัว	18.8	18.9	5.9	16.9	7.7	8.9	11.7	4.6	13.7	8.1
Ultimate Analysis										
คาร์บอน	37.5	38.2	21.3	41.6	25.6	21.2	23.9	10.1	28.2	27.8
ไฮโดรเจน	4.4	5.0	3.1	5.1	3.2	2.6	3.0	1.3	3.4	4.1
ออกซิเจน	33.3	35.3	23.3	37.4	24.5	15.3	22.9	9.4	27.4	22.5
ไนโตรเจน	0.2	0.6	0.1	0.4	0.1	0.3	0.6	0.1	0.1	0.1
ซัลเฟอร์	0.04	0.1	0.03	0.2	0.02	0.04	0.1	0.02	0.03	NA
ขี้เถ้า	12.7	10.4	1.4	6.1	1.6	2.03	1.2	0.7	0.9	3.7
ความชื้น	12.00	10.0	50.8	9.2	45.0	58.6	48.4	78.4	40.0	41.7
คุณสมบัติอื่น ๆ										
ค่าความร้อนสูง (kJ/kg)	14,755	13,650	9,243	16,794	10,365	9,196	9,370	3,908	11,298	11,704
ค่าความร้อนต่ำ (kJ/kg)	13,517	12,330	7,368	15,479	8,600	7,240	7,556	1,760	9,615	9,830

ที่มา : กองศึกษาและพัฒนาโรงไฟฟ้าฐานกระทรวงพลังงาน. (2021).

การเตรียมวัตถุดิบเชื้อเพลิงชีวมวล

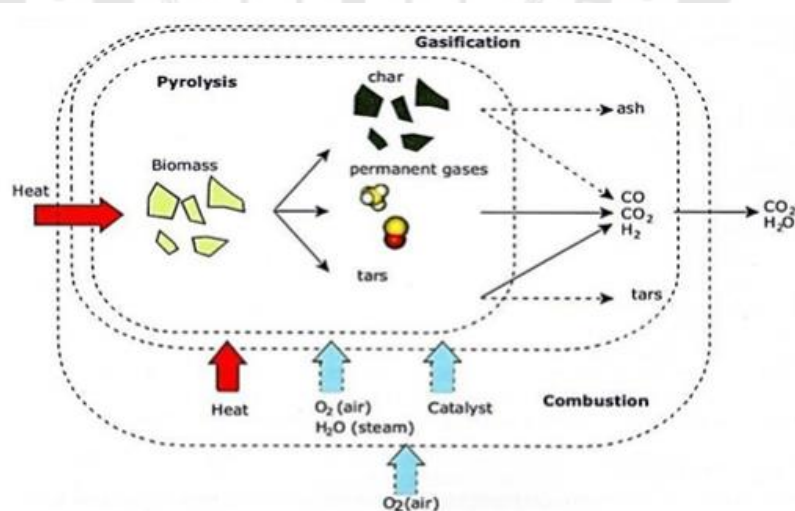
เชื้อเพลิงที่ใช้สำหรับนำมาป้อนให้กับระบบแก๊สซิฟิเคชันนั้นมีลักษณะเฉพาะเป็นอย่าง มากเมื่อเทียบกับระบบเผาไหม้โดยตรง ซึ่งปัจจัยทางกายภาพและทางเคมีนั้นมีความสำคัญในการ กำหนดระบบของเครื่องผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ ในแต่ละระบบมีการออกแบบให้รองรับ เชื้อเพลิงที่ต่างกันออกไป เช่น ขนาด รูปทรง ค่าความหนาแน่น ปริมาณความชื้น ค่าความร้อน และปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของเชื้อเพลิง เป็นต้น

การเก็บรักษาวัตถุดิบชีวมวล

การเก็บรักษาชีวมวลเพื่อใช้สำหรับเป็นเชื้อเพลิงควรจัดเก็บให้แยกจากบริเวณที่ตั้งของเครื่องผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ รวมถึงแหล่งที่สามารถเป็นแหล่งกำเนิดของเพลิงไหม้ได้ พื้นที่ที่ใช้เก็บเชื้อเพลิงชีวมวลควรเป็นที่โล่งมีหลังคาและผนังเพื่อป้องกันไม่ให้โดนความชื้น ฝุ่นละออง รวมถึงแสงแดด เพื่อควบคุมให้ชีวมวลมีประสิทธิภาพสำหรับนำไปใช้งาน

2.1.2 กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

แก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) เป็นเทคโนโลยีสำหรับแปรรูปเชื้อเพลิงแข็งให้เป็นพลังงานในรูปแบบแก๊สเชื้อเพลิง โดยอาศัยกระบวนการเคมีความร้อนจากการเผาไหม้ในสภาวะที่จำกัดอากาศ (Air) หรือออกซิเจน (Oxygen, O_2) รวมถึง ไอน้ำ (Steam) ให้อยู่ในสภาวะที่มีการควบคุมปริมาณเชื้อเพลิงในสัดส่วนที่ต่ำกว่าปริมาณที่ทำให้เกิดการเผาไหม้เชื้อเพลิงอย่างสมบูรณ์ ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon) เรียกว่า แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ (synthesis gas) ได้แก่ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แก๊สไฮโดรเจน (H_2) แก๊สมีเทน (CH_4) แก๊สไนโตรเจน (N_2) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และแก๊สอื่น ๆ นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์อื่น ๆ เช่น ถ่านชาร์ (Char) เถ้า (Ash) น้ำมันดิน (Tar) และไอน้ำ เป็นต้น



ภาพประกอบ 1 กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันจากชีวมวล

ที่มา : สถาบันพลาสติก. (2022). เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันเศษไม้.

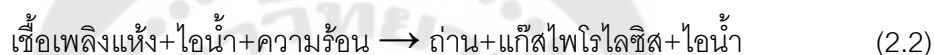
ขั้นตอนปฏิกิริยาของกระบวนการซีพีเคชัน

ปฏิกิริยาของกระบวนการซีพีเคชัน สามารถแบ่งโซนการเกิดปฏิกิริยาได้เป็น 4 โซน ได้แก่ โซนอบแห้ง (Drying Zone) โซนไพโรไลซิส (Pyrolysis Zone) โซนเผาไหม้ (Combustion Zone) และโซนรีดักชัน (Reduction Zone) หลักการเกิดปฏิกิริยาของแต่ละโซนมีดังนี้

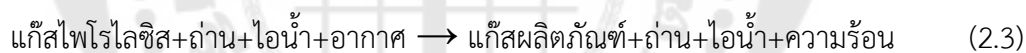
โซนอบแห้ง เป็นโซนที่อยู่บนสุด มีหน้าที่อบแห้งและระเหยน้ำออกจากเชื้อเพลิงด้วยความร้อนที่เกิดจากโซนเผาไหม้ ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 40 - 200 °C แสดงดังสมการ (2.1)



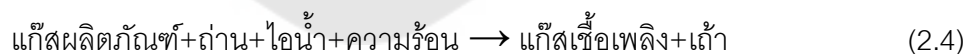
โซนไพโรไลซิส เป็นโซนที่อยู่ติดกับโซนเผาไหม้ กระบวนการนี้จะได้ก้อนถ่าน แก๊สและผลิตภัณฑ์ข้างเคียง เช่น น้ำส้มควันไม้ และน้ำมันดิน อุณหภูมิภายในโซนนี้มีค่าประมาณ 500 - 600 °C แสดงดังสมการ (2.2)



โซนการเผาไหม้ เรียกอีกอย่างว่าโซนออกซิเดชัน (Oxidation Zone) คือโซนที่ถ่านรวมถึงแก๊สที่ได้จากโซนไพโรไลซิสไหลลงมาออกซิเดชันกับอากาศที่ป้อนเข้าสู่เตาอุณหภูมิในโซนนี้ ค่าประมาณ 1,000 - 1,400 °C แก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาในโซนนี้ได้แก่แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ไอน้ำ (H₂O) และถ่าน แสดงดังสมการ (2.3)



โซนรีดักชัน หรือเรียกอีกอย่างว่าโซนแก๊สซีพีเคชัน ถือเป็นขั้นตอนสุดท้ายในกระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ซึ่งเป็นโซนที่แก๊สที่ได้จากการเผาไหม้ทำปฏิกิริยาเคมีโดยไม่ใช้อากาศ อุณหภูมิภายในโซนนี้ประมาณ 800 - 1,000 °C โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในโซนรีดักชันแสดงดังสมการที่ (2.4)



ปฏิกิริยาบูดูยาร์ด (Boudouard Reaction)



ปฏิกิริยาอวเตอร์แก๊ส (Water Gas Reaction)



ปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน (Hydro-gasification reaction)



ปฏิกิริยาเคมีในการผลิตแก๊ส

ในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์สามารถแบ่งออกเป็น 4 ชั้นโดยขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ปฏิกิริยาและผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในแต่ละชั้น ได้แก่

ชั้นการเผาไหม้ (Hearth Zone or Combustion Zone) เกิดขึ้นตรงตำแหน่งที่เชื้อเพลิงกับออกซิเจนทำปฏิกิริยาเคมีกัน โดยที่คาร์บอนและไฮโดรเจนที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงจะถูกเผาไหม้กับออกซิเจนในปริมาณจำกัด (Partial Combustion) ได้รับความร้อน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำ ดังสมการที่ 2.9 และ 2.10



ชั้นรีดักชัน (Reduction Zone or Gasification Zone) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และไอน้ำ (H_2O) ที่ได้จากชั้นการเผาไหม้จะไหลเข้าสู่ชั้นนี้ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน (Endothermic Reaction) ที่จะเปลี่ยนแก๊สเผาไหม้ไม่ได้ ได้แก่ CO_2 และ H_2O ให้กลายเป็น แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แก๊สไฮโดรเจน (H_2) และแก๊สมีเทน (CH_4) ที่สามารถเผาไหม้ได้โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะแบ่งได้ เป็น 3 กลุ่มคือ

ปฏิกิริยาบารด์ัวร์ (Boudouard Reaction) ดังสมการที่ 2.11



ปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊ส (Water Gas Reaction) ดังสมการที่ 2.12



ปฏิกิริยาวอเตอร์ชิฟ ไอน้ำจะทำปฏิกิริยากับแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) กลายเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ดังสมการที่ 2.13



ถ้าปริมาณไอน้ำมีปริมาณสูง ไอน้ำจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอน ดังสมการที่ 2.14



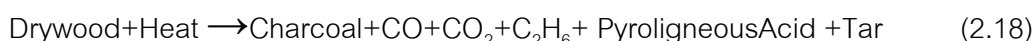
ปฏิกิริยาการผลิตมีเทน (Methane Production) ดังสมการที่ 2.16



และมีปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กับแก๊สไฮโดรเจนมีโอกาสเกิดแก๊สมีเทนได้เช่นกัน ดังสมการที่ 2.17



ชั้นกลั่นสลายหรือชั้นไพโรไลซิส (Distillation Zone or Pyrolysis Zone) เป็นปฏิกิริยาแบบดูดความร้อน ซึ่งได้รับความร้อนมาจากชั้นรีดักชันซึ่งเป็นชั้นที่อยู่ติดกัน จะได้สารระเหย (Volatile Matter) ซึ่งประกอบด้วย เมทานอล กรดน้ำส้ม และน้ำมันดิบ เป็นต้น โดยที่อุณหภูมิในชั้นนี้จะอยู่ประมาณช่วง 130 - 600 °C ของแข็งที่เหลือจากกระบวนการนี้คือถ่าน ดังสมการที่ 2.18



ชั้นลดความชื้น (Drying Zone) ในชั้นนี้เชื้อเพลิงจะได้รับความร้อนจากชั้นเผาไหม้ อุณหภูมิในช่วงนี้ไม่สูงพอที่จะทำให้เกิดการสลายตัวของสารระเหยต่าง ๆ โดยอุณหภูมิจะเริ่มเกิดขึ้นที่อุณหภูมิบรรยากาศไปจนถึงอุณหภูมิประมาณ 135 °C ดังสมการที่ 2.19



2.1.3 ทฤษฎีและการคำนวณการเผาไหม้

การเผาไหม้จะคำนวณได้จากปริมาณต่าง ๆ ที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงนั้นต่อปริมาณเชื้อเพลิงหนึ่งหน่วย ดังสมการที่ 2.20

$$C + H + O + S + N + w + a = 1 \quad (2.20)$$

ในส่วนของแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์จะแสดงสัดส่วนโดยปริมาตรของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สไฮโดรเจน แก๊สไฮโดรคาร์บอน แก๊สออกซิเจน แก๊สไนโตรเจน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำ ฯลฯ ตามลำดับ ดังสมการที่ 2.21

$$\text{CO} + \text{H}_2 + \sum \text{C}_m\text{H}_n + \text{O}_2 + \text{N}_2 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} = 1 \quad (2.21)$$

ตาราง 2 แสดงสมการการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง

	C	+	O ₂	=	CO ₂
	1 กิโลโมล		1 กิโลโมล		1 กิโลโมล
I	12 กิโลกรัม		32 กิโลกรัม		44 กิโลกรัม
			22.4 m ³ N		22.4 m ³ N
	c kg		(c/12) × 22.4 m ³ N		(c/12) × 22.4 m ³ N
	C	+	(1/2) O ₂	=	CO ₂
	1 กิโลโมล		1/2 กิโลโมล		1 กิโลโมล
II	12 กิโลกรัม		32/2 กิโลกรัม		28 กิโลกรัม
			22.4/2 m ³ N		22.4 m ³ N
	c kg		(c/12)/2 × 22.4 m ³ N		(c/12) × 22.4 m ³ N

ตาราง 2 (ต่อ)

H	+	(1/4) O ₂	=	(1/2)H ₂ O
1 กิโลโมล		1/4 กิโลโมล		1/2 กิโลโมล
III 1 กิโลกรัม		32/4 กิโลกรัม		18/2 กิโลกรัม
		22.4/4 m ³ N		22.4/2 m ³ N
H กิโลกรัม		(h/4)×22.4 m ³ N		(h/2)×22.4 m ³ N
S	+	O ₂	=	SO ₂
1 กิโลโมล		1 กิโลโมล		1 กิโลโมล
IV 32 กิโลกรัม		32 กิโลกรัม		64 กิโลกรัม
		22.4 m ³ N		22.4 m ³ N
s กิโลกรัม		(s/32)×22.4 m ³ N		(s/32)×22.4 m ³ N
N	=	(1/2) N ₂		
1 กิโลโมล		1 กิโลโมล		
V 14 กิโลกรัม		28/2 กิโลกรัม		
		22.4/2 m ³ N		
n กิโลกรัม		(n/28)×22.4 m ³ N		
H ₂ O	=	H ₂ O		
1 กิโลโมล		1 กิโลโมล		
VI 18 กิโลกรัม		18 กิโลกรัม		
		22.4 m ³ N		
W กิโลกรัม		(w/18)×22.4 m ³ N		

ตาราง 3 แสดงสมการการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้เชื้อเพลิงแก๊ส

I	$\text{CO} + (1/2) \text{O}_2 = \text{CO}_2$		
	1 กิโลโมล	1/2 กิโลโมล	1 กิโลโมล
	$22.4 \text{ m}^3 \text{ N}$	$22.4/2 \text{ m}^3 \text{ N}$	$22.4 \text{ m}^3 \text{ N}$
	$\text{co m}^3 \text{ N}$	$(1/2) \text{ co m}^3 \text{ N}$	$\text{co m}^3 \text{ N}$
II	$\text{H}_2 + (1/2) \text{O}_2 = \text{H}_2\text{O}$		
	1 กิโลโมล	1/2 กิโลโมล	1 กิโลโมล
	$22.4 \text{ m}^3 \text{ N}$	$22.4/2 \text{ m}^3 \text{ N}$	$22.4 \text{ m}^3 \text{ N}$
	$\text{h}_2 \text{ m}^3 \text{ N}$	$(1/2) \text{ h}_2 \text{ m}^3 \text{ N}$	$\text{h}_2 \text{ m}^3 \text{ N}$
III	$\text{C}_m\text{H}_n + (m+n/4) \text{O}_2 = m\text{CO}_2 + n/2 \text{H}_2\text{O}$		
	1 กิโลโมล	$(m+n/4)$ กิโลโมล	m กิโลโมล $n/2$ กิโลโมล
	$22.4 \text{ m}^3 \text{ N}$	$(m+n/4) \times 22.4/2 \text{ m}^3 \text{ N}$	$m \times 22.4/2 \text{ m}^3 \text{ N}$ $(n/2) \times 22.4/2 \text{ m}^3 \text{ N}$
	$\text{C}_m\text{h}_n \text{ m}^3 \text{ N}$	$(m+n/4) \text{ C}_m\text{h}_n \text{ m}^3 \text{ N}$	$m\text{C}_m\text{h}_n \text{ m}^3 \text{ N}$ $(n/2) \text{ C}_m\text{h}_n \text{ m}^3 \text{ N}$

ตาราง 4 แสดงปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง

ชนิดเชื้อเพลิง	$\text{CO}_{2,\text{max}}(\%)$
แก๊สธรรมชาติชั้น	10.6
แก๊สธรรมชาติแห้ง	11.5
LPG	13.8-15.1
ถ่านหินแอนทราไซต์	19-20
ถ่านโค้ก	20.6
ไม้	12.0

2.1.4 อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง

อากาศที่ใช้สำหรับทำปฏิกิริยาเผาไหม้แบบสมบูรณ์นั้นจะต้องมีปริมาณที่พอดีหรือไม่ น้อยกว่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่คำนวณทางทฤษฎี สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.23

$$AFR_{TH} = (11.44X_C + 34.32X_H + 4.29X_S - 4.29X_O)(1 - X_M - X_A) \quad (2.23)$$

โดยที่

AFR_{TH} คือ อัตราส่วนอากาศต่อเศษไม้ทางทฤษฎี (kg/h)

X_M คือ สัดส่วนโดยมวลของความชื้นในเชื้อเพลิง

X_A คือ สัดส่วนโดยมวลของเถ้าในเชื้อเพลิง

X_C คือ สัดส่วนโดยมวลของคาร์บอนในเศษไม้ที่แห้งและไม่มีเถ้า

X_H คือ สัดส่วนโดยมวลของไฮโดรเจนในเศษไม้ที่แห้งและไม่มีเถ้า

X_S คือ สัดส่วนโดยมวลของซัลเฟอร์ในเศษไม้ที่แห้งและไม่มีเถ้า

X_O คือ สัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนในเศษไม้แห้งและไม่มีเถ้า

ในกรณีที่ใช้แก๊สต่าง ๆ จากแก๊สไอเสีย การหาอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงสามารถหาได้จากสมการที่ 2.24

$$AFR_A = \frac{1}{0.767} \left(\frac{28X_{cb}Y_{N_2}}{12(y_{CO} + y_{CO_2})} \right) - X_{N,ar} \quad (2.24)$$

โดยที่

AFR_A คือ อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงเศษไม้จริง (kg/h)

X_{cb} คือ สัดส่วนคาร์บอนที่ถูกเผาไหม้ต่อมวลเศษไม้

y_{CO} คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของธาตุคาร์บอนมอนอกไซด์

y_{CO_2} คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของธาตุคาร์บอนไดออกไซด์

Y_{N_2} คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของธาตุไนโตรเจน

$X_{N,ar}$ คือ สัดส่วนโดยมวลของธาตุไนโตรเจนในเศษไม้

2.1.5 ค่าความร้อนเชื้อเพลิง

ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงโดยทั่วไปจะหมายถึงปริมาณความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้แบบพอดี ในปริมาณ 1 kg. หรือ 1 m³ วิธีการหาค่าความร้อนโดยตรงเช่นวิธีบอมบ์แคลอริมิเตอร์ ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมในปัจจุบัน ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงนั้นจะขึ้นอยู่กับผลิตภัณฑ์จากกระบวนการเผาไหม้ซึ่งจะได้น้ำ (H₂O) หรือไอน้ำ (Steam) ถ้าเชื้อเพลิงที่ผ่านการเผาไหม้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำจะให้ค่าความร้อนทางสูง (Higher heating value, HHV) และการเผาไหม้ที่ได้ผลิตภัณฑ์เป็นไอน้ำ

จะให้ค่าความร้อนทางต่ำ (Lower heating value, LHV) การหาค่าความร้อนสูงและค่าความร้อนต่ำสามารถหาได้จากสมการที่ 2.25 และ 2.26

$$HHV = (0.341C_{db} + 1.322H_{db} - 1.20_{db} - 0.12N_{db} + 0.0686S_{db} - 0.0153A_{db}) \left(1 - \frac{W_{db}}{100}\right) \quad (2.25)$$

$$LHV = HHV - 2.443 \left(8.936 \frac{H_{db}}{100} \times 1 - \frac{W_{db}}{100}\right) \frac{W_{db}}{100} \quad (2.26)$$

โดยที่

C_{db} คือ สัดส่วนโดยมวลของคาร์บอนในเศษไม้ที่แห้ง

H_{db} คือ สัดส่วนโดยมวลไฮโดรเจนในเศษไม้ที่แห้ง

O_{db} คือ สัดส่วนโดยมวลออกซิเจนในเศษไม้ที่แห้ง

N_{db} คือ สัดส่วนโดยมวลไนโตรเจนในเศษไม้ที่แห้ง

S_{db} คือ สัดส่วนโดยมวลซัลเฟอร์ในเศษไม้ที่แห้ง

A_{db} คือ สัดส่วนโดยมวลเถ้าในเศษไม้

HHV คือ ค่าความร้อนทางสูง (MJ/kg)

LHV คือ ค่าความร้อนทางต่ำ (MJ/kg)

W_{db} คือ สัดส่วนโดยมวลน้ำในเศษไม้

2.1.6 อัตราส่วนอากาศสมมูลสำหรับกระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์

อัตราส่วนอากาศสมมูลสำหรับกระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์หาได้จากสมการที่ 2.26

$$ER_G = \frac{\frac{AMFR_G}{FFR}}{\frac{AMFR_{TH}}{FFR}} = \frac{AMFR_G}{AMFR_{TH}} \quad (2.26)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned}
 AMFR_{TH} &= \text{อัตราการป้อนอากาศสำหรับกระบวนการเผาไหม้ทางทฤษฎี, (kg/h)} \\
 AMFC_G &= \text{อัตราการป้อนอากาศสำหรับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน, (kg/h)} \\
 AFR_G &= \text{อัตราส่วนอากาศต่อเศษไม้สำหรับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน} \\
 AFR_{TH} &= \text{อัตราส่วนอากาศต่อเศษไม้สำหรับกระบวนการเผาไหม้ทางทฤษฎี} \\
 FFR &= \text{อัตราการป้อนไม้เชื้อเพลิง, (kg/h)}
 \end{aligned}$$

2.1.7 อัตราการป้อนอากาศเพื่อเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์

อัตราการป้อนอากาศเพื่อเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์หาได้จากสมการที่ 2.27

$$AFR_{C,syngas} = EA \times (AFR_{th} - AFR_G) = EA \times (1 - ER) \times AFR_{th} \quad (2.27)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned}
 AFR_{C,syngas} &= \text{อัตราการป้อนอากาศสำหรับเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์, (kg/h)} \\
 EA &= \text{สัดส่วนอากาศส่วนเกิน}
 \end{aligned}$$

2.1.8 อัตราส่วนอากาศสมมูลสำหรับกระบวนการเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์

อัตราส่วนอากาศสมมูลสำหรับกระบวนการเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์หาได้จากสมการที่ 2.28

$$ER_C = \frac{\frac{AMFR_C}{FFR}}{\frac{AMFR_{TH}}{FFR}} = \frac{AMFR_C}{AMFR_{TH}} \quad (2.28)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned}
 AMFR_{TH} &= \text{อัตราการป้อนอากาศสำหรับกระบวนการเผาไหม้ทางทฤษฎี, (kg/h)} \\
 AMFC_C &= \text{อัตราการป้อนอากาศสำหรับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน, (kg/h)} \\
 AFR_C &= \text{อัตราส่วนอากาศต่อเศษไม้สำหรับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} AFR_{TH} &= \text{อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงสำหรับกระบวนการเผาไหม้ทางทฤษฎี} \\ FFR &= \text{อัตราการป้อนไม้เชื้อเพลิง, (kg/h)} \end{aligned}$$

2.1.9 สมดุลพลังงานของระบบ

พลังงานจากการป้อนเชื้อเพลิง

พลังงานจากการป้อนเชื้อเพลิงสามารถหาได้จากอัตราการใช้เชื้อเพลิงคูณกับค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง ดังแสดงในสมการที่ 2.29

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_F \times LHV \quad (2.29)$$

เมื่อ

\dot{Q}_c = ปริมาณความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้, MJ/h

\dot{m}_F = อัตราการใช้เชื้อเพลิง, L/h หรือ kg/h

LHV = ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง, MJ/L หรือ MJ/kg หรือ Nm³/kg

อัตราส่วนอากาศ

อัตราส่วนอากาศบ่งบอกให้รู้ว่าอากาศที่เข้าเผาไหม้มีค่ามากกว่าอากาศที่พอดีทางทฤษฎีเท่าใด สามารถหาได้จากสมการที่ 2.30

$$m = \frac{21}{21 - O_2} \quad (2.30)$$

เมื่อ

m = อัตราส่วนอากาศ

O_2 = ร้อยละของแก๊สออกซิเจนในแก๊สไอเสีย (%)

2.1.10 การออกแบบเครื่องผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์

เครื่องผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ถือเป็นส่วนที่สำคัญที่สุดเพื่อให้ได้ขนาดที่เหมาะสมกับการใช้งานและมีประสิทธิภาพสูงสุด จะต้องมีการคำนวณ ซึ่งมีวิธีการขั้นตอนดังนี้

ขั้นที่ 1. กำหนดขนาดของเตาที่จะออกแบบ ซึ่งหาได้จากขนาดของหัวเผา ประมาณการประสิทธิภาพของเตาประมาณการประสิทธิภาพของหัวเผาประมาณการประสิทธิภาพของระบบผลิตแก๊สชีวมวล

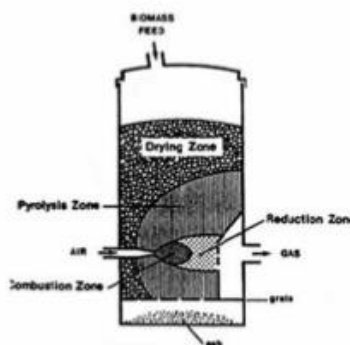
ขั้นที่ 2. กำหนดเชื้อเพลิงที่ใช้ เพื่อหาคุณสมบัติ และค่าความร้อนของเชื้อเพลิง

ขั้นที่ 3. คำนวณหาอัตราการไหลของแก๊สชีวมวลและอัตราการสิ้นเปลืองไม้

ขั้นที่ 4. คำนวณหาขนาดของเครื่องผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์

2.1.11 เครื่องผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แบบไหลขวาง

เครื่องผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แบบไหลขวาง (Crossdraft Gasifier) เป็นระบบที่อากาศไหลขวางกับทิศทางการไหลของเชื้อเพลิง เชื้อเพลิงชีวมวลจะถูกป้อนจากทางด้านบนของเครื่องผลิตแก๊ส อากาศจะถูกส่งตรงไปยังชั้นเชื้อเพลิงโดยตรง ข้อดีของเตาชนิดนี้คือชั้นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแคบทำให้การผลิตแก๊สร้อนสามารถทำได้ไวกว่าแบบอากาศไหลลง และแบบไหลขึ้น โดยปกติบริเวณการเผาไหม้จะอยู่กึ่งกลางของเครื่องผลิตแก๊ส แต่ขอบเขตการเผาไหม้อาจขยายกว้างขึ้นได้เมื่อความเร็วอากาศที่ป้อนเข้าสู่เตาสูงขึ้น



ภาพประกอบ 2 เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แบบไหลขวาง(Crossdraft gasifier)

ที่มา : วีรชัย, อ. (2553). การศึกษาแนวทางการบริหารจัดการขยะชุมชนเพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทนแบบครบวงจร ศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

2.2 เตาเผาผลิตภัณฑ์เซรามิก

เตาเผาเซรามิกเป็นอุปกรณ์สำคัญอย่างมากในกระบวนการผลิตเซรามิก เป็นอุปกรณ์ลำดับสุดท้ายในกระบวนการผลิต ซึ่งต้องลงทุนสูงและมีความสำคัญมากต่อระบบการผลิตเซรามิก เนื่องจากถ้าหากเกิดความบกพร่องจากการเผา จะส่งผลให้ชิ้นงานที่ผ่านการเตรียมมาอย่างดีนั้นเสียหาย ดังนั้นเตาเผาเซรามิกที่ดีควรสามารถเผาชิ้นงานเซรามิกได้คุณภาพดี ประหยัดเชื้อเพลิง และการบำรุงรวมถึงการนำออกจากเตาเผาสามารถทำได้ง่าย สามารถเร่งอุณหภูมิสูงตามที่ต้องการได้ การกระจายอุณหภูมิสม่ำเสมอทั่วทั้งเตา ใช้ระยะเวลาการเผาสั้น แข็งแรงทนทาน รวมถึงมีความปลอดภัยสูง

2.2.1 ผลิตภัณฑ์เซรามิก

ในสมัยก่อนนั้นคำว่าเซรามิกหมายถึงศิลปะที่เกี่ยวข้องกับเครื่องปั้นดินเผา มีรากศัพท์มาจากภาษากรีก "เครามอส" หมายถึงวัสดุที่ผ่านการเผา ดังนั้นผลิตภัณฑ์เซรามิกจึงครอบคลุมผลิตภัณฑ์หลายอย่างที่ใช้ความร้อนในกระบวนการผลิต ในปัจจุบันเซรามิกหมายถึงผลิตภัณฑ์ที่ทำจากวัตถุดิบจากธรรมชาติ เช่น ดิน หิน หวาย และแร่ธาตุต่าง ๆ นำมาผสมเข้าด้วยกันกลายเป็นสิ่งประดิษฐ์ หลังจากนั้นเข้าสู่กระบวนการเผาเพื่อเปลี่ยนโครงสร้างภายในเนื้อดินให้เกิดความแข็งแรงและสามารถคงรูปอยู่ได้

ขั้นตอนการผลิตเซรามิกขึ้นอยู่กับดินและส่วนผสมต่าง ๆ และลักษณะการนำไปใช้งาน ซึ่งมีขั้นตอนที่แตกต่างกันออกไป เช่น การเตรียมวัตถุดิบ การขึ้นรูป การตากแห้ง การเผา การเคลือบ นอกจากนี้ยังมีการตกแต่งให้เกิดความสวยงามโดยการวาดลวดลายด้วยสีหรือการติดรูปลอก

ผลิตภัณฑ์เซรามิกที่พบในชีวิตประจำวันมีหลากหลายชนิดสามารถแบ่งออกตามลักษณะการใช้งาน ได้แก่

1. ผลิตภัณฑ์เซรามิกที่ใช้เป็นภาชนะปรุงอาหาร เช่น ถ้วย ชาม
2. ผลิตภัณฑ์วัสดุทนไฟ เช่น อิฐฉนวนทนไฟ หน้า โถสุขภัณฑ์
3. ผลิตภัณฑ์แก้ว เช่น แก้ว กระจก
4. ผลิตภัณฑ์ใช้งานด้านไฟฟ้า เช่น ก่อ่งพิวส์
5. ผลิตภัณฑ์เครื่องสุขภัณฑ์ เช่น อ่างล้าง
6. ผลิตภัณฑ์กระเบื้อง เช่น กระเบื้องปูพื้น

2.2.2 ชนิดเตาเผาผลิตภัณฑ์เซรามิก

เตาเผาสามารถแบ่งออกตามลักษณะการใส่ชิ้นงาน ได้เป็น 5 ประเภท

1. เตาที่เปิดด้านบน (Top loaders kiln) เป็นเตาที่เปิดฝาจากด้านบนเพื่อใส่ชิ้นงาน



ภาพประกอบ 3 เตาที่เปิดด้านบน (Top loaders kiln)

2. เตาที่เปิดด้านหน้า (Front loaders kiln) เป็นเตาที่เปิดฝาจากด้านข้างของตัวเตา



ภาพประกอบ 4 เตาที่เปิดด้านหน้า (Front loaders kiln)

3. เตายกหรือเตาครอบ (Top hats kiln) เป็นเตาที่สามารถยกตัวเตาหรือฝาครอบออกจากฐานเตาได้



ภาพประกอบ 5 เตายกหรือเตาครอบ (Top hats kiln)

4. เตารถเข็นหรือเตาชัตเติล (Car kilns or Shuttle Kiln) เป็นเตาที่ตัวเตาสร้างบนฐานที่มีความแข็งแรง ประตูเตาสามารถเปิดให้รถเข็นที่มีชิ้นงานเรียงอยู่บนรถเข็นสามารถเคลื่อนที่เข้าไปยังตัวเตาแล้วปิดฝาเตาได้



ภาพประกอบ 6 เตารถเข็นหรือเตาชัตเติล (Car kilns or Shuttle Kiln)

5. เตาที่เปิด-ปิดฝา (Clam shells kiln) เป็นเตาคัลายกับเตาที่เปิดด้านบน เพียงแต่ฝาครอบเตาจะครอบถึงฐานเตา



ภาพประกอบ 7 เตาที่เปิด-ปิดฝา (Clam shells kiln)

2.2.3 ส่วนประกอบของเตาเผาผลิตภัณฑ์เซรามิก

เตาเผาประกอบด้วย 3 ส่วนสำคัญ ได้แก่ ส่วนโครงสร้าง ส่วนผลิตความร้อนให้กับเตาเผาเซรามิก และ ส่วนวัดอุณหภูมิ

ส่วนโครงสร้าง ทำหน้าที่ให้ความแข็งแรงและป้องกันการถ่ายเทความร้อนในระหว่างการเผาเซรามิก ดังนั้นโครงสร้างด้านนอกเป็นโครงสร้างเหล็ก ชั้นถัดเป็นชั้นฉนวนป้องกันการถ่ายเทความร้อนจากภายในเตาสู่ภายนอกเตาและสามารถแบ่งผนังเตาออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ผนังเตา ซึ่งเป็นส่วนที่รับน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นจึงมักจะใช้แผ่นเซรามิก หรือ อิฐทนไฟที่มีความแข็งแรง

ผนังเตาด้านข้างมักจะใช้อิฐทนไฟที่มีคุณภาพดี หรือ ใช้อิฐทนไฟชนิดเบา (insulating brick) และผนังด้านบนของเตา มักจะใช้อิฐทนไฟที่มีน้ำหนักเบา ฉนวนได้แก่ อิฐทนไฟ เส้นใยเซรามิก เป็นต้น

ส่วนผลิตความร้อน เตาเผาสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทตามแหล่งพลังงานได้แก่ แหล่งความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง ได้แก่ ไม้ฟืน ถ่านโค้ก แก๊สสูงต้ม น้ำมัน เป็นต้น และแหล่งความร้อนจากพลังงานไฟฟ้า

ส่วนวัดอุณหภูมิ เป็นส่วนที่บอกอุณหภูมิภายในเตา ซึ่งนิยมใช้เครื่องวัดอุณหภูมิแบบเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ประกอบด้วยโลหะที่แตกต่างกันที่ปลายทั้งสองข้างและปลายด้านหนึ่งถูกให้ความร้อนจะมีกระแสต่อเนื่องซึ่งไหลในวงจรเทอร์โมอิเล็กทริก เมื่อจุดเชื่อมต่อของโลหะทั้งสองถูกทำให้ร้อนจะเกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้น ซึ่งทำให้ทราบค่าของอุณหภูมิที่ปลายจุดเชื่อมของขดไฟฟ้าได้ เทอร์โมคัปเปิลชนิด K (Type K) เป็นเทอร์โมคัปเปิลที่นิยมใช้งานทั่วไปมากที่สุด โดยมีความไวประมาณ $41 \mu\text{V} / ^\circ\text{C}$ มีราคาไม่แพงและสามารถวัดในช่วงอุณหภูมิระหว่าง -200 ถึง $+1,350$ องศาเซลเซียส

2.2.4 วัสดุทนไฟและอุปกรณ์สำหรับใช้ในการเผาเซรามิก

วัสดุทนไฟสำหรับรองเผาและอุปกรณ์ประกอบเตาเผา ได้แก่

วัสดุทนไฟรองเผาชนิดกล่อง

ประกอบด้วยเนื้อ Mullite ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) และ Cordierite ($2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$) ทนต่อการขีดสี การกัดกร่อนของ Slag ได้ดี สามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลัน มีความแข็งแรงสูง ที่อุณหภูมิใช้งานเหมาะกับการใช้งานในสภาพบรรยากาศการเผาแบบ Oxidation และป้องกันผลิตภัณฑ์จากความสกปรกของแก๊ส อากาศ และการเสียหายเนื่องจากเปลวไฟในเตาเผา ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตกระเบื้องบุผนัง โม่เสก สีเคมี เฟอร์ไรท์ (แม่เหล็ก) เป็นต้น



ภาพประกอบ 8 วัสดุทนไฟสำหรับรองเผาชนิดกล่อง

วัสดุอุปกรณ์ทนไฟและแผ่นรองเผา

ประกอบด้วยเนื้อ Cordierite, Mullite-Cordierite, Mullite และ High-Alumina (Al_2O_3) ปริมาณต่างกันเล็กน้อยตามแต่คุณภาพ ผลิตภัณฑ์ทนต่อการขีดสีได้ดี สามารถรับแรงและมีความแข็งแรงสูง ทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลันได้ดี ใช้รองรับผลิตภัณฑ์เซรามิก เช่น ถ้วย จาน ชาม ของตกแต่งเซรามิกต่าง ๆ เป็นต้น และยังถูกใช้รับน้ำหนักในโครงสร้างของรถเตาในอุตสาหกรรมเซรามิก



ภาพประกอบ 9 วัสดุอุปกรณ์ทนไฟและแผ่นรองเผา

วัสดุทนไฟรองเผาจานชาม

ประกอบด้วยเนื้อ Mullite และ Cordierite ทนต่อการขีดสีสูง มีความแข็งแรงสูง ทนต่อการร้าวร่อน เนื่องจากสามารถเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว สะสมความร้อนน้อย สามารถใช้งานได้ทั้งบรรยากาศการเผาแบบ Reduction และ Oxidation ใช้งานได้ดีในระบบการเผาแบบ fast firing อีกทั้งป้องกันผลิตภัณฑ์จากความสกปรกของแก๊สและอากาศภายในเตา ป้องกันการเสียหายของผลิตภัณฑ์เนื่องจากเปลวไฟ ใช้ในอุตสาหกรรมถ้วย จาน ชามของตกแต่งเซรามิกต่าง ๆ



ภาพประกอบ 10 วัสดุทนไฟรองเผาจาน/ชาม

อิฐทนไฟชนิดไฟร์เคลย์

ผลิตจากขามือตคุณภาพสูง มีส่วนประกอบอะลูมินา ตั้งแต่ 30 ถึง 43% ทนต่อการขัดสี และการกัดกร่อนได้ดี ทนต่อการร้าว ล่อน เนื่องจากเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้ดี ความแข็งแรงสูง และหดตัวต่ำที่อุณหภูมิสูง นิยมใช้งานทั่ว ๆ ไป ที่มีสภาวะไม่รุนแรง เป็น Back-up lining ในเตา boiler และเตาหลอมแก้ว และยังถูกใช้ในช่วง Cooling Zone ในเตาอุโมงค์, ใช้ในช่วง feed ends ในเตาเผาซีเมนต์

อิฐทนไฟอะลูมินาสูง

ผลิตจากบ็อกไซต์ ส่วนประกอบอะลูมินาตั้งแต่ 60-90 % มีคุณสมบัติต้านทานการกัดกร่อนจาก Slag และน้ำโลหะได้ดี สามารถทนต่อการกัดกร่อนจากเถ้าของถ่านหิน ลิกไนต์ และน้ำมันเตาได้ดี มีความหนาแน่นและความแข็งแรงสูงทนต่อการร้าวล่อน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิได้ดี ใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูง 1,600-1,900 องศาเซลเซียส

อิฐฉนวนทนไฟ



ภาพประกอบ 11 อิฐฉนวนทนไฟ

ผลิตจากอะลูมินาตั้งแต่ 35% - 60% มีค่าการนำความร้อนต่ำ ความจุความร้อนต่ำ และมีความแข็งแรงสูง เป็นฉนวนกันความร้อนที่ดี สูญเสียความร้อนน้อย อุณหภูมิใช้งานช่วง 900 - 1,400 °C ช่วยลดน้ำหนักของเตาเพราะอิฐมีน้ำหนักเบา ประหยัดพลังงาน นิยมใช้เป็น Back up lining ของอิฐไฟร์เคลย์และอิฐอะลูมินาสูงในเตาเผาเซรามิก เตาหลอมแก้วและเตา Periodic และใช้เป็น Support ผนังเตา Roller และใช้เป็นพื้นของรถเตาเผาเซรามิก

ปูนทนไฟสูง และทนไฟสูงพิเศษ

ปูนก่อผสมเสร็จแข็งตัวหลังจากการให้ความร้อน ให้ความทนไฟสูง การหดตัวต่ำ สามารถทนต่อการขัดสีและการกัดกร่อนจาก Slag ได้ดี มีทั้งชนิดเปียกที่ผสมน้ำแล้วสามารถใช้งานได้ทันที และชนิดแห้งที่ต้องผสมน้ำก่อนใช้งาน สามารถทนต่อการกัดกร่อนจาก Slag คาร์บอนไอระเหยและน้ำโลหะได้ดี นิยมใช้เป็นตัวกลางในการก่ออิฐทนไฟทุกชนิด

พลาสติกทนไฟชนิดไฟร์เคลย์ และ อะลูมินาสูง

มีความแข็งแรงสูง ความหนาแน่นสูง มีค่าคงตัวปริมาตรสูงและมีการหดตัวต่ำที่อุณหภูมิใช้งานทนต่อการร้าวล่อน นิยมใช้ในการซ่อมเตาทั่ว ๆ ไป เช่น เตาเผา เตาหลอมเหล็ก หม้อไอน้ำ เตาเผาเซรามิก ผนังเตา โค้งหลังคา และบล็อกหัวเผา

คอนกรีตทนไฟชนิดฉนวนทนไฟ

คอนกรีตทนไฟชนิดความแข็งแรงพิเศษมีคุณสมบัติเด่นคือ ง่ายต่อการติดตั้ง และประหยัดค่าใช้จ่ายในการติดตั้งหรือซ่อมแซม รวมทั้งอายุการใช้งานที่เทียบเท่าอิฐทนไฟทั่วไป

คอนกรีตทนไฟชนิดฉนวนทนไฟ

1. มีความพรุนตัวสูง การหดตัวน้อย การนำความร้อนต่ำ
2. ประหยัดพลังงานได้มากเพราะมีการสะสมพลังงานในตัวเองต่ำ

การใช้งานคอนกรีตทนไฟชนิดฉนวนทนไฟ

1. เหมาะในการฉาบและก่อเป็น Back-up lining และก่อเป็นโครงสร้างแทนอิฐทนไฟไฟร์เคลย์ หรืออิฐทนไฟอะลูมินาสูง ซึ่งเป็นโครงสร้างที่รับน้ำหนักไม่มาก เช่น โค้งหลังคาเตา, ผนังเตา, ผนังรถเตา
2. สามารถนำไปใช้งานด้านอื่น ที่ต้องการประหยัดพลังงานและลดน้ำหนักโครงสร้าง



ภาพประกอบ 12 คอนกรีตทนไฟชนิดฉนวนทนไฟ

ฉนวนกันความร้อนเซรามิกไฟเบอร์

เป็นฉนวนป้องกันความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูงไม่ติดไฟ มีค่านำความร้อนที่ต่ำ และมีค่าต้านทานความร้อนที่ดี เป็นผลิตภัณฑ์ที่ออกแบบมาสำหรับอุณหภูมิตั้งแต่ 1,260°C, 1,400°C และ 1,600°C มีน้ำหนักเบา มีความยืดหยุ่นสูง แม้จะโดนแรงอัดอย่างมากก็สามารถกลับคืนรูปเดิมได้

ตาราง 5 ข้อมูลผลิตภัณฑ์ฉนวนทนไฟเซรามิกไฟเบอร์

				
BLANKET	BOARD	BULK	PAPER	TAPE
ใช้เป็นฉนวน	ใช้บุผนังตู้เพื่อเป็น	ใช้เป็นฉนวน	ใช้เป็นปะเก็น ซีล	ใช้เป็น ซีล ผนัง
ห่อหุ้มและป้องกัน	ฉนวนกันความ	ป้องกันความร้อน	สำหรับงานหลอม	เตาอบ และพันท่อ
วัสดุชิ้นงานที่มี	ร้อน และใช้เป็น	รั้วไหลในเตาเผา	โลหะ ผนังและฝา	พันชิ้นงานที่
อุณหภูมิสูงมากๆ	ภาชนะรองรับ	และใช้อุดรู	เตาอบ เตาหลอม	ป้องกันความร้อน
หนา : 13,25,50	วัตถุที่มีอุณหภูมิ	ช่องว่างในผนังเตา	หนา : 1-5 mm.	หนา : 3 mm.
mm.	สูงหนา : 25,50			
	mm.			

สามารถนำไปขึ้นรูปลักษณะต่าง ๆ ได้หลายชนิด โดยเซรามิก ไฟเบอร์ มีส่วนประกอบของแร่อะลูมินา และซิลิกา ซึ่งต้านทานการกัดกร่อนของน้ำโลหะ และคุณสมบัติเป็นฉนวน จึงสามารถนำไปใช้กับอุตสาหกรรมหลอมโลหะ ทำเบ้าหลอม รางเท ปลั๊กอุด ที่เทน้ำโลหะ

2.2.5 การเผาผลิตภัณฑ์เซรามิก

กระบวนการเผาผลิตภัณฑ์เซรามิก หรือการทำให้ผลิตภัณฑ์เซรามิกสุกตัว (maturing) เป็นหัวใจหลักของการผลิตเซรามิก โดยจะเป็นกระบวนการหลังๆ ที่จะต้องมีการเตรียมในขั้นตอนต่าง ๆ มาเป็นอย่างดี แต่หากการเผามีปัญหาจนทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ออกมาเสียหาย หรือไม่ได้สมบัติต่าง ๆ ตามที่ต้องการ ก็อาจจะเป็นการสูญเสียเปล่า กระบวนการความร้อนของเซรามิกสำหรับการทำให้ผลิตภัณฑ์เซรามิกสุกตัว สามารถเรียกได้หลายแบบด้วยกันดังนี้

- การเผา (firing) เป็นคำเรียกแบบกลางๆ ทั่ว ๆ ไป
- การหลอม (melting) ใช้สำหรับกรณีการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เซรามิกที่ต้องเผาที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลว ได้แก่ผลิตภัณฑ์แก้วเซรามิก
- การสุกตัวเป็นเนื้อแก้ว (vitrification) มีบางส่วนหลอมเป็นเนื้อแก้ว
- การเผาผนึก (sintering) เป็นกระบวนการความร้อนเพื่อให้ผงเซรามิกเชื่อมติดกัน

จนมีความหนาแน่นสูง

- การเชื่อมยึดด้วยปฏิกิริยา (reaction bonding) เป็นการผลิตชิ้นงานผลิตภัณฑ์เซรามิกที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมี สร้างพันธะให้เชื่อมติดกัน

- การเผาให้ได้ตามที่ต้องการ เผาสตุ (เผาปูน) (calcining)

- การเคลือบผิว (coating) เป็นกระบวนการทางเซรามิกอีกอย่างหนึ่ง ที่ใช้ประโยชน์จากสมบัติบางประการของเซรามิกได้แก่ความแข็ง เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ทนทานต่อการขีดขูดมากขึ้น

- การเผาผนึก คือการเชื่อมอนุภาคหรือผงวัสดุให้ติดกัน อัดตัวกันแน่น โดยใช้ความร้อน ซึ่งต่ำกว่าจุดหลอมเหลว โดยจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของชิ้นงานที่สังเกตได้ดังนี้

- strength, elastic modulus ความแข็งแรง และความยืดหยุ่น

- hardness, fracture toughness ความแข็ง และความเหนียว

- electrical and thermal conductivity ความนำไฟฟ้า และความร้อน

- permeability to gases and liquids การซึมผ่านของแก๊ส และของเหลว

- average grain number, size and shape จำนวนเกรน ขนาดเกรน และรูปร่างของเกรน

- distribution of grain size and shape การกระจายตัวของเกรน ขนาด และรูปร่าง

- average pore size and shape ขนาดรูพรุน และรูปร่าง

- distribution of pore size and shape การกระจายตัวของขนาดรูพรุน และรูปร่าง

- chemical composition and crystal structure องค์ประกอบทางเคมี และโครงสร้างผลึก

2.2.5.1 เทคนิคการเผาและการควบคุมเตาเผาผลิตภัณฑ์เซรามิก

การเผาในทางเซรามิก คือ การเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ผลิตภัณฑ์เซรามิกในเตา ภายใต้บรรยากาศที่เหมาะสม เพื่อเปลี่ยนสภาพดิน หรือส่วนผสมวัตถุดิบ ให้เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงเหมือนหิน ช่วยให้เกิดผลิตภัณฑ์เกิดความคงทนถาวร และสวยงาม มีเทคนิคในการวัดอุณหภูมิ 5 ข้อ ดังนี้

1. ดุสีไฟ (color temperature)

2. วัดอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคัปเปิล (thermocouple)

3. ไพโรมิเตอร์ (pyrometer)

4. โคนวัดอุณหภูมิ (pyrometric cone equivalent)

5. แหวนวัดอุณหภูมิ (thermal ring, bullers ring)

บรรยากาศที่ใช้ในการเผาเตาเซรามิกทั่วไปแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะ ได้แก่

บรรยากาศออกซิเดชัน (Oxidation firing, OF) คือการเผาที่มีการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์และใช้ออกซิเจนมากเกินไป หลังจากเผาไหม้แล้วจะมีออกซิเจนที่เหลืออยู่

บรรยากาศรีดักชัน (Reduction firing, RF) คือการเผาที่มีการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์แต่ในเตาเผาจะมีออกซิเจนไม่เพียงพอ จึงทำให้เมื่อเผาไหม้แล้วจะมีคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เหลืออยู่

บรรยากาศนิวทรัล (Neutral firing, NF) คือการเผาไหม้ที่สมบูรณ์และไม่มีออกซิเจนเหลืออยู่เลย การเผาไหม้จะมีออกซิเจนที่พอดี

ตาราง 6 ย่านการวัดอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลชนิดต่าง ๆ

Thermocouple type	Temperature range (°C)	Metal
T	-270 to 400	Cu/Constantan
N	-270 to 1300	NiCrSi/NiSi
E	-270 to 910	NiCr/Constantan
J	-210 to 1200	Fe/Constantan
K	-270 to 1370	NiCr/NiSi
B	20 to 1820	PtRh30 / PtRh6
R	-50 to 1760	PtRh13 / Pt
S	-50 to 1760	PtRh10 / Pt

การเผาดิบ (Biscuit firing)

การเผาดิบ คือการเผาครั้งแรกของกระบวนการทำเซรามิก เป็นการเผาเพื่อไล่ความชื้น และสารอินทรีย์ในผลิตภัณฑ์เซรามิกก่อนนำไปชุบสารเคลือบ ถือเป็นสิ่งจำเป็นซึ่งเป็นการลดปริมาณน้ำ ซึ่งน้ำทำให้การระเบิดเนื่องจากมีแรงดันเกิดขึ้น การเผาดิบสามารถที่จะเผาใน

อุณหภูมิต่ำ หรืออุณหภูมิสูงก็ได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของดินที่นำมาผลิต การเผาดิบใช้อุณหภูมิประมาณ 750-800 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการเผาดิบแล้ว จะมีความเป็นรูพรุนสูง ทำให้ผลิตภัณฑ์สามารถดูดซึมน้ำเคลือบได้ดี

การเผาเคลือบ (Gloss firing)

เมื่อชิ้นงานผ่านการเผาดิบแล้ว ชิ้นงานจะถูกเคลือบด้วยสารเคลือบชนิดต่าง ๆ และเผาให้สารเคลือบละลายเป็นแก้ว สามารถยึดติดกับพื้นผิวของชิ้นงานได้แน่น การเผาเคลือบเริ่มต้นในบรรยากาศออกซิเดชัน เพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิโดยรอบเป็นประมาณ 950 °C หลังจากนั้นเผาภายใต้บรรยากาศรีดักชัน จนถึงอุณหภูมิสุดท้ายที่ต้องการ

วงจรในการเผาเคลือบ

ช่วงที่ 1 อุณหภูมิห้อง 24-950 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 5-6 ชั่วโมง

ช่วงที่ 2 950-1,250 องศาเซลเซียส (Oxidation firing) ใช้เวลา 3-4 ชั่วโมง

หรือ 950-1,250 องศาเซลเซียส (Reduction firing) ใช้เวลา 4-5 ชั่วโมง

ช่วงที่ 3 เผาเย็นไฟที่อุณหภูมิกงที่ (Soaking) 1,250 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 15 นาที

2.2.6 การเกิดปฏิกิริยาในเนื้อของผลิตภัณฑ์เซรามิกระหว่างการเผา

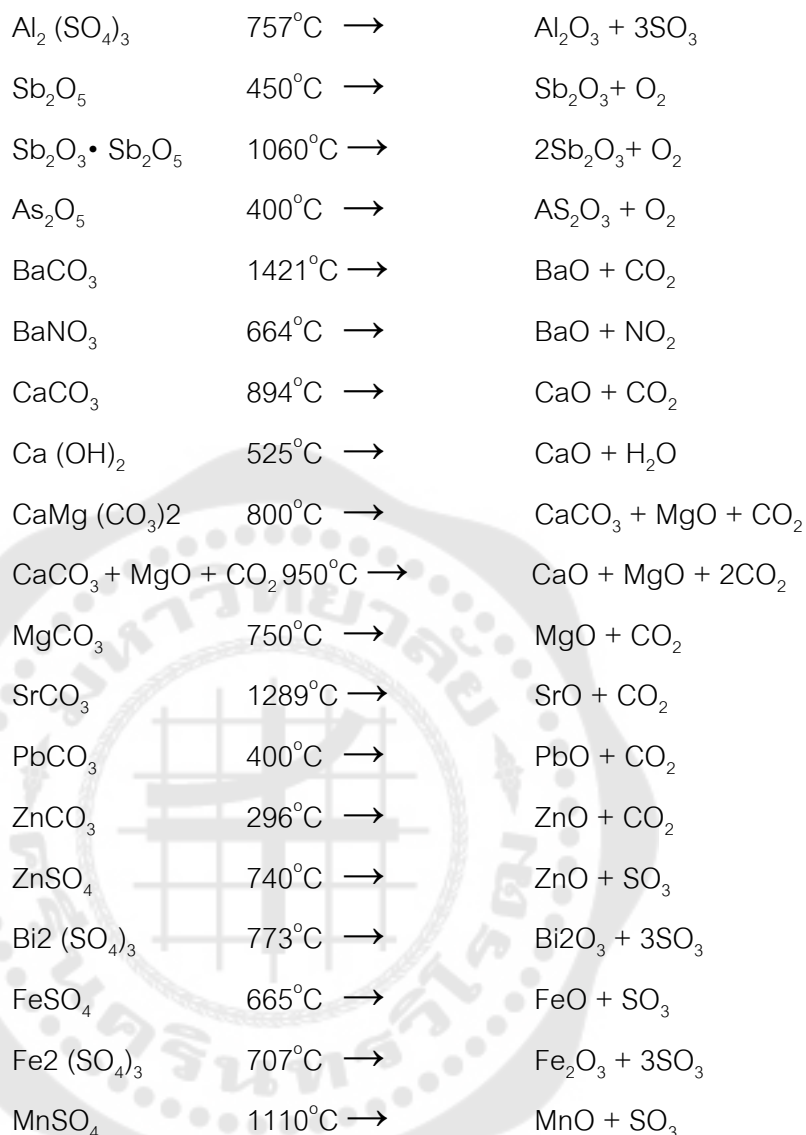
การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบการเคลือบเดิมเป็นกระบวนการที่ยากและซับซ้อน กระบวนการนี้เกี่ยวข้องกับการใช้อุณหภูมิสูงในช่วงเวลาหนึ่ง ขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบการเคลือบแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอน

1. การย่อยสลายและการแยกวัตถุดิบ
2. การรวมกันของสารประกอบ
3. การผืนีกอนุภาคต่าง ๆ ด้วยความร้อน
4. การหลอมละลาย
5. การตกผลึก

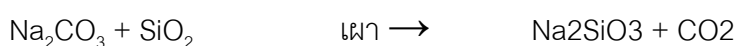
กระบวนการข้างต้นอาจเกิดการทับซ้อนกันเสมอ และจะเกิดขึ้นอีกเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และสารเคมีใหม่ปรากฏขึ้นและหายไป

การแยกสลายตัวของวัตถุดิบ

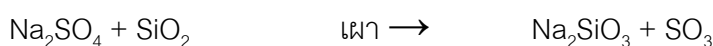
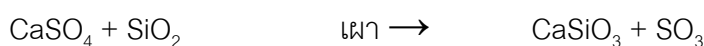
ปฏิกิริยาการแยกสลายตัวเป็นการแตกตัวของสารอย่างหนึ่งให้สารสองชนิด หรือมากกว่าโดยการกระทำของความร้อนแต่เพียงอย่างเดียว ดังสมการต่อไปนี้



ในการเผาเคลือบที่อุณหภูมิสูง สิ่งสำคัญคือการแปรสภาพจากของแข็งชนิดหนึ่งไปเป็นของแข็งชนิดใหม่ พร้อมทั้งคายแก๊สออกมาตลอดเวลา เช่น



พวกซัลเฟตก็เกิดการแตกตัวในแบบนี้เช่นกัน เช่น



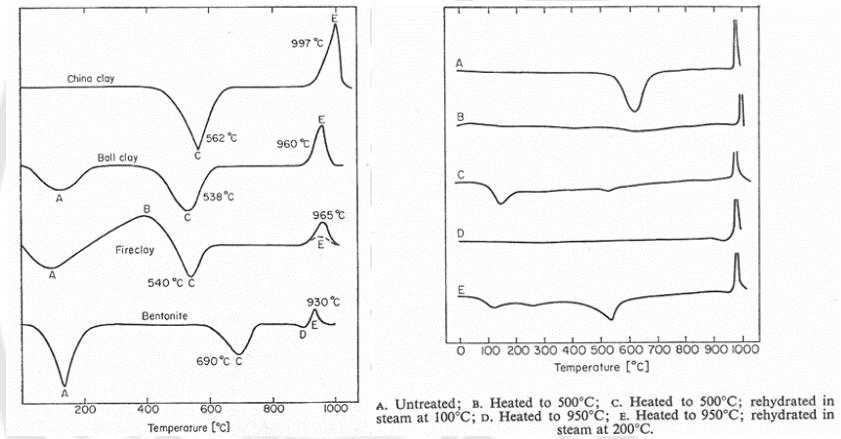
แต่ Na_2SO_4 และ Na_2SiO_3 ที่หลอมเหลวจะไม่รวมกันเป็นเนื้อเดียว แต่จะแยกชั้นกัน เช่นเดียวกับน้ำและน้ำมัน

ซัลเฟตจะถูกรีดิวซ์ให้เป็นซัลไฟด์ได้ด้วยคาร์บอนและสารที่เป็นตัวรีดิวซ์และพวกซัลไฟด์เมื่อเผาต่อไปในอากาศจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนทำให้เกิดพวก RO และ SO_2 หรือ SO_3 ส่วน

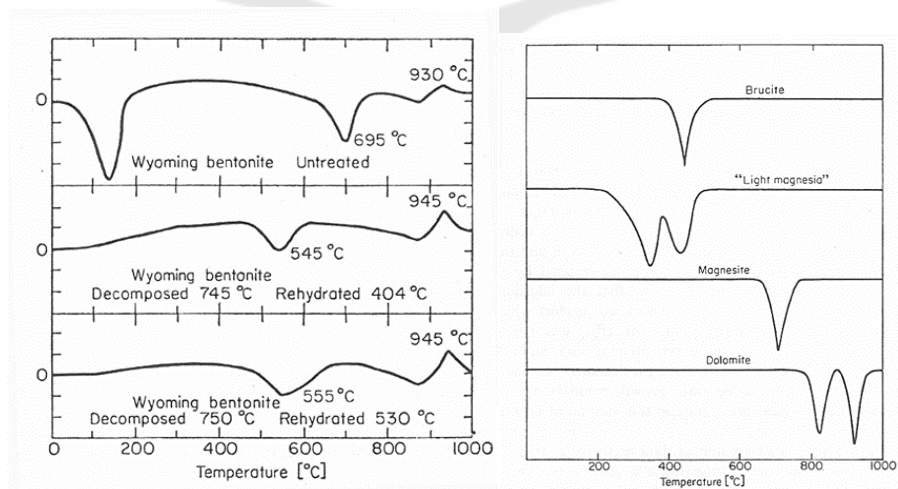
ปฏิกิริยาระหว่างดินกับแคลเซียมคาร์บอเนตอาจเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่าง ๆ ดังนี้ ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 800°C เกิด $\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ หรืออาจเกิด $\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ อุณหภูมิระหว่าง 800°C ถึง 900°C เกิด $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ และที่อุณหภูมิ 900 - 950°C เกิด $5\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ อุณหภูมิระหว่าง 900 - 1,200°C เกิด $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$

ตะกั่วออกไซด์ (PbO) ทำปฏิกิริยากับ SiO_2 เกิด PbSiO_3 ที่อุณหภูมิประมาณ 580°C ปฏิกิริยาจะเกิดได้ดีมากขึ้นที่ 670°C และ 730°C

การเผาเคลือบปกติจะเผาในบรรยากาศออกซิไดซ์ เพราะฉะนั้น C ในดินที่ใช้หรือเป็นสิ่งสกปรกปนอยู่จะถูกขจัดออกไปที่อุณหภูมิระหว่าง 500 - 800°C ปฏิกิริยานี้สำคัญเพราะมีโอกาสทำให้เกิดเม็ดกลมหรือรูเข็มบนผิวเคลือบ Fe^{++} ถูกออกซิไดส์เร็วมากที่อุณหภูมิ 900°C



ภาพประกอบ 13 การวิเคราะห์ช่วงอุณหภูมิที่มีการเกิดปฏิกิริยาในเนื้อดินวัตถุดิบ



ภาพประกอบ 14 กราฟการดูดกลืนและคายความร้อนที่เกิดขึ้นในสารต่าง ๆ

ปฏิกิริยาระหว่างของแข็งกับของแข็ง

สารประกอบต่าง ๆ ถ้าผสมกันอย่างดี ถึงแม้ว่าจะไม่มีเนื้อสารในสภาพของเหลว จะเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิค่อนข้างต่ำทำให้เกิดสารประกอบชนิดใหม่ ตัวอย่างเช่น การเกิดปฏิกิริยาระหว่าง SiO_2 กับ RO หรือ RCO_3 ที่อุณหภูมิ 400°C หรือปฏิกิริยาระหว่าง CaO กับดินที่อุณหภูมิ 530°C อุณหภูมิทั้งสองต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของสารประกอบแต่ละตัวมากมาย

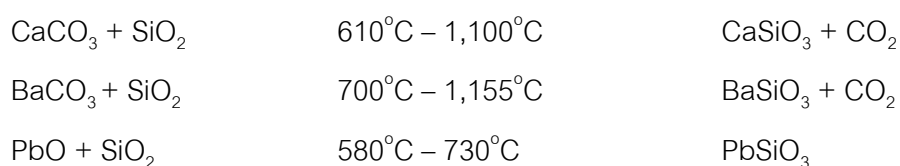
นักเซรามิกสนใจมากต่อปฏิกิริยาชนิดนี้และผลต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น การผลิตแก้ว เคลือบ และโลหะเคลือบ เนื้อผลิตภัณฑ์ สี วัสดุทนไฟ ซีเมนต์ และอื่น ๆ ปฏิกิริยารูปแบบต่าง ๆ ที่กล่าวมาแล้วใช้เป็นวิธีผลิตวัสดุหลายชนิดซึ่งไม่สามารถใช้วิธีอย่างอื่น เพราะว่าผลผลิตต่างกันต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นไม่คงตัวที่จุดหลอมเหลว หรือไม่กี่ของเหลวมีความหนืดมากจนไม่สามารถทำให้เกิดการตกผลึก ตัวอย่างเช่น CaO และ MgO จะทำปฏิกิริยากับดินที่อุณหภูมิ 800°C เกิด RSiO_3 ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ต่ำกว่าจุดหลอมตัวหลายร้อยองศา

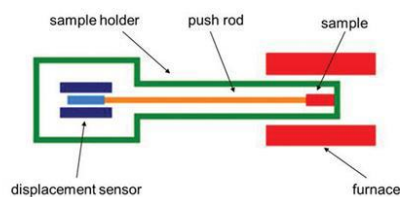
ปฏิกิริยาระหว่างของแข็งกับของแข็งจะเกิดขึ้นและช่วยส่งเสริมปฏิกิริยาได้ โดยทำให้เกิดสภาวะซึ่งทำให้แรงยึดเกาะระหว่างอะตอมน้อยลง และทำให้โครงสร้างภายในอะตอมหละหลวม ความแข็งแรงของสารลดลง และทำให้อะตอมภายในของสารเคลื่อนไหวเร็วขึ้น การใช้พลังงานความร้อนกระตุ้นจะทำให้เกิดสภาวะดังได้กล่าวมาแล้วคือ การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างการเปลี่ยนแปลงรูปของอนุภาค การเปลี่ยนแปลงรูปแบบของกลไก การประสานกันระหว่างวัสดุซึ่งมีโครงสร้างภายในต่างกัน ความเครียดทั้งทางพลังกลและพลังไฟฟ้า และสมบัติทางแสงต่าง ๆ

ความเร็วของปฏิกิริยาวัตพลังงานความร้อน ที่ใช้ในการกระตุ้นให้อะตอมเกิดการสั่นสะเทือนมากพอ จะทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนอนุภาคหรืออะตอมในโครงสร้างของสาร

ขั้นตอนปฏิกิริยาระหว่างของแข็ง Na_2CO_3 กับของแข็ง SiO_2 ที่เกิดระหว่างการเผาเป็นแบบอย่างที่ดีของการเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็งกับของแข็ง ในขณะที่อุณหภูมิของ CO_3 กับ SiO_2 สูงขึ้น พลังงานความร้อนไปกระตุ้นให้พันธะในโครงสร้างของ SiO_2 หละหลวมและขณะเดียวกัน Na^+ จะแทรกผ่านผิวโครงสร้าง ครั้งแรกสารที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะขุ่นมัว แต่ในที่สุดจะเกิดประกายเช่นเดียวกับโอบอล ปฏิกิริยานี้ไม่ใช่เป็นการรวมกันโดยอัตราส่วนที่แน่นอน แต่เป็นผลจากการดูดกลืนหรือเกิดจากการแพร่ของอนุภาค

ปฏิกิริยาระหว่างของแข็งกับของแข็งที่น่าสนใจอีกเช่น





ภาพประกอบ 15 เครื่องวิเคราะห์สมบัติทางการขยายตัวทางความร้อน

ที่มา : ธนากร, ว. (2563). เตาเผาและเทคนิคการเผา ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยร่วมกับ สมาคมเซรามิกส์ไทย.

ตาราง 7 ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นในการเผาบรรยากาศออกซิเดชันและรีดักชัน

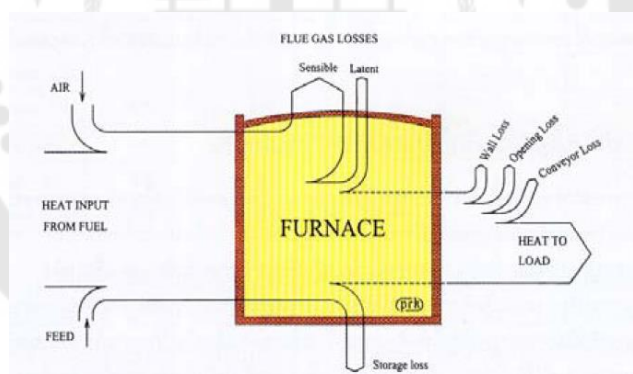
ช่วงการขึ้นอุณหภูมิ	ระยะเวลาเผา (ชม.)	บรรยากาศ	คำอธิบาย
อุณหภูมิห้อง-110	1	OF	ช่วยระเหยของน้ำเป็นไอน้ำ
110-260	1.5	OF	น้ำ ความชื้นระเหยต่อเนื่องเป็นไอน้ำ
260-500	1	OF	สารอินทรีย์ในวัตถุดิบเริ่มเผาไหม้
500-600	1	OF	การเปลี่ยนแปลงของผลึกควอตซ์ 573
600-1,000	1	OF	สารอินทรีย์และแก๊สหมดไปอย่างสมบูรณ์ที่ 1,000 °C
1,000-1,150	1	RF หรือ OF	เริ่มเผาแบบสันดาปไม่สมบูรณ์หินพื้นน้ำเริ่มหลอม
1,150-1,250	2	RF หรือ OF	เนื้อดินและน้ำเคลือบเกิดการเปลี่ยนแปลงจนสุกตัว
1,250	5-15 นาที (รวม 8.45 ชม.)	RF หรือ OF	เผาขึ้นไฟเพื่อให้ผลิตภัณฑ์สุกทั่วเตา
1,250-150	6-12		ปิดเตาเผาให้อุณหภูมิลดลงจึงเปิดเตาเผา

2.2.7 การสูญเสียความร้อนในเตาเผา

ความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าเตาจะถูกใช้และสูญเสียไปในลักษณะดังต่อไปนี้

- ความร้อนที่ปล่อยออกมาสู่ผลิตภัณฑ์
- สูญเสียความร้อนไปกับอากาศเสีย
- การสูญเสียความร้อนผ่านผนังเตาและโครงสร้าง
- การสูญเสียความร้อนทางปากเตา
- การสูญเสียความร้อนอื่น ๆ

ดังนั้นเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของเตาเผาจึงจำเป็นต้องลดการเกิดการสูญเสียต่าง ๆ ให้ได้มากที่สุด โดยทั่วไป เตาเผาจะมีประสิทธิภาพเพียง 20-40% เท่านั้น จึงลดการสูญเสียความร้อน เช่น ระหว่างการบำรุงรักษาหัวเตา ปรับปรุงการฉีดยาน้ำมันเชื้อเพลิง ขนาดการเปิดที่ลดลง เพิ่มความหนาของฉนวน การใช้ฉนวนน้ำหนักเบา ผนังภายนอกที่ลดลง ระบบส่งกำลังแบบ Radiant การลดน้ำหนักที่คงไว้ อัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง เป็นต้น

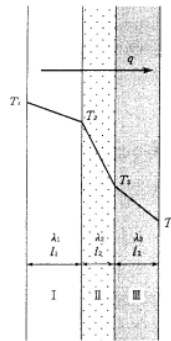


ภาพประกอบ 16 การสูญเสียความร้อนในเตาเผา

ที่มา: เตาเผาอุตสาหกรรม ภาคอุตสาหกรรม (2023).

2.2.8 ทฤษฎีการนำความร้อนแบบหลายชั้น

การนำความร้อนแบบหลายชั้นจะประกอบด้วยแผ่นวัสดุที่มีสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่แตกต่างกันไปมาประกบแนบเข้าด้วยกันมากกว่า 1 ชั้นขึ้นไป ดังภาพที่ 17



ภาพประกอบ 17 การนำความร้อนแบบหลายชั้น

ให้การกระจายตัวของอุณหภูมิพื้นผิวของแต่ละชั้นจะสม่ำเสมอ ไม่มีการไหลของความร้อนไปในทิศทางใดนอกจากความหนาของแผ่นวัสดุและอุณหภูมิผิวสัมผัสของวัสดุแต่ละชั้นเท่ากัน (ไม่มีความต้านทานการนำความร้อนที่ผิวสัมผัส)

ค่าการนำความร้อนของวัสดุแบบหลายชั้นจะเท่ากับผลรวมของความต้านทานการนำความร้อนของแต่ละชั้น ดังนั้นจึงถือว่าวัสดุนี้เป็นแผ่นวัสดุ 1 แผ่นที่มีอุณหภูมิพื้นผิว T_1 และ T_{n+1} และความต้านทานการนำความร้อน ดังสมการที่ (2.31)

$$\dot{Q} = \frac{(T_1 - T_{n+1})}{R_c}, R_c = \sum_{i=1}^n \left(\frac{l_i}{\lambda_i A} \right) \quad (2.31)$$

โดย

\dot{Q} = ปริมาณความร้อน (W)

R_c = ความต้านทานการนำความร้อน (m^2K/W)

λ = สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (W/m.K)

n = จำนวนชั้นของแผ่นวัสดุ

T = อุณหภูมิที่ผิว (K)

2.2.9 วิธีการวิเคราะห์สมบัติของแก้วเซรามิก

การทดสอบการดูดซึมน้ำ

นำตัวอย่างแก้วเซรามิกที่ผ่านการเผาแล้วชั่งน้ำหนัก และจดบันทึกค่าน้ำหนักแห้ง จากนั้นนำตัวอย่างแก้วเซรามิกไปต้มในน้ำที่ 80°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็นและนำไปแช่ไว้ในน้ำนั้นอีก 24 ชั่วโมง การต้มจะต้องหาเศษวัสดุรองไม่ให้ชิ้นงานตัวอย่างติดกันภาชนะและแต่ละชิ้นให้วางห่างกัน เมื่อครบกำหนดเวลานำแก้วเซรามิกตัวอย่างขึ้นจากน้ำ ใช้ผ้าหมาด ๆ ซับผิวแก้ว และนำไปชั่งน้ำหนักที่ดูดซับน้ำ จดบันทึกค่า และสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.32

$$\text{การดูดซึมน้ำ (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักเปียก} - \text{น้ำหนักแห้ง}}{\text{น้ำหนักแห้ง}} \times 100 \quad (2.32)$$

การทดสอบการหดตัว

วัดความหนาของแก้วเซรามิกตัวอย่างก่อนและหลังเผาและคำนวณหาค่าการหดตัวอย่างแก้วเซรามิกสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.33

$$\text{การหดตัว (\%)} = \frac{\text{ความหนา} - \text{ความหนาหลังเผา}}{\text{ความหนา}} \times 100 \quad (2.33)$$

การทดสอบความหนาแน่น

การวัดหาค่าความหนาแน่นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.34

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.34)$$

โดย

ρ คือ ความหนาแน่น (g/cm^3), (kg/m^3)

m คือ มวล (g), (kg)

V คือ ปริมาตร (cm^3), (m^3)

2.3 ระบบควบคุมการทำงาน

โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ (PLC)

โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ (Programmable Logic Controller) หรือพีแอลซี (PLC) เป็นอุปกรณ์ที่คิดค้นขึ้นมาเพื่อใช้ควบคุมการทำงานของเครื่องจักรหรือระบบต่าง ๆ แทนวงจรรีเลย์แบบเก่า ปัจจุบันโปรแกรมพีแอลซีเป็นที่นิยมในงานระดับอุตสาหกรรมเพราะสามารถ

ต่อเข้ากับอุปกรณ์อินพุตและเอาต์พุตได้โดยตรง ใช้งานได้ง่าย ใช้กระแสไฟน้อยกว่า และสะดวกกว่าเมื่อต้องการขยายขั้นตอนการทำงานของเครื่องจักร

เราสามารถจำแนกประเภทของพีแอลซีตามลักษณะภายนอกได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. พีแอลซีชนิดบล็อก (Block Type PLCs) พีแอลซีประเภทนี้จะรวมส่วนประกอบทั้งหมดของพีแอลซีอยู่ในบล็อกเดียวกันไม่ว่าจะเป็น ตัวประมวลผล หน่วยความจำภาคอินพุต/เอาต์พุต และแหล่งจ่ายไฟ

2. พีแอลซีชนิดโมดูล (Module Type PLCs) หรือแร็ค (Rack Type PLCs) พีแอลซีชนิดนี้ ส่วนประกอบแต่ละส่วนสามารถแยกออกจากกันเป็นโมดูล (Module) เช่น ภาคอินพุต/เอาต์พุต จะอยู่ในส่วนของโมดูลอินพุต/เอาต์พุต (Input/Output Units) ซึ่งสามารถเลือกใช้งานได้ว่าจะใช้โมดูลขนาดกี่อินพุต/เอาต์พุต ซึ่งมีให้เลือกใช้งานหลายรูปแบบอาจจะใช้เป็นอินพุตอย่างเดียวขนาด 8/16 จุด หรือเป็นเอาต์พุตอย่างเดียวขนาด 4/8/12/16 จุด ขึ้นอยู่กับรุ่นของพีแอลซีในส่วนของตัวประมวลผลและหน่วยความจำจะรวมอยู่ในซีพียูโมดูล (CPU Unit) สามารถเปลี่ยนขนาดของ CPU Unit ให้เหมาะสมตามความต้องการใช้งาน

โครงสร้างภายในของพีแอลซีแต่ละส่วนจะประกอบกันทำงานเป็นระบบควบคุมที่เรียกว่าพีแอลซีซึ่งประกอบไปด้วยส่วนสำคัญดังภาพที่ 18



ภาพประกอบ 18 ไดอะแกรมการทำงานของพีแอลซี

ที่มา : บริษัททอสมรอน อีเลคทรอนิคส์จำกัด (2023).

จากไดอะแกรมดังกล่าวพีแอลซีจะมีส่วนประกอบสำคัญด้วยกันทั้งหมด 5 ส่วนดังนี้

1. หน่วยประมวลผลกลาง (Central Processing Unit) เป็นส่วนสำคัญที่ควบคุมการทำงานของโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ (PLC) มีไมโครโปรเซสเซอร์เป็นตัวสั่งงาน หน้าที่หลักคือรับข้อมูลหรือโปรแกรมจากอินพุตมาประมวลผลอีกทำเช่นนั้นซ้ำเรื่อย ๆ ไปจนกว่าหยุด

จ่ายไฟให้กับพีแอลซีการประมวลผลโดยการอ่านครบหนึ่งรอบเราเรียกว่า การสแกนเวลา (Scan) ซึ่งถ้าใช้เวลาจำนวนหนึ่งในการสแกนเรียกว่า การสแกนไทม์ (Scan Time) เวลาในการสแกนในการสแกนแต่ละรอบใช้เวลาประมาณ 1 ถึง 100 วินาที ทั้งยังขึ้นอยู่กับขนาดหน่วยความจำและความเร็วของหน่วยประมวลผลรวมถึงจำนวน โปรแกรมที่ป้อนเข้าไปในพีแอลซี

2. หน่วยความจำ (Memory Unit) ทำหน้าที่สำคัญคือเก็บโปรแกรมและคำสั่ง จัดเป็นโปรแกรมขนาดหน่วยความจำเป็นความสามารถในด้านการจัดเก็บโปรแกรมที่มีขนาดของการวัดเป็นบรรทัดของโปรแกรมหรือจำนวน Step โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ (PLC) สามารถแบ่งหน่วยความจำที่สำคัญเป็น 2 ส่วนด้วย คือ หน่วยความจำระบบ (System Memory) หน่วยความจำระบบเป็นส่วนที่เก็บโปรแกรมบริหารระบบและระบบข้อมูลที่ไม่อนุญาตให้ผู้ใช้ หน่วยความจำผู้ใช้ (User Memory) ความจำส่วนที่ทำหน้าที่เก็บโปรแกรมผู้ใช้

- หน่วยความจำ RAM (Random Access Memory) เป็นระบบหน่วยความจำที่สามารถเปลี่ยนแปลงแก้ไขข้อมูลได้ หน่วยความจำนี้มีแบตเตอรี่เล็ก ๆ ต่อไว้เพื่อนำไปเลี้ยงข้อมูลเมื่อเกิดไฟดับข้อมูลจะยังคงอยู่ การอ่านและเขียนโปรแกรมทำได้ง่ายเหมาะกับงานที่มีการเปลี่ยนแปลงข้อมูลบ่อย ๆ ส่วนใหญ่เป็นการเก็บโปรแกรมในช่วงพัฒนา

- หน่วยความจำ ROM (Read Memory) เป็นระบบหน่วยความจำที่ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงแก้ไข ข้อมูลภายในได้ง่าย หน่วยความจำนี้เมื่อไม่มีกระแสไฟเลี้ยงก็ยังคงเก็บโปรแกรมข้อมูลไว้ในหน่วยความจำนี้ จะอ่านโปรแกรมได้อย่างเดียว ผู้ใช้ไม่สามารถเขียนโปรแกรมเข้าไปได้ เหมาะสำหรับใช้เป็นโปรแกรมบริหาร ระบบโปรแกรมที่เสร็จสิ้นสมบูรณ์

- หน่วยความจำ EPROM (Erasable Programmable Read Only) หน่วยความจำชนิดนี้ต้องใช้เครื่องมือพิเศษในเขียนโปรแกรม เครื่องมือเขียนโปรแกรมนี้เรียกว่า PROM Write หน่วยความจำ EPROM ใช้เก็บโปรแกรมที่มีการพัฒนาที่สมบูรณ์ดีแล้วที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงแก้ไขอีก เมื่อไฟดับโปรแกรมที่เก็บไว้จะไม่มีสูญหาย ถ้าจะลบโปรแกรมต้องใช้เครื่องลบโปรแกรม หรือใช้แสงอัลตราไวโอเล็ต

- หน่วยความจำ (Electrical Erasable Programmable) หน่วยความจำชนิดนี้เหมาะสำหรับเก็บโปรแกรมที่พัฒนาสมบูรณ์แบบแล้ว หน่วยความจำนี้มีลักษณะคล้ายหน่วยความจำ EPROM เมื่อเกิดไฟดับโปรแกรมนี้จะไม่สูญหายเช่นกัน การอัปเดตโปรแกรมเข้าไปในเครื่องอัปเดตพิเศษในการลบโปรแกรมและข้อมูลนั้นทำได้โดยวิธีการป้อนสัญญาณเพาท์ ในการลบข้อมูลนั้นไม่จำเป็นต้องลบหมดก็ได้

3. หน่วยอินพุต (Input Unit) ทำหน้าที่แปลงระดับสัญญาณจากภายนอกให้เหมาะสมกับระบบการทำงานของ PLC แปลงสัญญาณภายนอกและภายในออกจากกัน เพื่อป้องกันไม่ให้นหน่วยประมวลผลเสียหายเมื่อหน่วย อินพุตลัดวงจร แก้ปัญหาการสั้นสะพานของ สัมผัสได้

4. หน่วยเอาต์พุต (Output Unit) ทำหน้าที่รับสัญญาณจาก CPU แยกสัญญาณระหว่าง CPU กับอุปกรณ์ภายนอก ขยายสัญญาณให้มีค่าสูงส่งออกไปยังเอาต์พุต

5. หน่วยติดต่อกับระบบส่วนภายนอกเป็นอุปกรณ์ที่อำนวยความสะดวกในการพัฒนาโปรแกรม สามารถใช้ PC ชนิดเดียวกันได้หลายเครื่อง หน้าที่ของอุปกรณ์ภายนอก ได้แก่ ใช้ บ้อนโปรแกรมเข้าไปในหน่วยความจำใช้ในการแก้ไขโปรแกรม, การรักษาโปรแกรม, การพิมพ์ โปรแกรม และการแสดงผลสถานะการควบคุม

2.4 มาตรฐานคุณภาพอากาศที่ระบายออกสำหรับโรงงานอุตสาหกรรม

ค่ามาตรฐานคุณภาพอากาศที่ระบายออกสำหรับโรงงานอุตสาหกรรม ตามประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เรื่องกำหนดมาตรฐานควบคุมการปล่อยทิ้งอากาศเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม ดังตารางที่ 8

ตาราง 8 ค่ามาตรฐานคุณภาพอากาศที่ระบายออกสำหรับโรงงานอุตสาหกรรม

ชนิดของสารเจือปน (หน่วยวัด)	หน่วย	แหล่งที่มาของสารเจือปน	ค่าปริมาณของสารเจือปนในอากาศ	
			ไม่มีการเผาไหม้ เชื้อเพลิง	มีการเผาไหม้ เชื้อเพลิง
		ก. แหล่งกำเนิดความร้อนที่ใช้		
		- น้ำมันหรือน้ำมัน เตา	-	240
1. ฝุ่นละออง (Total Suspended Particulate)	mg/m ³	- ถ่านหิน - เชื้อเพลิงชีวมวล - เชื้อเพลิงอื่น ๆ	- - 300	320 320 240
		ข. การถลุง หล่อหลอม รีดตีง หรือผลิต อะลูมิเนียม	400	320
		ค. การผลิตทั่วไป		
2. พลวง (Antimony)	mg/m ³	การผลิตทั่วไป	20	16
3. สารหนู (Arsenic)	mg/m ³	การผลิตทั่วไป	20	16

ชนิดของสารเจือปน (หน่วยวัด)	หน่วย	แหล่งที่มาของสารเจือปน	ค่าปริมาณของสารเจือปนในอากาศ	
			ไม่มีการเผาไหม้ เชื้อเพลิง	มีการเผาไหม้ เชื้อเพลิง
4. ทองแดง (Copper)	mg/m ³	การผลิตทั่วไป	30	24
5. ตะกั่ว (Lead)	mg/m ³	การผลิตทั่วไป	30	24
6. ปรอท (Mercury)	mg/m ³	การผลิตทั่วไป	3	2.4
7. คลอรีน (Chlorine)	mg/m ³	การผลิตทั่วไป	30	24
8. ไฮโดรเจนคลอไรด์ (Hydrogen Chloride)	mg/m ³	การผลิตทั่วไป	200	160
9. กรดกำมะถัน (Sulfuric acid)	ส่วนในล้านส่วน	การผลิตทั่วไป	25	-
10. ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogen Sulfide)	ส่วนในล้านส่วน	การผลิตทั่วไป	100	80
11. คาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon Monoxide)	ส่วนในล้านส่วน	การผลิตทั่วไป	870	690
12. ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Sulfur dioxide)	ส่วนในล้านส่วน	ก. แหล่งกำเนิดความร้อนที่ใช้		
		- น้ำมันหรือน้ำมัน	-	950
		เตา	-	700
		- ถ่านหิน	-	60
		- เชื้อเพลิงชีวมวล	-	60
		- เชื้อเพลิงอื่น ๆ	-	60
ข. การผลิตทั่วไป	500	-		
13. ออกไซด์ของไนโตรเจน (Oxides of nitrogen)	ส่วนในล้านส่วน	แหล่งกำเนิดความร้อนที่ใช้		
		- น้ำมันหรือน้ำมัน	-	200
		เตา	-	400
		- ถ่านหิน	-	200
- เชื้อเพลิงชีวมวล	-	200		
14. ไซลีน (Xylene)	ส่วนในล้านส่วน	การผลิตทั่วไป	200	-
15. ครีซอล (Cresol)	ส่วนในล้านส่วน	การผลิตทั่วไป	5	-
15. ครีซอล (Cresol)	ส่วนในล้านส่วน	การผลิตทั่วไป	5	-

ที่มา : ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เล่ม 123 ตอนที่ 50 (2549).

หมายเหตุ : 1. ค่าปริมาณสารเจือปนในอากาศ กรณีกระบวนการผลิตที่ไม่มีการเผาไหม้เชื้อเพลิง ให้คำนวณผลที่ความดัน 1 atm หรือ 760 mmHg อุณหภูมิ 25°C ที่สภาวะแห้ง (Dry Basis) โดยมีปริมาตรอากาศเสียที่ออกซิเจน ณ สภาวะจริงในขณะตรวจวัด

2. ค่าปริมาณสารเจือปนในอากาศ กรณีกระบวนการผลิตที่ไม่มีการเผาไหม้เชื้อเพลิง ให้คำนวณผลที่ความดัน 1 atm หรือ 760 mmHg อุณหภูมิ 25°C ที่สภาวะแห้ง (Dry Basis) โดยมีปริมาตรอากาศเสียที่ออกซิเจน ร้อยละ 7

2.5 บทปริทัศน์วรรณกรรม

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และได้นำเสนอตามหัวข้อต่อไปนี้

(เกศแก้ว, 2547) สำหรับงานวิจัยนี้ได้สร้างชุดอุปกรณ์เพื่อใช้ร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ด AT89C51 ในการควบคุมอุณหภูมิของเตาเผาอุณหภูมิสูง โดยเขียนโปรแกรมคำสั่งสำหรับควบคุมอุณหภูมิของเตาเผาอุณหภูมิสูงด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ด AT89C51 และทำการทดสอบการทำงานของชุดควบคุมอุณหภูมิและโปรแกรมควบคุมอุณหภูมิ ตั้งแต่เริ่มต้นจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับเตาเผาอุณหภูมิสูงจนกระทั่งอุณหภูมิของเตาเผาอุณหภูมิสูงถึง 500°C ควบคุมให้คงที่เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ค่าการแกว่งของอุณหภูมิในช่วงนี้เฉลี่ยร้อยละ 0.5 ผลการทดสอบโปรแกรมคำสั่งควบคุมอุณหภูมิของเตาเผาอุณหภูมิสูงพบว่าสามารถควบคุมอุณหภูมิของเตาเผาอุณหภูมิสูง ให้คงที่ได้ตามที่กำหนดไว้ โดยค่าการแกว่งของอุณหภูมิ ไม่เกินร้อยละ 1

(วรรณช, 2559) ได้ศึกษาประสิทธิภาพระบบผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากชีวมวลสำหรับเผาปิสิกิตของผลิตภัณฑ์เซรามิก ซึ่งจากงานวิจัยพบว่า การเผาปิสิกิตที่ศึกษามีลักษณะการเพิ่มอุณหภูมิดังนี้ ช่วงที่ 1 เป็นการเผาไอน้ำในผลิตภัณฑ์จากอุณหภูมิห้องไปยัง 300 °C ใช้เวลา 7 ชั่วโมง ช่วงที่ 2 จากอุณหภูมิจาก 300°C ไป 900°C ใช้เวลา 5 ชั่วโมง และ ช่วงที่ 3 เป็นการรักษาอุณหภูมิที่ 900°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แก๊สชีวมวลใช้เศษไม้ที่มีความกว้างประมาณ 1-2 นิ้ว และความยาวประมาณ 2-5 นิ้ว นอกจากนี้พบว่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบผลิตแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าเท่ากับ 73.14%

(กฤษฎางค์ และคนอื่น ๆ, 2562) ได้ออกแบบ สร้างและทดสอบเตาผลิตแก๊สชีว มวลชนิดไหลขึ้นสำหรับการเผาผลิตภัณฑืเม็ดมะยมดินเผา จำนวน 100 kg/day การควบคุม อุณหภูมิภายในเตาเผาครั้งนี้ ช่วงที่ 1 เป็นการเผาไอน้ำในผลิตภัณฑืจากอุณหภูมิห้องไปยัง 363°C ใช้เวลา 1 ชั่วโมง ช่วงที่ 2 จากอุณหภูมิจาก 363°C ไป 850°C ใช้เวลา 4 ชั่วโมง และ ช่วงที่ 3 เป็น การรักษาอุณหภูมิที่ 850°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากการทดลองพบว่า ขนาดเตาเผาเซรามิกที่สร้าง ขึ้นมีขนาด 0.77x0.8x0.78 m และความจุของถังเชื้อเพลิงชีวมวลเท่ากับ 86 L ความจุของถังเติม เชื้อเพลิงชีวมวลทรงสี่เหลี่ยมคางหมูเท่ากับ 287 L อัตราการไหลของอากาศที่ป้อนให้กับระบบ 9.528 L/s

(ธนากร, 2563) นอกจากแก๊สเชื้อเพลิงไม่ว่าจะเป็นแก๊สหุงต้มหรือแก๊สธรรมชาติซึ่ง เป็นเชื้อเพลิงที่สำคัญสำหรับอุตสาหกรรมเซรามิกแล้ว เนื่องจากปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม และความ ยั่งยืนของการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลที่กำลังจะหมดลงในไม่ช้า อีกทั้งปัญหาภาวะราคาของแก๊ส เหล่านี้ที่นับวันจะสูงขึ้น ทำให้เกิดปัญหาด้านต้นทุนเชื้อเพลิงในอุตสาหกรรมเซรามิกได้ จึงได้มี งานวิจัยที่พัฒนาการนำเชื้อเพลิงชีวมวล (biomass fuel) ได้แก่ ไม้พืนจากต้นไม้ชนิดต่าง ๆ โดยเฉพาะไม้โตเร็วจากป่าปลูก เช่น ไม้ยูคาลิปตัส ไม้สนทะเล ไม้กระถินยักษ์ ไม้กระถินณรงค์ ไม้ กระถินเทพา ไม้ไผ่ ไม้ยางพารา วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ได้แก่ ฟางข้าว แกลบข้าว ชานอ้อย ใบอ้อย ชังข้าวโพด กากปาล์มน้ำมัน กะลาปาล์มน้ำมัน ทะลายปาล์มเปล่า วัสดุเหลือทิ้งของ อุตสาหกรรมอาหาร ได้แก่ กากสาเหล้า กากชา ซึ่งรวมเรียกว่า ชีวมวล สามารถนำมาใช้งานเป็น เชื้อเพลิงได้ แต่การเผาเป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อนโดยตรงนั้น จะก่อให้เกิดปัญหาจากซีเถ้า ค่า พลังงานที่ไม่สม่ำเสมอความชื้นในชีวมวล จึงจำเป็นต้องมีการทำให้เป็นแก๊สชีวมวล

(กำพล, 2562) ได้ศึกษาการผลิตถ่านและน้ำส้มควันไม้จากไม้ไผ่เลี้ยงด้วยเตาเผา ถ่านชุมชนขนาด 200 ลิตร ที่ทำงานร่วมกับหัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ จากการศึกษาพบว่าชุด หัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์สามารถผลิตแก๊สร้อนที่ระดับอุณหภูมิสูงสุดที่ 1,000 °C ได้ ซึ่ง สามารถใช้แหล่งความร้อนในการเผาเซรามิกได้

(กิตติศักดิ์, 2558) ศึกษาสำรวจปัญหาและความต้องการของผู้ประกอบการ อุตสาหกรรมเซรามิกในจังหวัดลำปาง ใช้กลุ่มตัวอย่างเป็นผู้บริหารของโรงงานเซรามิก จำนวน 230 คน ใช้วิธีการเก็บข้อมูลโดยใช้แบบสอบถามปลายปิด จำนวน 225 ฉบับ คิดเป็นร้อยละ 97.83 ของประชากรทั้งหมด จากการศึกษาพบว่าปัญหาอันดับหนึ่งของผู้ประกอบการคือราคาต้นทุนของ เชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาเซรามิก ปัญหารองลงมาเป็นเรื่องของการลดต้นทุนสำหรับการผลิตและ

ปัญหาที่พบน้อยคือราคาของเครื่องจักรที่ใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิก ซึ่งอุตสาหกรรมจำเป็นต้องใช้เครื่องจักรที่ใหญ่ส่งผลทำให้ราคาสูง

(สมมาส, 2556) ได้ทำการเปรียบเทียบสมรรถนะของเตาซีวมวลขนาด 20 kW ที่ใช้ไม้ยูคาลิปตัสเป็นเชื้อเพลิงกับเตาแก๊สหุงต้มชนิดหัวเร่งประสิทธิภาพต่ำ (KB-5) และประสิทธิภาพสูง (SG5) ที่ใช้แก๊สปิโตรเลียมเหลว (LPG) เป็นเชื้อเพลิง จากการทดลองพบว่า ถ้าพิจารณาจากประสิทธิภาพทางความร้อนแล้ว เตาซีวมวลมีประสิทธิภาพทางความร้อนต่ำกว่าเตาแก๊สหุงต้มชนิดหัวเร่งประสิทธิภาพต่ำ (KB-5) และหัวเร่งประสิทธิภาพสูง (SG5) ประมาณ 29% และ 41% ตามลำดับ แต่ในขณะที่พิจารณาเรื่องของต้นทุนการของเชื้อเพลิงแล้วค่าใช้จ่ายสำหรับเตาซีวมวลต่ำกว่าเตาแก๊สหุงต้มทั้งสองชนิด

(Xiao, Ni, Chi, และ Cen, 2008) ได้ศึกษาการนำยางรถยนต์เก่ามาแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงให้กับเตาฟลูอิดไดซ์เบด โดยเตาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร สูง 560 มิลลิเมตร ทดสอบที่อุณหภูมิ 400-800 องศาเซลเซียส พบว่า อัตราส่วนสมมูล (Equivalent ratio) เท่ากับ 0.2-0.6 ผลการวิจัยพบว่าค่าความร้อน (LHV) ของแก๊สที่ได้เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น หรืออัตราส่วนสมมูลลดลงจะลดลงตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น

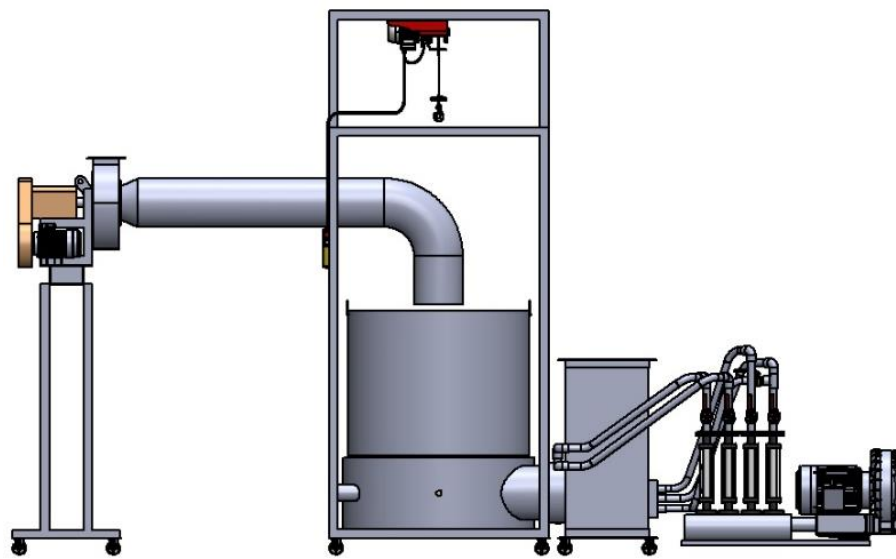
บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 ออกแบบและสร้างเตาเผาผลิตภัณฑ์เซรามิก

เตาเผาเซรามิกเริ่มต้นด้วยรูปทรงที่เป็นลูกบาศก์ (Cube) เนื่องจากรูปร่างนี้สามารถให้พื้นที่ได้มากที่สุด ซึ่งทำให้มีพื้นที่ในการวางชิ้นงานได้มาก การออกแบบเตาเผาต้องคำนึงถึงทิศทางการไหลของเปลวไฟและความร้อน เตาทรงกลมจึงมีจุดเด่นในเรื่องการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาได้ดีกว่าเตาแบบเหลี่ยม ซึ่งจะช่วยลดปัญหาเรื่องของมุมปะทะได้ เตาทรงกลมนิยมออกแบบให้เส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงควรเท่ากัน (Olsen, 2001) ในปัจจุบันนี้มีการพัฒนาวัสดุสำหรับสร้างเตา ในสมัยก่อนส่วนผนังเตาใช้อิฐที่ผลิตจากดินเหนียวทั่วไปผสมทรายและเกลบหรือซีเมนต์ จากนั้นเริ่มพัฒนากลายเป็นอิฐฉนวนความร้อน จนถึงเซรามิกไฟเบอร์ที่มีความเป็นฉนวนความร้อนได้ดี มีน้ำหนักเบา สามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้ดี ทนความร้อนได้สูง และสามารถขึ้นรูปได้หลายรูปทรง ทำให้ผู้วิจัยมีแนวคิดในการออกแบบเตาเผาเซรามิกโดยใช้ฉนวนเซรามิกไฟเบอร์เนื่องจากสามารถขึ้นรูปทรงของเตาเผาได้ง่าย แผ่นรองผลิตภัณฑ์ (Shelve) ถือเป็นส่วนสำคัญเตาเผาเซรามิก ในการใช้พื้นที่เพื่อวางผลิตภัณฑ์สำหรับการเผา ซึ่งจะใช้บ่งบอกถึงขนาดของเตาเผาเซรามิกอีกด้วย ซึ่งการทดลองนี้ผู้วิจัยจะใช้ขนาดแผ่นรอง 45×45×15 เซนติเมตร ซึ่งเป็นขนาดที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย

ชุดเตาเผาเซรามิกแสดงดังภาพที่ 19 ประกอบด้วยส่วนเตาผลิตและเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ (Gasifier and synthesis burner part) (1) ส่วนเตาเผาเซรามิก (Ceramic kiln) (2) ส่วนพัดลมป้อนอากาศ (Air fan part) (3) ส่วนพัดลมดูดไอเสีย (Exhaust fan part) (4) และรอกไฟฟ้า (5)



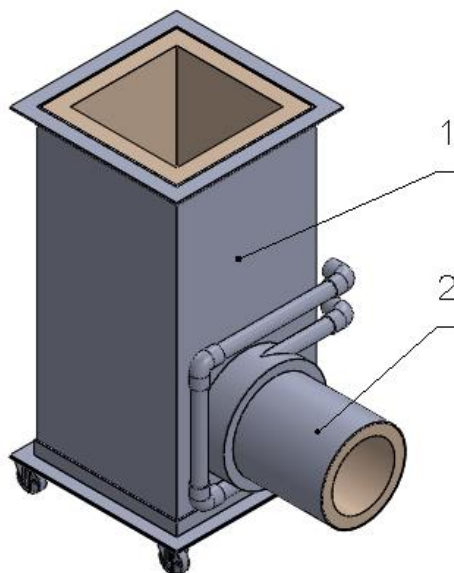
(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 19 (ก) แบบเตาเผาผลิตภัณฑ์เซรามิกที่ทำงานร่วมกับเครื่องผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ (ข) เตาเผาผลิตภัณฑ์เซรามิกและเครื่องผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่สร้างเสร็จ

ส่วนที่ 1 ส่วนเตาผลิตและเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ (Gasifier and synthesis burner part)



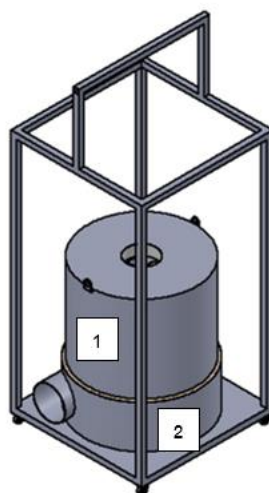
ภาพประกอบ 20 เตาผลิตและเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์

เตาผลิตและเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ ประกอบด้วย ส่วนผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์จากชีวมวล (1) และ หัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ (Burner) (2) ดังภาพ 20 ส่วนของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์จากชีวมวล สร้างด้วยคอนกรีตทนไฟคลาส 15หนา 75 มิลลิเมตร และกรุด้วยฉนวนเซรามิกไฟเบอร์หนา 25 มิลลิเมตร ชั้นนอกสุดของเตาทำด้วยโลหะหนา 3 มิลลิเมตร ที่พันทับด้วยสีกันสนิมและสีทนความร้อน ในการหล่อเตาต้องใช้นามเตยสแตนเลสรูปตัววาย (Y) เชื่อมกับผนังเตา เพื่อยึดคอนกรีตกับผนังโลหะ ภายในเตามีตะแกรงรองรับเชื้อเพลิงชีวมวลทำด้วยวัสดุสแตนเลส 304 และมีช่องป้อนอากาศสำหรับทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิง เพื่อเปลี่ยนเชื้อเพลิงแข็งเป็นแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ รวมทั้งติดตั้งระบบควบคุมการป้อนอากาศเข้าสู่เตาผลิตและเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ ชีวมวลจะถูกป้อนเข้าสู่เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์จากทางด้านบนของเตา ส่วนฝาเตาสามารถเลื่อนเปิดและปิดได้ และออกแบบให้มีช่องบริเวณใต้เตาเพื่อให้สามารถระบายแก๊สออกจากเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ได้

ส่วนหัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ (Burner) มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 200 มิลลิเมตร ยาว 325 มิลลิเมตร ต่ออยู่กับเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ (Gasifier) ในตำแหน่งที่แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ไหลออกจากเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ หัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์เป็นรูปทรงกระบอกด้านในหล่อด้วยคอนกรีตทนไฟคลาส 15หนา 25 มิลลิเมตร ที่

บริเวณส่วนต้นของหัวเผามีห้องป้อนอากาศสำหรับใช้ในการเผาไหม้กับแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ (Syngas) โดยมีช่องรูจำนวนมากบริเวณรอบท่อเพื่อให้อากาศจากห้องป้อนอากาศไหลเข้าผสมเข้ากับแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ได้ดี และเพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้น อุณหภูมิเปลวไฟสูงเพียงพอสำหรับการสร้างความร้อนให้กับเตาเผาผลิตภัณฑ์เซรามิก

ส่วนที่ 2 ส่วนเตาเผาเซรามิก (Ceramic kiln)



ภาพประกอบ 21 เตาเผาเซรามิก

ตัวเตาเผาเซรามิกประกอบด้วย ส่วน คือ ฐานเตา ฝาครอบเตา ดังภาพที่ 21

ฐานเตา (1) เป็นตัวรองรับฝาครอบเตา มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 810 มิลลิเมตร สูง 400 มิลลิเมตร โครงด้านนอกทำจากเหล็กกล้าหนา 3 มิลลิเมตร ชั้นถัดมาบุด้วยเส้นใยเซรามิก (Ceramic Fiber Blanket) ทนอุณหภูมิ 1,260 °C หนา 50 มิลลิเมตร และชั้นในสุดหล่อด้วยคอนกรีตทนไฟคลาส 13 หนา 100 มิลลิเมตร ฐานเตายกสูงจากพื้น 180 มิลลิเมตร เพื่อให้สามารถรองรับส่วนเตาผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ได้พอดี

ฝาครอบเตา (2) ออกแบบให้สามารถยกขึ้น-ลงได้โดยใช้รอกไฟฟ้าที่ติดตั้งไว้ตรงตำแหน่งด้านบนของเตา ฝาครอบเตามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 810 มิลลิเมตร บุกด้วยเส้นใยเซรามิก (Ceramic Fiber Blanket) ทนอุณหภูมิ 1,260 °C หนา 100 มิลลิเมตร โครงด้านนอกทำจากสแตนเลส 304 ม้วนเป็นทรงกระบอก และเจาะรูด้านบนสำหรับเป็นทางออกของไอเสีย มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 280 มิลลิเมตร

แผ่นรองเผาและขาตั้ง สำหรับวางชิ้นงาน มีขนาด 450x450 หนา 15 มิลลิเมตร และขาตั้งสูง 130 มิลลิเมตร เตาเผาสามารถวางแผ่นได้ทั้งหมด 5 ชั้น

ส่วนที่ 3 ส่วนพัดลมป้อนอากาศ (Air fan part)

ส่วนพัดลมป้อนอากาศจะใช้พัดลมกำลังขับเคลื่อนขนาด 1.50 kW. ติดตั้งโรตาริเตอร์เพื่อวัดอัตราการไหลของอากาศจำนวน 4 ตำแหน่ง โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 ป้อนเข้าสู่ห้องผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ (Gasifier) และส่วนที่ 2 ป้อนเข้าสู่ห้องเผาแก๊สเชื้อเพลิง (Burner) โดยติดตั้งเกจวัดความดันและเทอร์โมคัปเปิล จำนวน 1 จุด ดังภาพที่ 22



ภาพประกอบ 22 พัดลมป้อนอากาศ (Air fan part)

ส่วนที่ 4 ส่วนพัดลมดูดไอเสีย (Exhaust fan part)

ส่วนพัดลมดูดอากาศสำหรับดูดไอเสียจากกระบวนการเผาเซรามิกใช้พัดลมกำลังขับเคลื่อนขนาด 1.50 kW. ท่อดูดอากาศขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 นิ้ว ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล จำนวน 1 จุด ดังภาพที่ 23



ภาพประกอบ 23 พัดลมดูดไอเสีย (Exhaust fan part)

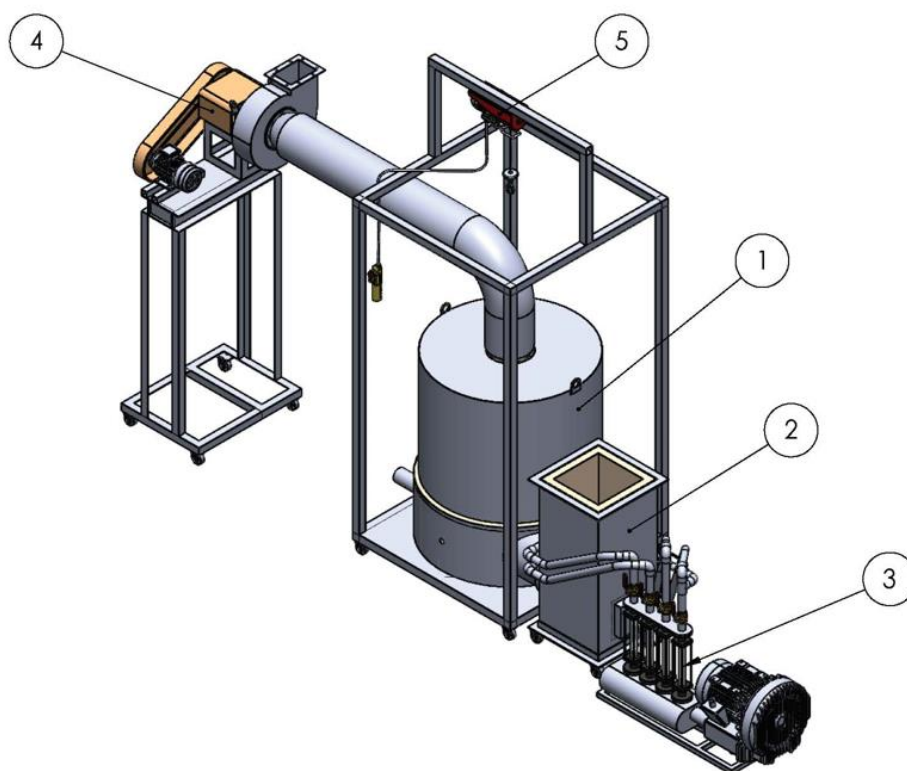
ส่วนที่ 5 รอกไฟฟ้า (Electric hoist)

รอกไฟฟ้าสำหรับยกฝาครอบเตา ขึ้น – ลง สำหรับใส่แก้วเซรามิกตัวอย่าง รองรับน้ำหนัก 200 กิโลกรัม ถูกติดตั้งไว้ในส่วนบนของเตาเผาเซรามิก ดังภาพที่ 24



ภาพประกอบ 24 รอกไฟฟ้า (Electric hoist)

3.2 หลักการทำงานของชุดเตาเผาเซรามิก

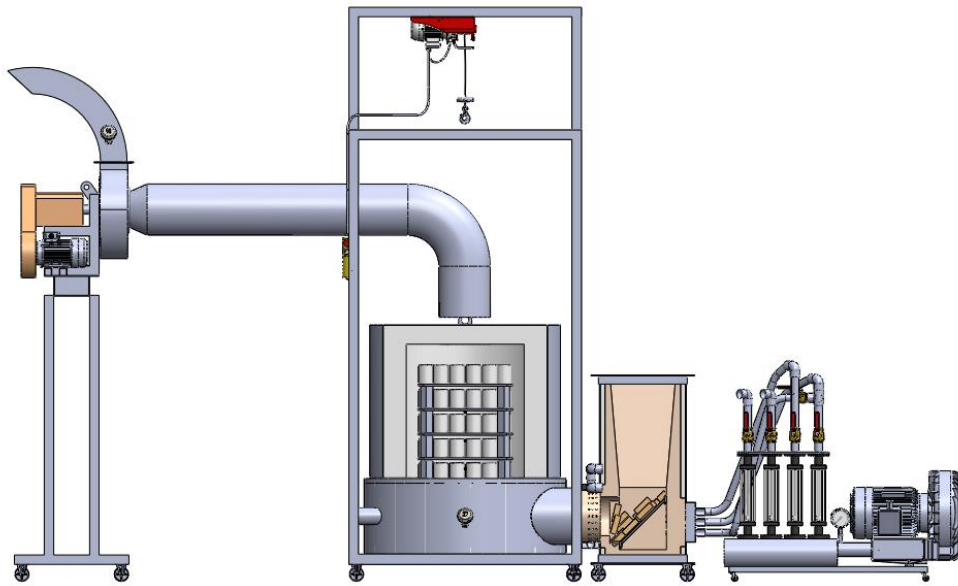


ภาพประกอบ 25 ส่วนประกอบของชุดเตาเผาเซรามิก (1) เตาเผาเซรามิก, (2) เตาผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์, (3) พัดลมป้อนอากาศ, (4) พัดลมดูดไอเสีย, (5) รอกไฟฟ้า

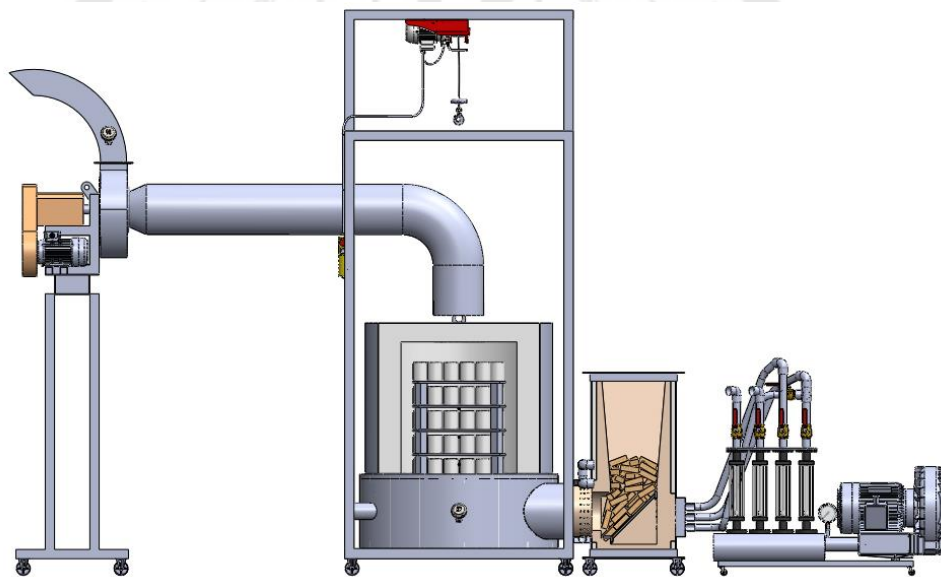
การเผาไหม้ อาศัยความร้อนจากเตาผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่ใช้ไม่พินเป็นเชื้อเพลิง สำหรับป้อนความร้อนให้กับเตาเผา เพื่อให้ได้อุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิกเพิ่มขึ้นด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่ 110 135 และ 160°C/hr สามารถแบ่งการควบคุมเตาผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ออกเป็น 2 ช่วง ได้แก่

ช่วงที่ 1 เป็นช่วงที่อุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิกมีอุณหภูมิระหว่าง 100-400°C การทำงานของเตาผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ เริ่มจากการใส่ไม้เชื้อเพลิงประมาณ 1-2 กิโลกรัม ลงในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ (1) เปิดวาล์วพัดลมป้อนอากาศ (3) ส่วนที่ 1 (Primary Air) ที่อัตราการไหล 11 m³/hr และเปิดพัดลมดูดไอเสีย (Exhaust fan part) (4) ที่การไหล 1,500 m³/hr จากนั้นจุดไม้เชื้อเพลิงในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ (2) ให้ติดไฟช่วงนี้เป็นการใช้ความร้อนจากกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง (Wood Combustion) เพื่อเป็นแหล่งพลังงานให้กับเตาเผาเซรามิก แก๊สร้อนที่ได้จากกระบวนการเผาไหม้จะถูกส่งไปยังเตาเผาเซรามิกผ่านทางห้องเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ โดยอาศัยแรงดูดจากพัดลมดูดไอเสีย (Exhaust fan part) (4) ขณะเดียวกันในช่วงนี้อากาศในส่วนที่ 2 (Secondary Air) จะยังคงถูกปิดอยู่ การเพิ่มของอุณหภูมิภายในเตาเป็นผลมาจากการทำปฏิกิริยาระหว่างไม้เชื้อเพลิงและออกซิเจนในอากาศ การเติมไม้เชื้อเพลิงและการป้อนอากาศจะเพิ่มขึ้นตามอัตราการเพิ่มอุณหภูมิของการเผาไหม้ ซึ่งระดับเชื้อเพลิงในช่วงแรกของการเผาจะไม่สูงมากนัก ดังภาพ 26 (ก)

ช่วงที่ 2 เป็นช่วงที่อุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิกอยู่ระหว่าง 400-800°C เมื่ออุณหภูมิหัวเบิร์นเนอร์ถึงประมาณ 400 °C ให้ทำการเปิดวาล์วป้อนอากาศ (3) ส่วนที่ 2 (Secondary Air) ที่อัตราการไหล 22 m³/hr ส่งไปยังห้องเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ (Burner) เพื่อเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ การทำปฏิกิริยาในช่วงนี้เป็นการเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่ได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) ซึ่งจะได้แก๊สร้อนที่มีอุณหภูมิสูง สำหรับใช้ในกระบวนการเผาเซรามิก ในช่วงนี้ปริมาณไม้เชื้อเพลิงและอากาศที่ป้อนเข้าสู่เตาผลิตและเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ต้องมีความสัมพันธ์กัน ถ้าชั้นเชื้อเพลิงมากเกินไปจะส่งผลทำให้อุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิกต่ำลง ทั้งนี้เนื่องมาจากความชื้นในไม้เชื้อเพลิงดูดความร้อนไปบางส่วน ทำให้อุณหภูมิต่ำลงในห้องผลิตและเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ต่ำลง ส่งผลทำให้อุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิกต่ำลงด้วยเช่นกัน แต่ถ้าชั้นเชื้อเพลิงน้อยเกินไปก็จะส่งผลทำให้การเผาไหม้เชื้อเพลิงเปลี่ยนจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) กลายเป็นการเผาไหม้สมบูรณ์ (Combustion) แทนได้ ซึ่งจะส่งผลทำให้ค่ามลพิษสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนด



(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 26 แสดงระดับความหนาของชั้นเชื้อเพลิง (ก) แสดงปริมาณระดับชั้นเชื้อเพลิงช่วงที่ 1 (Combustion) ของการเผาปัสกิต (ข) แสดงปริมาณระดับชั้นเชื้อเพลิงช่วงที่ 2 (Gasification) ของการเผาปัสกิต

เตาเผาเซรามิก (1) แบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนฐานเตา และส่วนฝาครอบเตา

ส่วนที่ 1 ส่วนฐานเตาออกแบบมาให้เชื่อมต่อกับหัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ ซึ่งเชื่อมต่อกันในตำแหน่งด้านซ้ายของฐานเตาเผาเซรามิก เพื่อให้แก๊สร้อนวิ่งเป็นวงกลมลักษณะ คล้ายไซโคลน ซึ่งจะช่วยให้แก๊สร้อนสามารถกระจายตัวได้ทั่วถึงตลอดทั้งเตา และแก๊วเซรามิก ตัวอย่างได้รับความร้อนที่สม่ำเสมอ

ส่วนที่ 2 ฝาครอบเตาออกแบบเพื่อให้สามารถยกขึ้น-ลงได้ โดยใช้ระบบรอกไฟฟ้า (5) เพื่อสะดวกแก่การใส่ชิ้นงานและนำชิ้นงานตัวอย่างแก้วเซรามิกออกจากเตาเผา ด้านบนฝาครอบมี รูเพื่อระบายไอเสียจากกระบวนการเผาเซรามิก โดยมีพัดลมดูดไอเสีย (Exhaust fan part) (4) ดูดไอเสียออกสู่บรรยากาศ และยังทำหน้าที่ควบคุมความดันภายในเตาเผาเซรามิก รวมทั้งเตา ผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ให้มีค่าต่ำกว่าบรรยากาศเล็กน้อย เพื่อป้องกันไม่ให้แก๊ส เชื้อเพลิงสังเคราะห์ไหลย้อนออกทางช่องป้อนเชื้อเพลิง

3.3 วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

3.3.1 การเตรียมตัวอย่างแก้วเซรามิกสำหรับเผาดิบ

ตัวอย่างแก้วเซรามิกที่ใช้ในการทดสอบการเผาดิบ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.5 cm. และสูง 7.5 cm. และหนา 4.0 – 4.5 mm ตัวอย่างแก้วเซรามิกถูกเตรียมด้วยวิธีการหล่อน้ำดินใน แม่พิมพ์ปูนพลาสติก น้ำดินเตรียมจากดินชนิด VCE ของบริษัท Compound Clay Company Limited มีค่าความถ่วงจำเพาะอยู่ระหว่าง 1.65 g/mL และปรับความหนืดของน้ำดินด้วย สารละลาย Sodium silicate จนมีความหนืด 2.5 – 5.0 poise วิธีการหล่อน้ำดินดังภาคผนวก ฉ

ตัวอย่างแก้วเซรามิกที่ได้จากกระบวนการหล่อ ดังในภาพที่ 27 นำมาจัดเรียงลงใน เตาเผา โดยมีจำนวนทั้งหมด 5 ชั้น ในชั้น 1 – 4 วางตัวอย่างแก้วเซรามิกจำนวน 29 ใบ และชั้น บนสุดวางตัวอย่างแก้วเซรามิกจำนวน 33 ใบ ดังแสดงในภาพที่ 28



ภาพประกอบ 27 ตัวอย่างแก้วเซรามิกที่ได้จากกระบวนการหล่อ



ภาพประกอบ 28 ตัวอย่างการจัดเรียงแก้วเซรามิกในเตาเผา

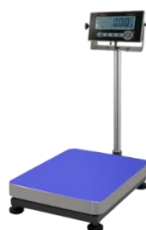
3.3.2 เครื่องมือการวัด

เทอร์โมคัปเปิล Type K สำหรับวัดอุณหภูมิ มีย่านการวัดอุณหภูมิที่ -200°C ถึง $+1,350^{\circ}\text{C}$ ก้านโพรบยาว 30 เซนติเมตร หนา 10 มิลลิเมตร ให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันต่ออุณหภูมิอยู่ที่ $(41\mu\text{V}/^{\circ}\text{C})$ ดังแสดงภาพที่ 29



ภาพประกอบ 29 เทอร์โมคัปเปิล Type K

เครื่องชั่งดิจิตอล ค่าความละเอียด 0.01 Kg แทนขนาด 400 x 500 mm. รุ่น EEKW 150 kg. ดังแสดงภาพที่ 30



ภาพประกอบ 30 เครื่องชั่งดิจิตอล

โรตاميเตอร์ (Rotameter) ย่านการวัด 0-50 m³/hr (อากาศ) ทุ่นลอยเป็นสแตนเลส 304
ความเที่ยงตรง : ±2.5% ดังแสดงภาพที่ 31



ภาพประกอบ 31 โรตاميเตอร์

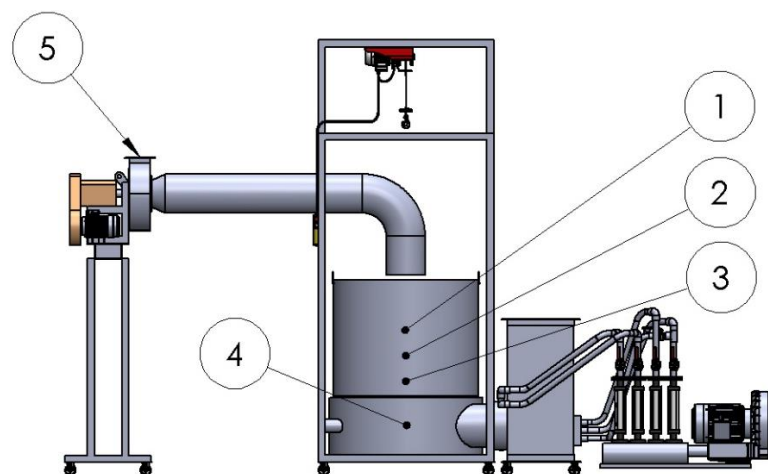
เครื่องวิเคราะห์แก๊ส (Flue gas analyzer) รุ่น testo 350XL วิเคราะห์แก๊ส O₂, CO, COlow, NO, NOlow, NO₂, SO₂, H₂S, CO₂ – NDIR โพรบสามารถทนอุณหภูมิสูงสุด -40 – 1,200 °C ดังแสดงภาพที่ 32



ภาพประกอบ 32 เครื่องวิเคราะห์แก๊ส

3.3.3 ตำแหน่งติดตั้งเครื่องมือวัด

ตำแหน่งการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล ดังแสดงดังภาพที่ 33



ภาพประกอบ 33 ตำแหน่งติดตั้งเครื่องมือวัด

- T1 คือ อุณหภูมิบนเตาเผาเซรามิก
- T2 คือ อุณหภูมิกลางเตาเผาเซรามิก
- T3 คือ อุณหภูมิล่างเตาเผาเซรามิก
- T4 คือ อุณหภูมิห้องเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์
- T5 คือ อุณหภูมิไอเสียที่ปล่อยออกสู่บรรยากาศ

3.3.4 วิธีการทดลอง

นำไม้เชื้อเพลิงใส่ลงในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ ประมาณ 1 - 2 กิโลกรัม จากนั้นเปิดวาล์วพัดลมป้อนอากาศในส่วนที่ 1 (Primary Air) ควบคุมอัตราการไหลของอากาศที่ 11 m³/hr และเปิดพัดลมดูดอากาศให้ได้อัตราการไหลเท่ากับ 1,500 m³/hr หลังจากนั้นจุดไฟที่ไม้เชื้อเพลิง เมื่อเชื้อเพลิงลุกไหม้แล้วควบคุมอัตราการป้อนอากาศให้เพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของไม้เชื้อเพลิง เพื่อเพิ่มอุณหภูมิเตาเผาให้ได้ตามกราฟมาตรฐาน โดยช่วงแรกความร้อนที่ส่งให้เตาเผาเซรามิกได้จะมาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งบริเวณห้องผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ และส่งแก๊สร้อนผ่านหัวเบรินเนอร์เข้าสู่เตาเผาเซรามิก ช่วงต่อมาเมื่ออุณหภูมิหัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์สูงกว่า 400°C ให้เปิดวาล์วพัดลมป้อนอากาศในส่วนที่ 2 (Secondary Air) ที่อัตราการไหลเท่ากับ 22 m³/hr เพื่อป้อนอากาศให้กับห้องเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ (Burner) เพื่อเผาแก๊ส

เชื้อเพลิงสังเคราะห์ สำหรับสร้างความร้อนให้กับเตาเผาเซรามิก และเมื่ออุณหภูมิเตาเผาเซรามิก อุณหภูมิถึง 800°C ให้ควบคุมอุณหภูมิให้คงที่อีก 30 นาที หลังจากนั้นให้ปิดพัดลมบ้อนและดูดู อากาศและรอให้อุณหภูมิในเตาเผาเซรามิกมีอุณหภูมิต่ำกว่า 150°C จึงจะเปิดเตาเพื่อนำชิ้นงาน ตัวอย่างแก้วเซรามิกออก

แก้วเซรามิกตัวอย่างก่อนและหลังเผาจะต้องทำการวัดค่าความหนา และน้ำหนัก เพื่อนำ ค่าไปวิเคราะห์หาคุณสมบัติของแก้วเซรามิก

การใช้โปรแกรม PLC เพื่อควบคุมอัตราการเพิ่มอุณหภูมิของเตาเผาเซรามิกแบบ อัตโนมัติที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 160°C/hr โดยโปรแกรมจะอ่านอุณหภูมิที่หัวเผาแก๊สเชื้อเพลิง สังเคราะห์ (Burner) เพื่อเป็นข้อมูลในการสั่งงานพัดลมบ้อนอากาศให้มีอัตราการบ้อนอากาศให้ สัมพันธ์กับอุณหภูมิมาตรฐาน (Set point) โดยปริมาณเชื้อเพลิงที่บ้อนเข้าสู่เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง สังเคราะห์จะต้องสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น วิธีการใช้โปรแกรมดังกล่าวมีดังนี้

3.3.5 วิธีการวิเคราะห์ผลการทดลอง

ไม้เชื้อเพลิงเป็นเศษไม้ที่เหลือจากกระบวนการผลิตพาเลทไม้ที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัด 1×3 นิ้ว และมีความยาวในช่วง 3-6 นิ้ว ตัวอย่างเศษไม้ถูกนำไปวิเคราะห์หาปริมาณธาตุ (Ultimate Analysis) CHNS/O โดยมีวิธีทดสอบ/วิเคราะห์อ้างอิงตามมาตรฐาน (ASME D5373 D4239) ด้วยเครื่องวิเคราะห์ Truspec CHN Truspec S ยี่ห้อ LECO และวิเคราะห์หาองค์ประกอบ โดยประมาณ (Proximate Analysis) โดยวิธีทดสอบ/วิเคราะห์อ้างอิงตามมาตรฐาน (ASTM D3172-3175) ด้วยเครื่องวิเคราะห์ TGA701 Thermogravimetric Analyzer ส่วนค่าความร้อน HHV วิเคราะห์โดยอ้างอิงตามมาตรฐาน ASME D5865 ด้วยเครื่องวิเคราะห์ Bomb Calorimeter AC600 Automatic Calorimeter

การวิเคราะห์หาปริมาณมลพิษจากแก๊สไอเสีย ได้แก่ CO และ NOx ด้วยเครื่อง Gas Analyzer ยี่ห้อ Testo รุ่น 350XL

การวิเคราะห์หาสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างแก้วเซรามิกก่อน – หลังเผาดิบ เพื่อหาค่าการดูดซึมน้ำ การหดตัว และความหนาแน่นของแก้วเซรามิกตัวอย่างมีวิธีการดังนี้

วิธีการทดสอบการดูดซึมน้ำ

นำตัวอย่างแก้วเซรามิกที่ผ่านการเผาดิบแล้วชั่งน้ำหนัก และจดบันทึกค่าน้ำหนักแห้ง จากนั้นนำตัวอย่างแก้วเซรามิกไปต้มในน้ำเดือดเป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นทิ้งไว้ให้เย็นและนำไป แช่ไว้ในน้ำนั้นอีก 24 ชั่วโมง การต้มจะต้องหาเศษวัสดุรองไม่ให้ชิ้นงานตัวอย่างติดกันภาชนะและ

แต่ละชิ้นให้วางห่างกัน เมื่อครบกำหนดเวลานำแก้วเซรามิกตัวอย่างขึ้นจากน้ำ ใช้ผ้าหมาด ๆ ซับผิวแก้ว และนำไปแช่น้ำหนักที่ดูดซับน้ำ จดบันทึกค่า และนำไปคำนวณหาค่าการดูดซับน้ำ

วิธีการทดสอบการหดตัว

วัดความหนาของแก้วเซรามิกตัวอย่างก่อนและหลังเผาดิบและคำนวณหาค่าการหดตัวของตัวอย่างแก้วเซรามิก

วิธีการทดสอบความหนาแน่น

วัดมวลและปริมาตรเพื่อหาความหนาแน่นของแก้วเซรามิกตัวอย่างโดยการคำนวณ

3.4 เงื่อนไขการทดลอง

การทดลองที่ 1 ศึกษาสมรรถนะเครื่องผลิตและเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์

ศึกษาตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิแก๊สร้อนจากเครื่องผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ ทดลองหาสภาวะอัตราส่วนอากาศที่เหมาะสมสำหรับผลิตแก๊สร้อนเพื่อใช้ในการเผาผลิตภัณฑ์เซรามิกที่มีคุณภาพ และมลพิษจากการเผาไหม้ ไม้เชื้อเพลิงที่ใช้เป็นเศษไม้ที่เหลือจากกระบวนการผลิตพาเลทไม้ ขนาดหน้าตัด 1×3 นิ้ว และมีความยาวในช่วง 3-6 นิ้ว

การทดลองที่ 2 ศึกษาสมรรถนะของเตาเผาผลิตภัณฑ์เซรามิก

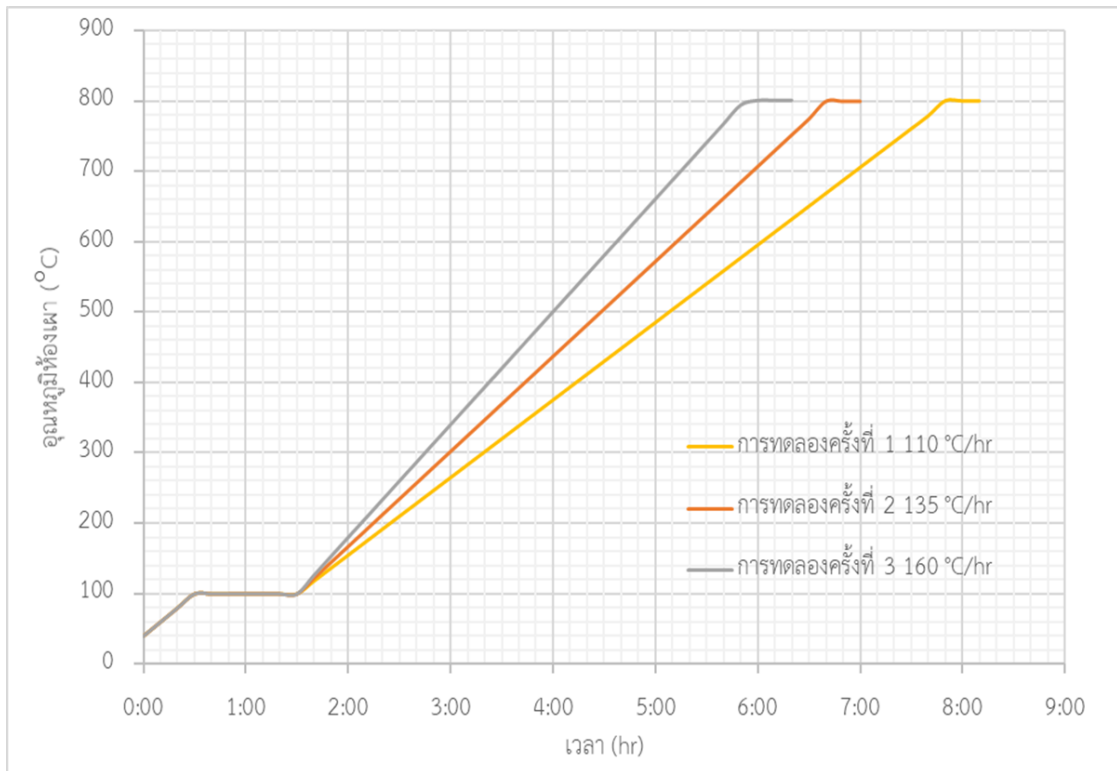
ศึกษาสมรรถนะของเตาเผาผลิตภัณฑ์เซรามิก นำแก้วเซรามิกตัวอย่าง จำนวน 149 ใบ จัดเรียงทั้งหมด 5 ชั้นแบ่งเป็น ชั้นที่ 1-4 จำนวน 29 ใบ และชั้นที่ 5 (ชั้นบนสุด) จำนวน 33 ใบ โดยควบคุมอุณหภูมิในเตาเผาเซรามิกให้มีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่ 110 135 และ 160 °C/hr แบ่งเป็น 3 ช่วง ดังนี้

ช่วงที่ 1 เป็นการเผาที่อุณหภูมิบรรยากาศถึง 100-120°C เพื่อไล่ความชื้นออกจากชิ้นงาน คงที่เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ช่วงที่ 2 อุณหภูมิ 120-800°C ช่วงนี้เป็นช่วงที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามอัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่ 110 135 และ 160°C/hr ดังภาพที่ 34

ช่วงที่ 3 ยืนอุณหภูมิที่ 800°C เป็นเวลา 30 นาที

โดยมีการเก็บการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาเผาตลอดการทดลองเพื่อหาการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาเผา



ภาพประกอบ 34 แสดงกราฟควบคุมอุณหภูมิมาตรฐานในการเผาปัสกิต

การทดลองที่ 3 ศึกษากราฟอุณหภูมิการเผาผลิตภัณฑ์เซรามิกเมื่อควบคุมเตาผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ด้วยโปรแกรม PLC

ศึกษาตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการควบคุมเตาเผาเซรามิกที่ใช้โปรแกรม PLC ควบคุมการทำงานโดยที่ควบคุมการอัตราการป้อนอากาศสำหรับผลิตและเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิภายในเตาเผาให้เป็นไปตามอัตราการเพิ่มอุณหภูมิเท่ากับ 160°C/hr

บทที่ 4

ผลการดำเนินงาน

4.1 ผลการศึกษาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อเตาผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเศษไม้

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของเศษไม้ที่ได้จากกระบวนการผลิตพาเลทไม้ให้ผลดังตารางที่ 9 จากตารางที่ 9 ผลการวิเคราะห์หาองค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate Analysis) พบว่ามีปริมาณความชื้นเท่ากับ 13.42 % สารระเหย 63.61% คาร์บอนคงตัว 22.08% และเถ้า 0.89 % ผลการวิเคราะห์หาธาตุเคมี (Ultimate Analysis) พบว่ามีปริมาณธาตุคาร์บอน ธาตุไฮโดรเจน และธาตุออกซิเจนมีค่าเท่ากับ 45.62 6.73 และ 42.36% ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนต่ำ (LHV) พบว่ามีค่า 15.89 MJ/kg และค่าความร้อนสูง (HHV) พบว่ามีค่า 17.68 MJ/kg

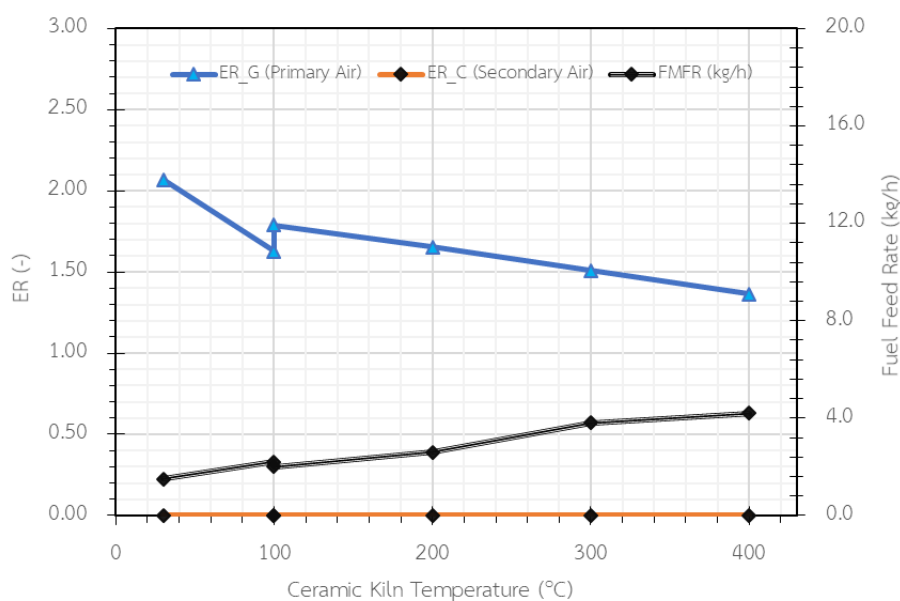
ตาราง 9 แสดงการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณและการวิเคราะห์ธาตุเคมี

Proximate analysis (wet basis, wt.%)	
Moisture	13.42
Volatile matter	63.61
Fixed carbon	22.08
Ash	0.89
Ultimate analysis (wet basis, wt.%)	
Carbon (C)	45.62
Hydrogen (H)	6.73
Nitrogen (N)	4.33
Sulfur (S)	0.08
Chloride (Cl)	0
Oxygen (O)	42.36
Thermal analysis (as received basis, wt.%)	
Higher heating value, HHV (MJ/kg)	17.68
Lower heating value, LHV (MJ/kg)	15.89

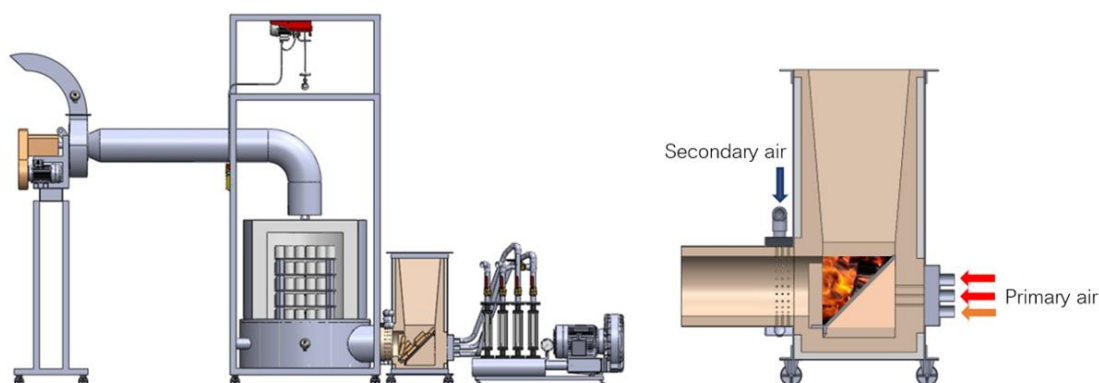
ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอากาศและไม้เชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าสู่เตาผลิตและเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์

จากผลการทดลองดังตารางที่ 10 แสดงปริมาณอากาศและไม้เชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าสู่เตาผลิตและเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ ซึ่งมีการควบคุมอัตราการเพิ่มอุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิกที่ 160°C/hr โดยแบ่งช่วงการทำงานของเตาผลิตและเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ออกเป็น 2 ช่วง ได้แก่

ช่วงที่ 1 เป็นช่วงที่อุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิกมีค่าอุณหภูมิระหว่าง $100\text{-}400^{\circ}\text{C}$ การทำงานของเตาผลิตและเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ในช่วงนี้ เป็นการให้ความร้อนจากกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง (Wood Combustion) เพื่อเป็นแหล่งพลังงานให้กับเตาเผาเซรามิก ซึ่งจะใช้อากาศในส่วนที่ 1 (Primary Air) ป้อนเข้าเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์เพื่อทำปฏิกิริยากับไม้เชื้อเพลิง จากภาพที่ 39 พบว่าเมื่ออุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิกเพิ่มตามอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ (Heating Rate) เท่ากับ 160°C/hr ปริมาณการใช้ไม้เชื้อเพลิงและอากาศมีความสัมพันธ์กัน ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราการเผาไหม้ที่เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิของเตาเผา เมื่ออุณหภูมิในเตาเผาสูงขึ้นปฏิกิริยาการเผาไหม้จะค่อย ๆ สมบูรณ์มากขึ้น ซึ่งจะต้องใช้อากาศที่มากเพียงพอสำหรับใช้ในกระบวนการเผาไหม้ไม้เชื้อเพลิง เพื่อเป็นแหล่งความร้อนสำหรับไปใช้ใน ระบบ ส่งผลให้ค่าอัตราส่วนสมมูล (Equivalence Ratio) ลดลงตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น ที่อุณหภูมิ $100\ 200\ 300$ และ 400°C มีค่าเท่ากับ 1.79 1.65 1.51 และ 1.36 ตามลำดับ



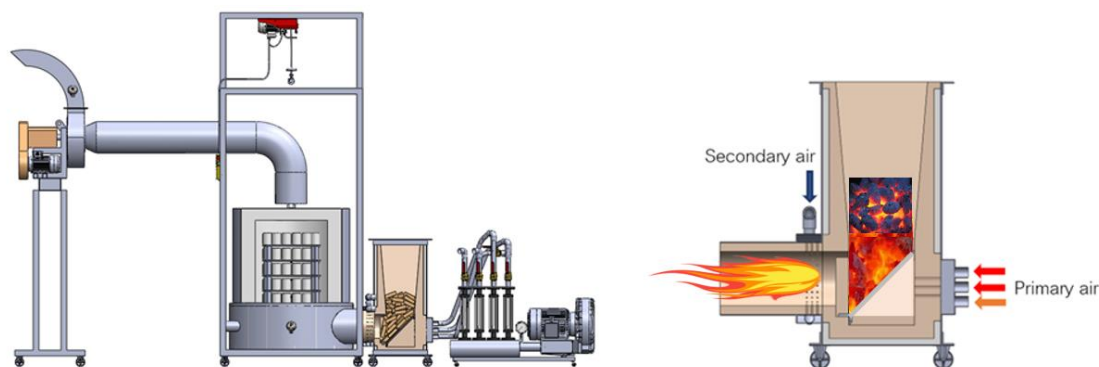
ภาพประกอบ 35 แสดงปริมาณอากาศและเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าสู่ระบบในช่วง Combustion



ภาพประกอบ 36 เตาผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่ทำงานในช่วงที่ 1 (Wood combustion)

ช่วงที่ 2 เป็นช่วงที่อุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิกสูงกว่า 400°C การทำงานของเตาผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์เข้าสู่ช่วงปกติ (Normal working period) โดยเฉพาะไม้เชื้อเพลิงถูกป้อนเข้าเตาเพิ่มขึ้นจนมีระดับสูงกว่าระดับช่องป้อนอากาศส่วนที่ 1 เพื่อให้เกิดกระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ (Wood Gasification) ในขณะเดียวกันมีการป้อนอากาศส่วนที่ 2 (Secondary Air) โดยมีอัตราการไหลที่ $27 \text{ m}^3/\text{hr}$ เพื่อเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ (Producer gas Combustion) ได้รับความร้อนป้อนเข้าสู่เตาเผาเซรามิกอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้ได้อุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิกเพิ่มขึ้นจาก 400°C เป็น 800°C จึงต้องเพิ่มทั้งระดับอุณหภูมิและปริมาณความร้อนจากอัตราการผลิตและเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์โดยต้องเพิ่มทั้งอัตราการป้อนอากาศส่วนที่ 1 และ 2 โดยคอยเติมเศษไม้เชื้อเพลิงเข้าสู่เตาเพื่อรักษาระดับเศษไม้ในเตาให้สูงกว่าช่องป้อนอากาศส่วนที่ 1 ตลอดเวลา ปริมาณการใช้เศษไม้ อัตราการป้อนอากาศส่วนที่ 1 และ 2 แสดงในตารางที่ 10 เมื่อวิเคราะห์อัตราส่วนการป้อนอากาศส่วนที่ 1 และอัตราการใช้เศษไม้พบว่ามีความสัมพันธ์สมมูลส่วนผลิตแก๊ส (ER_{PA}) อยู่ในช่วง 0.33 ถึง 0.61 ซึ่งบ่งบอกว่าใช้อากาศในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์จากเศษไม้น้อยกว่าอากาศที่ใช้เผาไหม้เศษไม้ทางทฤษฎี ซึ่งจำเป็นต้องป้อนอากาศส่วนที่สองเข้าไปเผาไหม้กับแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่หัวเบิร์นเนอร์โดยมีอัตราส่วนสมมูลส่วนเผาแก๊ส (ER_{SA}) อยู่ในช่วง 0.69 ถึง 0.90 ซึ่งจะส่งผลให้ ค่าอัตราส่วนสมมูลรวม (ER_T) มีค่าอยู่ในช่วง 1.20 ถึง 1.30 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ในขั้นตอนแรกและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ในขั้นตอนที่สองส่งผลให้อัตราส่วนสมมูลรวมต่ำกว่าอัตราส่วนสมมูลของการเผาไหม้เศษไม้ในช่วงเริ่มต้น โดยใช้อากาศส่วนเกินเพียง 20-30% เมื่ออากาศส่วนเกินที่ใช้ในการเผาไหม้เศษไม้น้อยจึงส่งผลให้อุณหภูมิการเผาไหม้สูงขึ้น โดยสอดคล้องกับการทดลองและ

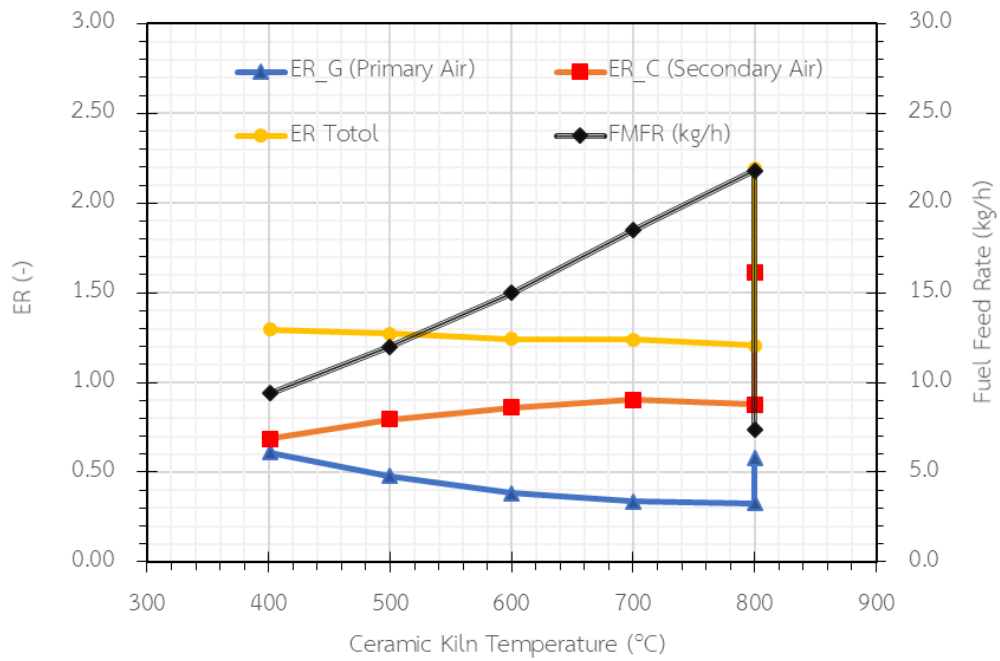
แบบจำลองของ (F.Vidian, 2022) ที่พบว่าอุณหภูมิเปลวไฟเพิ่มขึ้นเมื่ออากาศส่วนเกินในการเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ลดลง



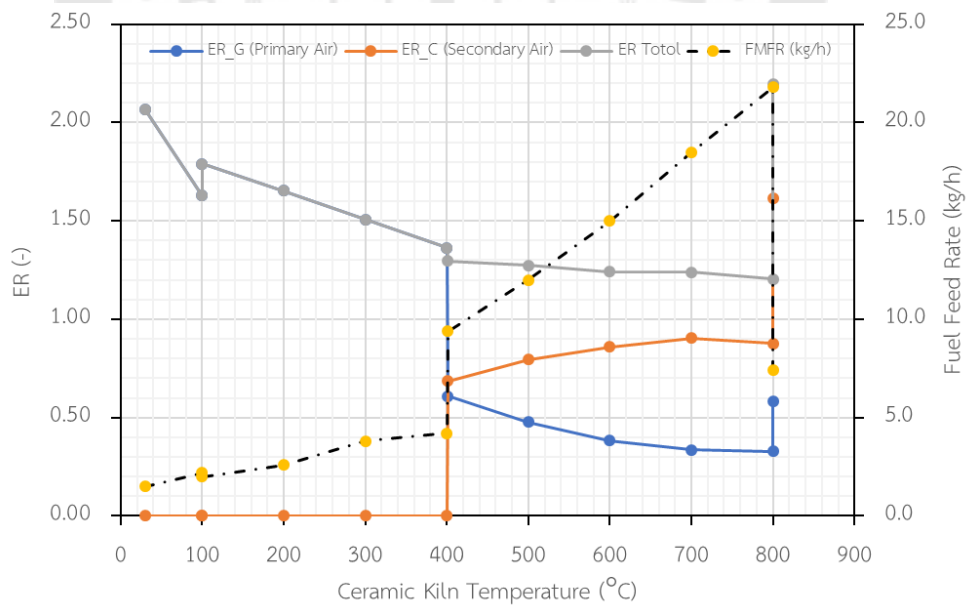
ภาพประกอบ 37 เตาผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่ทำงานในช่วงที่ 2 (Wood gasification and syngas combustion)

ตาราง 10 แสดงอัตราการป้อนอากาศและปริมาณเชื้อเพลิงสำหรับเตาผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์

อุณหภูมิเตาเผาเซรามิก (°C)	ช่วงเวลา (hr)	อัตราการป้อน (m ³ /hr)			FMFR (kg/h)	ER _{PA} (Primary Air)	ER _{SA} (Secondary Air)	ER _T
		Primary Air	Secondary Air	Total Air				
30	0.01	13	0	13	1.5	2.07	0.00	2.07
100	0.50	15	0	15	2.2	1.63	0.00	1.63
100	1.00	15	0	15	2.0	1.79	0.00	1.79
200	0.55	18	0	18	2.6	1.65	0.00	1.65
300	0.55	24	0	24	3.8	1.51	0.00	1.51
400	0.55	24	0	24	4.2	1.36	0.00	1.36
401	0.00	24	27	51	9.4	0.61	0.69	1.30
500	0.55	24	40	64	12.0	0.48	0.80	1.27
600	0.55	24	54	78	15.0	0.38	0.86	1.24
700	0.55	26	70	96	18.5	0.34	0.90	1.24
800	0.55	30	80	110	21.8	0.33	0.88	1.20
800	0.50	18	50	68	7.4	0.58	1.61	2.19



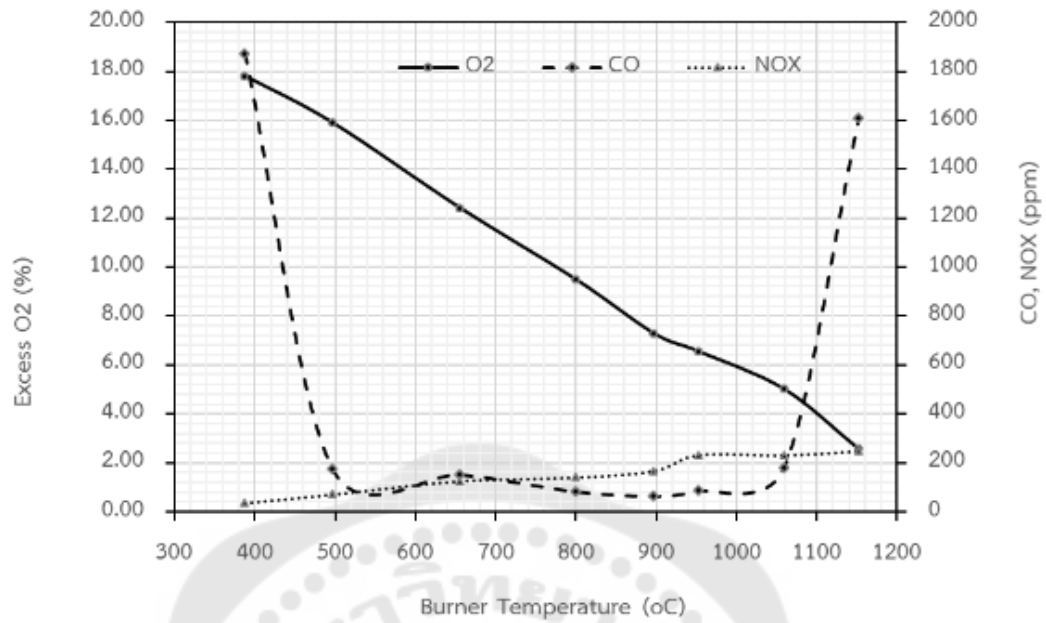
ภาพประกอบ 38 แสดงปริมาณอากาศและเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าสู่ระบบในช่วง Gasification



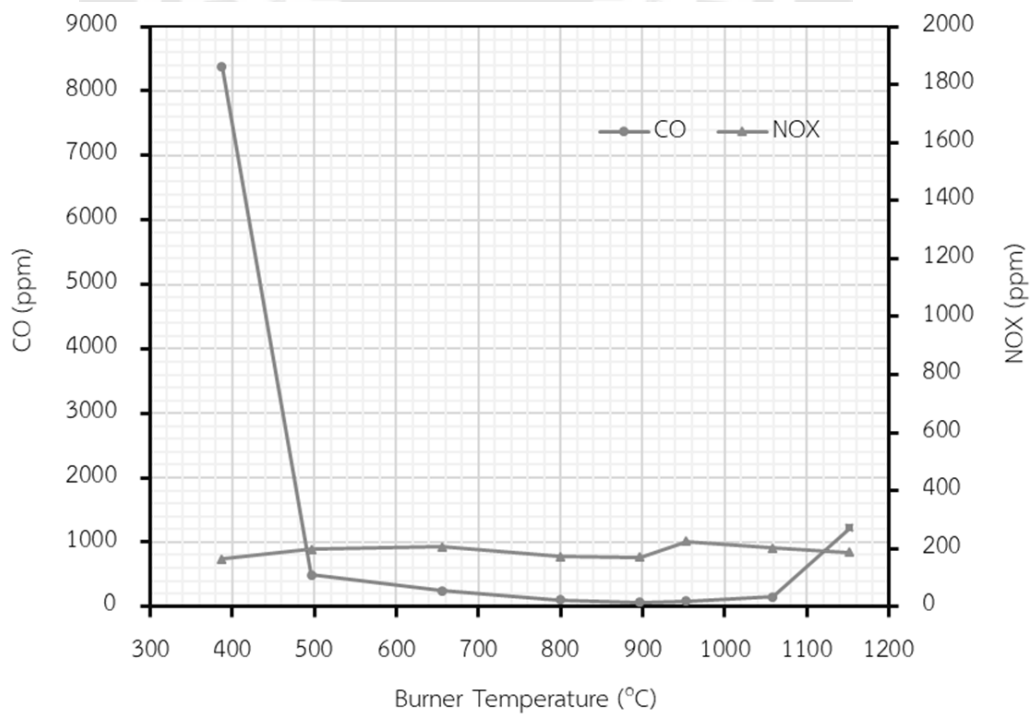
ภาพประกอบ 39 แสดงอัตราส่วนสมมูล (Equivalence ratio) ของการทดลองเผาปิสิกิตที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 160 °C/hr

ผลการปลดปล่อยแก๊สมลพิษจากเตาผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์

ผลการวัดปริมาณการปลดปล่อยแก๊สมลพิษที่ออกจากเครื่องผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แสดงดังภาพที่ 40 เมื่อนำผลการวัดการปลดปล่อยแก๊สมลพิษ ภาพที่ 40 มาคำนวณหาปริมาณแก๊สไอเสียที่ปล่อยออกจากชุดเตาเผาเซรามิกตามมาตรฐานควบคุมการปล่อยทิ้งอากาศเสียที่ความดัน 1 บรรยากาศ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ในสภาวะแห้ง (Dry Basis) เมื่อปริมาณออกซิเจนส่วนเกิน (Excess Oxygen) ในการเผาไหม้ที่ร้อยละ 7 ให้ผลการคำนวณดังภาพที่ 41 จากภาพที่ 41 พบว่า เมื่ออุณหภูมิที่หัวเบิร์นเนอร์อยู่ในช่วงอุณหภูมิ 100-400 °C เป็นช่วงที่ใช้ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงไม้พาลแบบเผาไหม้สมบูรณ์ ปริมาณออกซิเจนที่วัดได้มีค่าเท่ากับ 18% ดังภาพที่ 40 เมื่อพิจารณาปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ภาพที่ 41 พบว่ามีค่าเท่ากับ 8,400 ppm ซึ่งมีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพไอเสียที่กำหนด ทั้งนี้เนื่องจากการเผาในช่วงแรกเป็นการเผาเชื้อเพลิงแข็ง (Wood Combustion) จึงต้องใช้อากาศในการเผาไหม้จำนวนมาก เพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ อีกทั้งเชื้อเพลิงเป็นเชื้อเพลิงแข็ง การเผาไหม้จึงยากกว่าการเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ จึงทำให้เชื้อเพลิงบางส่วนเกิดการเผาไหม้แบบไม่สมบูรณ์ เมื่อช่วงอุณหภูมิหัวเบิร์นเนอร์มากกว่า 400°C พบว่าปริมาณออกซิเจนที่วัดได้มีค่าลดลงตามอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในเตา ปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ จาก 8,400 ppm เป็น 400 ppm ที่ช่วงอุณหภูมิจาก 400°C เป็น 500°C และเมื่ออุณหภูมิหัวเบิร์นเนอร์สูงกว่า 1,100°C พบว่าปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เพิ่มขึ้นจาก 600 ppm เป็น 800 ppm ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณออกซิเจนที่อุณหภูมิดังกล่าวมีค่าลดลง จึงส่งผลทำให้เกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์อีกครั้ง เป็นสาเหตุทำให้ปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เพิ่มขึ้น ส่วนแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ (NOx) ตลอดช่วงการเผามีค่าสูงสุดเท่ากับ 225 ppm ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพไอเสียที่สามารถปล่อยออกจากโรงงานอุตสาหกรรมอยู่เล็กน้อย



ภาพประกอบ 40 แสดงปริมาณแก๊สไอเสียที่ปล่อยออกจากชุดเตาเผาเซรามิกที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 163 °C/hr



ภาพประกอบ 41 แสดงปริมาณแก๊สไอเสียที่ปล่อยออกจากชุดเตาเผาเซรามิก เมื่อคำนวณอากาศส่วนเกินที่ร้อยละ 7

4.2 ผลการศึกษาการใช้แก๊สร้อนจากเตาผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์เพื่อเผา บิสกิต

ผลการเร่งอุณหภูมิในการเผาต่อสมบัติตัวอย่างแก้วเซรามิกหลังเผา

เพื่อให้ได้อุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิกสูงสุดที่ 800°C โดยควบคุมอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิกที่ 3 ระดับคือ 110 135 และ 160°C/hr จึงต้องควบคุมการทำงาน of เตาผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ด้วยการควบคุมการป้อนอากาศส่วนที่ 1 สำหรับเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ และอากาศส่วนที่ 2 สำหรับเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ โดยควบคุมปริมาณเศษไม้ในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ให้มีปริมาณที่เหมาะสม จากการควบคุมการทำงาน of เตาผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ทำให้ได้อุณหภูมิที่หัวเผาและอุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิกดังแสดงในภาพที่ 42 43 และ 44

ในการควบคุมการทำงาน of เตาผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์เพื่อให้ได้อุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิกเป็นไปตามกราฟมาตรฐาน พบว่าปริมาณการใช้เชื้อเพลิงไม้พาลาทอลอดช่วงการทำงานแสดงในตารางที่ 12 เมื่ออัตราการเพิ่มอุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิกมีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการเผาเซรามิกมีแนวโน้มลดลงโดยที่อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิกที่ 110°C/hr ต้องใช้เวลาในการเผาเซรามิก 8 ชั่วโมง 45 นาที จากอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิ 800°C และใช้เวลาในการเผาเซรามิกที่อุณหภูมิคงที่ต่อไปอีก 30 นาที เพื่อให้อุณหภูมิภายในเตากระจายตัวได้อย่างทั่วถึง เมื่อเพิ่มอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในเตาเป็น 135°C/hr และ 160°C/hr พบว่าเวลาที่ใช้ในการเผาเซรามิกลดลงเหลือ 7 ชั่วโมง 8 นาที และ 5 ชั่วโมง 50 นาที ตามลำดับ เมื่อพิจารณาอัตราการใช้เชื้อเพลิงและปริมาณการใช้เชื้อเพลิงที่อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิก 3 ระดับ พบว่า อัตราการใช้เชื้อเพลิงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราการเพิ่มเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิกแต่ปริมาณการใช้ไม้เชื้อเพลิงมีแนวโน้มลดลงดังแสดงในตารางที่ 12

ผลการทดลองที่ 1 อัตราการเพิ่มอุณหภูมิเท่ากับ 110°C/hr ใช้เชื้อเพลิงไม้พาลาทอลจำนวน 63.6 กิโลกรัม และใช้เวลาในการเผาทั้งหมด 9 ชั่วโมง 15 นาที ผลการวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในส่วนเตาเผาเซรามิก ดังแสดงในภาพที่ 42 จากภาพที่ 42 ในช่วงรักษาอุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิกให้คงที่ที่ 800°C พบว่าค่าอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาเผาเซรามิกมีค่า 822°C และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 12°C อุณหภูมิสูงสุดที่หัวเบอร์เนอร์และภายในเตาเผาเซรามิกมีค่าเท่ากับ 1,005.5 และ 845.7 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่ามีความแตกต่างกันประมาณ 159.5°C เนื่องจากที่ตำแหน่งบริเวณหัวเบอร์เนอร์เป็นจุดที่เกิดการเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ จึงเป็นส่วนที่มีอุณหภูมิสูงสุด นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งบริเวณด้านล่าง กลางเตา และตำแหน่งบน

เตาเซรามิกมีอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าการกระจายของอุณหภูมิภายในส่วนของเตาเผาเซรามิกมีความสม่ำเสมอ ในภาพที่ 46 แสดงภาพตัวอย่างแก้วเซรามิกก่อนและหลังเผาที่สภาวะดังกล่าว และภาพที่ 45 แสดงตัวอย่างแก้วเซรามิกก่อนและหลังเผาด้วยเตาไฟฟ้า พบว่าชิ้นงานเซรามิก หลังเผามีสภาพสมบูรณ์ ไม่มีส่วนแตกร้าว ชิ้นงานให้สีที่คล้ำกว่าแก้วเซรามิกที่เผาด้วยเตาไฟฟ้าเนื่องจากมีเขม่ามาเคลือบที่ผิวชิ้นงาน เมื่อนำตัวอย่างที่เผาแล้วมาหาสมบัติการหดตัว ความหนาแน่น และการดูดซึมน้ำ ให้ผลการทดลองดังตารางที่ 12 จากตารางที่ 12 พบว่าตัวอย่างแก้วเซรามิกมีเปอร์เซ็นต์การหดตัวเท่ากับ 4.31 มีความหนาแน่นเท่ากับ 1.63 และมีเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำเท่ากับ 22.13 เมื่อเปรียบเทียบกับผลการเผาตัวอย่างในเตาเผาไฟฟ้าที่ใช้พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

ผลการทดลองที่ 2 อัตราการเพิ่มอุณหภูมิเท่ากับ 136°C/hr ใช้เชื้อเพลิงไม้พาเลทจำนวน 50.2 กิโลกรัม และใช้เวลาในการเผาทั้งหมด 7 ชั่วโมง 8 นาที ผลการวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในส่วนเตาเผาเซรามิก ดังแสดงในภาพที่ 43 จากภาพที่ 43 ในช่วงรักษาอุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิกให้คงที่ที่ 800°C พบว่าค่าอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาเผาเซรามิกมีค่า 819°C และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 11°C อุณหภูมิสูงสุดที่หัวเบอร์เนอร์และภายในเตาเผาเซรามิกมีค่าเท่ากับ 975.7 และ 841.3°C ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่ามีความแตกต่างกันประมาณ 134.4°C เนื่องจากที่ตำแหน่งบริเวณหัวเบอร์เนอร์เป็นจุดที่เกิดการเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ จึงเป็นส่วนที่มีอุณหภูมิสูงสุด นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งบริเวณด้านล่าง กลางเตา และตำแหน่งบนเตาเซรามิกมีอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าการกระจายของอุณหภูมิภายในส่วนของเตาเผาเซรามิกมีความสม่ำเสมอ ในภาพที่ 46 แสดงภาพตัวอย่างแก้วเซรามิกก่อนและหลังเผาที่สภาวะดังกล่าว และภาพที่ 45 แสดงตัวอย่างแก้วเซรามิกก่อนและหลังเผาด้วยเตาไฟฟ้า พบว่าชิ้นงานเซรามิก หลังเผามีสภาพสมบูรณ์ ไม่มีส่วนแตกร้าว ชิ้นงานให้สีที่คล้ำกว่าแก้วเซรามิกที่เผาด้วยเตาไฟฟ้าเนื่องจากมีเขม่ามาเคลือบที่ผิวชิ้นงาน เมื่อนำตัวอย่างที่เผาแล้วมาหาสมบัติการหดตัว ความหนาแน่น และการดูดซึมน้ำ ให้ผลการทดลองดังตารางที่ 12 จากตารางที่ 12 พบว่าตัวอย่างแก้วเซรามิกมีเปอร์เซ็นต์การหดตัวเท่ากับ 3.69 มีความหนาแน่นเท่ากับ 1.68 และมีเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำเท่ากับ 20.68 เมื่อเปรียบเทียบกับผลการเผาตัวอย่างในเตาเผาไฟฟ้าที่ใช้พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

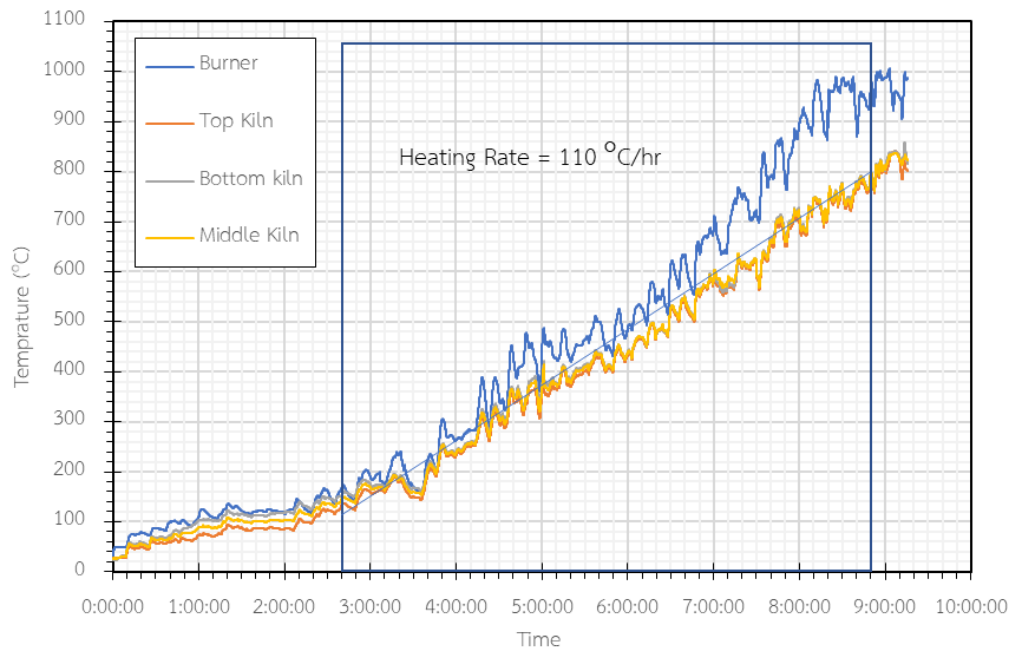
ผลการทดลองที่ 3 อัตราการเพิ่มอุณหภูมิเท่ากับ 163°C/hr ใช้เชื้อเพลิงไม้พาเลทจำนวน 49.4 กิโลกรัม และใช้เวลาในการเผาทั้งหมด 5 ชั่วโมง 50 นาที ผลการวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในส่วนเตาเผาเซรามิก ดังแสดงในภาพที่ 44 จากภาพที่ 44 ในช่วงรักษาอุณหภูมิภายใน

เตาเผาเซรามิกให้คงที่ที่ 800°C พบว่าค่าอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาเผาเซรามิกมีค่า 801°C และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 10°C อุณหภูมิสูงสุดที่หัวเบอร์เนอร์และภายในเตาเผาเซรามิกมีค่าเท่ากับ 969.6 และ 828.3°C ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่ามีความแตกต่างกันประมาณ 141.3°C เนื่องจากที่ตำแหน่งบริเวณหัวเบอร์เนอร์เป็นจุดที่เกิดการเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ จึงเป็นส่วนที่มีอุณหภูมิสูงสุด นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งบริเวณด้านล่าง กลางเตา และตำแหน่งบนเตาเผาเซรามิกมีอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าการกระจายของอุณหภูมิภายในส่วนของเตาเผาเซรามิกมีความสม่ำเสมอ ในภาพที่ 46 แสดงภาพตัวอย่างแก้วเซรามิกก่อนและหลังเผาที่สภาวะดังกล่าว และภาพที่ 45 แสดงตัวอย่างแก้วเซรามิกก่อนและหลังเผาด้วยเตาไฟฟ้า พบว่าชิ้นงานเซรามิก หลังเผามีสภาพสมบูรณ์ ไม่มีส่วนแตกร้าว ชิ้นงานให้สีที่คล้ำกว่าแก้วเซรามิกที่เผาด้วยเตาไฟฟ้าเนื่องจากมีเขม่ามาเคลือบที่ผิวชิ้นงาน เมื่อนำตัวอย่างที่เผาแล้วมาหาสมบัติการหดตัว ความหนาแน่น และการดูดซึมน้ำ ให้ผลการทดลองดังตารางที่ 12 จากตารางที่ 12 พบว่าตัวอย่างแก้วเซรามิกมีเปอร์เซ็นต์การหดตัวเท่ากับ 2.69 มีความหนาแน่นเท่ากับ 1.71 และมีเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำเท่ากับ 18.51 เมื่อเปรียบเทียบกับผลการเผาตัวอย่างในเตาเผาไฟฟ้าที่ใช้พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

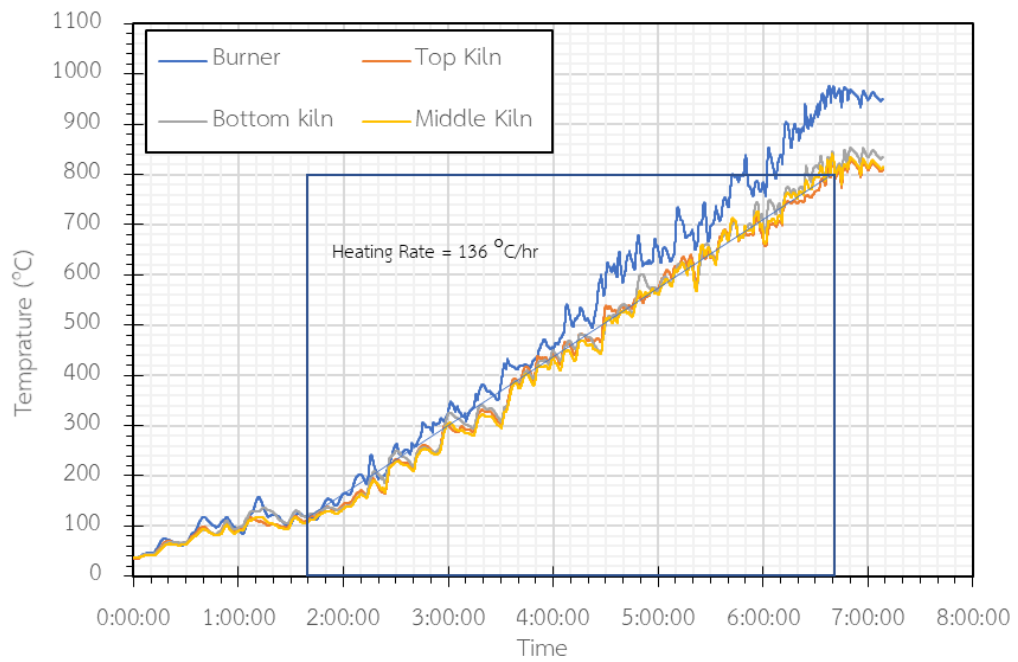
เมื่อเปรียบเทียบระยะเวลาที่ใช้ในการเผาเซรามิกที่ใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิเท่ากับ 110°C และ 160°C พบว่าเมื่อใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่ 160°C สามารถประหยัดระยะเวลาได้ 3.42 ชั่วโมง และลดการใช้ไม้เชื้อเพลิงแห้งลง 14.2 กิโลกรัม

ตาราง 11 แสดงอัตราการใช้ไม้เชื้อเพลิงในการทดลอง

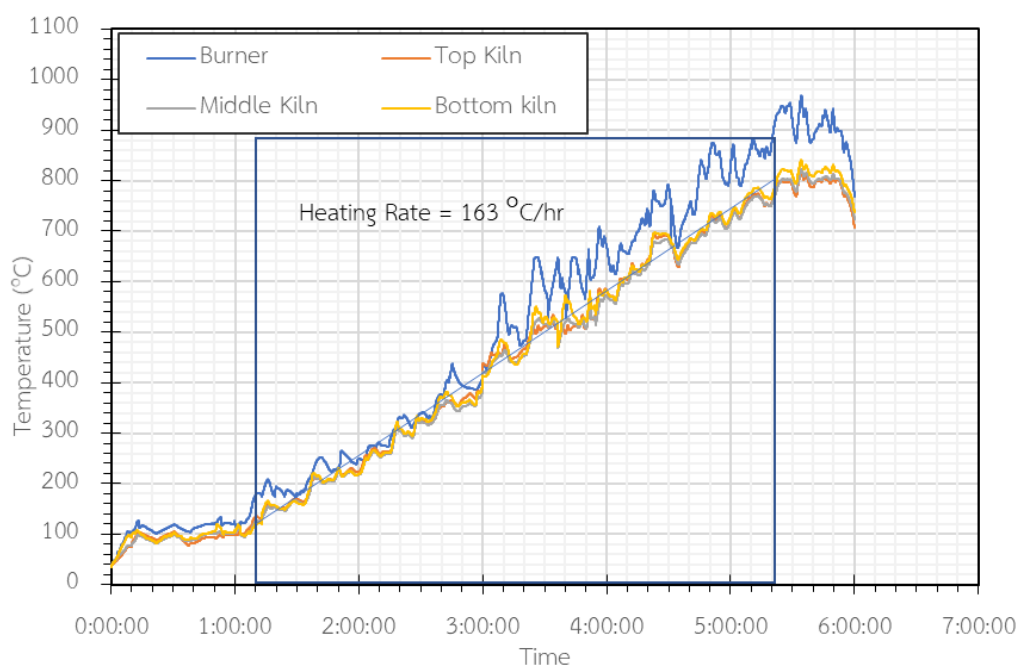
การทดลอง	ไม้เชื้อเพลิง (kg.) %Wet basis	ความชื้น (%)	ไม้เชื้อเพลิง (kg.) %Dry basis	เวลาที่ใช้ใน การเผา (hr.)	อัตราการใช้ไม้เชื้อเพลิง (kg/hr.)
1	72.6	14.3	63.6	9.25	6.88
2	57.4	14.3	50.2	7.13	7.04
3	59.3	20.0	49.4	5.83	8.47
PLC	56.7	20.0	47.2	6.25	7.55



ภาพประกอบ 42 แสดงอุณหภูมิของชุดเตาเผาเซรามิกเมื่ออัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ต่อชั่วโมง



ภาพประกอบ 43 แสดงอุณหภูมิของชุดเตาเผาเซรามิกเมื่ออัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 136 องศาเซลเซียส ต่อชั่วโมง



ภาพประกอบ 44 แสดงอุณหภูมิของชุดเตาเผาเซรามิกเมื่ออัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 163 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง

ตาราง 12 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของแก้วผลิตภัณฑ์เซรามิกตัวอย่างที่ผ่านการเผาปิสิกิต

การทดลอง	การหดตัว (%)	ค่าความหนาแน่น (mg/mL)	ค่าการดูดซับน้ำ (%)
1	4.31	1.63	22.13
2	3.69	1.68	20.68
3	2.69	1.71	18.51
เตาเผาเซรามิกไฟฟ้า	4.98	1.61	15.22



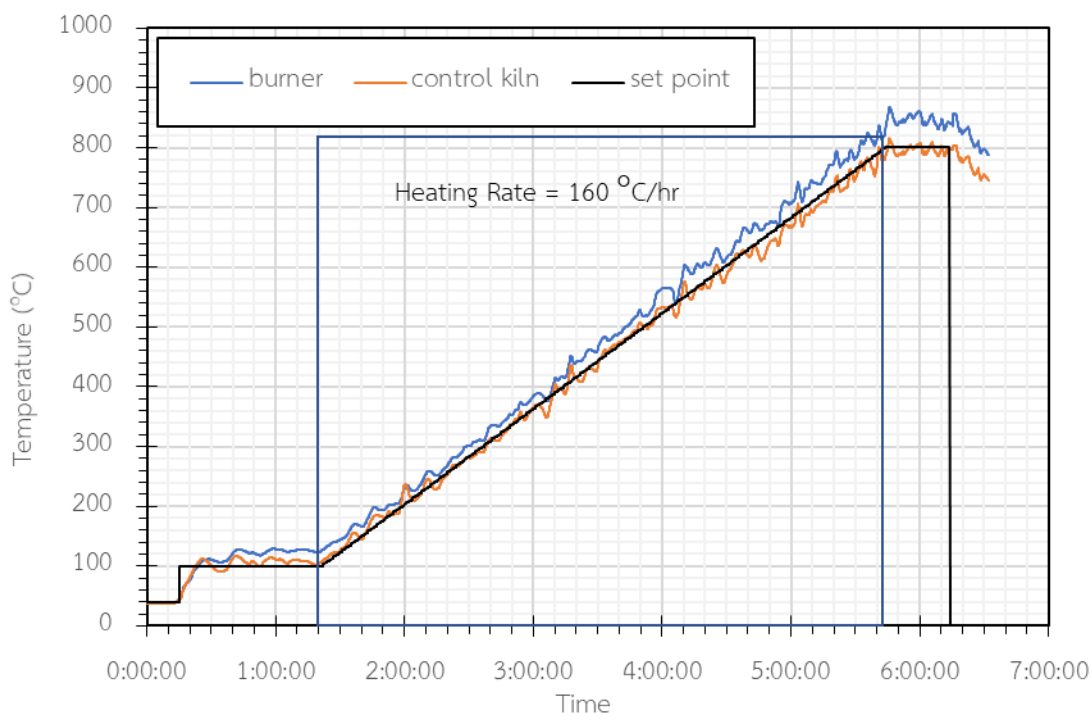
ภาพประกอบ 45 ตัวอย่างเปรียบเทียบผลิตภัณฑ์เซรามิกก่อนและหลังเผาโดยใช้เตาเผาแบบไฟฟ้า



ภาพประกอบ 46 ตัวอย่างเปรียบเทียบผลิตภัณฑ์เซรามิกก่อนและหลังเผาโดยใช้เตาจากชุดการ
ทดลอง

ผลการเร่งอุณหภูมิในการเผาปิסקิตโดยใช้โปรแกรม PLC

จากการทดลองเผาเซรามิกโดยใช้โปรแกรม PLC ในการควบคุมการทำงานของเตาผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ เพื่อให้ได้อุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิกที่ 800°C โดยควบคุมอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิกที่ 160°C/hr จึงต้องควบคุมการทำงานของเตาผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ด้วยใช้โปรแกรมควบคุมในส่วนการบ้อนอากาศส่วนที่ 1 สำหรับเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ และอากาศส่วนที่ 2 สำหรับเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ โดยปริมาณเศษไม้ในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์จะถูกควบคุมความหนาของชั้นเชื้อเพลิงด้วยผู้ควบคุมเตา โดยในช่วงอุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิกต่ำกว่า 400°C ผู้ควบคุมเตาจะต้องคอยรักษาระดับความหนาชั้นเชื้อเพลิงให้ต่ำกว่ารูบ้อนอากาศส่วนแรก (แถวกลาง) เมื่ออุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิกสูงกว่า 400°C ผู้ควบคุมเตาจะต้องคอยรักษาระดับความหนาชั้นเชื้อเพลิงให้สูงกว่ารูบ้อนอากาศส่วนแรก (แถวบน) จากการควบคุมการทำงานของเตาผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ทำให้ได้อุณหภูมิที่หัวเผาและอุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิกดังแสดงในภาพที่ 47 จากภาพที่ 47 พบว่าใช้เวลาในการเผาเซรามิกทั้งหมด 6 ชั่วโมง 15 นาที เมื่อเปรียบเทียบปริมาณการใช้ไม้เชื้อเพลิงที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิเท่ากัน จากผลการทดลองโดยการใช้โปรแกรมควบคุมเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์สามารถลดปริมาณการใช้ไม้เชื้อเพลิงลง 2.2 กิโลกรัม ซึ่งสามารถประหยัดเชื้อเพลิงลงร้อยละ 4.5 เนื่องจากอุณหภูมิเฉลี่ยเข้าใกล้อุณหภูมิตามเส้นควบคุมมากกว่าอีกทั้งค่าเบี่ยงเบนมีค่าต่ำกว่ากรณีไม่ใช้โปรแกรม PLC ควบคุม อุณหภูมิสูงสุดที่หัวเบิร์เนอร์และภายในเตาเผาเซรามิกมีเท่ากับ 868.2°C และ 815.4°C ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่ามีค่าความแตกต่างกันประมาณ 52.8°C อุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาเผาเซรามิกมีค่า 797°C และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 6°C



ภาพประกอบ 47 แสดงอุณหภูมิของชุดเตาเผาเซรามิกโดยใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมงโดยใช้โปรแกรม PLC ควบคุม

4.3 ผลการการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

ผลการการวิเคราะห์ต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์

ในตารางที่ 9 แสดงการวิเคราะห์ต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ ซึ่งใช้ผลจากการทดลองโดยใช้โปรแกรม PLC มาใช้ในการคำนวณ ระยะเวลาในการเผาปกติทั้งหมด 6.25 ชั่วโมง ใช้ไม้เชื้อเพลิงทั้งหมด 47.2 kg ซึ่งสำรวจราคาไม้พาลาเมื่อวันที่ 9 มีนาคม 2566 จากบริษัท พี ที เอ็ม วู้ด จำกัด เท่ากับ 900 บาทต่อตัน การใช้ไฟฟ้าสำหรับระบบปรับอากาศและดูดไอเสียที่มีกำลังขับลมเท่ากับ 0.75 kW จำนวน 2 ตัว (ราคาค่าไฟฟ้า 5 บาทต่อหน่วย) เมื่อคิดเป็นปริมาณการใช้ไฟฟ้าเท่ากับ 9.375 kWhr คิดเป็นค่าใช้จ่ายเท่ากับ 46.88 บาท เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้แก๊สหุงต้มเป็นเชื้อเพลิง ที่ใช้เวลาการเผา และขนาดเตาใกล้เคียงกัน พบว่าเตาที่ใช้แก๊สหุงต้มมีปริมาณการใช้เชื้อเพลิงเท่ากับ 5 kg ซึ่งคิดเป็นค่าใช้จ่ายเท่ากับ 150 บาท ต่อการเผา 1 ครั้ง และเมื่อเปรียบเทียบกับการเตาไฟฟ้า ใช้เวลาการเผา และขนาดเตาใกล้เคียงกัน พบว่าเตาไฟฟ้ามีปริมาณการใช้ไฟเท่ากับ 84.5 kWhr ซึ่งคิดเป็นค่าใช้จ่ายเท่ากับ 422.5 บาท ต่อการเผา 1 ครั้ง ดังนั้นเมื่อ

คิดต้นทุนในแง่ของชนิดเชื้อเพลิงแล้วเมื่อใช้เชื้อเพลิงจากเศษไม้ แก๊สหุงต้ม และเตาไฟฟ้า จะมีต้นทุนการผลิตต่อชิ้นเท่ากับ 0.60 1.01 และ 2.84 บาท ตามลำดับ

ตาราง 13 แสดงการเปรียบเทียบการวิเคราะห์ต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์

Type	LPG	ไฟฟ้า	เศษไม้
จำนวนเชื้อเพลิง, กิโลกรัม	5	0	47.20
ราคาเชื้อเพลิง, บาท/กิโลกรัม	30	0	0.90
จำนวนไฟฟ้า, kWhr (5บาท/หน่วย)	0	84.50	9.375
รวมรายจ่าย, บาท	150	422.5	89.36
ราคาต้นทุน, บาท/ชิ้น	1.01	2.84	0.60

ผลการเปรียบเทียบระยะเวลาความคุ้มค่า

จากตาราง 15 เมื่อเปรียบเทียบระยะเวลาความคุ้มค่าจากเตาทั้ง 3 ชนิด เมื่อคิดขนาดปริมาตรเตาที่ใกล้เคียงกันและกำลังการผลิตเท่ากันเผา 1 ครั้งต่อวัน พบว่าที่เตาไฟฟ้ามีค่าใช้จ่ายสูงที่สุดเท่ากับ 698.5 บาท รองลงมาเป็นเตาแก๊สแอลพีจี 426 บาท และเตาที่ใช้เศษไม้มีค่าใช้จ่ายเท่ากับ 365.3 บาท รายรับเมื่อหักกับค่าใช้จ่ายทั้งหมดแล้วเตาที่ใช้เชื้อเพลิงไม้เชื้อเพลิงมีกำไรมากที่สุดอยู่ที่ 1,124.7 บาท ซึ่งเตาที่ใช้เศษไม้ใช้เงินลงทุนสำหรับสร้างเตาจำนวน 91,620 บาท สามารถเผาเซรามิกคืนทุนได้ในการเผาครั้งที่ 82 เมื่อเทียบกับเตาที่แก๊สแอลพีจีเป็นเชื้อเพลิงพบว่าสามารถคืนทุนได้ในการเผาครั้งที่ 386 และเตาไฟฟ้าสามารถคืนทุนได้ในการเผาครั้งที่ 421

ตาราง 14 แสดงรายการราคาต้นทุนสำหรับสร้างชุดเตาเผาเซรามิก

รายการ	ราคา (บาท)
1. แผ่นรองเผาขนาด 45x45x1.5 cm. 5 แผ่น ราคา 1,500 บาทต่อแผ่น	7,500
2. ขาตั้ง 20 อัน ขนาดความสูง 12 นิ้ว ราคา 150 บาทต่ออัน	3,000
3. เส้นใยเซรามิกชนิดทนอุณหภูมิ 1,260 °C หนา 50 mm 1 ก้อน	2,000
กล่องละ 2,000 บาท	
4. เส้นใยเซรามิกชนิดทนอุณหภูมิ 1,260 °C หนา 25 mm 1 ก้อน	2,000
กล่องละ 2,000 บาท	

ตาราง 14 (ต่อ)

รายการ	ราคา (บาท)
5. คอนกรีตทนไฟ Cast-15 จำนวน 200 กิโลกรัม กิโลกรัมละ 25 บาท	5,000
6. ตู้ควบคุมอุณหภูมิการเผา 1 ตู้	8,000
7. เทอร์โมคัปเปิลชนิด Type K จำนวน 5 ตัว ตัวละ 850	4,250
8. รอกโซ่ไฟฟ้า 1 ตัว	2,500
9. คีบขึ้นงาน ทนอุณหภูมิสูง 1 อัน อันละ 500 บาท	500
10. สายไฟฟาง จำนวน 1 ชุด	350
11. เหล็กแผ่นขนาด 1,220 x 2,440 mm. หนา 3 mm. จำนวน 2 แผ่น แผ่นละ 2,000 บาท	4,000
12. แผ่นสแตนเลสขนาด 1,220 x 2,440 mm. หนา 2 mm จำนวน 1 แผ่น แผ่นละ 4,600 บาท	4,600
13. เหล็กกล่อง 40x40x 3.2 mm. ยาว 6 m. จำนวน 3 เส้น เส้นละ 600 บาท	1,800
14. ตะแกรงเตาเหล็กหล่อ 1 ชุด ชุดละ 2,000 บาท	2,000
15. อุปกรณ์ปรับความเร็วชุดเป่าอากาศเข้าเตา	5,000
16. พัดลมดูดอากาศ 1 ตัว	25,000
17. พัดลมป้อนอากาศ 1 ตัว	8,000
18. กระจกทนไฟ หนา 10 mm. เส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว	2,500
19. ล้อ PVC 3 นิ้ว จำนวน 4 อัน อันละ 110 บาท	440
20. ล้อ PVC 1.5 นิ้ว จำนวน 4 อัน อันละ 95 บาท	380
21. ล้อ PVC 2 นิ้ว จำนวน 4 อัน อันละ 100 บาท	400
22. สีกันสนิมชนิดทนความร้อน 1 กระป๋อง	2,400
รวม	91,620

ตาราง 15 เปรียบเทียบระยะเวลาความคุ้มทุน

Type	แก๊สแอลพีจี	ไฟฟ้า	เศษไม้	หมายเหตุ
รวมรายจ่าย	426	698.5	365.3	
ค่าไฟฟ้า, บาท	0	422.5	46.86	5 บาท/kWhr
ค่าเชื้อเพลิง, บาท	150	0	42.48	
ค่าวัตถุดิบสำหรับหล่อ ผลิตภัณฑ์เซรามิก, บาท	276	276	276	500 บาท / 50 กิโลกรัม / 270 ชิ้น
รวมรายรับ	1,490	1,490	1,490	
ผลิตภัณฑ์เซรามิก	1,490	1,490	1,490	10 บาท/ชิ้น
กำไรสุทธิ	1,064	791.5	1,124.7	
เงินลงทุนชุดเตาเผา	410,000	333,000	91,620	
จำนวนครั้งที่เผาเพื่อคืนทุน	386	421	82	

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการทดลอง

ผลการวิเคราะห์หาองค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate Analysis) พบว่ามีปริมาณความชื้นเท่ากับ 13.42% สารระเหย 63.61% คาร์บอนคงตัว 22.08% และเถ้า 0.89% ผลการวิเคราะห์หาธาตุเคมี (Ultimate Analysis) พบว่ามีปริมาณธาตุคาร์บอน ธาตุไฮโดรเจน และธาตุออกซิเจนมีค่าเท่ากับ 45.62 6.73 และ 42.36% ตามลำดับ ค่าความร้อนต่ำ (LHV) มีค่า 15.89 MJ/kg และค่าความร้อนสูง (HHV) มีค่า 17.68 MJ/kg

เตาผลิตและเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แบบไหลขวางที่ใช้เศษไม้ที่เหลือจากการผลิตพาเลทไม้เป็นเชื้อเพลิงสามารถทำอุณหภูมิเบิร์นเนอร์สูงสุด 1,152 °C ซึ่งเพียงพอต่อการเผาปัสติกที่อุณหภูมิ 800°C ปัจจัยที่ส่งผลต่อการควบคุมเตาเผาเซรามิกคือ ปริมาณการป้อนไม้เชื้อเพลิง รวมถึงระดับความหนาของชั้นเชื้อเพลิงที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น และอัตราการป้อนอากาศซึ่งในช่วงเริ่มต้นจะต้องใช้อากาศในปริมาณที่มากเพื่อทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ส่งผลทำให้ค่าอัตราส่วนอากาศผสมมูล (ER) ในช่วงแรกมีแนวโน้มลดลงที่อุณหภูมิ 100 200 300 และ 400 °C ค่าอัตราส่วนอากาศผสมมูลมีค่าเท่ากับ 1.79 1.65 1.51 และ 1.36 ตามลำดับ ในช่วงที่ 2 เมื่ออุณหภูมิเตาเผาเซรามิกสูงกว่า 400°C ค่าอัตราส่วนอากาศผสมมูลในส่วนผลิตแก๊ส (ER_{PA}) มีค่าอยู่ในช่วง 0.33-0.61 ซึ่งช่วงอัตราส่วนผสมมูลที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์อยู่ระหว่าง 0.-2-0.4 ส่งผลทำให้ที่ค่าอัตราส่วนอากาศผสมมูลรวม (ER_r) อยู่ในช่วง 1.20-1.30

ผลการวิเคราะห์ค่ามลพิษจากไอเสียที่ปลดปล่อยจากเตาเผาเซรามิกพบว่า ที่อุณหภูมิหัวเบิร์นเนอร์ในช่วงแรกที่อุณหภูมิ 100-400°C ปริมาณออกซิเจน (O₂) ที่วัดได้มีค่าเท่ากับ 18% ปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เท่ากับ 8,400 ppm ซึ่งมีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพไอเสียที่กำหนด เนื่องจากเป็นการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง (Wood Combustion) ซึ่งช่วงแรกในการเผาไหม้ไม้เชื้อเพลิงสามารถทำได้ยาก จากนั้นจะเริ่มเผาไหม้สมบูรณ์มากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ในช่วงนี้ปริมาณการใช้อากาศจะมากเพื่อให้กระบวนการเผาไหม้ได้เผาไหม้ได้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ซึ่งจะส่งผลทำให้ในช่วงแรกจะสูญเสียความร้อนไปกับไอเสียมาก แต่เมื่อถึงช่วงอุณหภูมิที่หัวเบิร์นเนอร์อุณหภูมิมากกว่า 400°C จะเปลี่ยนการเผาไหม้เป็นแบบแก๊สซิฟิเคชันซึ่งส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนที่วัดได้มีค่าลดลง การเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ทำได้ดีกว่าการเผาไหม้ในช่วงแรกเนื่องจากแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์สามารถเผาได้ง่ายกว่าเชื้อเพลิงแข็ง ส่งผลให้

ปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) มีค่าลดลงจาก 8,400 ppm เป็น 4,000 ppm และสูงขึ้นอีกครั้งที่อุณหภูมิมากกว่า 1,100 °C เนื่องจากปริมาณออกซิเจน (O₂) ลดต่ำลงจนใกล้สภาวะที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์อีกครั้ง ส่วนแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) ตลอดช่วงการเผามีค่าสูงสุดเท่ากับ 225 ppm ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพไอเสียเล็กน้อย

ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไม้เชื้อเพลิงและอากาศที่ป้อนเข้าสู่เตาผลิตและเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ให้ผลดังนี้ การทดลองที่ 1 ใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิเท่ากับ 110°C/hr. พบว่าอุณหภูมิหัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์สามารถทำได้สูงสุด 1,005.5°C และอุณหภูมิสูงสุดในเตาเผาเซรามิกเท่ากับ 845.7°C ใช้เวลาในการเผาทั้งหมด 9 ชั่วโมง 15 นาที ใช้ไม้เชื้อเพลิงทั้งหมด 63.6 กิโลกรัม ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาเผาเซรามิกในช่วงอุณหภูมิคงที่มีค่า 822°C และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 12°C สามารถเผาติดผลิตภัณฑ์แก้วเซรามิกได้โดยไม่เกิดความเสียหาย การทดลองที่ 2 ใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิเท่ากับ 136°C/hr. พบว่าใช้ไม้เชื้อเพลิงจำนวน 50.2 กิโลกรัม อุณหภูมิสูงสุดที่หัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ 975.7°C อุณหภูมิสูงสุดในเตาเผาเซรามิก 841.3°C ใช้เวลาในการเผาทั้งหมด 7 ชั่วโมง 8 นาที ใช้ ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาเผาเซรามิกในช่วงอุณหภูมิคงที่มีค่า 819°C และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 11°C สามารถเผาติดผลิตภัณฑ์แก้วเซรามิกได้โดยไม่เกิดความเสียหาย และการทดลองที่ 3 ใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิเท่ากับ 163°C/hr. พบว่าใช้ไม้เชื้อเพลิงทั้งหมด 49.4 กิโลกรัม อุณหภูมิสูงสุดของหัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์เฉลี่ย 969.6°C อุณหภูมิสูงสุดในเตาเผาเซรามิกเท่ากับ 828.3°C ใช้เวลาในการเผาทั้งหมด 5 ชั่วโมง 50 นาที ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาเผาเซรามิกในช่วงอุณหภูมิคงที่มีค่า 801°C และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 10°C สามารถเผาติดผลิตภัณฑ์แก้วเซรามิกได้เร็วที่สุดและไม่เกิดความเสียหาย

ผลการใช้โปรแกรม PLC ควบคุมการทำงานเตาผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์เพื่อส่งแก๊สร้อนไปยังเตาเผาเซรามิก ใช้อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 160°C/hr ซึ่งควบคุมอุณหภูมิตามกราฟมาตรฐานที่กำหนด พบว่าอุณหภูมิสูงสุดที่หัวเบิร์เนอร์และภายในเตาเผาเซรามิกมีค่าเท่ากับ 868.2°C และ 815.4°C ตามลำดับ ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาเผาเซรามิกในช่วงอุณหภูมิคงที่มีค่า 797°C และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 6°C ซึ่งค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานลดลงร้อยละ 40 เมื่อเทียบกับการทดลองที่ 3 เนื่องจากโปรแกรมสามารถควบคุมปริมาณการใช้อากาศสำหรับผลิตและเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ได้เหมาะสมกับช่วงอุณหภูมิตามกราฟอุณหภูมิมาตรฐานที่กำหนดได้ สามารถประหยัดเชื้อเพลิงได้ร้อยละ 4.5 เมื่อเทียบกับการทดลองที่ 3

ผลการหาคุณสมบัติของตัวอย่างแก้วเซรามิกที่เผาด้วยชุดเตาเผาเซรามิกที่ใช้เศษไม้เป็นเชื้อเพลิง พบว่าผลิตภัณฑ์แก้วเซรามิกให้ผลที่คล้ายกับแก้วเซรามิกที่เผาด้วยชุดเตาเผาไฟฟ้า เนื่องจากมีเขม่ามาเคลือบที่ผิวชิ้นงานทำให้เกิดสีคล้ำกว่า เมื่อนำตัวอย่างที่เผาแล้วมาหาสมบัติการหดตัว ความหนาแน่น และการดูดซึมน้ำ พบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแก้วเซรามิกที่เผาด้วยเตาไฟฟ้าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

ผลการคิดต้นทุนพลังงานที่ใช้สำหรับเผาเซรามิก 1 ครั้ง พบว่าเตาเผาเซรามิกสามารถบรรจุตัวอย่างแก้วเซรามิกได้ทั้งหมด 149 ชิ้น ทำให้เมื่อคิดต้นทุนแล้วราคาต่อชิ้นอยู่ที่ 0.60 บาท ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับเตาที่ใช้แก๊ส LPG และเตาไฟฟ้า พบว่าสามารถลดต้นทุนการผลิตได้ร้อยละ 41 และ 64 ตามลำดับ เมื่อคิดระยะเวลาคุ้มทุนของเตาเผาเซรามิกพบว่ารายรับเมื่อหักค่าใช้จ่ายทั้งหมดเท่ากับ 1,124.7 บาท เงินลงทุนสำหรับสร้างเตาเท่ากับ 91,620 บาทต่อชุด ดังนั้นระยะเผาคืนอยู่ที่ 82 ครั้ง เมื่อเทียบกับเตาที่ใช้แก๊สแอลพีจีและเตาไฟฟ้า พบว่า จำนวนครั้งที่เผาคืนทุนเท่ากับ 386 และ 421 ครั้ง ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากเตาที่ใช้แก๊สแอลพีจีและไฟฟ้ามีต้นทุนการผลิตที่สูงกว่า ทั้งเงินลงทุนสำหรับซื้อเตาและในเรื่องของราคาเชื้อเพลิงที่แพงกว่า จึงทำให้ระยะคืนทุนของเตาทั้งสองนั้นใช้ระยะเวลานานกว่า

อภิปรายผลการทดลอง

เตาผลิตและเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แบบไหลขวางที่ใช้เศษไม้ที่เหลือจากการผลิตพลาเทไม้เป็นเชื้อเพลิงสามารถทำอุณหภูมิเบิร์นเนอร์สูงสุด $1,152^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเพียงพอต่อการเผาปัสกิตที่อุณหภูมิ 800°C สอดคล้องกับผลการทดลองของ (กำพล, 2562) ที่ศึกษาเตาแก๊สซีไฟเออร์แบบไหลขวางที่ทำงานร่วมกับเตาเผาถ่านสามารถทำอุณหภูมิเบิร์นเนอร์สูงสุด $1,000^{\circ}\text{C}$ ซึ่งข้อดีของเตาชนิดนี้สามารถผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่สะอาด อุณหภูมิสูง และยังมีข้อได้เปรียบในเรื่องการเริ่มระบบการทำงานเตารวมถึงการเร่งอุณหภูมิเตาสามารถซึ่งทำได้ดีกว่าเตาผลิตแก๊สแบบไหลขึ้นและเตาผลิตแก๊สแบบไหลลง ใช้เวลาเพียง 5-10 นาที (วีรัชย์, 2553) ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อควบคุมเตาเผาเซรามิกคือ ปริมาณการป้อนไม้เชื้อเพลิง รวมถึงระดับความหนาของชั้นเชื้อเพลิงที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น และอัตราการป้อนอากาศซึ่งในช่วงเริ่มต้นจะต้องใช้อากาศในปริมาณที่มากเพื่อทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ส่งผลทำให้ค่าอัตราส่วนอากาศผสมมูล (ER) ในช่วงแรกมีแนวโน้มลดลงที่อุณหภูมิ 100 200 300 และ 400°C ค่าอัตราส่วนอากาศผสมมูลมีค่าเท่ากับ 1.79 1.65 1.51 และ 1.36 ตามลำดับ ในช่วงที่ 2 เมื่ออุณหภูมิเตาเผาเซรามิกสูงกว่า 400°C ค่าอัตราส่วนอากาศผสมมูลในส่วนผลิตแก๊ส (ER_{PA}) มีค่าอยู่ในช่วง 0.33-0.61 ให้ผลการทดลองสอดคล้องกับ (พิษณุ, 2564) ซึ่งได้กล่าวว่าช่วงอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมในกระบวนการผลิต

แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์อยู่ระหว่าง 0.2-0.4 ส่งผลทำให้ที่ค่าอัตราส่วนอากาศผสมรวม (ER_T) อยู่ในช่วง 1.20-1.30

จากการทดลองเผาเซรามิกโดยใช้โปรแกรม PLC ควบคุมการทำงานของเตาเผาเซรามิก ที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิได้เท่ากับ 160°C/hr พบว่า ใช้เวลาในการเผาทั้งหมด 6 ชั่วโมง 15 นาที ใช้เชื้อเพลิงจำนวน 47.2 กิโลกรัม ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองที่ 3 แล้วปริมาณการใช้เชื้อเพลิงลดลงร้อยละ 4.5 อุณหภูมิสูงสุดที่หัวเบอร์เนอร์และภายในเตาเผาเซรามิกมีค่าเท่ากับ 868.2°C และ 815.4°C เนื่องจากโปรแกรมควบคุมปริมาณการใช้อากาศสำหรับผลิตและเผาใหม่ แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่ได้เหมาะสมกับอุณหภูมิตามกราฟมาตรฐานที่กำหนดได้ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของอุณหภูมิภายในเตามีค่าน้อยกว่าการทดลองที่ 3 ซึ่งสามารถลดโอกาสที่แก้วผลิตภัณฑ์เซรามิกเกิดความเสียได้

ค่ามลพิษที่ปลดปล่อยจากเตาเผาเซรามิก พบว่าปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ในช่วงแรกสูงกว่า 690 ppm ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดเนื่องจากการเผาใหม่ในช่วงแรกยังไม่สมบูรณ์นัก เมื่อถึงช่วงการเผาใหม่แบบแก๊สซิฟิเคชันพบว่าปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลงจนอยู่ในเกณฑ์ค่ามาตรฐาน เป็นผลมาจากการเผาใหม่แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์มีความสมบูรณ์กว่าการเผาใหม่เชื้อเพลิงไม้ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงแข็ง ส่วนแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ (NOx) ตลอดช่วงการเผาที่มีค่าสูงสุดเท่ากับ 225 ppm ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพไอเสียที่สามารถปล่อยออกจากโรงงานอุตสาหกรรมอยู่เล็กน้อย ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิด Thermal NOx เมื่ออุณหภูมิสูงจะส่งผลทำให้ปริมาณไนโตรเจนออกไซด์สูงขึ้น เนื่องจากไนโตรเจนอะตอมคู่ (N_2) เกิดการแตกตัวเป็นไนโตรเจนอะตอมเดี่ยว (N) ส่งผลทำให้สามารถทำปฏิกิริยากับสารอื่นได้ง่าย ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่ปลดปล่อยสู่บรรยากาศมีค่าเฉลี่ย 10.46% ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับ (ธนากร, 2563) พบว่าแก๊สแอลพีจีเมื่อผ่านการเผาใหม่จะปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 13.8-15.1% ซึ่งเห็นได้ว่าเชื้อเพลิงจากเศษไม้สามารถลดการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สู่ธรรมชาติได้ ส่งผลทำให้ลดภาวะโลกร้อน และช่วยจัดการปัญหาเชื้อเพลิงฟอสซิลที่กำลังจะหมดลง รวมถึงปัญหาราคาแก๊สแอลพีจี (LPG) ที่มีแนวโน้มสูงขึ้น ทำให้สามารถช่วยแก้ปัญหาในด้านต้นทุนเชื้อเพลิงในอุตสาหกรรมเซรามิกได้

การใช้เศษไม้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเตาเผาเซรามิกนั้นสามารถช่วยลดต้นทุนการผลิตในแง่ของราคาเชื้อเพลิงที่ใช้สำหรับเผาผลิตภัณฑ์เซรามิกได้ จากการสำรวจราคาเมื่อวันที่ 9 มีนาคม 2566 จากบริษัท พี ที เอ็ม วู้ด จำกัด ซึ่งประกอบธุรกิจเกี่ยวกับการผลิตพาเลทไม้ พบว่าไม้สำหรับแปรรูปพาเลทมีราคาเท่ากับ 900 บาทต่อตัน และจากการสืบค้นราคาแก๊ส LPG ในขณะเดียวกัน

พบว่ามีความเท่ากับ 30 บาทต่อกิโลกรัม (กรมเชื้อเพลิงธรรมชาติ, 2566) เมื่อคิดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงเทียบกับขนาดเตาที่เท่ากันพบว่า เตาที่ใช้เชื้อเพลิงแก๊ส LPG ใช้ปริมาณเชื้อเพลิงจำนวน 5 กิโลกรัม จึงสรุปได้ว่าเชื้อเพลิงจากเศษไม้สามารถลดต้นทุนการผลิตในแง่ของต้นทุนเชื้อเพลิงร้อยละ 70.4 เมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงแก๊ส LPG เห็นได้ว่าการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลสามารถนำมาทดแทนการใช้เชื้อเพลิงแก๊ส LPG ได้เช่นเดียวกับการทดลองของ (วรรณุช, 2559) ตัวอย่างแก้วเซรามิกจากชุดการทดลองให้สีคล้ำกว่าแก้วเซรามิกที่เผาด้วยเตาเผาไฟฟ้าเช่นเดียวกับการทดลองของ (สิทธิพร และ นารทพล, 2551) ทั้งนี้เนื่องจากอาจมีเขม่าจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงมาเคลือบที่ผิวชิ้นงาน และเมื่อนำแก้วเซรามิกตัวอย่างที่ผ่านการเผาดิบแล้วมาวิเคราะห์สมบัติค่าการหดตัว ความหนาแน่น และค่าการดูดซึมน้ำ พบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ใช้เตาเผาแบบไฟฟ้าให้ผลที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

ข้อเสนอแนะ

1. เครื่องผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์สามารถนำไปต่อยอดสำหรับสร้างความร้อนให้กับอุตสาหกรรมอบแห้งต่าง ๆ
2. การใช้เชื้อเพลิงจากเศษไม้ที่เหลือจากการผลิตพาล์ทไม้สามารถทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิล และยังช่วยลดภาวะโลกร้อนได้
3. แก๊สไอเสียที่ปล่อยสู่บรรยากาศสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้โดยอาศัยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อนำความร้อนที่เหลือไปใช้งานและลดการสูญเสียความร้อนจากระบบ

บรรณานุกรม

F.Vidian, A. R. H. (2022). Thermodynamic Simulation of Producer Gas Combustion from Biomass Gasification. *EAI Endorsed Transactions on Energy Web*, 9(5).

Olsen, F. L. (2001). The Kiln Book: Materials, Specifications and Construction. In *Ceramics Monthly*, 2001, Vol.49 (7), p.34 (Vol. 49, pp. 34): Columbus: American Ceramic Society.

Xiao, G., Ni, M.-J., Chi, Y., และ Cen, K.-F. (2008). Low-temperature gasification of waste tire in a fluidized bed. *Energy Conversion and Management*, 49(8), 2078-2082.

กรมเชื้อเพลิงธรรมชาติ. (2566). ข่าวพลังงานประจำวัน.

<https://dmf.go.th/public/list/data/detail/id/18172/menu/593>

กรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ, ก. (2565). รายงานเศรษฐกิจการค้าระหว่างประเทศ ประจำเดือนพฤษภาคม 2564.

https://ditp.go.th/ditp_web61/article_sub_view.php?filename=contents_attach/732719/732719.pdf&title=732719&cate=592&d=0

กฤษฎาภักดิ์, ศ., อุชา, โ., กฤตยชญ์, ค., และ กิตติโชติ, ศ. (2562). BIOMASS GASIFIER PRODUCES PRODUCER GAS FOR CERAMIC KILN. *VRU Research and Development Journal Science and Technology*.

กำพล, ถ. (2562). การศึกษาสมรรถนะและมลพิษของเตาเผาถ่านขนาด 200 ลิตรที่ทำงานร่วมกับ แก๊สซีฟเฮอร์เบิร์นเนอร์. วิทยานิพนธ์ (วศ.ม.(วิศวกรรมเครื่องกล)) -- มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 2562. <http://ir-ithesis.swu.ac.th/dspace/handle/123456789/568>

กิตติศักดิ์, ส. (2558). ปัญหาและความต้องการของผู้ประกอบการผลิตอุตสาหกรรมเซรามิก ใน จังหวัดลำปาง. *Industry Technology Lampang Rajabhat University*.

เกศแก้ว, โ. (2547). ชุดควบคุมอุณหภูมิของเตาเผาอุณหภูมิสูงแบบตั้งโปรแกรม. วิทยานิพนธ์ (กศ.ม. (ฟิสิกส์)) -- มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 2547.

http://thesis.swu.ac.th/swuthesis/Phys/Keadkaew_K.pdf

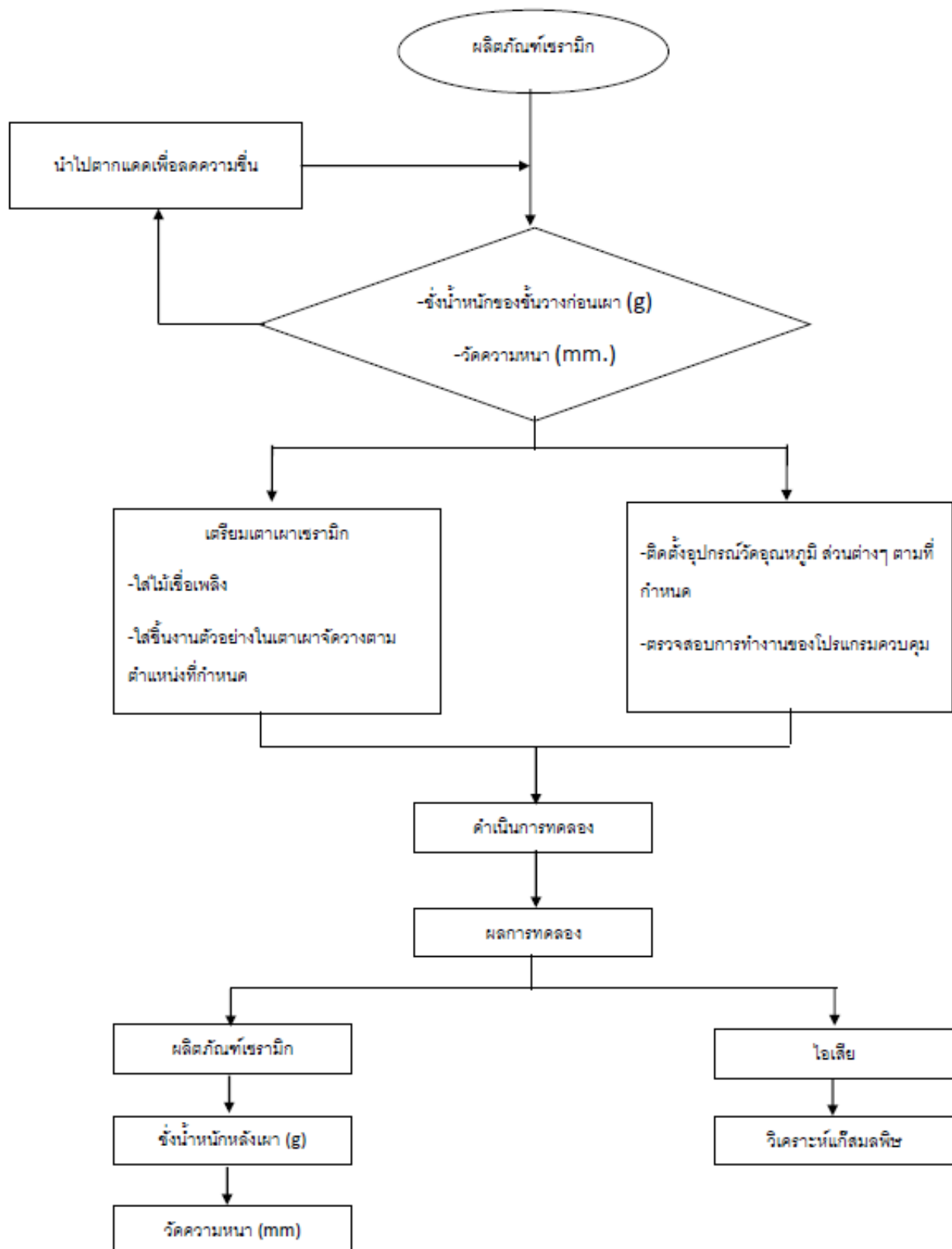
http://ils.swu.ac.th:8991/F?func=service&doc_library=SWU01&local_base=SWU01&doc_number=000076468&sequence=000001&line_number=0001&func_code=DB_REC ORDS&service_type=MEDIA

- ณัฐวัฒน์, อ. (2563). การออกแบบและสร้างเครื่องผลิตแก๊สร้อนเพื่อทำอากาศร้อนสำหรับอบไม้ยางพารา. วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์. (วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต วศ.บ (วิศวกรรมเครื่องกล)).
- ธนากร, ว. (2563). เซรามิกส์: เตาเผา และเทคนิคการเผา (50 เล่ม): ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- ร่วมกับ สมาคมเซรามิกส์ไทย.
- ธนาพล, ต., สุริฉาย, พ., ปรีย์ปวีณ, ภ., และ ภาณุวัฒน์, ไ. (2558). พลังงานทดแทนชุมชนจากเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งจากทางมะพร้าว. *Thai Science and Technology Journal*.
- พิษณุ, แ. (2564). การศึกษาสมรรถนะและมลพิษของชุดอุปกรณ์ผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ จากชีวมวลอัดเม็ดเพื่อผลิตแก๊สร้อนสะอาด. ปริญญาานิพนธ์ (วศ.ม. (วิศวกรรมเครื่องกล)) --มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 2564. <http://ir-thesis.swu.ac.th/dspace/bitstream/123456789/1175/1/gs582130028.pdf>
- ลดาวัลย์, ว. (2559). การพัฒนาก่อนเชื้อเพลิงชีวมวลจากเศษฟางข้าวผสมเศษลำไยเหลือทิ้ง. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ปีที่ 39, ฉบับที่ 2 (เม.ย.-มิ.ย. 2559), หน้า 239-255.
- วรรณช, แ. (2559). การศึกษาประสิทธิภาพระบบผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากชีวมวล เพื่อประยุกต์ใช้งานด้านความร้อนในเตาเผาเซรามิก. วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา ปีที่ 27, ฉบับที่ 4 (ต.ค.-ธ.ค. 2559), หน้า 37-45.
- วิรัตน์, ล. (2565). Rice Husk Gasifier Stove-Energy for Thai Agriculturalist. *KKU Science Journal*.
- วีระชัย, อ. (2553). การศึกษาแนวทางการบริหารจัดการขยะชุมชน เพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทนแบบครบวงจร [ระดับชุมชน] : รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์: นครราชสีมา : ศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- สมมาส, แ. (2556). การทดสอบสมรรถนะเตาชีวมวลขนาด 20 kW. วิศวกรรมศาสตร์ มศว ปีที่ 8, ฉบับที่ 1 (ม.ค.- มิ.ย. 2556), หน้า 24-33.
- สิทธิพร, ช., และ นารถพล, บ. (2551). เตาผลิตก๊าซชีวมวลพลังงานทางเลือกในอุตสาหกรรมเซรามิก. วารสารเซรามิกส์, 49-53.





ภาคผนวก ก
ไดอะแกรมการทำงานและคู่มือการผลิตภัณฑ์เซรามิก



คู่มือการสตาร์ทเตาเผาผลิตภัณฑ์เซรามิก

ไล่ชื้นงานผลิตภัณฑ์เซรามิกลงในเตาตามตำแหน่งที่กำหนด



ตรวจเช็คระบบควบคุมการทำงานของเตาเผา เช่น ระบบป้อนอากาศ, ระบบดูดอากาศ และ โปรแกรม PLC



ไล่ไม้เชื้อเพลิงที่เตาผลิตและเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์จากนั้นเปิดพัดลมดูดอากาศที่ 35 Hz

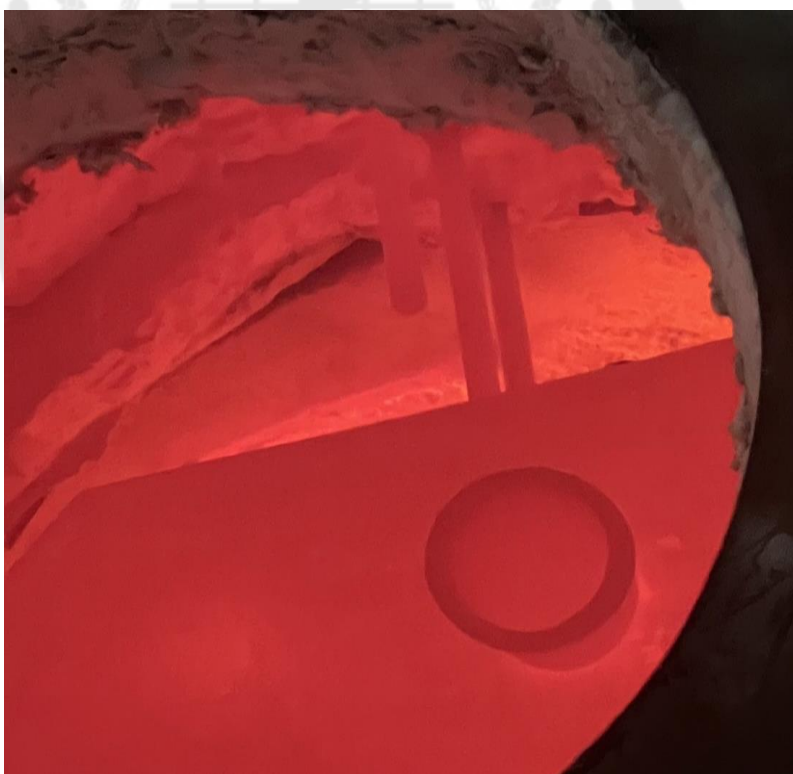


ตัวอย่างไม้ยางพาราที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับการทดลอง



จุดเตาผลิตและเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์

ควบคุมอุณหภูมิให้เป็นไปตามกราฟมาตรฐานที่กำหนด / กด Auto เพื่อให้โปรแกรม
เพื่อให้โปรแกรมควบคุมการทำงานอัตโนมัติ



ภาพแสดงขณะทดลองตรงตำแหน่งช่องระบายไอเสียจากเตาเผาเซรามิกเมื่ออุณหภูมิที่ 800 °C

เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการเผาแล้ว เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 100-150 °C ให้เปิดเตาเผาเพื่อนำ
ชิ้นงานออก

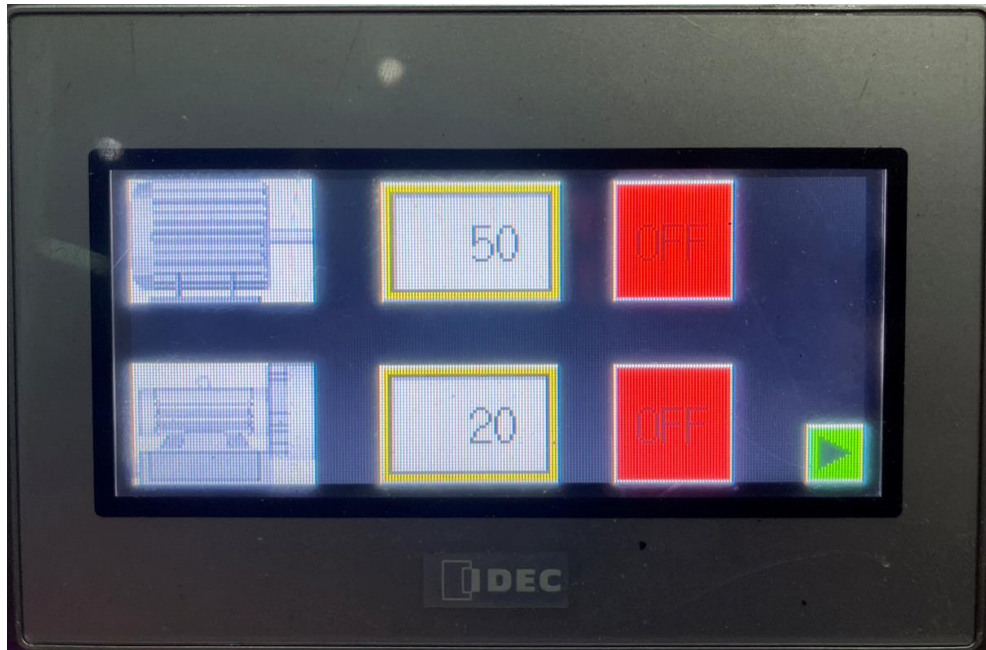


จุดวัดมลพิษไอเสียจากการเผาเซรามิก

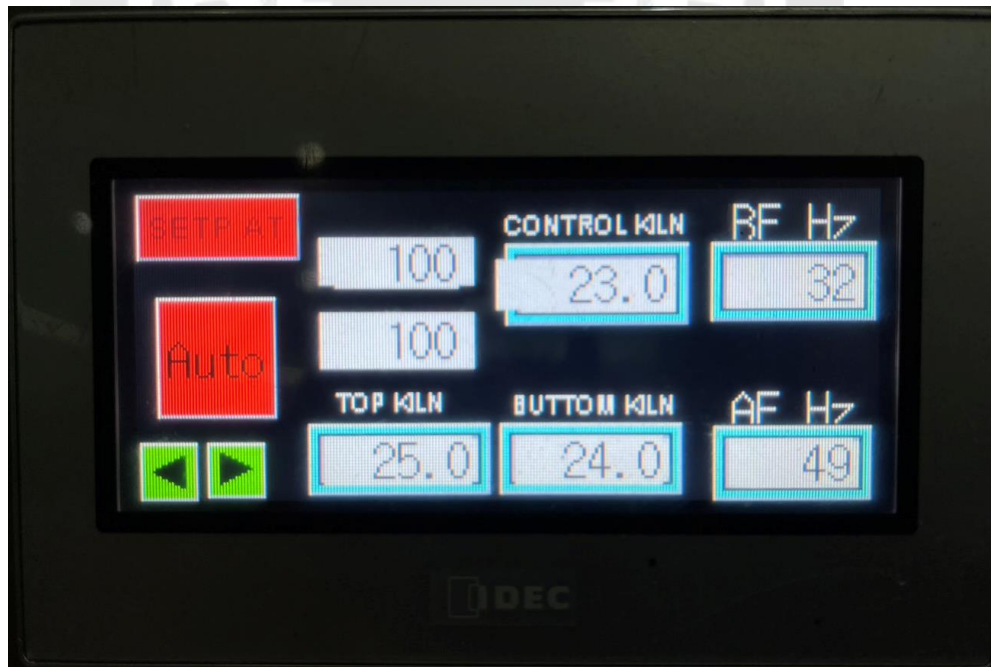


ภาคผนวก ข
โปรแกรม PLC

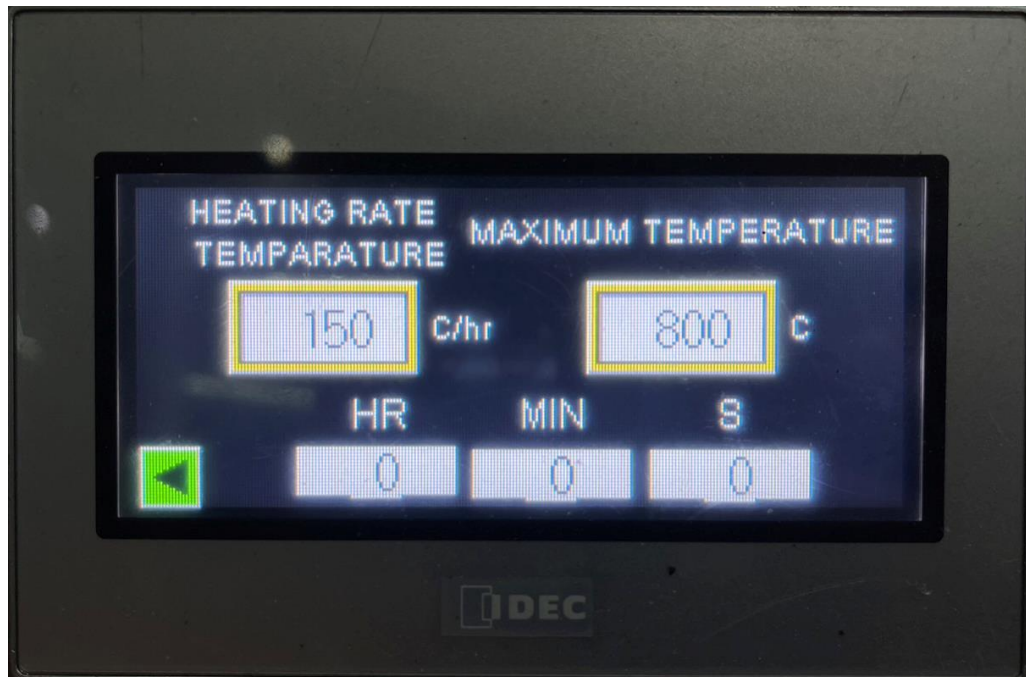
การใช้งานโปรแกรม PLC
เมนูการใช้งาน



หน้าจอที่ 1 ใช้สำหรับควบคุมการเปิด-ปิดการทำงานของพัดลมปรับอากาศ

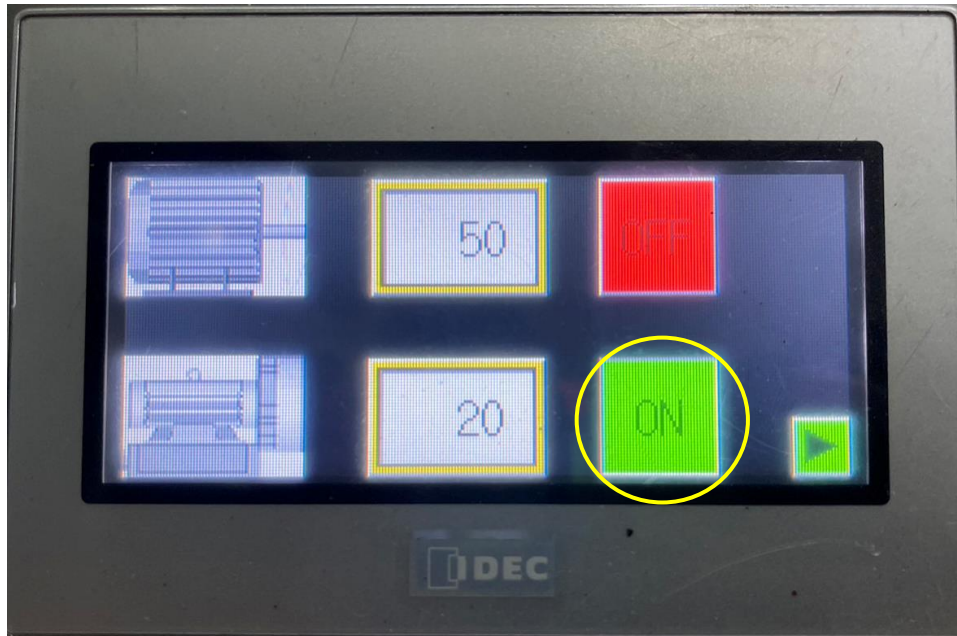


หน้าจอที่ 2 ใช้สำหรับดูค่าอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ภายในห้องเผาและตั้งค่าอุณหภูมิที่ต้องการ



หน้าจอที่ 3 ใช้สำหรับการตั้งค่าอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและค่าอุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ในการเผา

คู่มือการใช้งานโปรแกรม



หน้าจอที่ 1 กดปุ่ม OFF ภายในวงกลมให้กลายเป็น ON เพื่อเปิดการทำงานพัดลมปรับอากาศ



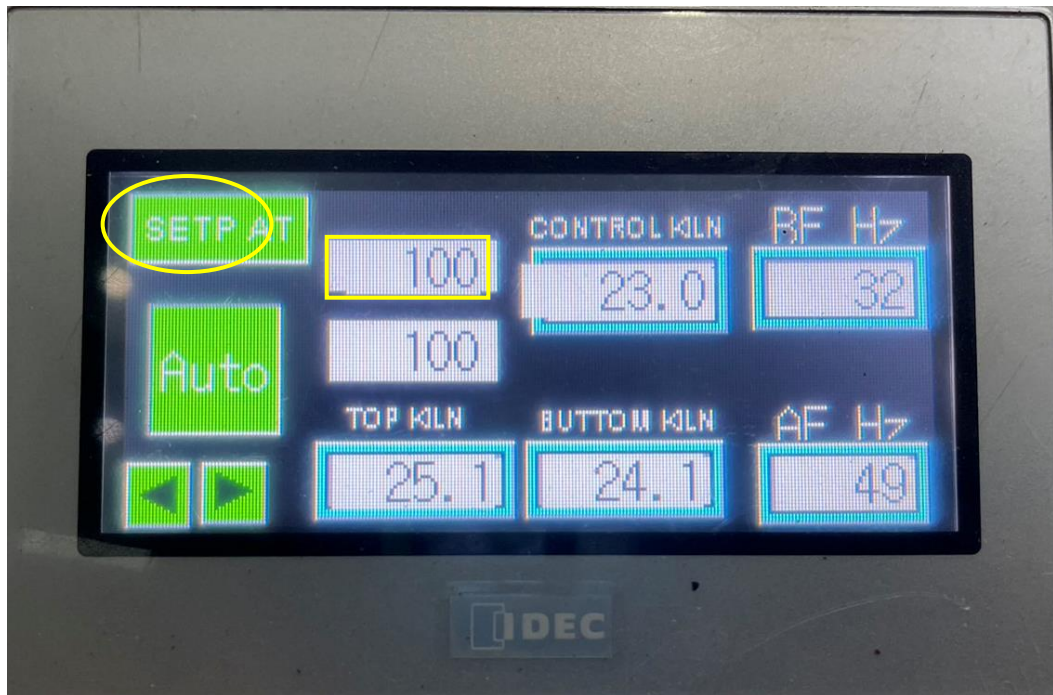
หน้าจอที่ 2 กดที่ช่องภายในวงกลมเพื่อตั้งค่าอุณหภูมิที่ต้องการ



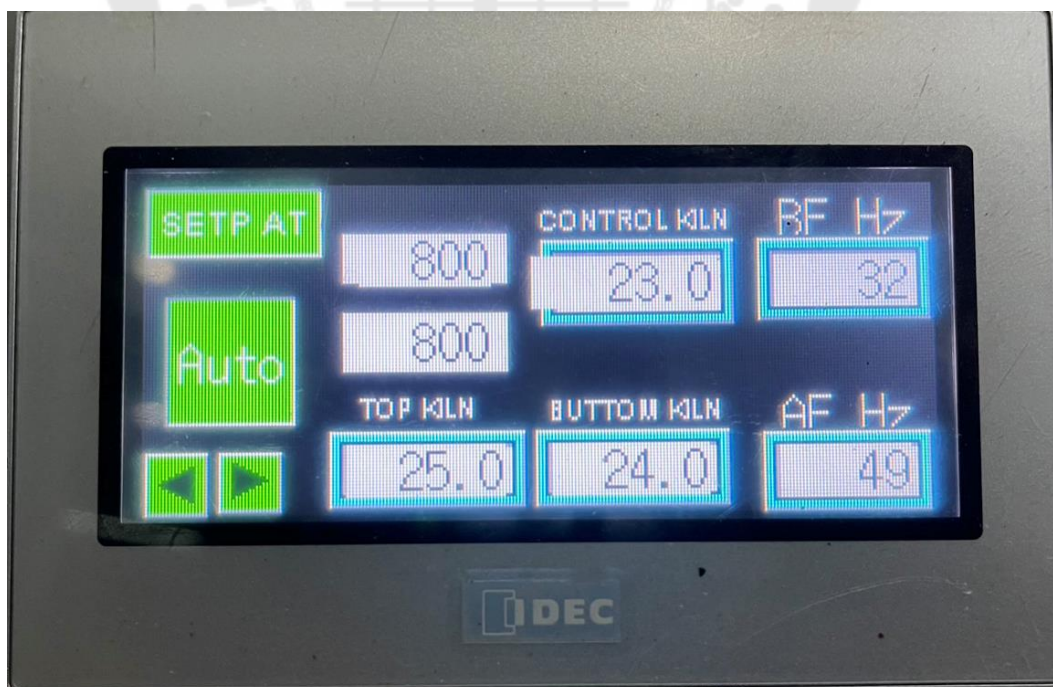
หน้าจอที่ 2 ตั้งค่าอุณหภูมิสูงสุดที่ต้องการจากนั้นกด ENT



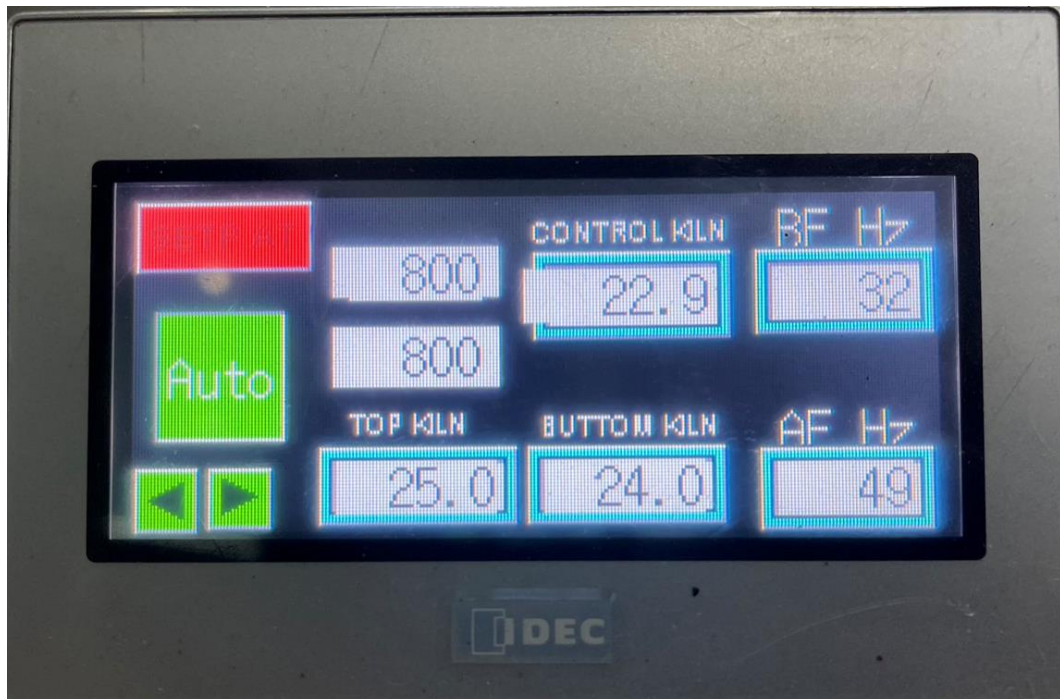
หน้าจอที่ 2 กดปุ่ม Auto ภายในวงกลมให้กลายเป็นสีเขียวเพื่อเริ่มการทำงานของพัดลมบ่อนอากาศแบบอัตโนมัติ



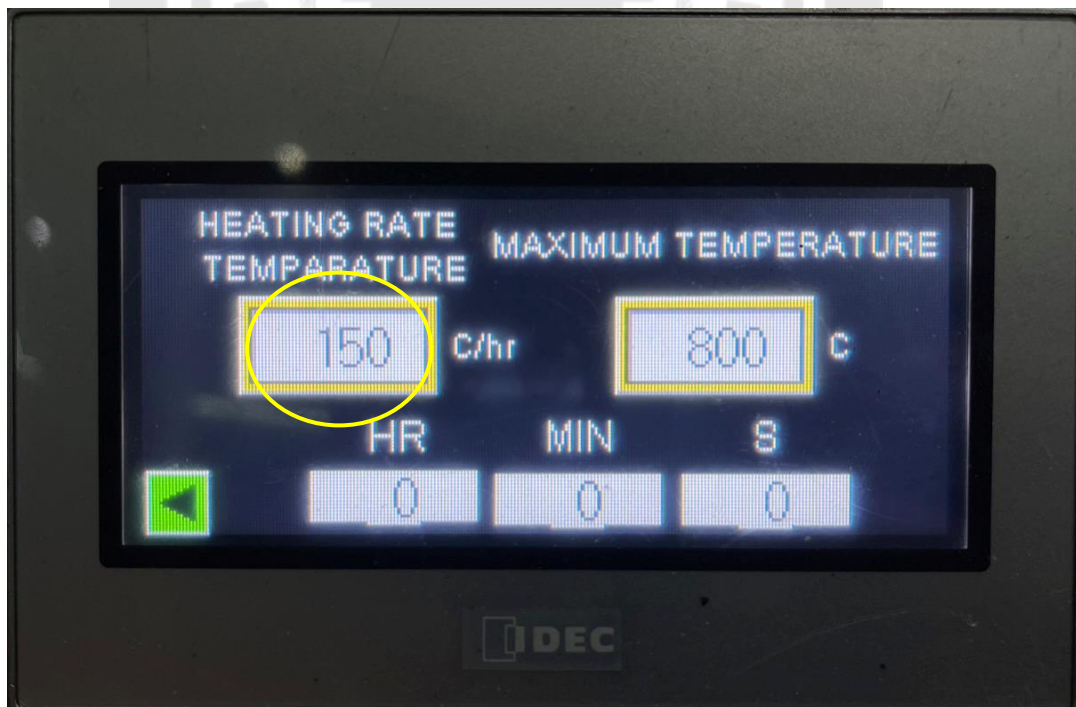
หน้าจอที่ 2 กดปุ่ม SETP AT ภายในวงกลมให้กลายเป็นสีเขียวเพื่อเริ่มการทำงานเพิ่มอุณหภูมิ โดยอัตโนมัติ อุณหภูมิที่ ณ ปัจจุบันสามารถดูได้จากช่องภายในกรอบสี่เหลี่ยม



หน้าจอที่ 2 จากการทำงานก่อนหน้าสมมติการตั้งค่าอุณหภูมิที่ต้องการที่ 800 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิ ณ ปัจจุบันจะเพิ่มขึ้นตามอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิที่ตั้งค่าในหน้าจอที่ 3



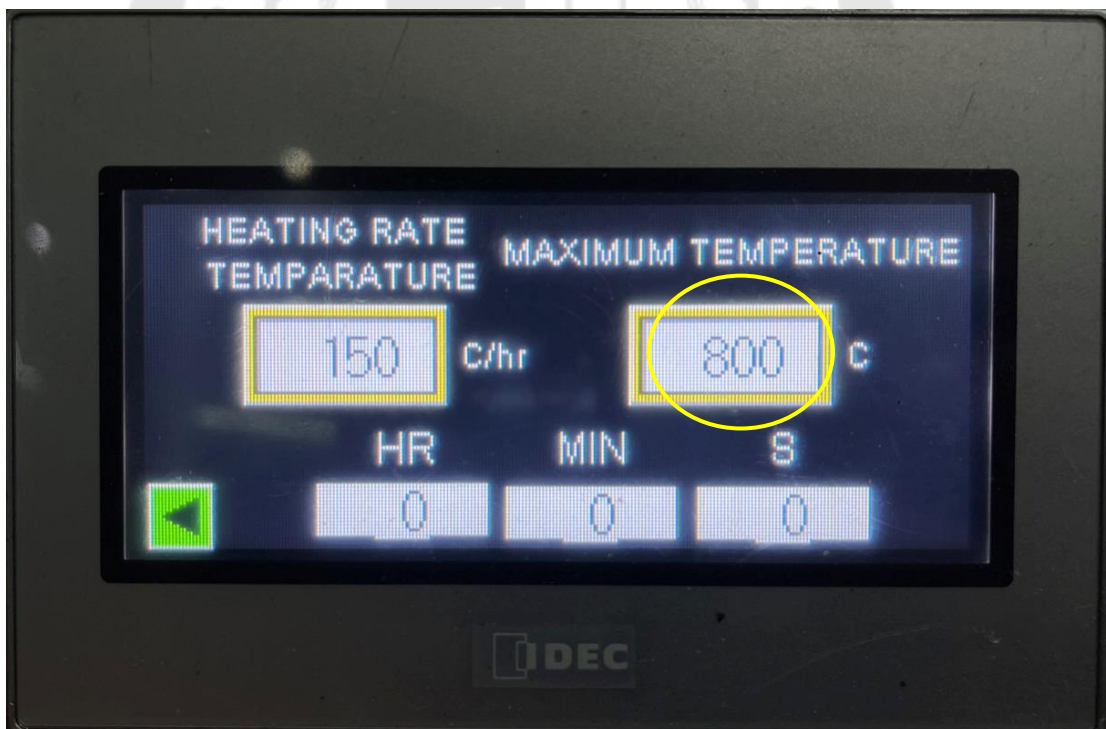
หน้าจอที่ 2 เมื่อค่าอุณหภูมิ ณ ปัจจุบัน ถึงค่าอุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ในการเผาปุ๋ยม SETP AT จะกลายเป็นสีแดงและหยุดการทำงานการเพิ่มอุณหภูมิอัตโนมัติ



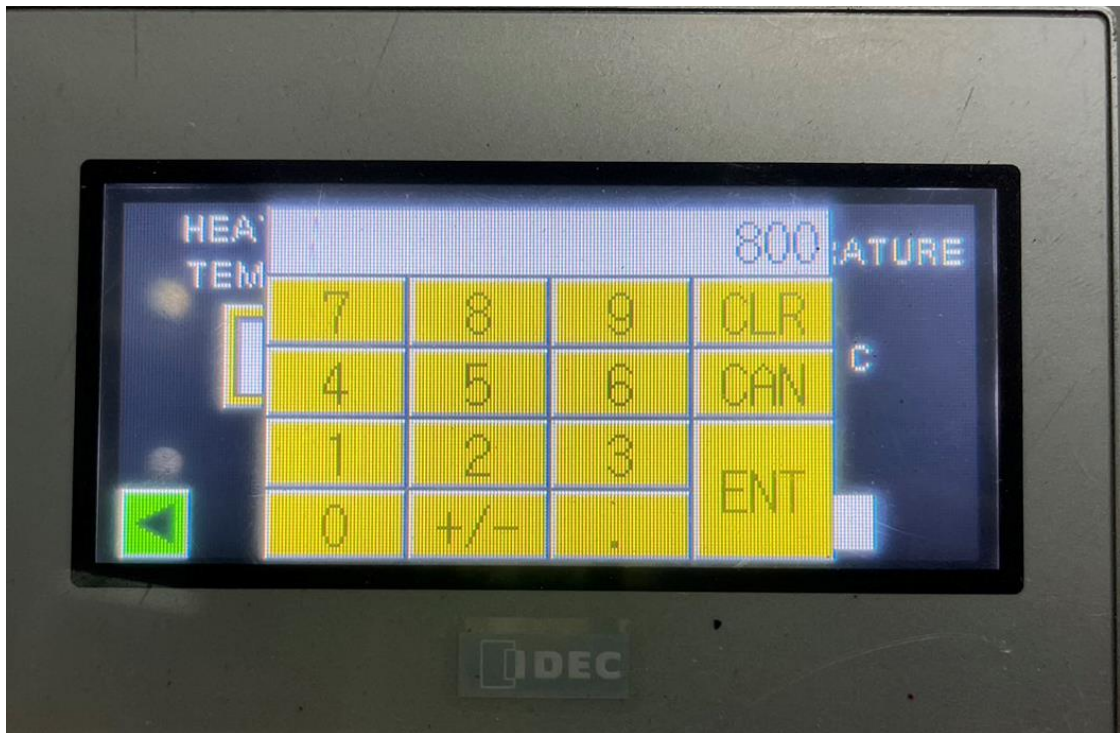
หน้าจอที่ 3 เมื่อกดปุ่มภายในวงกลมจะแสดงหน้าต่างการตั้งค่าอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิแบบอัตโนมัติ



หน้าจอที่ 3 เมื่อตั้งค่าอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ต้องการได้แล้วกดปุ่ม ENT

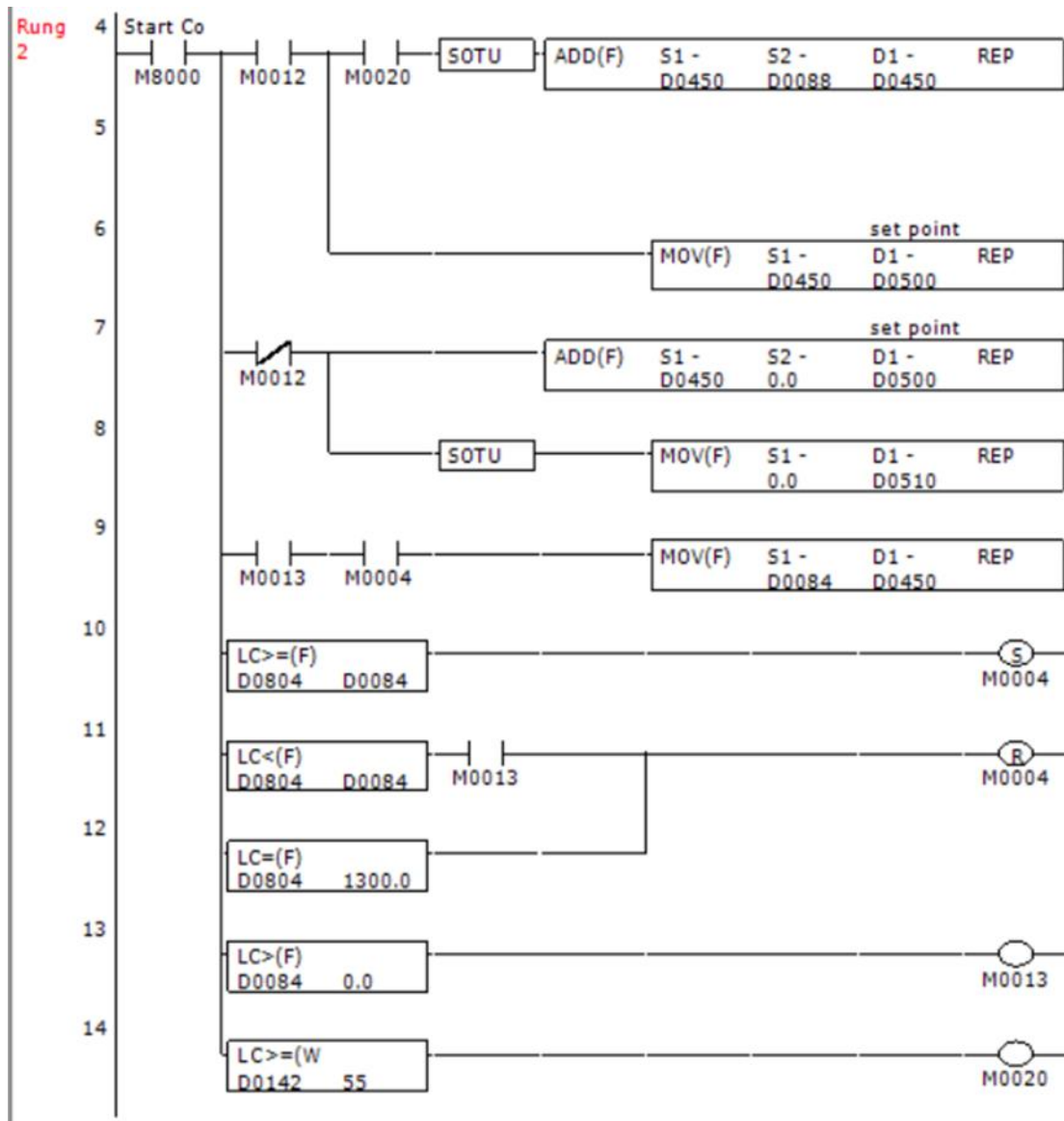
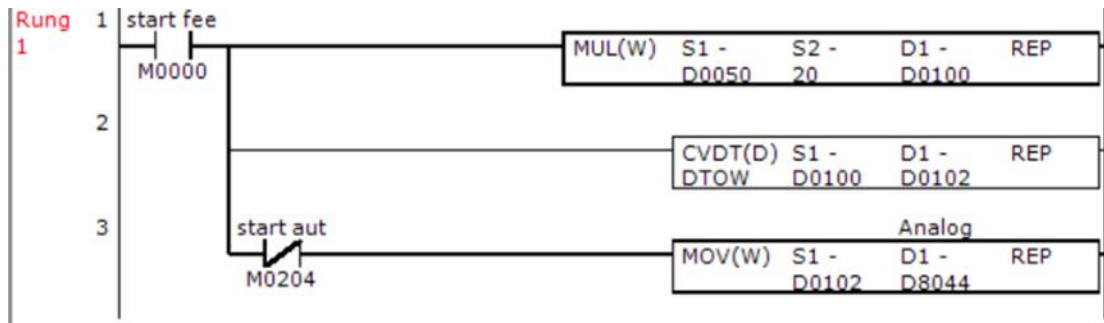


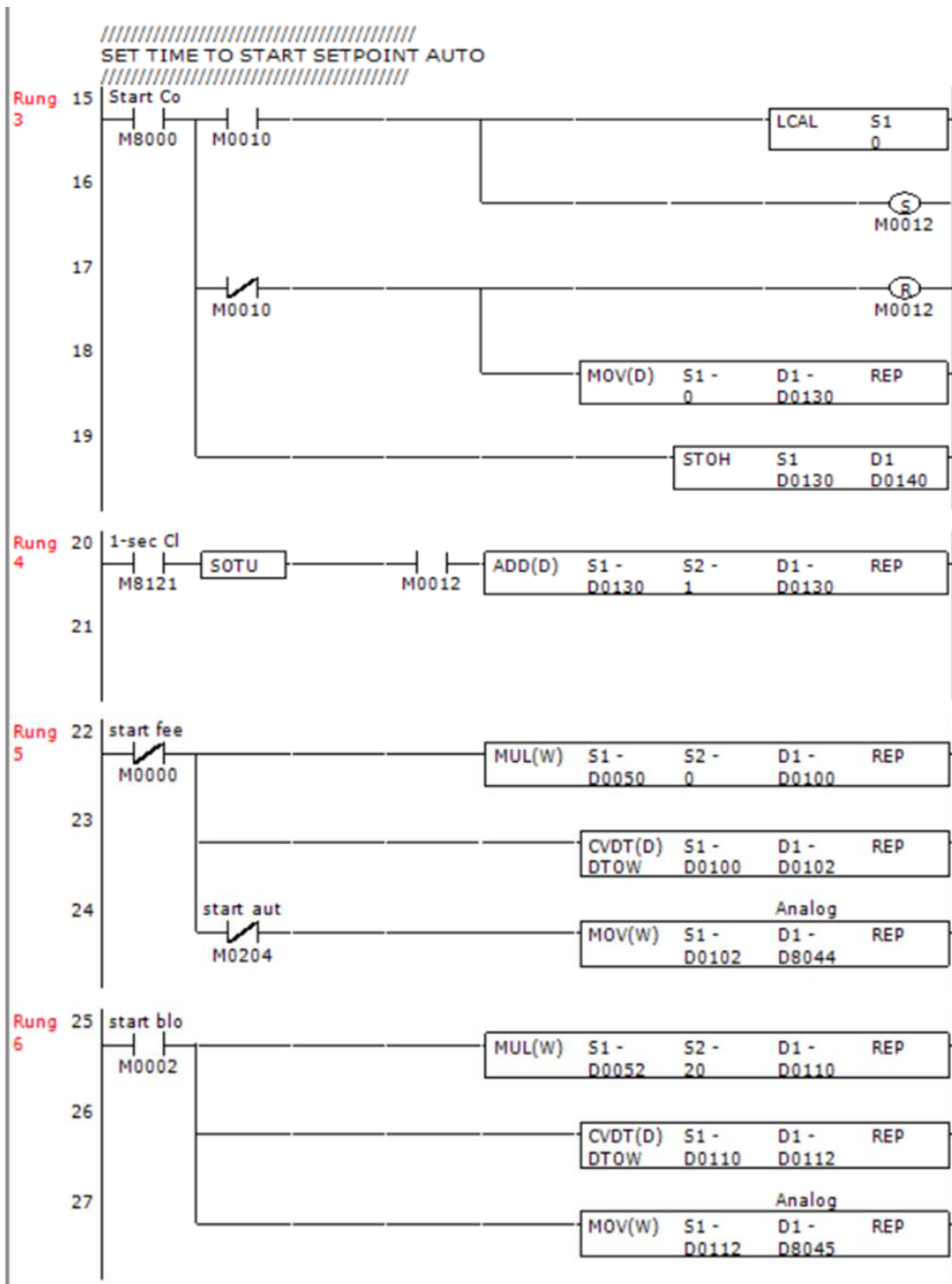
หน้าจอที่ 3 เมื่อกดปุ่มภายในวงกลมจะแสดงหน้าต่างการตั้งค่าอุณหภูมิสูงสุดในการเผา

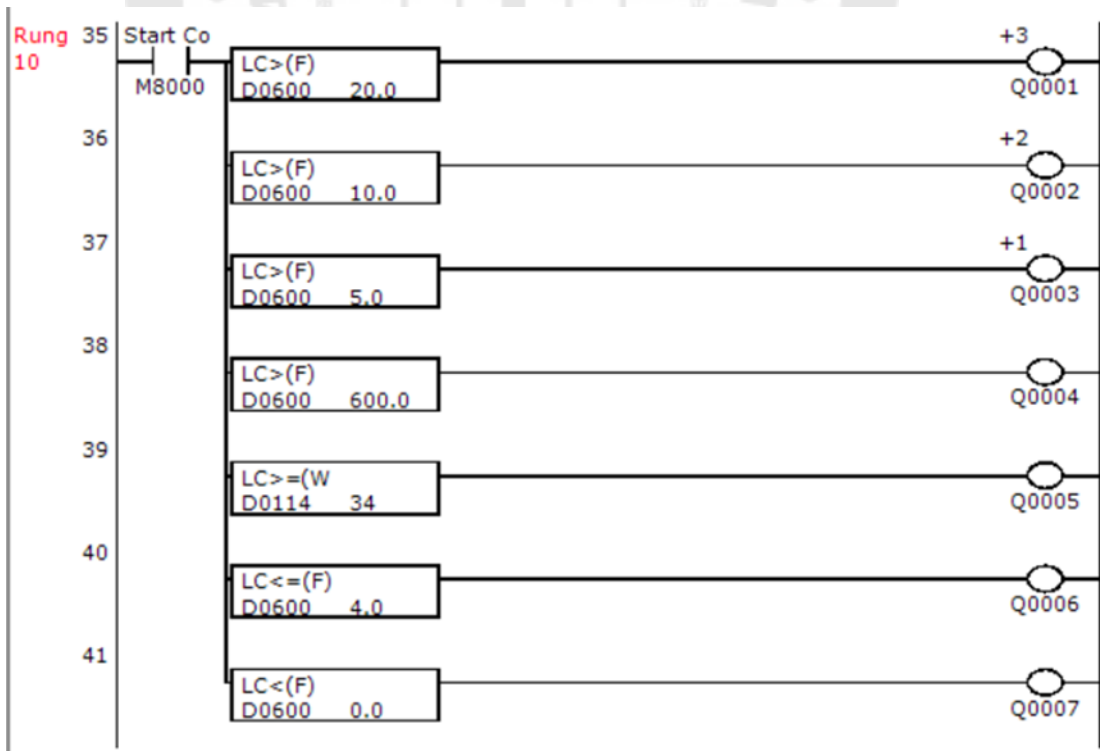
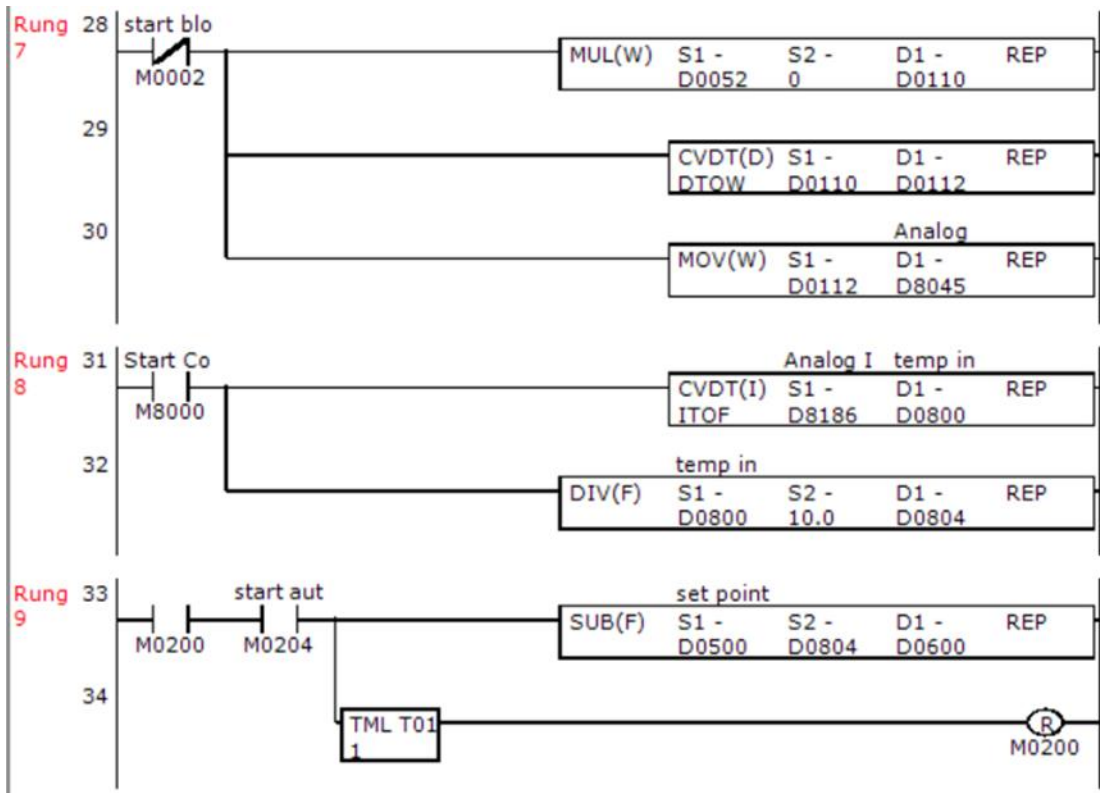


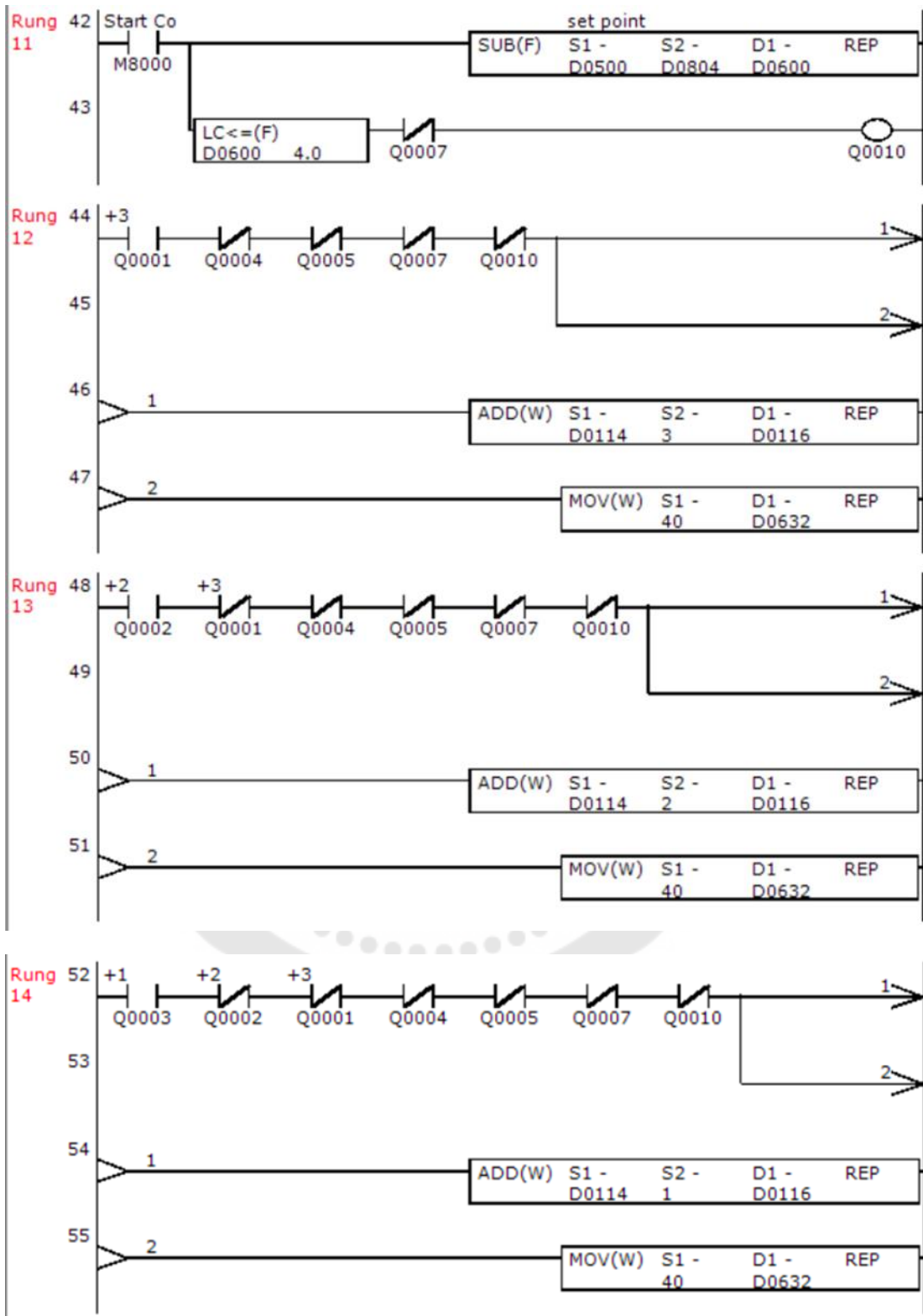
หน้าจอที่ 3 เมื่อตั้งค่าอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ต้องการได้แล้วกดปุ่ม ENT

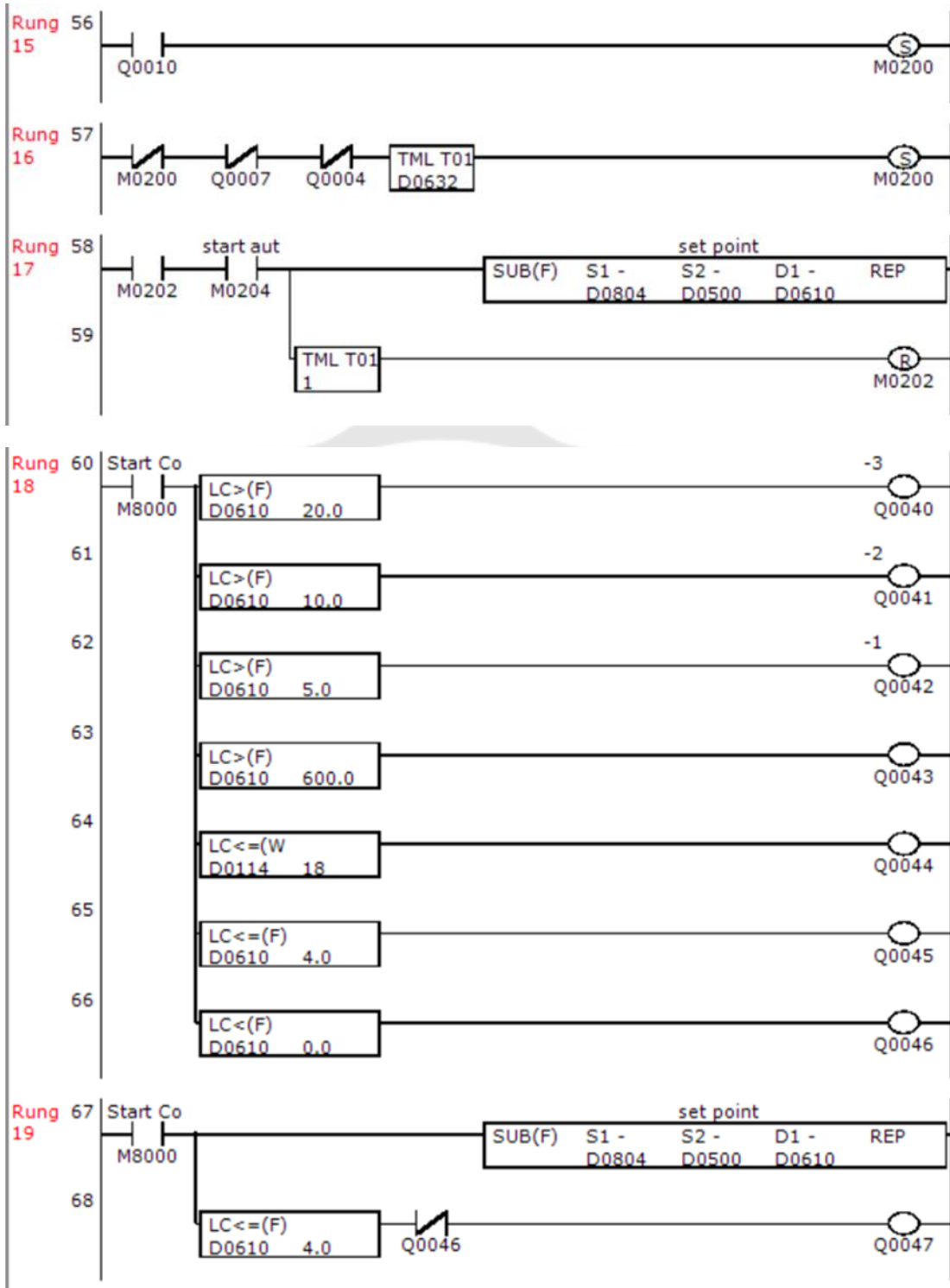
โค้ดโปรแกรม

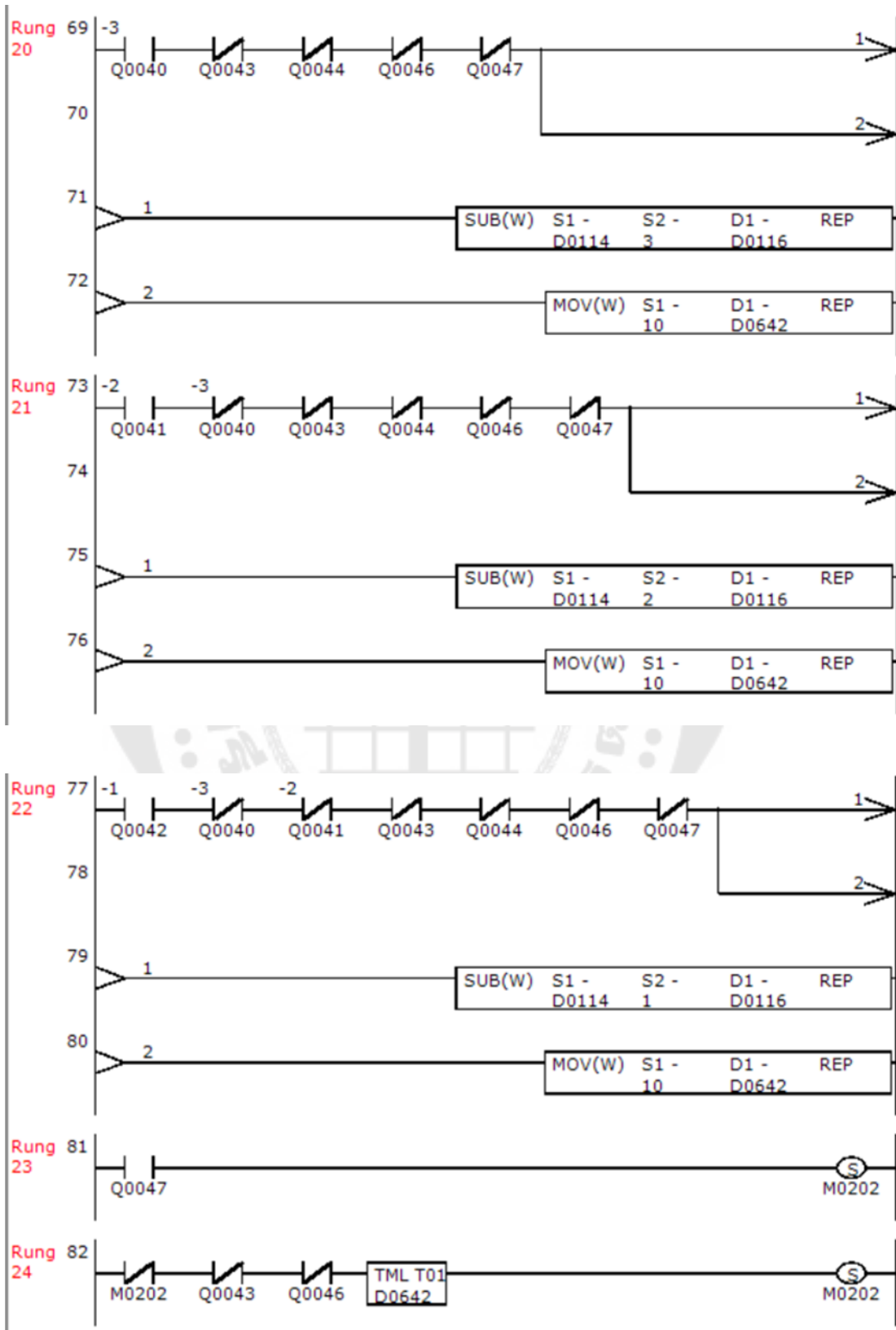


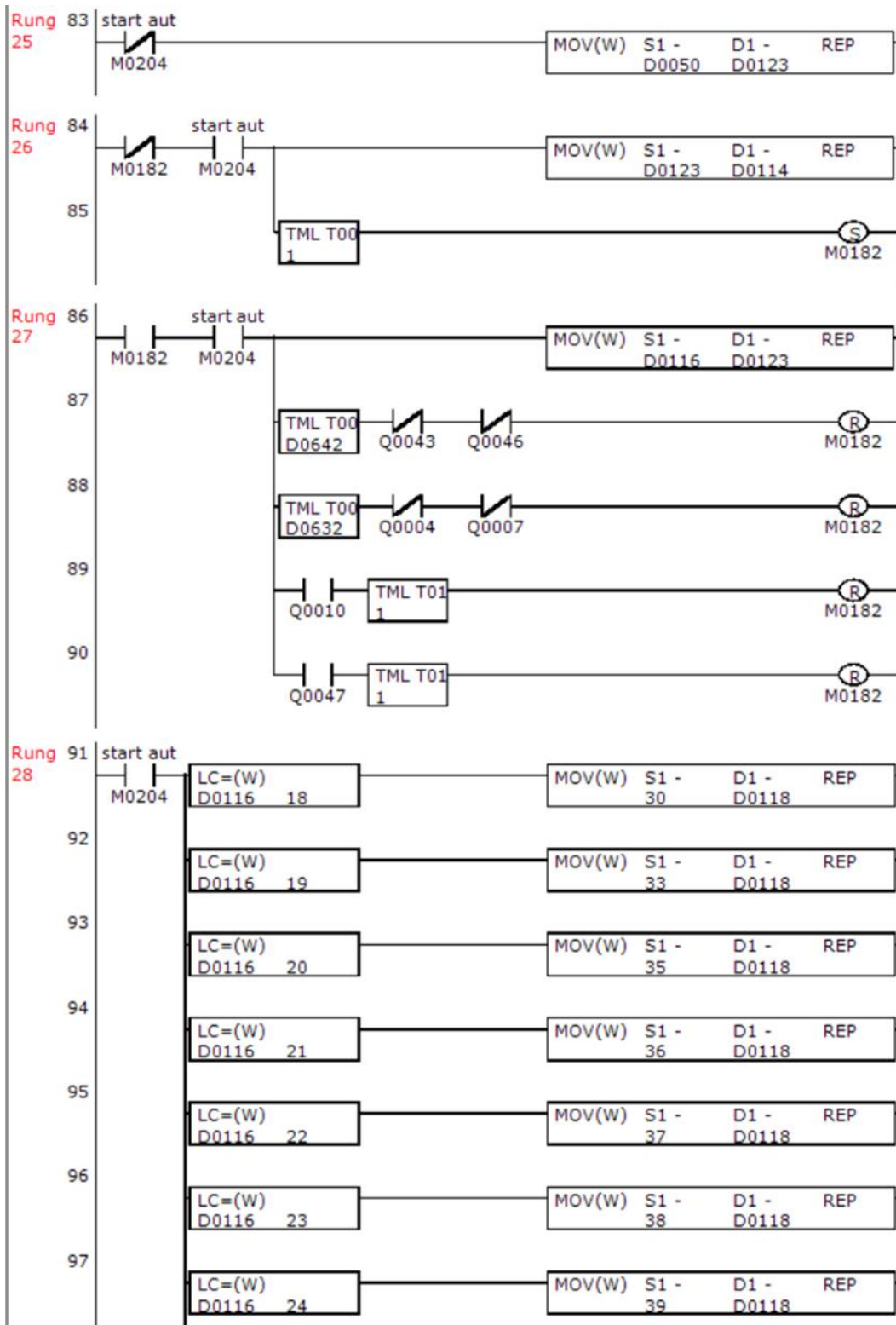


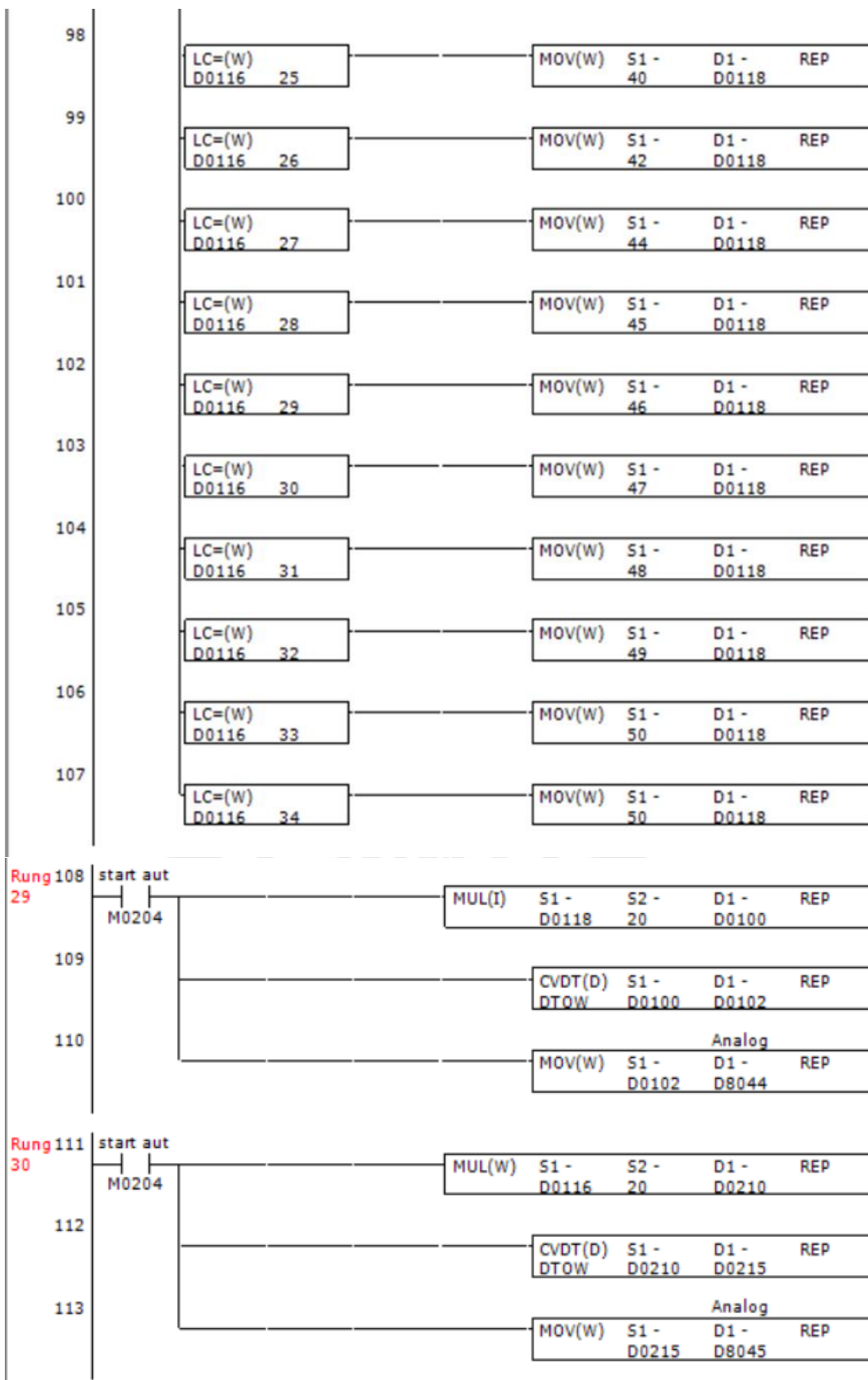


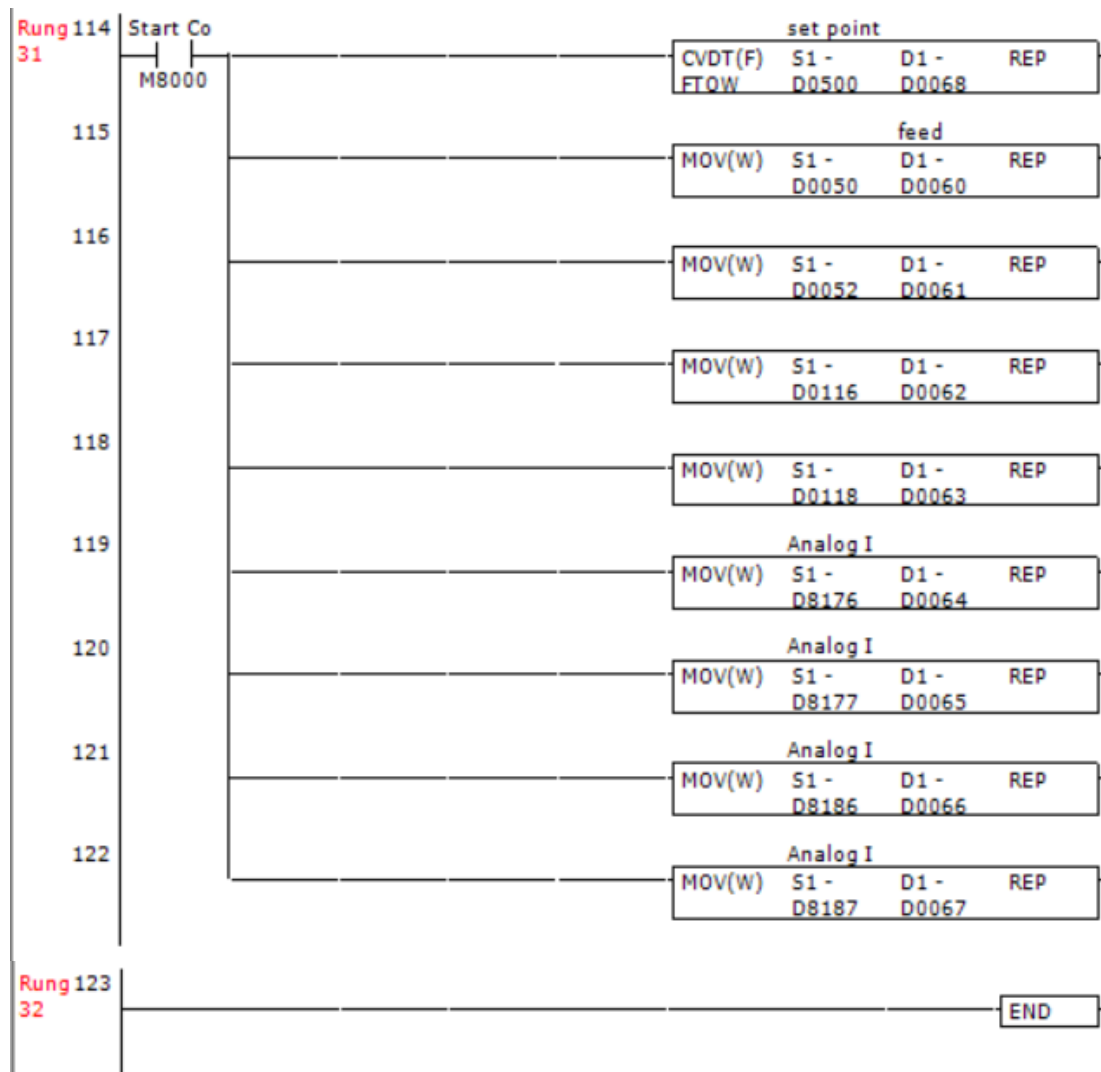














ภาคผนวก ค
ตารางบันทึกผลการทดลอง

ตาราง ค.1 ผลการทดลองที่ 1 การเผาผลิตภัณฑ์เซรามิกที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 136 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง

เวลา (hr:min:sec)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิตบนเตา (°C)	อุณหภูมิมกกลางเตา (°C)	อุณหภูมิล่างเตา (°C)
0:00:21	37.0	27.4	26.5	23.6
0:01:21	49.2	27.6	26.7	23.8
0:02:21	49.2	27.5	26.6	23.6
0:03:21	49.1	27.2	27.7	26.1
0:04:21	49.3	27.4	28.7	28.1
0:05:21	49.3	27.3	29.6	29.9
0:06:21	49.4	27.4	30.6	31.8
0:07:21	49.6	27.5	31.0	32.5
0:08:21	49.5	27.5	31.3	33.1
0:09:21	49.9	32.1	36.0	38.0
0:10:21	58.0	42.8	46.8	48.8
0:11:21	69.2	51.2	56.2	59.1
0:12:21	74.0	49.3	54.4	57.6
0:13:21	74.7	47.7	52.9	56.2
0:14:21	74.2	46.1	51.5	54.9
0:15:21	73.8	45.6	51.1	54.5
0:16:21	74.1	46.1	51.7	55.3
0:17:21	75.2	46.9	52.6	56.2
0:18:21	76.8	48.7	54.5	58.2
0:19:21	78.6	50.6	56.4	60.1
0:20:21	78.6	49.2	54.9	58.7
0:21:21	77.7	48.2	54.0	57.7
0:22:21	76.4	47.0	52.9	56.8
0:23:21	74.9	45.6	50.8	54.0
0:24:21	73.2	44.3	50.1	53.9
0:25:21	71.9	45.0	49.9	52.8

ตาราง ค.1 (ต่อ) ผลการทดลองที่ 1 การเผาผลิติดังที่เซรามิกที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 136 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง

เวลา (hr:min:sec)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิบนเตา (°C)	อุณหภูมิมกกลางเตา (°C)	อุณหภูมิล่างเตา (°C)
0:26:21	74.6	57.5	61.6	63.8
0:27:21	82.9	63.0	68.1	71.2
0:28:21	87.0	60.1	65.8	69.6
0:29:21	87.5	58.2	64.2	68.2
0:30:21	87.6	57.3	63.4	67.5
0:31:21	86.9	56.3	62.6	66.9
0:32:21	85.9	57.3	63.8	68.2
0:33:21	85.5	58.8	65.2	69.7
0:34:21	84.9	58.8	65.4	70.0
0:35:21	84.0	57.2	63.8	68.4
0:36:21	82.9	56.1	62.7	67.3
0:37:21	84.6	56.7	63.3	67.9
0:38:21	95.0	58.3	64.8	69.4
0:39:21	98.7	61.9	68.4	73.0
0:40:21	99.9	59.6	66.2	70.7
0:41:21	100.2	60.8	69.0	75.1
0:42:21	101.2	62.5	71.8	79.2
0:43:21	102.1	64.8	74.9	83.0
0:44:21	100.1	63.8	74.5	83.3
0:45:21	97.3	61.9	73.2	82.5
0:46:21	95.4	59.2	70.0	78.8
0:47:21	98.0	64.3	73.1	80.0
0:48:21	103.0	66.9	76.4	83.9
0:49:21	102.4	66.6	77.4	86.3

ตาราง ค.1 (ต่อ) ผลการทดลองที่ 1 การเผาผลิภัณฑ์เซรามิกที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 136 องศาเซลเซียสต่อ ชั่วโมง

เวลา (hr:min:sec)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิบนเตา (°C)	อุณหภูมิกกลางเตา (°C)	อุณหภูมิล่างเตา (°C)
0:50:21	100.0	65.5	77.3	87.2
0:51:21	97.6	64.0	76.7	87.5
0:52:21	95.4	63.3	76.9	88.4
0:53:21	93.6	63.1	77.3	89.5
0:54:21	92.1	62.5	77.2	90.0
0:55:21	91.9	61.7	77.4	91.2
0:56:21	96.1	63.7	79.9	94.1
0:57:21	100.4	65.4	81.5	95.7
0:58:21	103.5	68.1	84.1	98.2
0:59:21	106.7	71.7	87.7	101.7
1:00:21	113.9	74.2	90.1	104.1
1:01:21	123.4	74.1	90.0	103.8
1:02:21	123.7	73.3	89.1	102.9
1:03:21	124.3	77.2	92.8	106.5
1:04:21	122.3	74.3	90.2	104.0
1:05:21	119.4	74.3	90.4	104.4
1:06:21	116.4	73.9	90.2	104.5
1:07:21	113.9	73.9	90.4	104.9
1:08:21	111.5	72.0	88.6	103.2
1:09:21	109.7	70.8	87.5	102.3
1:10:21	108.2	70.2	87.0	101.9
1:11:21	107.3	72.0	88.6	103.2
1:12:21	106.8	71.6	87.7	101.8
1:13:21	108.8	76.2	90.1	102.0
1:14:21	114.1	76.3	90.6	102.9

ตาราง ค.1 (ต่อ) ผลการทดลองที่ 1 การเผาผลิภัณฑ์เซรามิกที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 136 องศาเซลเซียสต่อ ชั่วโมง

เวลา (hr:min:sec)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิบนเตา (°C)	อุณหภูมิกกลางเตา (°C)	อุณหภูมิล่างเตา (°C)
1:15:21	114.2	74.5	89.5	102.5
1:16:21	118.0	79.4	94.8	108.1
1:17:21	124.7	84.8	100.1	113.5
1:18:21	125.1	84.2	99.4	112.7
1:19:21	129.4	89.3	104.4	117.5
1:20:21	136.2	93.9	108.9	121.9
1:21:21	135.1	91.9	106.9	119.9
1:22:21	131.8	90.5	105.5	118.4
1:23:21	128.9	89.2	104.1	117.0
1:24:21	126.9	85.9	100.7	113.4
1:25:21	131.2	90.0	103.9	115.8
1:26:21	131.1	90.0	103.7	115.5
1:27:21	129.5	91.3	104.9	116.4
1:28:21	126.9	87.8	101.7	113.6
1:29:21	124.0	88.0	102.8	115.6
1:30:21	121.8	87.4	102.7	115.9
1:31:21	119.8	85.6	101.2	114.8
1:32:21	118.1	83.6	99.5	113.4
1:33:21	116.6	84.1	99.6	113.2
1:34:21	116.5	83.5	98.7	112.0
1:35:21	116.5	82.9	98.3	111.7
1:36:21	115.7	82.1	97.6	111.0
1:37:21	118.1	85.2	99.0	110.8
1:38:21	120.6	86.7	100.9	113.0
1:39:21	120.9	86.8	101.0	113.2

ตาราง ค.1 (ต่อ) ผลการทดลองที่ 1 การเผาผลิภัณฑ์เซรามิกที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 136 องศาเซลเซียสต่อ ชั่วโมง

เวลา (hr:min:sec)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิบนเตา (°C)	อุณหภูมิกกลางเตา (°C)	อุณหภูมิล่างเตา (°C)
1:40:21	121.1	87.1	101.3	113.5
1:41:21	121.1	87.1	101.4	113.7
1:42:21	121.2	87.2	101.4	113.6
1:43:21	121.4	86.6	100.7	112.8
1:44:21	121.4	86.5	100.6	112.8
1:45:21	120.7	86.4	100.5	112.6
1:46:21	120.0	85.1	99.1	111.1
1:47:21	120.6	84.5	98.5	110.6
1:48:21	125.5	87.2	101.0	112.9
1:49:21	125.2	88.7	102.9	115.2
1:50:21	124.2	89.0	103.8	116.7
1:51:21	123.0	88.0	103.4	116.8
1:52:21	122.3	87.6	103.3	117.0
1:53:21	121.9	86.7	102.7	116.8
1:54:21	121.4	86.6	102.8	117.0
1:55:21	120.9	86.4	102.8	117.3
1:56:21	120.4	86.1	102.8	117.5
1:57:21	119.8	85.3	102.1	116.9
1:58:21	119.4	84.9	101.9	116.9
1:59:21	118.8	85.3	102.3	117.3
2:00:21	116.4	86.3	103.5	118.8
2:01:21	121.2	86.6	104.0	119.3
2:02:21	121.4	86.8	104.2	119.6
2:03:21	125.1	86.1	103.5	119.0
2:04:21	124.6	85.3	102.8	118.4

ตาราง ค.1 (ต่อ) ผลการทดลองที่ 1 การเผาผลิภัณฑ์เซรามิกที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 136 องศาเซลเซียสต่อ ชั่วโมง

เวลา (hr:min:sec)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิบนเตา (°C)	อุณหภูมิกกลางเตา (°C)	อุณหภูมิล่างเตา (°C)
2:05:21	124.1	84.4	102.1	117.7
2:06:21	124.4	83.6	101.3	117.1
2:07:21	133.5	89.9	107.7	123.4
2:08:21	144.1	95.6	113.4	129.2
2:09:21	144.0	99.3	117.1	133.0
2:10:21	140.2	105.4	123.5	139.6
2:11:21	137.9	104.6	122.6	138.7
2:12:21	133.4	101.9	119.9	136.0
2:13:21	129.1	99.3	117.3	133.3
2:14:21	125.7	98.7	116.1	131.5
2:15:21	123.3	99.1	115.8	130.5
2:16:21	121.4	98.7	114.9	129.2
2:17:21	119.7	97.8	113.6	127.3
2:18:21	118.1	96.8	112.1	125.5
2:19:21	119.8	98.4	113.5	126.5
2:20:21	130.7	105.2	120.0	132.7
2:21:21	141.3	110.0	124.6	137.2
2:22:21	148.3	112.9	127.3	139.7
2:23:21	151.5	113.2	127.4	139.6
2:24:21	148.2	111.9	125.9	137.8
2:25:21	153.5	118.4	132.3	144.2
2:26:21	160.6	123.0	136.7	148.4
2:27:21	165.9	125.8	139.5	151.1
2:28:21	163.9	121.8	135.4	147.0
2:29:21	163.6	122.8	136.2	147.7

ตาราง ค.1 (ต่อ) ผลการทดลองที่ 1 การเผาผลิภัณฑ์เซรามิกที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 136 องศาเซลเซียสต่อ ชั่วโมง

เวลา (hr:min:sec)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิบนเตา (°C)	อุณหภูมิกกลางเตา (°C)	อุณหภูมิล่างเตา (°C)
2:30:21	160.5	123.7	137.1	148.5
2:31:21	153.8	122.4	135.8	147.2
2:32:21	147.7	121.6	134.9	146.2
2:33:21	142.5	120.4	133.7	145.0
2:34:21	138.5	118.2	131.3	142.5
2:35:21	136.6	115.4	129.1	140.9
2:36:21	146.5	121.1	135.2	147.3
2:37:21	154.5	122.2	136.5	148.8
2:38:21	160.3	124.7	139.2	151.6
2:39:21	164.2	128.8	140.4	150.0
2:40:21	170.9	136.0	147.4	156.8
2:41:21	172.4	135.7	148.2	158.7
2:42:21	166.5	136.2	149.4	160.6
2:43:21	160.9	133.2	146.8	158.5
2:44:21	156.4	131.0	144.9	156.7
2:45:21	152.2	128.9	143.0	155.1
2:46:21	148.8	127.1	141.2	153.3
2:47:21	145.9	126.1	140.3	152.4
2:48:21	143.3	124.9	139.2	151.4
2:49:21	142.2	124.0	138.3	150.5
2:50:21	157.6	134.7	149.0	161.3
2:51:21	176.0	144.1	158.5	170.8
2:52:21	175.6	149.5	163.9	176.2
2:53:21	182.9	153.3	166.6	178.0
2:54:21	191.6	161.2	173.0	182.9

ตาราง ค.1 (ต่อ) ผลการทดลองที่ 1 การเผาผลิภัณฑ์เซรามิกที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 136 องศาเซลเซียสต่อ ชั่วโมง

เวลา (hr:min:sec)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิบนเตา (°C)	อุณหภูมิกกลางเตา (°C)	อุณหภูมิล่างเตา (°C)
2:55:21	199.6	163.9	174.9	183.9
2:56:21	203.1	165.0	175.3	183.5
2:57:21	203.5	164.4	174.1	181.9
2:58:21	201.5	163.0	172.4	179.7
2:59:21	195.0	162.4	171.4	178.4
3:00:21	187.4	158.0	166.8	173.5
3:01:21	183.3	155.7	164.2	170.7
3:02:21	186.3	157.3	165.6	172.0
3:03:21	190.1	158.6	166.8	173.0
3:04:21	194.0	159.4	167.4	173.4
3:05:21	196.1	161.6	168.9	174.2
3:06:21	198.5	162.7	169.2	173.7
3:07:21	180.7	163.6	169.8	173.9
3:08:21	180.1	163.1	169.0	172.9
3:09:21	176.9	161.1	166.7	170.3
3:10:21	175.0	159.5	164.8	168.0
3:11:21	180.6	164.5	169.3	172.1
3:12:21	192.8	169.5	174.1	176.7
3:13:21	201.9	174.6	179.0	181.4
3:14:21	209.8	179.0	183.3	185.6
3:15:21	221.5	183.6	187.8	190.0
3:16:21	230.0	188.6	192.6	194.7
3:17:21	231.1	189.8	193.7	195.5
3:18:21	237.5	185.2	188.7	190.2
3:19:21	234.1	180.3	183.8	185.3

ตาราง ค.1 (ต่อ) ผลการทดลองที่ 1 การเผาผลิภัณฑ์เซรามิกที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 136 องศาเซลเซียสต่อ ชั่วโมง

เวลา (hr:min:sec)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิบนเตา (°C)	อุณหภูมิกกลางเตา (°C)	อุณหภูมิล่างเตา (°C)
3:20:21	235.3	185.1	188.5	189.8
3:21:21	235.7	182.9	188.7	192.5
3:22:21	219.4	177.7	184.6	189.6
3:23:21	204.0	171.7	179.5	185.2
3:24:21	205.6	165.0	173.3	179.6
3:25:21	193.8	160.1	168.8	175.6
3:26:21	184.3	156.1	165.2	172.3
3:27:21	176.3	152.7	162.0	169.3
3:28:21	177.9	149.2	158.9	166.6
3:29:21	173.4	149.1	159.1	167.1
3:30:21	168.7	150.1	160.0	167.9
3:31:21	166.1	148.4	158.4	166.3
3:32:21	163.6	148.5	158.5	166.4
3:33:21	161.9	148.6	158.6	166.6
3:34:21	160.0	147.5	157.5	165.6
3:35:21	157.8	144.1	154.1	162.1
3:36:21	162.0	149.6	158.6	165.6
3:37:21	172.6	158.2	166.6	172.9
3:38:21	198.1	171.4	178.4	183.4
3:39:21	219.0	186.0	193.7	199.3
3:40:21	223.4	198.8	206.3	211.8
3:41:21	233.5	204.5	211.9	217.2
3:42:21	234.3	206.9	214.1	219.3
3:43:21	226.1	203.1	210.2	215.3
3:44:21	216.7	199.2	206.3	211.4

ตาราง ค.1 (ต่อ) ผลการทดลองที่ 1 การเผาผลิผลิตภัณฑ์เซรามิกที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 136 องศาเซลเซียสต่อ ชั่วโมง

เวลา (hr:min:sec)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิบนเตา (°C)	อุณหภูมิกกลางเตา (°C)	อุณหภูมิล่างเตา (°C)
3:45:21	206.4	193.0	200.0	204.9
3:46:21	203.6	194.0	200.2	204.4
3:47:21	225.0	206.3	212.1	215.9
3:48:21	262.8	224.6	230.2	233.8
3:49:21	293.2	241.1	246.4	249.7
3:50:21	304.0	247.1	252.3	255.6
3:51:21	302.9	247.6	252.7	255.8
3:52:21	289.3	239.2	244.2	247.3
3:53:21	270.3	231.6	236.6	239.5
3:54:21	268.9	230.6	235.5	238.4
3:55:21	271.9	232.3	237.2	240.1
3:56:21	273.9	233.0	237.8	240.5
3:57:21	270.8	234.0	238.8	241.5
3:58:21	265.3	231.5	236.3	239.0
3:59:21	261.3	229.7	234.4	237.1
4:00:21	264.8	234.3	239.1	241.8
4:01:21	268.0	239.3	244.0	246.7
4:02:21	269.0	238.4	243.2	246.0
4:03:21	265.7	236.1	240.8	243.5
4:04:21	265.9	238.7	243.4	246.2
4:05:21	273.0	241.8	246.4	249.0
4:06:21	276.1	246.7	251.3	253.9
4:07:21	279.3	248.7	253.4	256.0
4:08:21	282.8	251.3	256.0	258.7
4:09:21	284.2	251.4	256.1	258.8

ตาราง ค.1 (ต่อ) ผลการทดลองที่ 1 การเผาผลิตภัณฑ์เซรามิกที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 136 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง

เวลา (hr:min:sec)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิบนเตา (°C)	อุณหภูมิกกลางเตา (°C)	อุณหภูมิล่างเตา (°C)
4:10:21	283.1	251.9	256.7	259.4
4:11:21	283.2	252.5	257.3	260.0
4:12:21	283.5	252.7	257.5	260.2
4:13:21	283.1	251.3	255.7	258.0
4:14:21	292.7	262.4	266.6	268.8
4:15:21	318.3	272.0	277.8	281.7
4:16:21	345.1	286.2	292.8	297.4
4:17:21	373.7	302.7	309.7	314.7
4:18:21	388.6	311.2	318.6	324.0
4:19:21	374.0	303.9	311.7	317.5
4:20:21	349.5	294.9	302.9	308.9
4:21:21	321.3	282.2	290.3	296.5
4:22:21	300.1	269.8	278.2	284.5
4:23:21	285.7	263.6	272.0	278.5
4:24:21	313.3	281.7	290.3	296.8
4:25:21	357.0	304.1	312.8	319.4
4:26:21	380.9	314.2	322.9	329.5
4:27:21	389.3	320.2	329.0	335.7
4:28:21	380.0	315.4	324.1	330.9
4:29:21	365.9	306.2	315.1	321.9
4:30:21	340.1	294.0	302.9	309.7
4:31:21	337.9	294.4	303.2	310.1
4:32:21	345.6	299.9	308.9	315.8
4:33:21	334.1	292.0	300.9	307.8
4:34:21	323.8	287.1	296.1	303.0

ตาราง ค.1 (ต่อ) ผลการทดลองที่ 1 การเผาผลิภัณฑ์เซรามิกที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 136 องศาเซลเซียสต่อ ชั่วโมง

เวลา (hr:min:sec)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิบนเตา (°C)	อุณหภูมิกกลางเตา (°C)	อุณหภูมิล่างเตา (°C)
4:35:21	327.6	294.6	304.2	309.8
4:36:21	361.9	311.8	321.3	326.7
4:37:21	416.0	339.0	348.5	353.9
4:38:21	447.8	354.3	364.0	369.7
4:39:21	445.4	352.3	362.2	368.1
4:40:21	419.8	340.9	350.9	356.8
4:41:21	401.0	338.5	348.6	354.6
4:42:21	385.8	339.5	349.6	355.7
4:43:21	402.9	354.2	364.0	369.8
4:44:21	408.8	344.3	354.2	360.1
4:45:21	410.1	336.6	346.5	352.4
4:46:21	412.7	320.1	330.0	335.8
4:47:21	420.3	313.6	322.6	327.5
4:48:21	468.0	337.9	345.4	348.9
4:49:21	476.9	333.4	342.8	348.2
4:50:21	459.0	352.6	363.7	370.8
4:51:21	447.6	357.7	369.7	377.6
4:52:21	455.4	360.6	373.3	382.0
4:53:21	448.9	363.1	376.5	386.0
4:54:21	432.2	362.3	376.4	386.5
4:55:21	424.5	365.5	380.2	390.9
4:56:21	410.4	348.4	363.1	373.8
4:57:21	381.6	324.6	338.6	348.6
4:58:21	361.3	307.2	320.4	329.7
4:59:21	388.7	332.2	344.7	353.1

ตาราง ค.1 (ต่อ) ผลการทดลองที่ 1 การเผาผลิผลิตภัณฑ์เซรามิกที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 136 องศาเซลเซียสต่อ ชั่วโมง

เวลา (hr:min:sec)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิบนเตา (°C)	อุณหภูมิกกลางเตา (°C)	อุณหภูมิล่างเตา (°C)
5:00:21	464.7	359.8	372.0	380.2
5:01:21	485.7	380.7	393.5	402.3
5:02:21	461.5	354.6	367.6	376.7
5:03:21	457.5	355.0	368.1	377.1
5:04:21	453.1	350.4	363.4	372.4
5:05:21	461.7	358.3	370.1	377.8
5:06:21	457.3	367.5	378.5	385.6
5:07:21	442.7	371.1	381.7	388.3
5:08:21	430.0	365.9	375.7	381.4
5:09:21	427.6	368.0	375.9	379.7
5:10:21	423.5	364.1	370.9	373.7
5:11:21	422.7	367.4	374.0	376.5
5:12:21	430.0	372.5	379.1	381.7
5:13:21	454.9	389.0	395.4	397.9
5:14:21	481.8	401.1	408.0	410.9
5:15:21	484.6	402.1	409.6	413.1
5:16:21	476.5	397.1	404.8	408.5
5:17:21	450.9	377.2	384.6	388.1
5:18:21	434.6	378.0	385.7	389.4
5:19:21	427.2	372.2	380.8	385.4
5:20:21	420.4	370.3	379.1	384.0
5:21:21	430.3	378.2	387.0	391.9
5:22:21	439.0	385.0	393.9	398.7
5:23:21	448.9	389.9	398.6	403.3
5:24:21	455.1	393.1	401.8	406.4

ตาราง ค.1 (ต่อ) ผลการทดลองที่ 1 การเผาผลิภัณฑ์เซรามิกที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 136 องศาเซลเซียสต่อ ชั่วโมง

เวลา (hr:min:sec)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิบนเตา (°C)	อุณหภูมิกกลางเตา (°C)	อุณหภูมิล่างเตา (°C)
5:25:21	452.4	392.2	400.9	405.6
5:26:21	452.5	394.9	403.7	408.5
5:27:21	452.7	395.0	403.8	408.6
5:28:21	455.9	395.8	404.2	408.6
5:29:21	463.5	400.2	408.7	413.3
5:30:21	465.7	402.0	410.5	414.9
5:31:21	470.1	403.9	411.9	415.9
5:32:21	466.0	399.3	407.2	411.2
5:33:21	463.7	402.6	410.3	413.9
5:34:21	477.7	408.7	415.9	419.0
5:35:21	486.5	415.4	421.5	423.6
5:36:21	496.4	422.3	428.5	430.7
5:37:21	510.4	432.8	439.4	441.9
5:38:21	504.7	428.3	435.9	439.4
5:39:21	498.9	427.7	434.5	437.2
5:40:21	498.6	427.1	433.5	435.8
5:41:21	495.0	427.3	433.5	435.8
5:42:21	478.5	417.0	423.1	425.2
5:43:21	461.0	409.5	415.5	417.4
5:44:21	445.6	397.6	403.4	405.1
5:45:21	445.5	402.3	407.7	409.0
5:46:21	451.4	407.6	412.8	413.9
5:47:21	448.4	407.8	412.8	413.8
5:48:21	441.5	405.6	410.6	411.6
5:49:21	433.0	399.4	404.2	405.0

ตาราง ค.1 (ต่อ) ผลการทดลองที่ 1 การเผาผลิภัณฑ์เซรามิกที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 136 องศาเซลเซียสต่อ ชั่วโมง

เวลา (hr:min:sec)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิบนเตา (°C)	อุณหภูมิกกลางเตา (°C)	อุณหภูมิล่างเตา (°C)
5:50:21	452.7	411.8	416.5	417.1
5:51:21	491.8	432.4	437.1	437.8
5:52:21	507.0	439.3	444.0	444.7
5:53:21	520.1	448.8	453.4	454.0
5:54:21	522.2	445.6	450.2	450.8
5:55:21	500.0	438.7	443.3	443.9
5:56:21	483.0	431.4	436.4	437.3
5:57:21	471.3	423.8	428.9	430.1
5:58:21	466.0	424.3	429.0	429.6
5:59:21	477.3	430.0	434.5	435.0
6:00:21	491.0	436.4	440.9	441.3
6:01:21	495.3	435.2	440.0	440.8
6:02:21	491.2	430.6	434.8	435.0
6:03:21	487.9	434.1	437.7	437.4
6:04:21	509.3	447.5	451.4	451.3
6:05:21	526.0	457.8	462.0	462.2
6:06:21	530.5	461.6	465.9	466.2
6:07:21	534.3	465.2	469.5	469.8
6:08:21	535.1	466.9	471.0	471.1
6:09:21	529.7	465.2	469.3	469.3
6:10:21	524.9	464.1	468.1	468.1
6:11:21	516.3	459.7	463.7	463.7
6:12:21	505.1	453.8	457.7	457.6
6:13:21	493.4	448.4	452.0	451.7
6:14:21	529.1	471.7	475.5	475.4

ตาราง ค.1 (ต่อ) ผลการทดลองที่ 1 การเผาผลิภัณฑ์เซรามิกที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 136 องศาเซลเซียสต่อ ชั่วโมง

เวลา (hr:min:sec)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิบนเตา (°C)	อุณหภูมิกกลางเตา (°C)	อุณหภูมิล่างเตา (°C)
6:15:21	564.3	485.2	489.4	489.5
6:16:21	577.7	492.2	496.5	496.8
6:17:21	578.3	494.1	498.2	498.3
6:18:21	571.4	489.5	493.2	493.0
6:19:21	542.7	464.7	467.8	466.9
6:20:21	543.8	476.4	479.1	477.8
6:21:21	550.0	481.2	483.7	482.2
6:22:21	546.7	480.1	482.7	481.2
6:23:21	547.9	485.1	487.7	486.3
6:24:21	563.8	491.9	494.5	493.0
6:25:21	547.1	478.1	481.0	479.8
6:26:21	534.8	479.5	482.0	480.5
6:27:21	523.3	473.5	475.9	474.3
6:28:21	519.1	480.6	483.0	481.5
6:29:21	585.3	508.6	512.4	512.1
6:30:21	619.6	525.4	529.9	530.3
6:31:21	621.1	526.7	531.5	532.2
6:32:21	608.5	520.7	525.6	526.6
6:33:21	594.1	513.3	518.4	519.5
6:34:21	583.7	511.9	517.0	518.1
6:35:21	569.5	502.3	507.1	508.0
6:36:21	582.9	510.4	515.1	515.9
6:37:21	620.5	532.9	538.0	539.0
6:38:21	634.8	540.6	546.0	547.4
6:39:21	629.1	539.8	545.3	546.8

ตาราง ค.1 (ต่อ) ผลการทดลองที่ 1 การเผาผลิติดัชนีเซรามิกที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 136 องศาเซลเซียสต่อ ชั่วโมง

เวลา (hr:min:sec)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิบนเตา (°C)	อุณหภูมิกกลางเตา (°C)	อุณหภูมิล่างเตา (°C)
6:40:21	627.8	535.5	541.6	543.6
6:41:21	606.5	528.2	534.7	537.2
6:42:21	588.2	519.6	526.2	528.9
6:43:21	579.0	513.1	519.7	522.3
6:44:21	568.3	510.0	515.8	517.6
6:45:21	561.7	506.3	511.6	512.9
6:46:21	555.0	506.6	511.5	512.4
6:47:21	609.6	533.2	538.3	539.5
6:48:21	654.0	557.3	562.3	563.3
6:49:21	658.2	558.4	563.4	564.4
6:50:21	635.0	550.5	555.2	555.8
6:51:21	650.2	559.4	564.0	564.6
6:52:21	663.2	564.2	568.7	569.3
6:53:21	669.6	568.0	572.5	573.0
6:54:21	672.2	568.1	572.6	573.0
6:55:21	668.4	564.5	568.9	569.3
6:56:21	670.6	570.9	574.8	574.7
6:57:21	685.8	588.0	593.4	594.7
6:58:21	680.2	583.3	587.5	587.7
6:59:21	673.2	574.0	577.1	576.1
7:00:21	704.9	592.6	598.4	599.3
7:01:21	701.3	588.9	599.1	596.6
7:02:21	673.9	572.0	586.2	579.6
7:03:21	662.4	571.1	586.6	577.8
7:04:21	652.6	567.4	582.7	573.7

ตาราง ค.1 (ต่อ) ผลการทดลองที่ 1 การเผาผลิติดัชนีเซรามิกที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 136 องศาเซลเซียสต่อ ชั่วโมง

เวลา (hr:min:sec)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิบนเตา (°C)	อุณหภูมิกกลางเตา (°C)	อุณหภูมิล่างเตา (°C)
7:05:21	634.2	559.1	573.6	563.7
7:06:21	639.4	553.3	568.4	559.2
7:07:21	638.3	557.1	572.0	562.5
7:08:21	641.6	559.2	573.4	563.2
7:09:21	645.8	559.0	572.4	561.5
7:10:21	685.7	577.6	591.3	580.7
7:11:21	698.2	568.7	583.2	573.4
7:12:21	714.5	570.1	584.4	574.3
7:13:21	727.0	568.3	582.8	572.9
7:14:21	738.9	564.6	579.0	569.0
7:15:21	746.7	578.2	592.3	582.0
7:16:21	744.9	598.8	612.6	602.0
7:17:21	768.8	621.8	636.2	626.2
7:18:21	762.0	617.5	622.0	622.6
7:19:21	754.2	614.0	618.4	618.7
7:20:21	752.2	612.7	616.9	617.0
7:21:21	756.2	614.6	618.8	619.0
7:22:21	747.8	610.7	615.0	615.4
7:23:21	745.1	609.5	613.7	613.9
7:24:21	729.3	606.5	610.6	610.7
7:25:21	707.6	604.9	608.5	608.2
7:26:21	703.3	613.2	617.3	617.4
7:27:21	705.1	614.7	619.1	619.4
7:28:21	714.1	616.7	620.6	620.4
7:29:21	719.6	621.2	625.3	625.3

ตาราง ค.1 (ต่อ) ผลการทดลองที่ 1 การเผาผลิภัณฑ์เซรามิกที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 136 องศาเซลเซียสต่อ ชั่วโมง

เวลา (hr:min:sec)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิบนเตา (°C)	อุณหภูมิกกลางเตา (°C)	อุณหภูมิล่างเตา (°C)
7:30:21	710.2	586.7	591.4	592.1
7:31:21	708.3	583.6	588.5	589.4
7:32:21	717.3	571.2	576.7	578.2
7:33:21	786.9	607.5	612.4	613.4
7:34:21	829.0	627.8	633.2	634.6
7:35:21	836.4	629.8	637.0	640.2
7:36:21	810.9	625.5	632.8	636.2
7:37:21	780.2	621.7	628.1	630.5
7:38:21	775.0	632.1	639.8	643.4
7:39:21	788.4	649.1	657.9	662.7
7:40:21	789.8	654.6	663.1	667.6
7:41:21	785.4	648.5	657.1	661.7
7:42:21	793.3	653.3	661.2	665.2
7:43:21	846.4	685.6	693.4	697.3
7:44:21	858.8	692.3	701.4	706.4
7:45:21	857.9	692.2	701.6	707.0
7:46:21	857.2	692.4	702.2	708.0
7:47:21	866.1	695.2	705.1	711.0
7:48:21	847.1	688.1	697.9	703.8
7:49:21	803.3	663.9	673.8	679.6
7:50:21	775.9	653.1	662.3	667.6
7:51:21	769.6	656.5	664.8	669.1
7:52:21	817.9	681.3	689.8	694.3
7:53:21	833.2	686.5	694.8	699.0
7:54:21	836.9	689.9	698.0	702.1

ตาราง ค.1 (ต่อ) ผลการทดลองที่ 1 การเผาผลิผลิตภัณฑ์เซรามิกที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 136 องศาเซลเซียสต่อ ชั่วโมง

เวลา (hr:min:sec)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิบนเตา (°C)	อุณหภูมิกกลางเตา (°C)	อุณหภูมิล่างเตา (°C)
7:55:21	850.1	695.5	702.4	705.3
7:56:21	878.1	717.0	723.4	725.9
7:57:21	871.9	707.3	715.5	719.8
7:58:21	865.4	703.6	712.7	717.8
7:59:21	883.3	714.0	722.9	727.7
8:00:21	903.1	695.5	704.0	708.5
8:01:21	909.4	674.1	682.1	686.2
8:02:21	920.7	682.1	689.9	693.8
8:03:21	920.0	677.9	685.6	689.3
8:04:21	911.5	673.2	679.5	681.8
8:05:21	902.9	677.3	682.9	684.6
8:06:21	890.5	724.9	730.1	731.3
8:07:21	887.5	723.3	728.3	729.4
8:08:21	878.5	718.4	723.2	723.9
8:09:21	901.0	728.6	733.2	733.7
8:10:21	953.2	742.3	747.2	748.2
8:11:21	970.0	742.9	748.1	749.2
8:12:21	983.6	738.5	743.6	744.8
8:13:21	973.1	737.1	742.3	743.5
8:14:21	955.1	736.3	741.6	742.8
8:15:21	931.4	720.5	725.7	727.0
8:16:21	910.2	708.1	713.3	714.5
8:17:21	880.8	697.7	703.0	704.2
8:18:21	874.5	716.0	720.8	721.5
8:19:21	874.6	701.5	705.2	705.0

ตาราง ค.1 (ต่อ) ผลการทดลองที่ 1 การเผาผลิผลิตภัณฑ์เซรามิกที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 136 องศาเซลเซียสต่อ ชั่วโมง

เวลา (hr:min:sec)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิบนเตา (°C)	อุณหภูมิกกลางเตา (°C)	อุณหภูมิล่างเตา (°C)
8:20:21	956.4	734.9	738.3	737.8
8:21:21	955.1	768.0	771.4	770.7
8:22:21	960.4	743.2	747.8	748.4
8:23:21	960.3	739.4	744.6	745.8
8:24:21	964.7	739.8	745.2	746.5
8:25:21	985.8	756.0	761.1	762.1
8:26:21	973.4	749.2	754.9	756.6
8:27:21	968.2	734.0	740.0	742.0
8:28:21	956.6	746.2	752.5	754.7
8:29:21	979.6	767.4	773.7	776.0
8:30:21	987.9	762.5	769.0	771.5
8:31:21	981.1	737.3	743.8	746.3
8:32:21	971.2	726.1	733.2	736.4
8:33:21	975.0	732.1	740.1	744.1
8:34:21	977.7	735.7	744.9	750.0
8:35:21	966.1	726.5	737.0	743.4
8:36:21	959.9	724.4	733.4	738.4
8:37:21	986.2	740.8	748.7	752.6
8:38:21	963.7	755.4	763.0	766.5
8:39:21	918.1	764.2	771.2	774.3
8:40:21	871.7	766.4	773.4	776.3
8:41:21	911.2	767.0	773.7	776.4
8:42:21	954.3	780.4	787.0	789.5
8:43:21	957.2	780.6	787.1	789.5
8:44:21	954.8	778.9	785.3	787.6

ตาราง ค.1 (ต่อ) ผลการทดลองที่ 1 การเผาผลิผลิตภัณฑ์เซรามิกที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 136 องศาเซลเซียสต่อ ชั่วโมง

เวลา (hr:min:sec)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิบนเตา (°C)	อุณหภูมิกกลางเตา (°C)	อุณหภูมิล่างเตา (°C)
8:45:21	949.0	772.4	778.7	781.0
8:46:21	941.9	765.2	771.7	774.1
8:47:21	929.3	756.8	763.0	765.3
8:48:21	928.0	759.5	765.7	767.9
8:49:21	947.1	782.2	787.3	788.5
8:50:21	968.4	787.9	792.9	793.9
8:51:21	962.4	778.7	784.3	785.9
8:52:21	933.0	763.3	769.0	770.6
8:53:21	973.1	793.0	798.8	800.7
8:54:21	987.6	799.6	805.5	807.4
8:55:21	991.3	792.0	798.0	799.9
8:56:21	1003.0	814.7	820.7	822.7
8:57:21	992.4	811.5	818.0	820.4
8:58:21	984.4	803.0	806.1	806.8
8:59:21	986.4	807.0	813.1	809.8
9:00:21	988.4	800.0	808.1	809.8
9:01:21	990.4	805.0	817.1	823.8
9:02:21	1000.0	815.0	827.0	833.5
9:03:21	992.0	825.0	834.0	837.2
9:04:21	962.0	837.0	834.0	837.2
9:05:21	932.0	837.2	834.2	837.4
9:06:21	941.5	839.2	836.2	839.4
9:07:21	961.3	840.0	837.0	840.2
9:08:21	957.3	838.0	835.0	838.2
9:09:21	952.7	834.2	831.2	834.4

ตาราง ค.1 (ต่อ) ผลการทดลองที่ 1 การเผาผลิภัณฑ์เซรามิกที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 136 องศาเซลเซียสต่อ ชั่วโมง

เวลา (hr:min:sec)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิบนเตา (°C)	อุณหภูมิกกลางเตา (°C)	อุณหภูมิล่างเตา (°C)
9:10:21	946.7	818.2	823.2	826.4
9:11:21	940.7	800.2	815.2	820.3
9:12:21	933.0	795.6	821.1	825.8
9:13:21	983.0	819.6	825.9	849.0
9:14:21	988.6	806.4	829.7	841.0
9:15:21	986.4	802.4	823.7	819.0

ตาราง ค.2 ผลการทดลองที่ 2 การเผาผลิตภัณฑ์เซรามิกที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 151 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง

เวลา (hr:min:sec)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิตบนเตา (°C)	อุณหภูมิมกกลางเตา (°C)	อุณหภูมิล่างเตา (°C)
0:00:21	37.3	35.3	36.3	38.1
0:01:21	37.4	35.3	36.4	38.1
0:02:21	37.4	35.2	36.2	38.1
0:03:21	38.7	36.5	37.1	38.9
0:04:21	40.7	38.9	38.8	40.5
0:05:21	43.1	41.1	40.4	42.4
0:06:21	44.7	42.2	41.4	43.4
0:07:21	45.4	42.7	41.6	43.9
0:08:21	45.6	42.6	41.5	43.9
0:09:21	45.6	42.7	41.6	43.8
0:10:21	46.1	42.7	41.5	43.8
0:11:21	47.1	43.0	41.7	44.3
0:12:21	50.3	45.2	43.0	46.3
0:13:21	55.3	49.3	45.9	49.1
0:14:21	61.2	53.8	49.5	52.6
0:15:21	68.1	57.9	52.9	56.2
0:16:21	73.1	62.2	56.7	59.4
0:17:21	74.9	66.1	60.2	62.3
0:18:21	74.3	68.4	62.5	64.8
0:19:21	73.2	69.4	63.9	66.6
0:20:21	71.6	69.4	64.4	67.6
0:21:21	70.1	69.1	64.4	68.1
0:22:21	68.2	68.1	64.0	68.2
0:23:21	66.4	66.9	63.4	68.0
0:24:21	64.5	65.7	62.6	67.6
0:25:21	62.8	64.8	61.8	66.7

ตาราง ค.2 (ต่อ) ผลการทดลองที่ 2 การเผาผลิตภัณฑ์เซรามิกที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 151 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง

เวลา (hr:min:sec)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิบนเตา (°C)	อุณหภูมิมกกลางเตา (°C)	อุณหภูมิล่างเตา (°C)
0:25:21	62.8	64.8	61.8	66.7
0:26:21	62.0	64.3	61.7	66.5
0:27:21	61.8	64.5	62.4	66.6
0:28:21	62.4	64.5	63.0	66.7
0:29:21	62.9	64.3	63.5	66.7
0:30:21	64.2	65.8	64.7	67.5
0:31:21	71.2	69.9	67.6	70.0
0:32:21	78.4	75.1	71.8	73.1
0:33:21	83.8	79.0	75.4	75.7
0:34:21	86.7	82.1	78.4	78.2
0:35:21	88.8	84.7	80.9	80.3
0:36:21	96.6	88.3	84.1	82.9
0:37:21	105.0	92.9	87.6	86.1
0:38:21	111.9	96.5	91.1	89.4
0:39:21	116.4	98.2	93.1	91.9
0:40:21	117.8	98.0	93.6	93.1
0:41:21	116.3	96.3	92.2	92.5
0:42:21	112.4	92.7	90.0	90.9
0:43:21	108.3	89.5	87.5	88.7
0:44:21	104.8	87.1	85.6	86.7
0:45:21	102.1	85.0	83.9	85.1
0:46:21	99.0	82.4	81.9	83.5
0:47:21	97.9	82.7	81.3	84.0
0:48:21	98.9	84.9	81.6	87.4

ตาราง ค.2 (ต่อ) ผลการทดลองที่ 2 การเผาผลิผลิตภัณฑ์เซรามิกที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 151 องศาเซลเซียสต่อ ชั่วโมง

เวลา (hr:min:sec)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิบนเตา (°C)	อุณหภูมิกกลางเตา (°C)	อุณหภูมิล่างเตา (°C)
0:49:21	103.3	88.0	83.1	89.7
0:50:21	108.1	92.2	85.9	91.5
0:51:21	111.6	99.2	91.5	97.4
0:52:21	114.1	107.6	99.0	106.5
0:53:21	116.9	110.0	102.4	110.0
0:54:21	113.5	102.4	98.2	106.4
0:55:21	108.0	94.7	92.2	100.5
0:56:21	102.3	90.1	87.7	95.9
0:57:21	98.3	88.1	85.4	93.2
0:58:21	96.7	91.6	86.7	93.5
0:59:21	93.8	94.9	89.3	95.8
1:00:21	90.1	96.3	90.6	97.5
1:01:21	86.8	96.3	90.8	98.5
1:02:21	85.4	97.4	91.3	100.3
1:03:21	88.6	103.3	95.2	105.9
1:04:21	100.5	111.5	101.6	114.0
1:05:21	111.3	117.2	107.1	118.5
1:06:21	120.8	118.8	111.6	126.0
1:07:21	126.4	115.9	111.7	128.4
1:08:21	130.6	114.1	114.0	128.2
1:09:21	140.9	112.5	116.1	128.8
1:10:21	151.0	111.0	117.6	129.4
1:11:21	157.4	109.1	117.4	128.8
1:12:21	155.5	109.2	117.4	130.4
1:13:21	146.3	109.0	117.3	134.4

ตาราง ค.2 (ต่อ) ผลการทดลองที่ 2 การเผาผลิภัณฑ์เซรามิกที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 151 องศาเซลเซียสต่อ ชั่วโมง

เวลา (hr:min:sec)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิบนเตา (°C)	อุณหภูมิกกลางเตา (°C)	อุณหภูมิล่างเตา (°C)
1:14:21	136.7	107.2	115.6	136.5
1:15:21	128.0	104.3	112.5	136.0
1:16:21	120.6	101.4	108.9	133.5
1:17:21	118.8	101.2	106.7	131.7
1:18:21	120.9	103.2	105.9	130.8
1:19:21	122.2	104.2	104.8	128.4
1:20:21	122.6	104.2	103.3	125.4
1:21:21	121.7	103.4	101.6	121.4
1:22:21	119.7	101.8	99.5	117.2
1:23:21	116.7	99.8	97.4	113.1
1:24:21	112.6	99.0	96.1	110.8
1:25:21	108.9	98.5	95.3	108.9
1:26:21	105.4	97.5	94.3	106.9
1:27:21	102.2	96.1	93.2	105.1
1:28:21	101.9	98.5	94.9	106.6
1:29:21	103.5	104.5	100.3	112.1
1:30:21	107.0	112.8	108.7	119.1
1:31:21	113.7	118.2	114.7	126.2
1:32:21	119.5	119.9	116.6	130.2
1:33:21	122.9	118.7	115.7	130.2
1:34:21	124.5	115.8	113.2	127.9
1:35:21	124.2	112.4	110.0	124.3
1:36:21	121.9	109.5	107.1	120.5
1:37:21	120.4	108.6	105.5	118.7
1:38:21	119.9	109.4	105.6	118.6

ตาราง ค.2 (ต่อ) ผลการทดลองที่ 2 การเผาผลิภัณฑ์เซรามิกที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 151 องศาเซลเซียสต่อ ชั่วโมง

เวลา (hr:min:sec)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิบนเตา (°C)	อุณหภูมิกกลางเตา (°C)	อุณหภูมิล่างเตา (°C)
1:39:21	119.5	112.2	107.1	119.8
1:40:21	118.3	117.1	111.2	123.4
1:41:21	117.1	119.5	113.5	125.2
1:42:21	115.5	119.8	113.6	124.5
1:43:21	113.8	119.3	113.2	123.3
1:44:21	112.0	124.2	118.3	127.2
1:45:21	115.6	126.8	120.4	129.1
1:46:21	124.1	129.3	122.8	131.3
1:47:21	132.8	129.9	123.8	132.3
1:48:21	140.3	132.2	125.6	133.5
1:49:21	147.5	135.6	128.2	135.0
1:50:21	152.8	137.4	129.7	136.9
1:51:21	153.9	137.3	129.8	137.4
1:52:21	152.6	136.1	129.1	136.7
1:53:21	149.5	134.5	127.8	135.9
1:54:21	145.0	133.0	126.5	134.8
1:55:21	140.5	130.9	124.9	133.3
1:56:21	142.0	131.1	124.9	132.4
1:57:21	147.6	133.1	126.4	132.3
1:58:21	155.1	136.6	129.2	133.4
1:59:21	161.4	140.6	132.8	135.3
2:00:21	164.9	143.8	135.7	137.4
2:01:21	165.6	146.0	137.9	139.2
2:02:21	163.2	146.5	138.9	140.1
2:03:21	161.2	145.9	138.8	140.0

ตาราง ค.2 (ต่อ) ผลการทดลองที่ 2 การเผาผลิผลิตภัณฑ์เซรามิกที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 151 องศาเซลเซียสต่อ ชั่วโมง

เวลา (hr:min:sec)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิบนเตา (°C)	อุณหภูมิกกลางเตา (°C)	อุณหภูมิล่างเตา (°C)
2:04:21	166.5	147.9	140.3	141.1
2:05:21	176.7	152.5	143.9	144.6
2:06:21	189.0	158.6	149.1	149.6
2:07:21	196.8	164.0	154.0	155.1
2:08:21	200.9	166.8	157.4	158.9
2:09:21	202.1	167.6	159.0	160.5
2:10:21	201.0	170.5	163.5	165.0
2:11:21	196.3	167.0	161.0	163.2
2:12:21	188.9	163.8	158.1	161.3
2:13:21	183.7	162.8	156.6	163.6
2:14:21	203.1	176.8	166.0	178.0
2:15:21	234.8	190.6	179.6	193.8
2:16:21	239.1	193.7	187.0	201.5
2:17:21	223.9	194.1	190.6	208.7
2:18:21	212.0	188.6	188.4	207.5
2:19:21	201.7	182.7	185.4	205.6
2:20:21	194.2	176.8	181.3	202.8
2:21:21	195.3	170.3	175.1	197.1
2:22:21	197.8	172.0	176.3	198.0
2:23:21	201.0	165.7	169.2	189.2
2:24:21	204.4	173.1	175.8	193.1
2:25:21	213.7	193.9	196.0	213.3
2:26:21	224.4	215.5	216.5	234.4
2:27:21	235.6	220.4	219.2	238.4
2:28:21	247.2	225.5	222.0	241.9

ตาราง ค.2 (ต่อ) ผลการทดลองที่ 2 การเผาผลิตภัณฑ์เซรามิกที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 151 องศาเซลเซียสต่อ ชั่วโมง

เวลา (hr:min:sec)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิบนเตา (°C)	อุณหภูมิกกลางเตา (°C)	อุณหภูมิล่างเตา (°C)
2:29:21	259.0	230.6	225.7	246.8
2:30:21	263.2	233.5	228.3	249.6
2:31:21	252.1	232.1	228.0	248.6
2:32:21	243.8	229.1	226.3	244.6
2:33:21	245.1	225.9	223.9	239.8
2:34:21	248.2	225.1	222.4	237.8
2:35:21	251.6	225.5	221.7	236.3
2:36:21	251.7	225.2	220.7	234.0
2:37:21	248.2	222.9	218.4	230.8
2:38:21	242.4	219.0	214.4	225.8
2:39:21	264.3	215.3	210.7	220.8
2:40:21	259.7	214.1	209.0	218.3
2:41:21	259.8	235.0	228.8	237.1
2:42:21	266.9	247.7	239.9	246.7
2:43:21	274.2	254.2	245.8	251.1
2:44:21	277.5	258.0	249.6	254.2
2:45:21	305.3	260.3	252.1	255.6
2:46:21	302.3	260.9	253.1	255.9
2:47:21	297.7	260.1	252.7	254.7
2:48:21	296.6	258.2	251.6	252.8
2:49:21	296.4	255.2	249.6	250.6
2:50:21	291.3	251.4	246.5	249.2
2:51:21	288.1	248.6	244.1	248.0
2:52:21	303.7	246.8	242.6	246.7
2:53:21	302.5	246.5	242.5	248.0

ตาราง ค.2 (ต่อ) ผลการทดลองที่ 2 การเผาผลิผลิตภัณฑ์เซรามิกที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 151 องศาเซลเซียสต่อ ชั่วโมง

เวลา (hr:min:sec)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิบนเตา (°C)	อุณหภูมิกกลางเตา (°C)	อุณหภูมิล่างเตา (°C)
2:54:21	304.1	248.2	244.0	252.3
2:55:21	312.5	255.5	249.2	259.6
2:56:21	313.0	275.2	264.8	271.6
2:57:21	309.2	295.3	282.3	288.8
2:58:21	313.2	303.2	294.0	304.9
2:59:21	320.2	304.4	300.3	318.0
3:00:21	334.8	301.7	304.6	325.5
3:01:21	347.3	294.7	305.1	325.3
3:02:21	341.6	292.1	301.2	321.6
3:03:21	335.7	289.0	296.6	319.0
3:04:21	330.7	287.5	292.7	316.4
3:05:21	335.8	286.6	290.3	314.4
3:06:21	327.9	289.7	289.3	313.5
3:07:21	322.4	297.6	290.8	310.9
3:08:21	318.6	297.9	289.8	306.7
3:09:21	322.6	293.7	286.1	303.2
3:10:21	311.8	291.7	284.3	301.8
3:11:21	321.3	292.0	284.0	300.6
3:12:21	329.1	291.3	283.7	298.7
3:13:21	332.6	289.2	281.9	295.5
3:14:21	335.4	288.0	280.7	293.9
3:15:21	351.2	296.8	287.7	302.4
3:16:21	356.0	314.2	303.1	321.0
3:17:21	363.8	325.3	315.1	334.7
3:18:21	374.9	329.6	320.0	340.0

ตาราง ค.2 (ต่อ) ผลการทดลองที่ 2 การเผาผลิตภัณฑ์เซรามิกที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 151 องศาเซลเซียสต่อ ชั่วโมง

เวลา (hr:min:sec)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิบนเตา (°C)	อุณหภูมิกกลางเตา (°C)	อุณหภูมิล่างเตา (°C)
3:19:21	381.8	331.4	322.1	340.4
3:20:21	379.8	329.3	320.7	337.7
3:21:21	373.9	327.2	318.2	333.5
3:22:21	368.0	327.9	318.1	332.2
3:23:21	368.5	328.8	318.8	333.9
3:24:21	365.9	327.5	318.1	334.2
3:25:21	362.5	323.3	314.8	331.7
3:26:21	359.3	318.4	310.6	327.8
3:27:21	354.7	312.5	305.4	322.8
3:28:21	351.0	308.5	301.3	317.1
3:29:21	365.4	305.3	298.5	312.0
3:30:21	387.7	302.0	295.3	307.5
3:31:21	410.5	318.4	312.2	322.8
3:32:21	419.2	332.0	326.7	336.0
3:33:21	419.1	336.6	330.4	337.6
3:34:21	427.0	353.3	343.2	345.9
3:35:21	420.1	369.6	359.1	360.7
3:36:21	418.7	385.3	373.5	374.6
3:37:21	417.1	393.5	383.0	384.6
3:38:21	414.3	393.7	385.4	388.8
3:39:21	412.5	388.6	382.3	388.3
3:40:21	418.2	380.3	375.2	386.6
3:41:21	419.2	387.2	376.6	385.6
3:42:21	419.5	400.3	386.7	392.3
3:43:21	420.8	413.0	397.6	401.9

ตาราง ค.2 (ต่อ) ผลการทดลองที่ 2 การเผาผลิภัณฑ์เซรามิกที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 151 องศาเซลเซียสต่อ ชั่วโมง

เวลา (hr:min:sec)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิบนเตา (°C)	อุณหภูมิกกลางเตา (°C)	อุณหภูมิล่างเตา (°C)
3:44:21	420.8	417.9	402.6	407.9
3:45:21	419.4	416.2	401.4	408.3
3:46:21	416.6	410.1	396.8	404.9
3:47:21	417.7	402.0	389.8	399.2
3:48:21	427.3	390.9	381.3	394.3
3:49:21	431.7	396.7	384.2	395.4
3:50:21	435.3	422.4	403.8	410.0
3:51:21	442.5	437.8	418.6	424.9
3:52:21	454.6	435.1	418.4	428.8
3:53:21	463.4	432.7	416.2	428.5
3:54:21	470.3	433.6	417.1	429.3
3:55:21	469.6	436.6	419.5	430.5
3:56:21	461.4	433.3	417.6	427.7
3:57:21	456.4	424.0	412.2	422.8
3:58:21	453.1	425.6	419.2	432.5
3:59:21	456.1	440.3	432.2	447.1
4:00:21	449.4	444.7	433.4	448.7
4:01:21	464.9	437.9	424.5	441.8
4:02:21	461.0	435.5	421.7	438.7
4:03:21	466.9	424.4	413.1	432.8
4:04:21	475.1	424.6	411.9	430.0
4:05:21	480.4	444.2	428.2	440.4
4:06:21	488.8	465.0	447.2	454.4
4:07:21	536.3	463.2	448.4	459.8
4:08:21	536.8	463.7	450.4	466.1

ตาราง ค.2 (ต่อ) ผลการทดลองที่ 2 การเผาผลิผลิตภัณฑ์เซรามิกที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 151 องศาเซลเซียสต่อ ชั่วโมง

เวลา (hr:min:sec)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิบนเตา (°C)	อุณหภูมิกกลางเตา (°C)	อุณหภูมิล่างเตา (°C)
4:09:21	522.4	461.5	448.4	469.1
4:10:21	506.1	455.6	442.1	464.8
4:11:21	496.8	446.5	433.7	457.7
4:12:21	511.0	440.1	429.1	453.0
4:13:21	513.1	451.6	437.9	455.5
4:14:21	519.2	471.4	458.1	472.1
4:15:21	531.7	480.0	468.3	481.9
4:16:21	531.7	482.2	469.7	481.0
4:17:21	521.8	480.0	468.4	480.6
4:18:21	510.2	477.6	466.7	480.9
4:19:21	514.0	468.8	459.0	477.1
4:20:21	508.6	469.6	459.9	474.9
4:21:21	501.5	473.5	462.0	474.3
4:22:21	494.6	470.7	458.5	469.6
4:23:21	511.1	466.7	451.8	461.4
4:24:21	529.7	470.7	451.0	456.7
4:25:21	556.0	472.7	449.5	452.1
4:26:21	584.1	470.6	446.2	447.0
4:27:21	599.8	465.7	443.9	447.7
4:28:21	576.3	494.5	470.1	468.5
4:29:21	565.3	524.3	497.4	489.7
4:30:21	601.6	538.8	513.0	507.2
4:31:21	622.4	533.7	512.8	514.8
4:32:21	616.3	537.0	513.9	519.1
4:33:21	605.8	531.0	507.1	516.7

ตาราง ค.2 (ต่อ) ผลการทดลองที่ 2 การเผาผลิผลิตภัณฑ์เซรามิกที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 151 องศาเซลเซียสต่อ ชั่วโมง

เวลา (hr:min:sec)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิบนเตา (°C)	อุณหภูมิกกลางเตา (°C)	อุณหภูมิล่างเตา (°C)
4:34:21	613.5	528.3	507.8	518.5
4:35:21	614.6	530.0	513.9	519.9
4:36:21	598.3	521.7	506.5	513.9
4:37:21	641.5	531.6	518.2	530.7
4:38:21	629.0	534.1	523.6	537.4
4:39:21	598.1	539.4	527.6	540.4
4:40:21	596.1	533.1	525.8	540.9
4:41:21	609.8	540.0	529.1	539.9
4:42:21	635.9	533.2	524.2	536.6
4:43:21	642.1	538.9	524.8	533.1
4:44:21	635.7	537.0	519.3	526.6
4:45:21	625.7	534.3	517.4	524.3
4:46:21	611.8	549.1	530.4	530.6
4:47:21	642.5	551.9	543.8	552.0
4:48:21	673.1	553.8	555.5	580.0
4:49:21	664.2	560.1	567.7	597.4
4:50:21	635.7	554.1	564.8	602.0
4:51:21	617.9	544.6	556.5	600.1
4:52:21	623.6	554.4	563.1	594.0
4:53:21	624.7	556.7	562.9	584.4
4:54:21	622.7	559.2	562.6	576.4
4:55:21	626.0	562.8	563.8	573.4
4:56:21	623.6	571.4	570.2	574.1
4:57:21	644.1	571.6	569.6	574.1
4:58:21	671.1	565.0	564.0	574.2

ตาราง ค.2 (ต่อ) ผลการทดลองที่ 2 การเผาผลิติดังที่เซรามิกที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 151 องศาเซลเซียสต่อ ชั่วโมง

เวลา (hr:min:sec)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิบนเตา (°C)	อุณหภูมิกกลางเตา (°C)	อุณหภูมิล่างเตา (°C)
4:59:21	656.2	571.2	563.0	569.3
5:00:21	646.0	573.8	560.4	566.2
5:01:21	627.5	585.5	571.2	579.2
5:02:21	640.4	592.0	580.0	591.6
5:03:21	654.9	597.2	585.6	594.5
5:04:21	653.4	606.5	591.5	595.1
5:05:21	644.9	609.2	590.9	592.1
5:06:21	634.7	605.6	585.0	586.0
5:07:21	627.5	597.5	577.9	580.8
5:08:21	634.9	600.2	584.5	586.0
5:09:21	645.2	616.7	607.9	599.8
5:10:21	704.9	613.1	609.3	612.2
5:11:21	735.6	608.2	608.7	622.2
5:12:21	718.7	617.4	614.1	621.5
5:13:21	708.9	629.0	621.1	622.1
5:14:21	702.4	636.3	623.6	624.6
5:15:21	681.9	631.2	613.7	618.2
5:16:21	673.6	622.8	606.2	611.0
5:17:21	677.7	624.0	613.2	611.6
5:18:21	679.3	637.9	629.4	620.2
5:19:21	687.6	632.6	619.7	618.4
5:20:21	674.1	612.4	595.9	599.6
5:21:21	650.2	591.1	572.9	578.0
5:22:21	659.6	588.1	577.6	578.1
5:23:21	700.4	614.9	619.7	602.0

ตาราง ค.2 (ต่อ) ผลการทดลองที่ 2 การเผาผลิติดังที่ 2 การเผาผลิติดังที่ 2 เซรามิกที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 151 องศาเซลเซียสต่อ ชั่วโมง

เวลา (hr:min:sec)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิบนเตา (°C)	อุณหภูมิกกลางเตา (°C)	อุณหภูมิล่างเตา (°C)
5:24:21	702.3	639.7	650.5	627.0
5:25:21	712.5	650.6	659.0	645.7
5:26:21	745.0	638.7	645.2	658.8
5:27:21	716.9	633.2	640.0	660.9
5:28:21	672.0	645.3	653.3	661.5
5:29:21	672.8	645.8	649.8	654.5
5:30:21	699.9	635.3	636.2	644.9
5:31:21	702.3	637.6	635.6	638.1
5:32:21	713.3	633.7	626.9	629.2
5:33:21	731.9	634.5	627.7	631.3
5:34:21	717.7	657.5	651.8	649.6
5:35:21	707.8	675.5	668.2	666.0
5:36:21	720.7	677.5	672.7	670.9
5:37:21	747.1	687.0	686.8	680.8
5:38:21	752.8	689.4	686.8	682.3
5:39:21	742.5	683.2	675.7	675.1
5:40:21	735.9	676.5	669.5	669.3
5:41:21	770.3	692.4	696.6	685.0
5:42:21	798.7	704.5	712.9	699.5
5:43:21	797.5	706.2	710.6	701.7
5:44:21	796.7	703.4	706.6	704.2
5:45:21	794.7	684.6	686.9	690.1
5:46:21	788.7	669.9	671.9	673.4
5:47:21	799.4	675.2	678.2	677.4
5:48:21	798.7	674.3	674.7	674.5

ตาราง ค.2 (ต่อ) ผลการทดลองที่ 2 การเผาผลิผลิตภัณฑ์เซรามิกที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 151 องศาเซลเซียสต่อ ชั่วโมง

เวลา (hr:min:sec)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิบนเตา (°C)	อุณหภูมิกกลางเตา (°C)	อุณหภูมิล่างเตา (°C)
5:49:21	814.4	682.4	691.5	685.3
5:50:21	836.0	681.5	689.9	695.7
5:51:21	786.4	679.4	688.3	697.3
5:52:21	775.5	679.9	690.2	701.2
5:53:21	767.2	681.0	690.0	698.3
5:54:21	757.2	678.2	685.2	693.3
5:55:21	779.4	704.2	718.8	734.7
5:56:21	787.0	713.4	722.9	744.7
5:57:21	781.7	715.2	722.5	737.4
5:58:21	766.9	691.5	697.0	712.8
5:59:21	772.2	683.4	701.1	720.3
6:00:21	784.7	665.3	671.4	701.0
6:01:21	758.4	657.7	661.6	685.7
6:02:21	810.4	670.1	681.5	712.2
6:03:21	852.8	694.5	706.3	748.7
6:04:21	837.5	699.3	706.8	746.1
6:05:21	821.6	701.6	711.7	742.1
6:06:21	805.6	701.5	709.9	733.0
6:07:21	792.4	696.8	701.9	721.9
6:08:21	816.6	701.5	711.6	735.2
6:09:21	833.2	707.3	718.8	741.4
6:10:21	837.8	704.8	712.6	712.4
6:11:21	838.8	727.8	733.8	734.1
6:12:21	888.1	737.2	750.3	756.2
6:13:21	904.1	744.4	761.0	771.8

ตาราง ค.2 (ต่อ) ผลการทดลองที่ 2 การเผาผลิภัณฑ์เซรามิกที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 151 องศาเซลเซียสต่อ ชั่วโมง

เวลา (hr:min:sec)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิบนเตา (°C)	อุณหภูมิกกลางเตา (°C)	อุณหภูมิล่างเตา (°C)
6:14:21	897.0	746.2	762.3	775.7
6:15:21	875.9	745.2	759.6	769.7
6:16:21	855.8	742.3	754.7	759.5
6:17:21	885.9	746.2	764.2	770.2
6:18:21	898.5	745.9	760.5	765.8
6:19:21	884.3	741.8	752.1	752.4
6:20:21	891.9	744.2	761.7	764.5
6:21:21	879.1	747.6	766.8	775.5
6:22:21	892.2	747.3	764.1	774.5
6:23:21	887.2	745.5	761.3	769.9
6:24:21	932.4	757.2	785.8	806.3
6:25:21	899.2	757.2	781.0	803.4
6:26:21	899.3	756.4	773.6	796.6
6:27:21	915.3	754.3	770.8	786.4
6:28:21	903.6	757.9	779.7	804.9
6:29:21	915.6	763.7	791.5	813.4
6:30:21	927.6	767.2	795.5	817.0
6:31:21	939.6	769.4	796.3	816.6
6:32:21	926.0	773.1	802.5	822.0
6:33:21	951.7	788.9	815.6	836.2
6:34:21	960.7	790.3	804.2	807.2
6:35:21	934.3	781.5	790.6	792.4
6:36:21	950.8	793.1	808.2	811.4
6:37:21	971.4	813.2	825.4	832.7
6:38:21	965.8	798.2	807.6	804.0

ตาราง ค.2 (ต่อ) ผลการทดลองที่ 2 การเผาผลิผลิตภัณฑ์เซรามิกที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 151 องศาเซลเซียสต่อ ชั่วโมง

เวลา (hr:min:sec)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิบนเตา (°C)	อุณหภูมิกกลางเตา (°C)	อุณหภูมิล่างเตา (°C)
6:39:21	965.1	821.6	838.9	841.2
6:40:21	975.7	819.3	830.7	827.0
6:41:21	953.5	801.5	800.5	806.5
6:42:21	960.2	800.2	807.2	813.2
6:43:21	967.2	807.2	814.2	820.2
6:44:21	953.7	793.7	800.7	806.7
6:45:21	946.9	786.9	793.9	799.9
6:46:21	973.7	813.7	820.7	842.7
6:47:21	971.2	811.2	818.2	827.7
6:48:21	959.4	814.4	819.4	839.4
6:49:21	961.1	821.1	826.1	846.1
6:50:21	967.5	827.5	832.5	852.5
6:51:21	964.2	824.2	829.2	849.2
6:52:21	960.8	820.8	825.8	845.8
6:53:21	957.2	817.2	822.2	842.2
6:54:21	953.4	813.4	818.4	835.8
6:55:21	942.6	802.6	807.6	827.0
6:56:21	945.2	805.2	810.2	830.2
6:57:21	966.5	826.5	831.5	851.5
6:58:21	960.0	820.0	825.0	845.0
6:59:21	953.5	813.5	818.5	838.5
7:00:21	949.5	809.5	814.5	834.5
7:01:21	955.9	815.9	820.9	840.9
7:02:21	962.2	822.2	827.2	847.2
7:03:21	961.8	821.8	826.8	846.8

ตาราง ค.2 (ต่อ) ผลการทดลองที่ 2 การเผาผลิตภัณฑ์เซรามิกที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 151 องศาเซลเซียสต่อ ชั่วโมง

เวลา (hr:min:sec)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิตบนเตา (°C)	อุณหภูมิมกกลางเตา (°C)	อุณหภูมิล่างเตา (°C)
7:04:21	957.7	817.7	822.7	842.7
7:05:21	953.6	813.6	818.6	838.6
7:06:21	949.6	809.6	814.6	834.6
7:07:21	945.5	805.5	810.5	830.5
7:08:21	949.1	809.1	814.1	834.1

ตาราง ค.3 ผลการทดลองที่ 3 การเผาผลิตภัณฑ์เซรามิกที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 163 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง

เวลา (hr:min:sec)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิตบนเตา (°C)	อุณหภูมิมกกลางเตา (°C)	อุณหภูมิล่างเตา (°C)
0:00:21	40.9	38.7	38.6	37.8
0:01:21	48.2	43.0	44.8	45.0
0:02:21	53.6	46.2	49.5	51.1
0:03:21	65.1	50.4	54.9	59.1
0:04:21	72.5	55.4	60.6	68.6
0:05:21	80.0	60.3	65.1	76.7
0:06:21	87.8	64.9	68.9	83.6
0:07:21	95.1	71.2	74.4	92.7
0:08:21	104.7	75.2	77.8	97.7
0:09:21	101.8	75.3	77.6	95.6
0:10:21	106.1	85.5	82.4	101.8
0:11:21	109.9	90.9	86.4	102.9
0:12:21	121.2	100.1	94.8	106.8
0:13:21	127.2	102.8	97.1	104.8
0:14:21	114.9	102.1	96.0	100.9
0:15:21	116.9	101.3	94.9	98.0
0:16:21	115.1	98.5	92.3	94.2
0:17:21	112.3	96.1	89.6	91.5
0:18:21	109.8	94.7	88.2	90.7
0:19:21	107.4	93.4	86.8	89.2
0:20:21	104.9	91.3	85.0	86.9
0:21:21	102.1	88.6	82.5	84.0
0:22:21	102.6	88.5	82.8	83.7
0:23:21	104.7	90.7	85.0	86.8
0:24:21	107.1	93.1	87.6	90.2
0:25:21	109.0	95.3	90.0	93.6
0:26:21	111.0	97.5	92.3	96.4

ตาราง ค.3 (ต่อ) ผลการทดลองที่ 3 การเผาผลิตภัณฑ์เซรามิกที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 163 องศาเซลเซียสต่อ ชั่วโมง

เวลา (hr:min:sec)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิบนเตา (°C)	อุณหภูมิมกกลางเตา (°C)	อุณหภูมิล่างเตา (°C)
0:26:21	111.0	97.5	92.3	96.4
0:27:21	113.1	99.1	93.6	96.2
0:28:21	115.0	101.3	96.0	99.6
0:29:21	116.6	102.6	96.8	98.7
0:30:21	119.0	105.2	99.5	102.1
0:31:21	117.5	102.5	97.8	99.2
0:32:21	114.1	97.3	94.7	97.1
0:33:21	112.2	93.6	93.2	96.5
0:34:21	109.9	88.7	89.9	90.9
0:35:21	108.1	85.0	88.3	90.2
0:36:21	106.4	81.4	86.8	89.6
0:37:21	104.5	78.1	85.7	89.2
0:38:21	105.1	80.8	87.5	93.3
0:39:21	109.7	82.1	88.5	92.0
0:40:21	112.0	82.7	89.0	91.3
0:41:21	113.1	83.9	90.3	92.1
0:42:21	114.5	86.4	92.5	95.0
0:43:21	116.2	89.2	95.2	97.8
0:44:21	117.6	91.3	97.6	99.7
0:45:21	119.0	92.7	99.2	100.8
0:46:21	120.2	93.7	100.5	101.4
0:47:21	120.4	93.7	100.7	102.1
0:48:21	120.7	94.2	101.3	103.7
0:49:21	120.8	94.5	101.8	105.1
0:50:21	120.9	94.7	102.1	106.0

ตาราง ค.3 (ต่อ) ผลการทดลองที่ 3 การเผาผลิตรายที่เซรามิกที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 163 องศาเซลเซียสต่อ ชั่วโมง

เวลา (hr:min:sec)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิบนเตา (°C)	อุณหภูมิกกลางเตา (°C)	อุณหภูมิล่างเตา (°C)
0:51:21	125.4	94.2	102.9	119.0
0:52:21	131.2	97.4	104.8	116.3
0:53:21	133.8	96.7	101.9	109.6
0:54:21	119.5	94.0	97.8	99.7
0:55:21	122.3	100.2	102.7	105.4
0:56:21	121.9	98.8	101.5	103.0
0:57:21	121.1	98.4	100.8	102.3
0:58:21	120.6	99.0	101.4	103.5
0:59:21	120.2	99.7	102.0	104.0
1:00:21	115.7	98.1	104.6	107.5
1:01:21	117.0	98.2	109.0	117.5
1:02:21	117.3	105.2	111.6	113.5
1:03:21	123.2	101.2	97.0	99.5
1:04:21	122.2	100.0	95.8	98.1
1:05:21	126.2	105.2	98.0	99.1
1:06:21	132.0	110.5	102.4	102.6
1:07:21	139.5	110.1	103.2	101.2
1:08:21	159.2	122.8	112.6	109.1
1:09:21	172.8	132.5	121.4	116.4
1:10:21	179.6	135.1	125.0	120.3
1:11:21	181.6	133.5	125.7	121.8
1:12:21	179.2	130.3	124.3	121.4
1:13:21	179.5	142.3	134.0	144.0
1:14:21	194.7	150.2	142.1	155.2
1:15:21	206.3	157.8	151.8	164.0
1:16:21	205.3	157.9	154.7	163.8

ตาราง ค.3 (ต่อ) ผลการทดลองที่ 3 การเผาผลิตภัณฑ์เซรามิกที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 163 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง

เวลา (hr:min:sec)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิบนเตา (°C)	อุณหภูมิกกลางเตา (°C)	อุณหภูมิล่างเตา (°C)
1:17:21	193.7	154.2	151.1	157.6
1:18:21	180.7	155.6	152.2	157.9
1:19:21	180.3	155.1	152.4	157.0
1:20:21	191.5	153.0	150.5	154.0
1:21:21	189.5	150.9	148.6	151.2
1:22:21	186.8	150.8	148.3	150.7
1:23:21	180.3	151.7	149.2	150.9
1:24:21	179.0	149.2	146.8	149.5
1:25:21	187.4	154.9	151.5	154.8
1:26:21	185.2	160.6	157.0	159.6
1:27:21	182.5	165.6	162.2	163.9
1:28:21	178.0	168.7	165.3	165.6
1:29:21	173.2	169.8	166.0	165.1
1:30:21	180.2	168.7	164.5	161.8
1:31:21	180.8	166.7	162.1	159.8
1:32:21	185.5	164.7	160.3	158.6
1:33:21	185.9	164.3	159.5	158.5
1:34:21	194.0	168.1	163.9	165.4
1:35:21	205.8	175.2	172.9	179.7
1:36:21	212.4	184.9	184.7	193.1
1:37:21	219.0	204.9	205.8	215.0
1:38:21	232.9	211.3	213.3	220.3
1:39:21	243.6	208.8	210.0	215.1
1:40:21	249.7	210.2	210.5	215.8
1:41:21	252.5	207.3	207.4	211.5
1:42:21	249.8	202.8	202.2	205.2

ตาราง ค.3 (ต่อ) ผลการทดลองที่ 3 การเผาผลิตภัณฑ์เซรามิกที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 163 องศาเซลเซียสต่อ ชั่วโมง

เวลา (hr:min:sec)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิบนเตา (°C)	อุณหภูมิกกลางเตา (°C)	อุณหภูมิล่างเตา (°C)
1:43:21	244.5	201.9	200.6	203.8
1:44:21	238.3	205.2	203.9	207.1
1:45:21	230.3	208.4	206.1	208.9
1:46:21	225.3	208.4	205.7	207.4
1:47:21	225.1	206.7	203.8	206.6
1:48:21	228.6	210.6	207.7	212.6
1:49:21	229.2	220.7	217.5	222.1
1:50:21	234.5	227.0	225.2	230.0
1:51:21	261.8	219.6	217.9	219.7
1:52:21	261.7	217.4	213.9	215.2
1:53:21	257.7	220.3	216.8	218.4
1:54:21	253.5	225.1	220.8	223.4
1:55:21	249.0	228.3	223.0	224.8
1:56:21	244.6	229.5	223.4	223.9
1:57:21	241.1	228.2	221.1	220.9
1:58:21	239.1	223.6	216.3	216.5
1:59:21	246.5	223.4	216.6	218.1
2:00:21	250.1	225.3	218.5	220.1
2:01:21	247.9	232.2	224.1	225.4
2:02:21	247.8	245.5	236.2	237.9
2:03:21	253.3	256.5	248.1	250.5
2:04:21	270.0	253.4	246.3	248.5
2:05:21	276.2	260.3	253.4	257.3
2:06:21	276.4	267.0	260.6	264.4
2:07:21	274.5	270.0	263.4	266.2
2:08:21	272.1	268.1	261.5	263.1

ตาราง ค.3 (ต่อ) ผลการทดลองที่ 3 การเผาผลิตก๊าซซีรามิกที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 163 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง

เวลา (hr:min:sec)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิบนเตา (°C)	อุณหภูมิกกลางเตา (°C)	อุณหภูมิล่างเตา (°C)
2:09:21	281.3	262.3	256.0	258.0
2:10:21	279.3	259.5	252.9	255.3
2:11:21	274.9	262.2	254.8	257.2
2:12:21	274.7	263.5	257.8	260.8
2:13:21	274.2	264.0	259.1	261.8
2:14:21	272.4	263.7	258.8	260.9
2:15:21	291.3	264.7	258.9	262.7
2:16:21	301.2	276.8	273.0	280.0
2:17:21	308.5	295.7	293.6	301.6
2:18:21	317.0	312.8	312.0	321.4
2:19:21	330.7	306.9	305.1	310.3
2:20:21	330.5	306.4	302.9	309.0
2:21:21	332.1	301.6	298.4	303.8
2:22:21	334.5	298.0	294.2	299.3
2:23:21	328.7	299.7	296.3	302.0
2:24:21	319.9	301.7	296.9	302.4
2:25:21	311.7	297.7	292.4	296.4
2:26:21	317.1	297.0	292.5	297.7
2:27:21	324.0	313.9	313.0	320.2
2:28:21	331.6	326.7	326.5	332.6
2:29:21	338.7	322.2	320.0	324.7
2:30:21	338.6	326.9	323.8	330.3
2:31:21	340.9	324.4	321.0	327.8
2:32:21	336.4	324.0	319.7	326.4
2:33:21	329.9	321.3	316.2	321.8
2:34:21	332.8	319.4	317.6	325.3

ตาราง ค.3 (ต่อ) ผลการทดลองที่ 3 การเผาผลิตก๊าซซีรามิกที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 163 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง

เวลา (hr:min:sec)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิบนเตา (°C)	อุณหภูมิกกลางเตา (°C)	อุณหภูมิล่างเตา (°C)
2:35:21	330.3	321.6	319.5	327.7
2:36:21	340.7	327.5	326.5	336.6
2:37:21	360.6	333.6	333.4	345.5
2:38:21	371.8	344.3	345.6	360.8
2:39:21	377.2	351.8	355.2	372.2
2:40:21	375.9	353.1	356.1	370.9
2:41:21	381.6	355.5	357.9	373.1
2:42:21	403.9	361.7	364.9	381.7
2:43:21	400.0	359.8	361.1	375.1
2:44:21	416.4	364.8	360.8	374.8
2:45:21	434.0	365.0	356.3	369.0
2:46:21	421.0	360.9	349.1	360.7
2:47:21	410.2	355.0	344.7	353.9
2:48:21	402.0	354.7	343.5	353.6
2:49:21	397.3	362.7	348.9	359.0
2:50:21	394.1	368.2	352.7	361.3
2:51:21	391.4	369.7	353.3	360.7
2:52:21	389.9	372.3	355.0	362.2
2:53:21	389.7	378.3	359.2	366.2
2:54:21	389.3	377.3	358.6	363.9
2:55:21	387.7	372.8	355.0	358.7
2:56:21	385.9	368.6	352.9	355.8
2:57:21	387.2	382.7	368.4	376.9
2:58:21	396.0	381.4	370.2	378.9
2:59:21	403.5	386.2	377.1	385.8
3:00:21	436.9	437.5	421.1	413.1

ตาราง ค.3 (ต่อ) ผลการทดลองที่ 3 การเผาผลิตรายที่เซรามิกที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 163 องศาเซลเซียสต่อ ชั่วโมง

เวลา (hr:min:sec)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิบนเตา (°C)	อุณหภูมิกกลางเตา (°C)	อุณหภูมิล่างเตา (°C)
3:01:21	431.0	434.4	420.3	412.9
3:02:21	428.1	435.0	421.8	415.5
3:03:21	445.7	449.2	432.5	426.0
3:04:21	463.4	458.6	441.2	436.5
3:05:21	475.7	454.5	443.1	446.2
3:06:21	482.2	455.8	447.4	450.6
3:07:21	502.2	459.2	452.4	462.5
3:08:21	559.0	456.4	453.6	483.4
3:09:21	576.2	457.6	454.1	482.2
3:10:21	565.3	472.9	462.1	479.4
3:11:21	531.2	464.8	463.4	478.0
3:12:21	499.9	452.3	450.0	463.7
3:13:21	507.7	444.3	441.2	447.0
3:14:21	512.9	447.7	441.1	441.8
3:15:21	509.5	450.0	441.0	438.2
3:16:21	509.8	451.1	440.6	435.2
3:17:21	488.7	455.2	443.6	440.4
3:18:21	474.0	461.1	448.7	448.4
3:19:21	480.5	466.0	452.1	456.7
3:20:21	483.1	467.7	453.6	456.9
3:21:21	497.4	471.8	458.2	460.5
3:22:21	541.3	485.7	472.6	476.3
3:23:21	579.4	500.4	489.2	499.1
3:24:21	619.3	502.4	508.3	537.4
3:25:21	647.9	501.2	518.9	542.3
3:26:21	647.5	503.8	523.7	544.4

ตาราง ค.3 (ต่อ) ผลการทดลองที่ 3 การเผาผลิตรีดิวซ์เซรามิกที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 163 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง

เวลา (hr:min:sec)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิต่อนเตา (°C)	อุณหภูมิมกกลางเตา (°C)	อุณหภูมิล่างเตา (°C)
3:27:21	640.0	508.9	528.1	539.7
3:28:21	622.6	505.8	520.5	529.8
3:29:21	596.9	510.3	517.5	520.9
3:30:21	580.4	513.7	516.8	530.7
3:31:21	566.8	511.5	514.8	525.2
3:32:21	558.3	510.3	509.8	516.4
3:33:21	580.3	524.8	517.6	522.1
3:34:21	602.3	529.6	523.6	528.3
3:35:21	624.3	506.9	512.9	526.4
3:36:21	646.3	481.9	468.7	471.6
3:37:21	605.6	496.9	485.1	493.4
3:38:21	605.6	503.0	502.9	529.3
3:39:21	587.2	504.3	516.3	555.2
3:40:21	534.1	498.6	522.2	569.5
3:41:21	572.0	512.4	525.3	559.0
3:42:21	609.9	504.5	521.5	555.2
3:43:21	646.2	509.8	518.2	539.7
3:44:21	647.4	512.6	516.7	531.5
3:45:21	643.9	512.7	515.4	527.6
3:46:21	625.4	508.7	509.5	517.1
3:47:21	602.4	520.3	514.9	519.8
3:48:21	582.5	534.1	524.2	528.0
3:49:21	572.6	508.1	513.7	527.9
3:50:21	608.6	508.5	507.4	520.1
3:51:21	660.0	538.5	539.4	558.1
3:52:21	606.0	528.5	529.8	549.7

ตาราง ค.3 (ต่อ) ผลการทดลองที่ 3 การเผาผลิตรีดที่เซรามิกที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 163 องศาเซลเซียสต่อ ชั่วโมง

เวลา (hr:min:sec)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิบนเตา (°C)	อุณหภูมิกกลางเตา (°C)	อุณหภูมิล่างเตา (°C)
3:53:21	609.2	526.9	528.1	549.6
3:54:21	622.4	528.9	528.0	550.0
3:55:21	660.8	560.8	529.8	552.4
3:56:21	709.4	586.5	553.8	577.0
3:57:21	683.9	578.8	563.4	574.5
3:58:21	675.0	574.5	562.3	573.3
3:59:21	680.6	585.7	573.1	583.6
4:00:21	662.3	578.8	569.2	579.7
4:01:21	634.4	572.6	564.9	573.2
4:02:21	620.1	570.2	563.1	569.3
4:03:21	627.2	568.9	562.6	568.6
4:04:21	614.5	561.0	556.2	564.1
4:05:21	633.9	579.9	571.7	580.7
4:06:21	668.6	601.8	589.6	597.6
4:07:21	669.8	603.0	592.6	600.3
4:08:21	659.8	607.0	596.7	604.7
4:09:21	657.2	605.3	596.3	607.1
4:10:21	654.7	603.9	595.7	607.9
4:11:21	665.5	619.0	607.5	618.4
4:12:21	678.5	635.2	621.2	630.5
4:13:21	680.8	625.4	615.7	625.6
4:14:21	695.4	625.3	616.4	624.9
4:15:21	700.2	619.8	612.4	621.4
4:16:21	713.6	624.0	614.7	623.9
4:17:21	726.3	636.1	624.6	632.9
4:18:21	711.8	632.0	622.2	632.4

ตาราง ค.3 (ต่อ) ผลการทดลองที่ 3 การเผาผลิตก๊าซเซรามิกที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 163 องศาเซลเซียสต่อ ชั่วโมง

เวลา (hr:min:sec)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิบนเตา (°C)	อุณหภูมิกกลางเตา (°C)	อุณหภูมิล่างเตา (°C)
4:19:21	736.5	639.7	628.3	637.0
4:20:21	719.5	642.9	632.9	641.2
4:21:21	723.2	660.9	647.2	660.6
4:22:21	769.3	691.3	672.7	689.5
4:23:21	773.1	692.1	678.1	696.9
4:24:21	759.4	686.4	675.4	694.8
4:25:21	756.4	688.0	677.2	694.1
4:26:21	748.7	689.0	679.0	693.8
4:27:21	752.4	691.1	681.8	695.2
4:28:21	758.2	692.5	683.2	695.3
4:29:21	786.8	691.1	682.5	692.8
4:30:21	781.8	685.0	678.9	688.2
4:31:21	750.0	671.9	670.1	677.8
4:32:21	719.2	660.8	662.5	671.4
4:33:21	686.1	643.2	648.5	658.3
4:34:21	667.0	630.0	636.1	646.3
4:35:21	685.6	638.0	638.0	650.1
4:36:21	709.2	653.4	648.3	660.0
4:37:21	720.1	662.0	655.7	666.9
4:38:21	730.3	668.7	661.7	672.9
4:39:21	741.6	675.7	667.9	678.5
4:40:21	758.6	683.4	674.4	684.0
4:41:21	743.3	684.1	676.1	683.7
4:42:21	733.2	682.7	675.3	682.0
4:43:21	754.8	685.4	678.3	686.3
4:44:21	794.8	692.7	685.5	694.7

ตาราง ค.3 (ต่อ) ผลการทดลองที่ 3 การเผาผลิตภักดิ์เซรามิกที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 163 องศาเซลเซียสต่อ ชั่วโมง

เวลา (hr:min:sec)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิบนเตา (°C)	อุณหภูมิกกลางเตา (°C)	อุณหภูมิล่างเตา (°C)
4:45:21	832.3	698.4	691.7	701.8
4:46:21	832.6	699.3	693.9	704.4
4:47:21	821.8	695.8	691.5	702.5
4:48:21	805.7	701.3	694.9	704.8
4:49:21	828.0	719.3	709.5	721.0
4:50:21	864.6	732.9	722.7	734.5
4:51:21	874.1	731.0	723.2	735.3
4:52:21	865.4	722.9	718.4	730.5
4:53:21	850.7	722.7	717.9	731.0
4:54:21	858.0	732.4	724.6	737.4
4:55:21	837.9	730.3	723.7	735.5
4:56:21	805.7	717.7	714.1	724.2
4:57:21	794.9	707.0	705.8	715.0
4:58:21	796.0	708.5	706.6	715.9
4:59:21	801.0	718.5	713.5	723.1
5:00:21	842.4	730.6	723.5	733.5
5:01:21	872.5	740.8	733.4	744.0
5:02:21	831.3	743.7	737.4	747.3
5:03:21	805.7	730.4	728.8	738.4
5:04:21	792.9	726.3	724.5	734.2
5:05:21	794.4	733.9	730.0	744.1
5:06:21	814.4	745.5	740.3	756.5
5:07:21	832.9	754.2	749.0	766.0
5:08:21	840.9	761.5	756.1	772.9
5:09:21	857.9	765.4	760.0	775.6
5:10:21	876.7	768.1	763.1	777.9

ตาราง ค.3 (ต่อ) ผลการทดลองที่ 3 การเผาผลิตก๊าซเซรามิกที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 163 องศาเซลเซียสต่อ ชั่วโมง

เวลา (hr:min:sec)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิต่อนเตา (°C)	อุณหภูมิมกกลางเตา (°C)	อุณหภูมิล่างเตา (°C)
5:11:21	878.5	773.4	768.5	784.4
5:12:21	865.0	773.1	768.5	784.0
5:13:21	858.0	774.2	770.3	786.4
5:14:21	850.5	768.1	766.4	781.3
5:15:21	862.9	761.4	761.0	775.3
5:16:21	847.0	750.8	752.3	766.6
5:17:21	867.9	755.7	754.2	768.8
5:18:21	853.3	751.4	750.8	765.1
5:19:21	857.2	750.0	748.8	763.6
5:20:21	885.8	760.8	757.5	773.6
5:21:21	912.1	773.7	769.2	786.6
5:22:21	930.6	786.7	781.8	800.7
5:23:21	935.9	797.1	793.8	813.2
5:24:21	946.9	800.1	799.8	820.0
5:25:21	946.7	798.2	803.4	823.6
5:26:21	935.6	795.6	801.9	820.9
5:27:21	946.5	798.3	802.9	821.3
5:28:21	950.6	797.7	802.0	818.2
5:29:21	942.1	797.5	801.6	818.6
5:30:21	905.5	783.5	790.6	806.6
5:31:21	884.0	771.8	781.0	796.7
5:32:21	896.7	781.5	786.5	804.8
5:33:21	939.7	805.9	807.3	828.3
5:34:21	969.1	821.2	822.6	839.8
5:35:21	926.7	802.8	809.5	823.4
5:36:21	942.6	811.7	815.3	830.9

ตาราง ค.3 (ต่อ) ผลการทดลองที่ 3 การเผาผลิตภัณฑ์เซรามิกที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 163 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง

เวลา (hr:min:sec)	อุณหภูมิ Burner (°C)	อุณหภูมิบนเตา (°C)	อุณหภูมิกกลางเตา (°C)	อุณหภูมิล่างเตา (°C)
5:37:21	907.2	803.0	810.3	823.2
5:38:21	878.0	790.1	799.4	811.6
5:39:21	880.0	788.3	795.8	809.3
5:40:21	885.4	789.2	794.8	809.2
5:41:21	899.0	798.0	800.5	815.8
5:42:21	905.0	799.9	802.9	817.3
5:43:21	912.2	798.8	802.7	817.2
5:44:21	913.0	799.1	801.7	817.0
5:45:21	925.0	803.1	805.8	822.4
5:46:21	933.3	803.1	808.6	824.8
5:47:21	914.9	800.0	806.3	822.2
5:48:21	895.7	793.2	800.8	816.0
5:49:21	935.2	807.6	809.6	827.5
5:50:21	907.6	801.0	806.8	822.2

ตาราง ค.4 ผลการทดลองการเผาผลิตภัณฑ์เซรามิกที่ใช้โปรแกรม PLC ควบคุม

เวลา (hr:min:sec)	อุณหภูมิที่กำหนด (°C)	อุณหภูมิควบคุมในเตา (°C)	อุณหภูมิ burner (°C)
0:01:10	40	37	38
0:02:10	40	37	38
0:03:10	40	37	38
0:04:10	40	38	38
0:05:10	40	38	38
0:06:10	40	38	38
0:07:10	40	38	39
0:08:10	40	38	39
0:09:10	40	38	38
0:10:10	40	38	38
0:11:10	40	38	38
0:12:10	40	38	38
0:13:10	40	38	39
0:14:10	40	40	41
0:15:10	100	44	45
0:16:10	100	48	54
0:17:10	100	62	64
0:18:10	100	69	69
0:19:10	100	76	73
0:20:10	100	82	77
0:21:10	100	90	88
0:22:10	100	97	93
0:23:10	100	102	97
0:24:10	100	108	102
0:25:10	100	112	106
0:26:10	100	113	109
0:27:10	100	110	111
0:28:10	100	107	111
0:29:10	100	105	112
0:30:10	100	101	111

ตาราง ค.4 (ต่อ) ผลการทดลองการเผาผลิตถ่านซีเซรามิกที่ใช้โปรแกรม PLC ควบคุม

เวลา (hr:min:sec)	อุณหภูมิที่กำหนด (°C)	อุณหภูมิควบคุมในเตา (°C)	อุณหภูมิ burner (°C)
0:31:10	100	97	109
0:32:10	100	93	108
0:33:10	100	91	107
0:34:10	100	90	106
0:35:10	100	91	107
0:36:10	100	92	107
0:37:10	100	94	109
0:38:10	100	101	113
0:39:10	100	108	118
0:40:10	100	114	123
0:41:10	100	117	126
0:42:10	100	117	128
0:43:10	100	115	128
0:44:10	100	112	127
0:45:10	100	109	126
0:46:10	100	106	124
0:47:10	100	103	122
0:48:10	100	104	122
0:49:10	100	108	123
0:50:10	100	106	121
0:51:10	100	103	120
0:52:10	100	100	118
0:53:10	100	100	118
0:54:10	100	106	120
0:55:10	100	110	123
0:56:10	100	112	125
0:57:10	100	114	127
0:58:10	100	114	129

ตาราง ค.4 (ต่อ) ผลการทดลองการเผาผลิตภัณฑ์เซรามิกที่ใช้โปรแกรม PLC ควบคุม

เวลา (hr:min:sec)	อุณหภูมิที่กำหนด (°C)	อุณหภูมิควบคุมในเตา (°C)	อุณหภูมิ burner (°C)
0:59:10	100	113	129
1:00:10	100	111	128
1:01:10	100	110	128
1:02:10	100	111	128
1:03:10	100	110	127
1:04:10	100	107	125
1:05:10	100	104	124
1:06:10	100	106	124
1:07:10	100	109	125
1:08:10	100	109	126
1:09:10	100	109	126
1:10:10	100	109	127
1:11:10	100	109	128
1:12:10	100	108	128
1:13:10	100	107	127
1:14:10	100	108	127
1:15:10	100	107	127
1:16:10	100	105	126
1:17:10	100	104	125
1:18:10	100	103	124
1:19:10	100	102	123
1:20:10	100	104	123
1:21:10	100	107	125
1:22:10	103	110	128
1:23:10	105	113	131
1:24:10	108	115	133
1:25:10	111	118	136
1:26:10	113	121	139
1:27:10	116	122	140
1:28:10	119	122	141

ตาราง ค.4 (ต่อ) ผลการทดลองการเผาผลิตภัณฑ์เซรามิกที่ใช้โปรแกรม PLC ควบคุม

เวลา (hr:min:sec)	อุณหภูมิที่กำหนด (°C)	อุณหภูมิควบคุมในเตา (°C)	อุณหภูมิ burner (°C)
1:29:10	121	123	142
1:30:10	124	127	144
1:31:10	127	130	146
1:32:10	129	132	148
1:33:10	132	136	152
1:34:10	135	143	158
1:35:10	137	151	165
1:36:10	140	155	169
1:37:10	143	155	170
1:38:10	145	151	169
1:39:10	148	147	168
1:40:10	151	145	166
1:41:10	153	150	168
1:42:10	156	158	174
1:43:10	159	166	182
1:44:10	161	174	189
1:45:10	164	181	197
1:46:10	167	184	199
1:47:10	169	185	197
1:48:10	172	184	194
1:49:10	175	182	193
1:50:10	177	182	194
1:51:10	180	181	196
1:52:10	183	189	201
1:53:10	185	191	203
1:54:10	188	187	202
1:55:10	191	187	203
1:56:10	193	189	204
1:57:10	196	187	204
1:58:10	199	199	210

ตาราง ค.4 (ต่อ) ผลการทดลองการเผาผลิตก๊าซเซรามิกที่ใช้โปรแกรม PLC ควบคุม

เวลา (hr:min:sec)	อุณหภูมิที่กำหนด (°C)	อุณหภูมิควบคุมในเตา (°C)	อุณหภูมิ burner (°C)
1:59:10	201	222	222
2:00:10	204	236	230
2:01:10	207	232	235
2:02:10	209	220	231
2:03:10	212	211	227
2:04:10	215	208	225
2:05:10	217	210	227
2:06:10	220	214	231
2:07:10	223	218	235
2:08:10	225	224	240
2:09:10	228	235	249
2:10:10	231	244	256
2:11:10	233	245	259
2:12:10	236	240	259
2:13:10	239	232	255
2:14:10	241	228	252
2:15:10	244	230	252
2:16:10	247	231	253
2:17:10	249	242	258
2:18:10	252	247	262
2:19:10	255	250	265
2:20:10	257	253	269
2:21:10	260	259	276
2:22:10	263	267	280
2:23:10	265	269	282
2:24:10	268	267	282
2:25:10	271	268	285
2:26:10	273	271	288
2:27:10	276	276	293
2:28:10	279	280	299

ตาราง ค.4 (ต่อ) ผลการทดลองการเผาผลิตถ่านซีเซรามิกที่ใช้โปรแกรม PLC ควบคุม

เวลา (hr:min:sec)	อุณหภูมิที่กำหนด (°C)	อุณหภูมิควบคุมในเตา (°C)	อุณหภูมิ burner (°C)
2:29:10	281	281	301
2:30:10	284	281	301
2:31:10	287	281	303
2:32:10	289	284	307
2:33:10	292	286	308
2:34:10	295	290	310
2:35:10	297	291	311
2:36:10	300	290	310
2:37:10	303	293	311
2:38:10	305	302	318
2:39:10	308	310	330
2:40:10	311	314	335
2:41:10	313	313	336
2:42:10	316	311	335
2:43:10	319	309	334
2:44:10	321	311	335
2:45:10	324	316	339
2:46:10	327	322	342
2:47:10	329	324	345
2:48:10	332	330	349
2:49:10	335	337	354
2:50:10	337	335	353
2:51:10	340	344	360
2:52:10	343	345	361
2:53:10	345	350	366
2:54:10	348	358	374
2:55:10	351	349	370
2:56:10	353	345	369
2:57:10	356	351	372
2:58:10	359	357	376

ตาราง ค.4 (ต่อ) ผลการทดลองการเผาผลิตก๊าซเซรามิกที่ใช้โปรแกรม PLC ควบคุม

เวลา (hr:min:sec)	อุณหภูมิที่กำหนด (°C)	อุณหภูมิควบคุมในเตา (°C)	อุณหภูมิ burner (°C)
2:59:10	361	362	381
3:00:10	364	366	384
3:01:10	367	369	388
3:02:10	369	371	390
3:03:10	372	369	389
3:04:10	375	364	386
3:05:10	377	355	381
3:06:10	380	348	376
3:07:10	383	357	379
3:08:10	385	373	389
3:09:10	388	390	403
3:10:10	391	404	415
3:11:10	393	397	412
3:12:10	396	395	413
3:13:10	399	397	417
3:14:10	401	391	416
3:15:10	404	389	416
3:16:10	407	406	429
3:17:10	409	433	449
3:18:10	412	431	448
3:19:10	415	417	439
3:20:10	417	416	442
3:21:10	420	409	442
3:22:10	423	408	444
3:23:10	425	411	447
3:24:10	428	420	453
3:25:10	431	431	460
3:26:10	433	432	462
3:27:10	436	430	461
3:28:10	439	428	459

ตาราง ค.4 (ต่อ) ผลการทดลองการเผาผลิตภัณฑ์เซรามิกที่ใช้โปรแกรม PLC ควบคุม

เวลา (hr:min:sec)	อุณหภูมิที่กำหนด (°C)	อุณหภูมิควบคุมในเตา (°C)	อุณหภูมิ burner (°C)
3:29:10	441	426	458
3:30:10	444	436	465
3:31:10	447	446	474
3:32:10	449	454	481
3:33:10	452	461	484
3:34:10	455	461	481
3:35:10	457	459	477
3:36:10	460	465	480
3:37:10	463	468	484
3:38:10	465	470	487
3:39:10	468	471	487
3:40:10	471	474	490
3:41:10	473	476	492
3:42:10	476	479	497
3:43:10	479	481	501
3:44:10	481	483	503
3:45:10	484	486	507
3:46:10	487	490	511
3:47:10	489	494	516
3:48:10	492	494	518
3:49:10	495	505	527
3:50:10	497	506	524
3:51:10	500	502	517
3:52:10	503	501	519
3:53:10	505	497	519
3:54:10	508	502	525
3:55:10	511	503	529
3:56:10	513	510	538
3:57:10	516	524	552
3:58:10	519	530	559

ตาราง ค.4 (ต่อ) ผลการทดลองการเผาผลิตภัณฑ์เซรามิกที่ใช้โปรแกรม PLC ควบคุม

เวลา (hr:min:sec)	อุณหภูมิที่กำหนด (°C)	อุณหภูมิควบคุมในเตา (°C)	อุณหภูมิ burner (°C)
3:59:10	521	531	562
4:00:10	524	532	564
4:01:10	527	532	566
4:02:10	529	532	565
4:03:10	532	534	565
4:04:10	535	534	564
4:05:10	537	530	558
4:06:10	540	518	539
4:07:10	543	521	548
4:08:10	545	538	567
4:09:10	548	555	580
4:10:10	551	573	601
4:11:10	553	569	602
4:12:10	556	552	596
4:13:10	559	547	590
4:14:10	561	549	588
4:15:10	564	560	596
4:16:10	567	567	605
4:17:10	569	566	603
4:18:10	572	563	600
4:19:10	575	568	606
4:20:10	577	571	608
4:21:10	580	565	603
4:22:10	583	566	604
4:23:10	585	577	612
4:24:10	588	593	622
4:25:10	591	604	630
4:26:10	593	599	628
4:27:10	596	587	619
4:28:10	599	575	610

ตาราง ค.4 (ต่อ) ผลการทดลองการเผาผลิตภัณฑ์เซรามิกที่ใช้โปรแกรม PLC ควบคุม

เวลา (hr:min:sec)	อุณหภูมิที่กำหนด (°C)	อุณหภูมิควบคุมในเตา (°C)	อุณหภูมิ burner (°C)
4:29:10	601	577	610
4:30:10	604	588	617
4:31:10	607	595	621
4:32:10	609	599	622
4:33:10	612	608	631
4:34:10	615	620	640
4:35:10	617	623	644
4:36:10	620	620	645
4:37:10	623	627	659
4:38:10	625	627	666
4:39:10	628	623	665
4:40:10	631	618	659
4:41:10	633	619	658
4:42:10	636	631	666
4:43:10	639	639	674
4:44:10	641	630	671
4:45:10	644	619	664
4:46:10	647	611	661
4:47:10	649	614	664
4:48:10	652	624	671
4:49:10	655	634	673
4:50:10	657	642	675
4:51:10	660	645	676
4:52:10	663	646	675
4:53:10	665	646	675
4:54:10	668	635	667
4:55:10	671	651	691
4:56:10	673	665	707
4:57:10	676	671	710
4:58:10	679	671	709

ตาราง ค.4 (ต่อ) ผลการทดลองการเผาผลิตก๊าซเซรามิกที่ใช้โปรแกรม PLC ควบคุม

เวลา (hr:min:sec)	อุณหภูมิที่กำหนด (°C)	อุณหภูมิควบคุมในเตา (°C)	อุณหภูมิ burner (°C)
4:59:10	681	666	705
5:00:10	684	667	707
5:01:10	687	670	711
5:02:10	689	682	721
5:03:10	692	705	742
5:04:10	695	689	727
5:05:10	697	668	709
5:06:10	700	681	725
5:07:10	703	688	731
5:08:10	705	689	733
5:09:10	708	698	746
5:10:10	711	692	742
5:11:10	713	698	741
5:12:10	716	703	741
5:13:10	719	706	740
5:14:10	721	708	741
5:15:10	724	712	749
5:16:10	727	708	753
5:17:10	729	719	766
5:18:10	732	727	772
5:19:10	735	727	771
5:20:10	737	733	777
5:21:10	740	750	791
5:22:10	743	739	780
5:23:10	745	727	770
5:24:10	748	729	774
5:25:10	751	732	779
5:26:10	753	735	781
5:27:10	756	762	793
5:28:10	759	761	796

ตาราง ค.4 (ต่อ) ผลการทดลองการเผาผลิตก๊าซเซรามิกที่ใช้โปรแกรม PLC ควบคุม

เวลา (hr:min:sec)	อุณหภูมิที่กำหนด (°C)	อุณหภูมิควบคุมในเตา (°C)	อุณหภูมิ burner (°C)
5:29:10	761	748	785
5:30:10	764	749	783
5:31:10	767	758	788
5:32:10	769	773	803
5:33:10	772	769	809
5:34:10	775	765	809
5:35:10	777	779	819
5:36:10	780	781	823
5:37:10	783	773	817
5:38:10	785	765	812
5:39:10	788	754	805
5:40:10	791	774	818
5:41:10	793	800	835
5:42:10	796	782	818
5:43:10	799	780	819
5:44:10	801	788	838
5:45:10	801	803	856
5:46:10	801	812	865
5:47:10	801	805	857
5:48:10	801	793	845
5:49:10	801	786	837
5:50:10	801	790	842
5:51:10	801	789	842
5:52:10	801	793	847
5:53:10	801	791	845
5:54:10	801	796	850
5:55:10	801	802	856
5:56:10	801	802	854
5:57:10	801	799	850
5:58:10	801	803	856

ตาราง ค.4 (ต่อ) ผลการทดลองการเผาผลิตก๊าซเซรามิกที่ใช้โปรแกรม PLC ควบคุม

เวลา (hr:min:sec)	อุณหภูมิที่กำหนด (°C)	อุณหภูมิควบคุมในเตา (°C)	อุณหภูมิ burner (°C)
5:59:10	801	806	860
6:00:10	801	808	860
6:01:10	801	794	844
6:02:10	801	789	838
6:03:10	801	790	838
6:04:10	801	798	846
6:05:10	801	805	853
6:06:10	801	805	853
6:07:10	801	794	841
6:08:10	801	789	835
6:09:10	801	790	836
6:10:10	801	798	844
6:11:10	801	790	835
6:12:10	801	792	835
6:13:10	801	799	843

ตารางแสดงผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์เซรามิก

ตำแหน่ง/ ครั้งที่	น้ำหนัก ก่อนเผา (g)	น้ำหนัก หลังเผา (g)	ความหนา ก่อนเผา (cm)	ความ หนาหลัง เผา (cm)	% การ หดตัว	ปริมาตร (g)	ความ หนาแน่น	น้ำหนัก แช่น้ำ (g)	% การดูด ซึมน้ำ
1-1		110	0.415	0.405	2.410	68	1.618	133	20.909
2-1		117	0.430	0.415	3.488	72	1.625	142	21.368
3-1		112	0.445	0.420	5.618	69	1.623	139	24.107
4-1		113	0.445	0.420	5.618	69	1.638	136	20.354
5-1		122	0.450	0.440	2.222	73	1.671	146	19.672
6-1		111	0.420	0.395	5.952	68	1.632	135	21.622
7-1		118	0.445	0.420	5.618	72	1.639	142	20.339
8-1		111	0.445	0.420	5.618	72	1.542	144	29.730
9-1		132	0.480	0.470	2.083	80	1.650	162	22.727

ตำแหน่ง/ ครั้งที่	น้ำหนัก ก่อนเผา (g)	น้ำหนัก หลังเผา (g)	ความหนา ก่อนเผา (cm)	ความ หนาหลัง เผา (cm)	% การ หดตัว	ปริมาตร (g)	ความ หนาแน่น	น้ำหนัก แช่น้ำ (g)	% การดูด ซึมน้ำ
10-1		117	0.450	0.425	5.556	71	1.648	142	21.368
11-1		123	0.450	0.425	5.556	75	1.640	151	22.764
12-1		131	0.485	0.470	3.093	79	1.658	159	21.374
13-1		110	0.405	0.390	3.704	68	1.618	135	22.727
14-1		114	0.400	0.385	3.750	70	1.629	139	21.930
15-1		129	0.465	0.445	4.301	80	1.613	156	20.930
1-2	136	128	0.465	0.440	5.376	79	1.620	156	21.875
2-2	132	125	0.440	0.430	2.273	76	1.645	151	20.800
3-2	143	135	0.475	0.470	1.053	81	1.667	163	20.741
4-2	130	123	0.420	0.410	2.381	71	1.732	148	20.325
5-2	127	119	0.420	0.400	4.762	72	1.653	145	21.849
6-2	143	134	0.455	0.420	7.692	80	1.675	162	20.896
7-2	140	131	0.455	0.440	3.297	79	1.658	159	21.374
8-2	142	133	0.440	0.430	2.273	81	1.642	161	21.053
9-2	110	104	0.350	0.335	4.286	61	1.705	125	20.192
10-2	106	99	0.315	0.305	3.175	59	1.678	119	20.202
11-2	106	100	0.330	0.325	1.515	59	1.695	120	20.000
12-2	112	105	0.355	0.340	4.225	61	1.721	126	20.000
13-2	103	96	0.340	0.325	4.412	56	1.714	116	20.833
14-2	106	100	0.325	0.320	1.538	59	1.695	120	20.000
15-2	106	100	0.355	0.330	7.042	60	1.667	120	20.000
1-3	119	110	0.330	0.325	1.515	64	1.719	131	19.091
2-3	115	107	0.380	0.370	2.632	62	1.726	127	18.692
3-3	119	111	0.350	0.345	1.429	65	1.708	131	18.018
4-3	125	114	0.345	0.340	1.449	67	1.701	136	19.298
5-3	117	107	0.320	0.315	1.563	63	1.698	128	19.626

ตำแหน่ง/ ครั้งที่	น้ำหนัก ก่อนเผา (g)	น้ำหนัก หลังเผา (g)	ความหนา ก่อนเผา (cm)	ความ หนาหลัง เผา (cm)	% การ หดตัว	ปริมาตร (g)	ความ หนาแน่น	น้ำหนัก แช่น้ำ (g)	% การดูด ซึมน้ำ
6-3	120	109	0.330	0.325	1.515	65	1.677	130	19.266
7-3	119	110	0.365	0.355	2.740	65	1.692	128	16.364
8-3	119	111	0.375	0.365	2.667	65	1.708	131	18.018
9-3	122	112	0.355	0.340	4.225	65	1.723	133	18.750
10-3	123	113	0.370	0.360	2.703	66	1.712	133	17.699
11-3	111	102	0.325	0.310	4.615	59	1.729	121	18.627
12-3-	120	111	0.335	0.325	2.985	65	1.708	132	18.919
13-3	119	110	0.360	0.350	2.778	65	1.692	130	18.182
14-3	119	109	0.350	0.340	2.857	64	1.703	129	18.349
15-3	122	112	0.325	0.310	4.615	66	1.697	133	18.750



ภาคผนวก ง
ตัวอย่างรายการคำนวณ

ตาราง ง.1 แสดงการคำนวณหามวลของออกซิเจนที่ใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิง 1 kg

ส่วนประกอบ เชื้อเพลิง	% โดยมวล	สมการ	มวลของออกซิเจนที่ต้องการต่อเชื้อเพลิง 1 kg
C	45.62	$C + O_2 = CO_2$ (12 + 32 = 44)	$\frac{45.62}{100} \times \frac{32}{12} = 1.217 \text{ kg}$
H	6.73	$H_2 + O_2 = 2H_2O$ (4 + 32 = 36)	$\frac{6.73}{100} \times \frac{32}{4} = 0.538 \text{ kg}$
S	0.08	$S + O_2 = SO_2$ (32 + 32 = 64)	$\frac{0.08}{100} \times \frac{32}{32} = 8 \times 10^{-4} \text{ kg}$
O	42.36	-	$\frac{42.36}{100} = 0.423 \text{ kg}$
N	4.33	-	-

มวลของออกซิเจนทั้งหมด = $1.217 + 0.5438 + (8 \times 10^{-4}) = 1.7616 \text{ kg}$

แต่เชื้อเพลิงมีออกซิเจนอยู่แล้ว 0.423 kg

ดังนั้น น้ำหนักออกซิเจนที่ต้องการจริงเท่ากับ

$$1.7616 - 0.423 = 1.3386 \text{ kg}$$

ในอากาศมีออกซิเจน 23 % เพราะฉะนั้นปริมาณอากาศจะเท่ากับ

$$\frac{100}{23} \times 1.3386 = 5.82 \text{ kg}$$

ดังนั้น ในการเผาไหม้ชีวมวล 1 kg ในแบบปกติจะใช้อากาศ 5.82 kg

ตัวอย่างการคำนวณ Mass Flow Rate: $AMFR_G$ (kg/h)

$$AMFR_G = 1.15 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 24 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$AMFR = 27.6 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

*หมายเหตุ อากาศที่เข้าสู่โรตารีเตออร์มีความหนาแน่นระหว่าง 1.151-1.155 kg/m³

ตัวอย่างการคำนวณ Air-Fuel Ratio

$$AFR_G = \frac{AMFR_G}{FFR}$$

$$AFR_G = \frac{27.6 \frac{\text{kg}}{\text{h}}}{9.4 \frac{\text{kg}}{\text{h}}}$$

$$AFR_G = 2.9$$

การคำนวณหาค่าอัตราส่วนอากาศผสม

ตัวอย่างการคำนวณ

$$ER_G = \frac{AFR_G}{AFR_{TH}}$$

$$ER_G = \frac{2.9}{5.82}$$

$$ER_G = 0.50$$

ตัวอย่างการคำนวณ Mass Flow Rate: AMFR_C (kg/h)

$$AMFR_C = 1.15 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 27 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$AMFR_C = 31.1 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

*หมายเหตุ อากาศที่เข้าสู่โรตารีเตอร์มีความหนาแน่นระหว่าง 1.151-1.155 kg/m

ตัวอย่างการคำนวณ Air-Fuel Ratio

$$AFR_C = \frac{AMFR_C}{FFR}$$

$$AFR_C = \frac{31.1 \frac{\text{kg}}{\text{h}}}{9.4 \frac{\text{kg}}{\text{h}}}$$

$$AFR_C = 3.3$$

การคำนวณหาค่าอัตราส่วนอากาศผสม

ตัวอย่างการคำนวณ

$$ER_C = \frac{AFR_C}{AFR_{TH}}$$

$$ER_C = \frac{3.3}{5.82}$$

$$ER_C = 0.57$$





ตารางที่ ๑.1 แสดงผลการวัดไอเสียของชุดเตาเผาเซรามิกที่ปล่อยระบาย

อุณหภูมิเฉลี่ยเบิร์นเนอร์ °C	O ₂ %	CO ppm	H ₂ ppm	NO _x ppm	CO ₂ %
387	17.80	1872.00	123.17	36.50	2.99
496	15.90	176.17	6.50	71.50	4.76
656	12.41	151.67	18.17	126.17	8.02
800	9.50	82.00	59.43	140.71	10.73
897	7.30	63.83	13.50	167.50	13
953	6.56	85.50	876.17	232.33	12.11
1059	5.03	178.33	176.83	231.00	14.91
1152	2.57	1608.33	598.33	248.17	17.2
เฉลี่ย	9.63	527.2	234	156	10.46
สูงสุด	17.8	1872	876.2	248.2	17.2

ตารางที่ ๑.2 แสดงผลการคำนวณไอเสียที่สภาวะอากาศส่วนเกินร้อยละ 7 ของชุดเตาเผาเซรามิก

อุณหภูมิเฉลี่ยเบิร์นเนอร์ °C	CO (ppm)	NO _x (ppm)
387	8384.79	163.49
496	489.42	198.64
656	248.36	206.60
800	100.02	171.64
897	65.24	171.19
953	82.87	225.18
1059	156.23	202.37
1152	1219.74	188.21

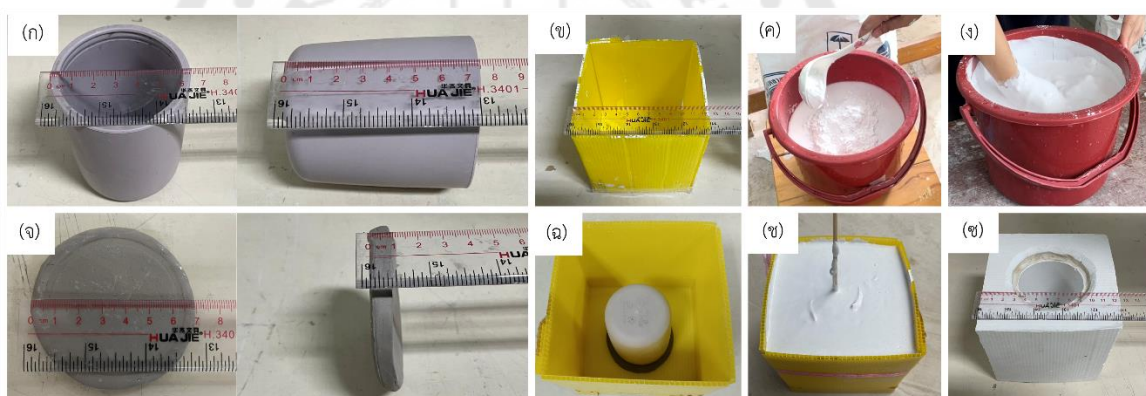


ภาคผนวก จ

ขั้นตอนการเตรียมวัสดุและวิธีการหล่อแก้วผลิตภัณฑ์เซรามิก

การเตรียมแม่พิมพ์ปูนพลาสติกสำหรับหล่อน้ำดิน

นำฟิวเจอร์บอร์ดขนาด 12.5 x 12.5 cm มาประกอบเป็นกล่องสี่เหลี่ยม ดังภาพ ฉ.1 (ก) เพื่อใช้เป็นกรอบแม่แบบแก้วซิลิโคน ดังภาพ ฉ.1 (ข) การหล่อแม่พิมพ์ปูนพลาสติกใช้ค่า Consistency 56 โดยชั่งปูนพลาสติก 3,500 g ค่อยๆ เทลงในน้ำ 2,000 g ดังภาพ ฉ.1 (ค) ผสมให้เข้ากัน ดังภาพ ฉ.1 (ง) วัสดุ VCE ให้เป็นแผ่นหนา 1.0 cm และมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.0 cm เพื่อใช้เป็นฐาน ดังภาพ ฉ.1 (จ) วางแผ่นดินที่ตัดไว้บนฐานฟิวเจอร์บอร์ด คั่วแก้วซิลิโคนทรงกระบอกไว้บนฐานดิน ดังภาพ ฉ.1 เพื่อป้องกันการติดของปูนพลาสติกกับแก้วซิลิโคนให้ทาวาสลินที่ผิวแก้วซิลิโคนบาง ๆ เทน้ำปูนพลาสติกจนท่วมแก้วซิลิโคนทรงกระบอก เทน้ำปูนพลาสติกลงไปอีกจนน้ำปูนพลาสติกมีความสูงกว่าความสูงจากกันแก้วซิลิโคนอีก 3.2 cm ดังภาพ ฉ.1 (ซ) รอให้ปูนพลาสติกแห้ง แกะกรอบแม่แบบฟิวเจอร์บอร์ดและแก้วซิลิโคนออก ได้เป็นแม่พิมพ์ปูนพลาสติกรูปแก้วทรงกระบอก ดังภาพ ฉ.1 (ซ)



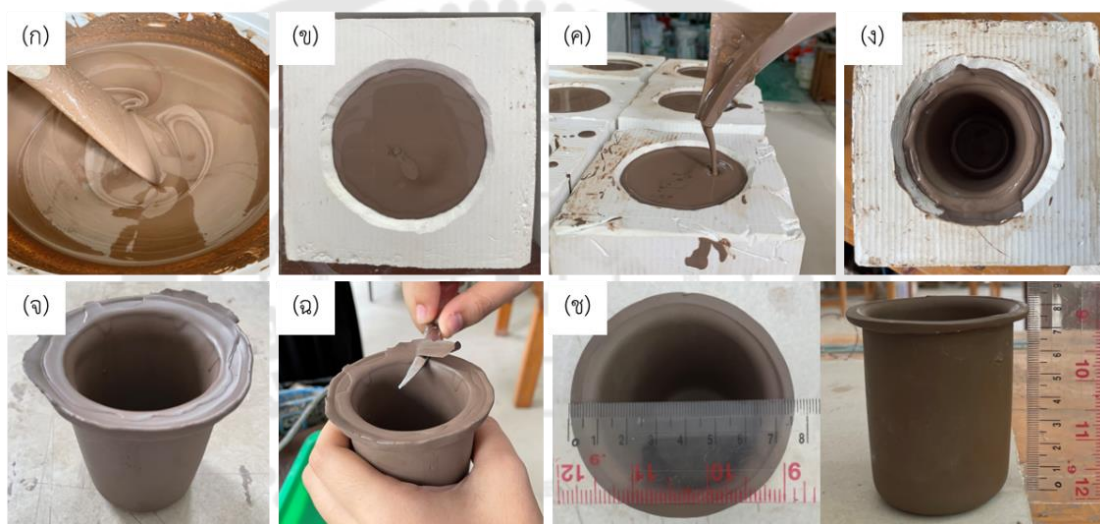
ภาพประกอบที่ ฉ.1 การเตรียมแม่พิมพ์ปูนพลาสติกสำหรับหล่อแก้ว

การหล่อชิ้นงานทดสอบด้วยวิธีการเทน้ำดิน

ชิ้นทดสอบเตรียมด้วยวิธีการหล่อน้ำดิน วิธีการเตรียมน้ำดิน โดยนำดิน VCE ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 °C จากนั้นนำดิน VCE แห้งไปแช่น้ำในถังพลาสติก โดยให้ความสูงของน้ำเหนือระดับดินประมาณ 3 cm ทิ้งไว้ 1 คืน จากนั้นเทน้ำส่วนเกินออกจากถังพลาสติก

น้ำดินที่มีความถ่วงจำเพาะในช่วง 1.68-1.72 g/cm³ โดยเตรียมจากชั่งดิน VCE ใส่ในน้ำแช่เป็นเวลา 24 hr เติม Sodium silicate: Na_2SiO_3 กวนให้เป็นเนื้อเดียวกัน ดังภาพที่ ฉ.2 (ก) จนได้ความหนืดของน้ำดินประมาณ 2.5 - 5.0 poise กรองน้ำดินผ่านตะแกรงร่อนขนาด 70 mesh เท

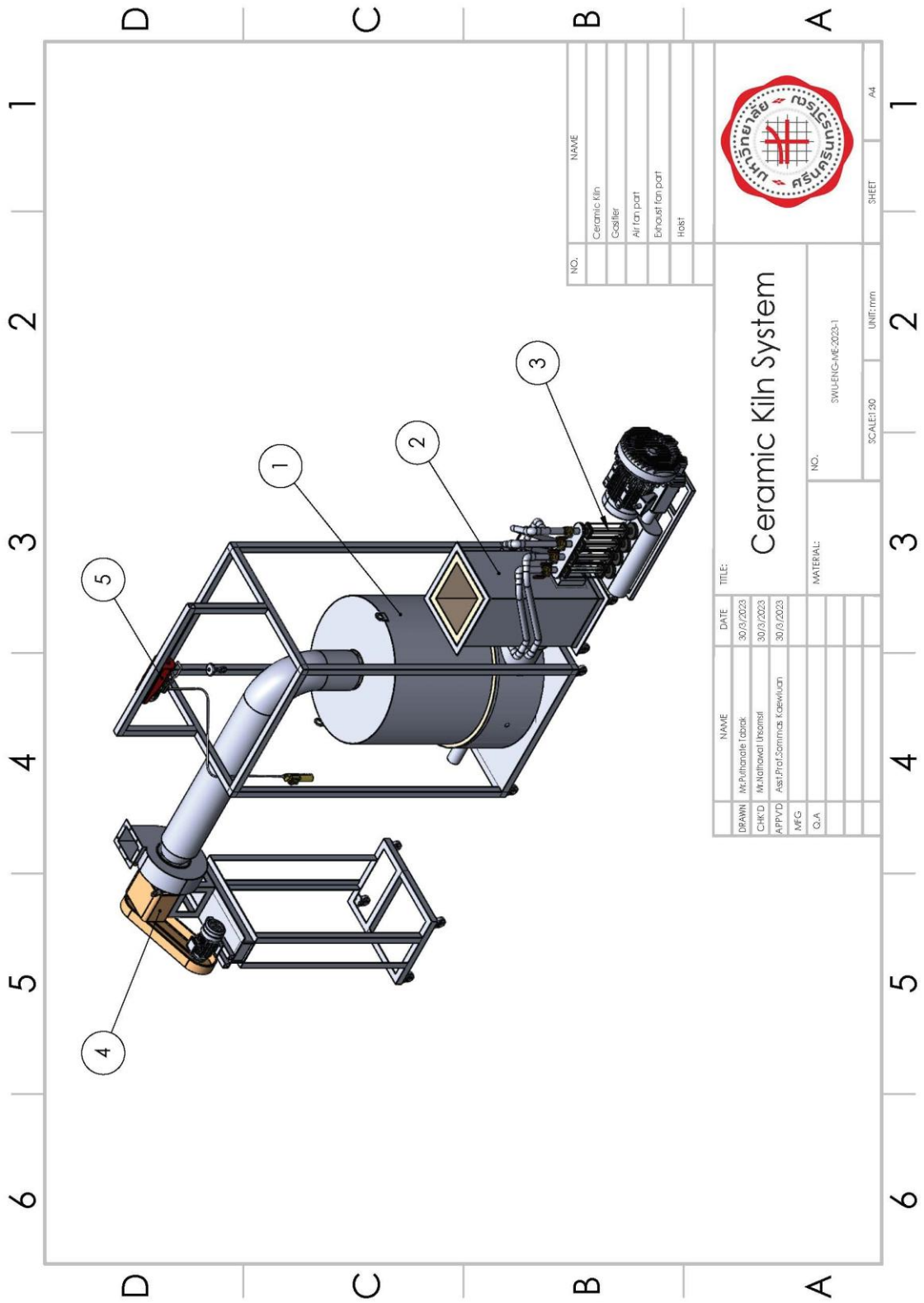
น้ำดินที่เตรียมไว้ลงไปแม่พิมพ์ปูนปลาสเตอร์ให้เต็ม ดังภาพที่ ฉ.2 (ข) ปล่อยให้ น้ำดินเกิดการดูดซับที่ผิวปูนปลาสเตอร์ ใช้เวลา 15 20 30 45 60 และ 90 นาที ได้ความหนาของชั้นงาน 2.56 2.68 3.24 4.24 5.06 และ 6.38 mm. ตามลำดับ ระหว่างขั้นตอนนี้เมื่อน้ำดินยวบต้องเติมน้ำดินให้มีระดับเท่าเดิม ดังภาพที่ ฉ.2 (ค) เทน้ำดินส่วนที่เหลือออกจากแม่พิมพ์ปูนปลาสเตอร์ ดังภาพที่ ฉ.2 (ง) ปล่อยให้ชิ้นงานร้อนจากแม่พิมพ์ แกะออกจากแม่พิมพ์ ดังภาพที่ ฉ.2 (จ) ตัดแต่งขอบชิ้นงานให้สม่ำเสมอ ดังภาพที่ ฉ.2 (ฉ) ได้ชิ้นงานที่มีผิวเรียบสม่ำเสมอ ดังภาพที่ ฉ.2 (ช) ปล่อยให้ชิ้นงานแห้งที่อุณหภูมิห้อง อบที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และนำชิ้นงานที่ได้ไปเผาที่ 800°C เป็นเวลา 30 นาที



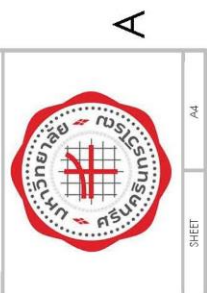
ภาพประกอบที่ ฉ.2 การหล่อชิ้นงานรูปแก้วด้วยวิธีการเทน้ำดิน



ภาคผนวก ช
แบบชุดเตาเผาผลิตภัณฑ์เซรามิก

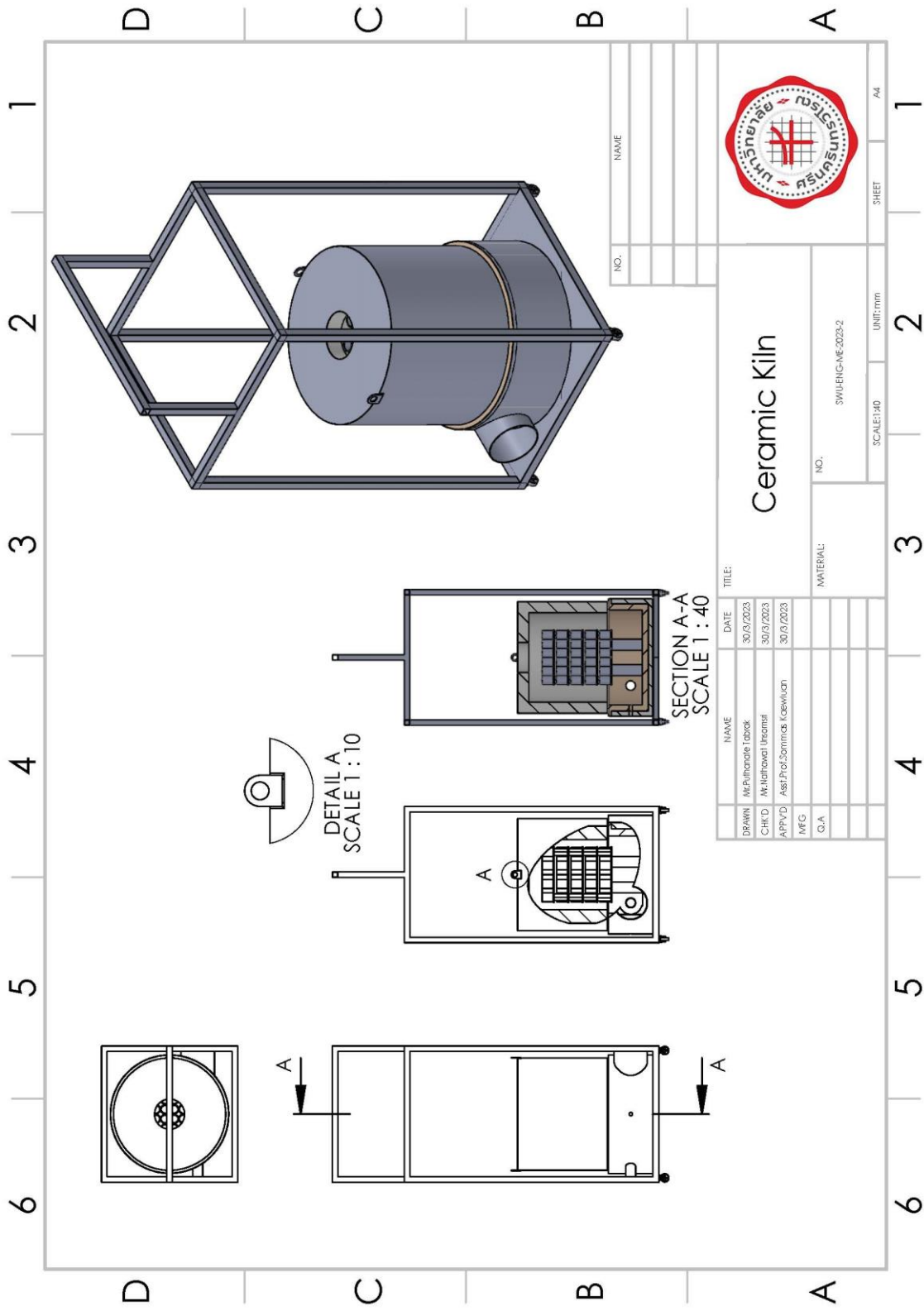


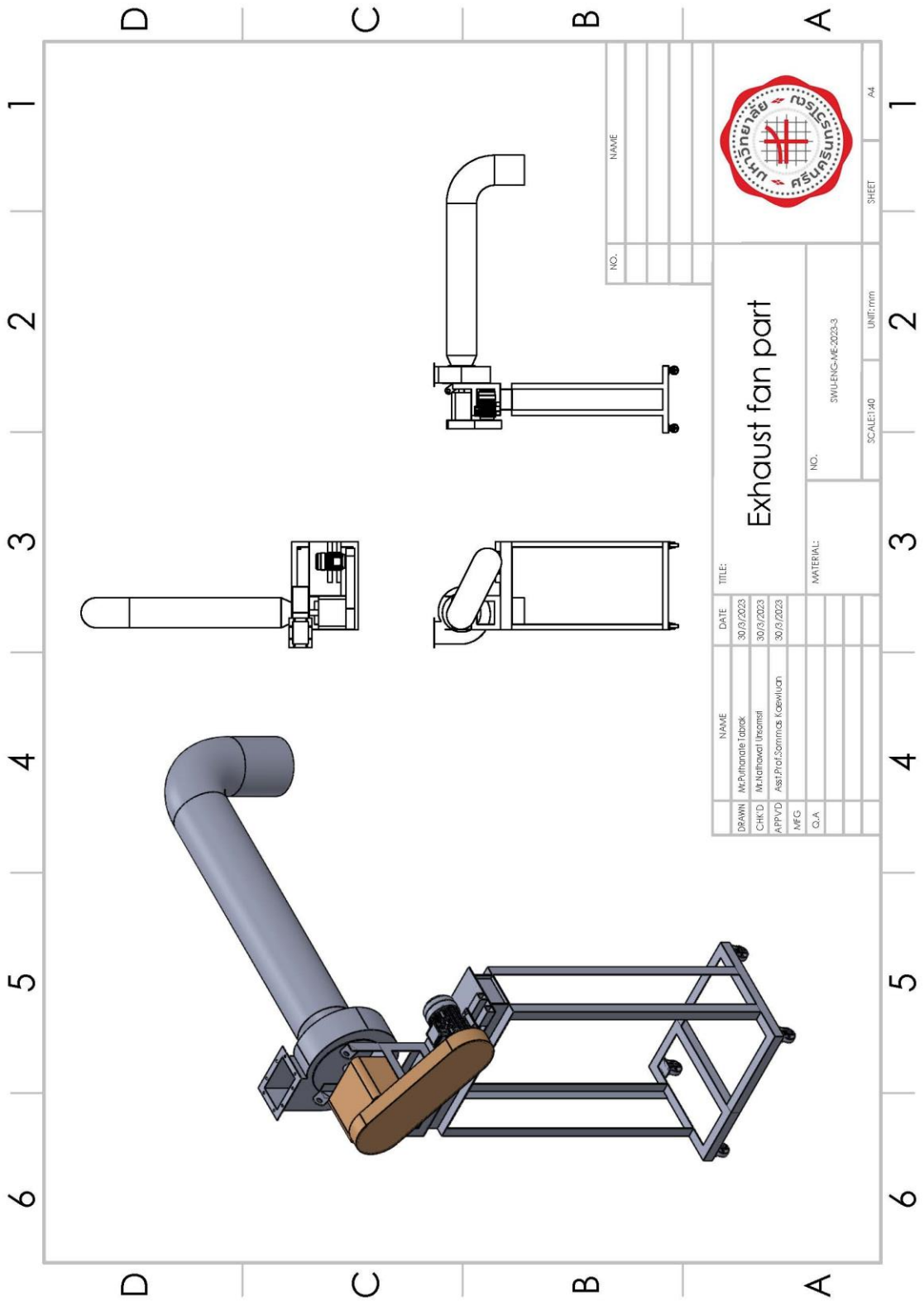
NO.	NAME
	Ceramic Kiln
	Coatler
	Air fan part
	Exhaust fan part
	Hobst



Ceramic Kiln System	
TITLE:	NO. SWUENG-NE-2023-1
DATE:	UNIT:mm
NAME:	SCALE:1:30
DATE:	SHEET
NAME:	/A4
DATE:	1
NAME:	2
DATE:	3
NAME:	4
DATE:	5
NAME:	6

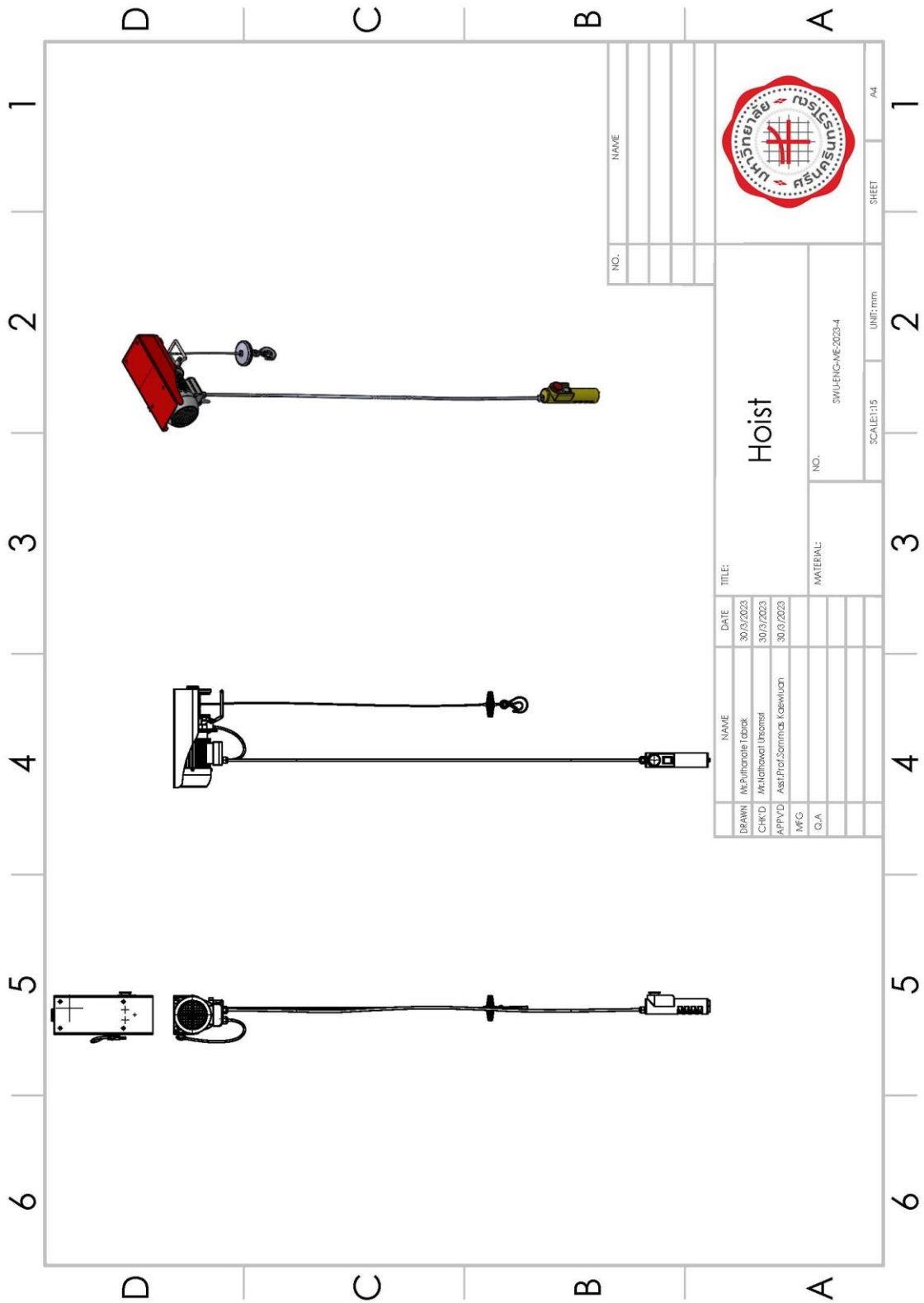
NO.	NAME	DATE
DPAWN	McPurhanale Tobak	30/9/2023
CHKD	Muhammad Usmanil	30/2/2023
APPVD	Asst.Prof.Sartimas Koberwulan	30/9/2023
MFG		
Q.A		

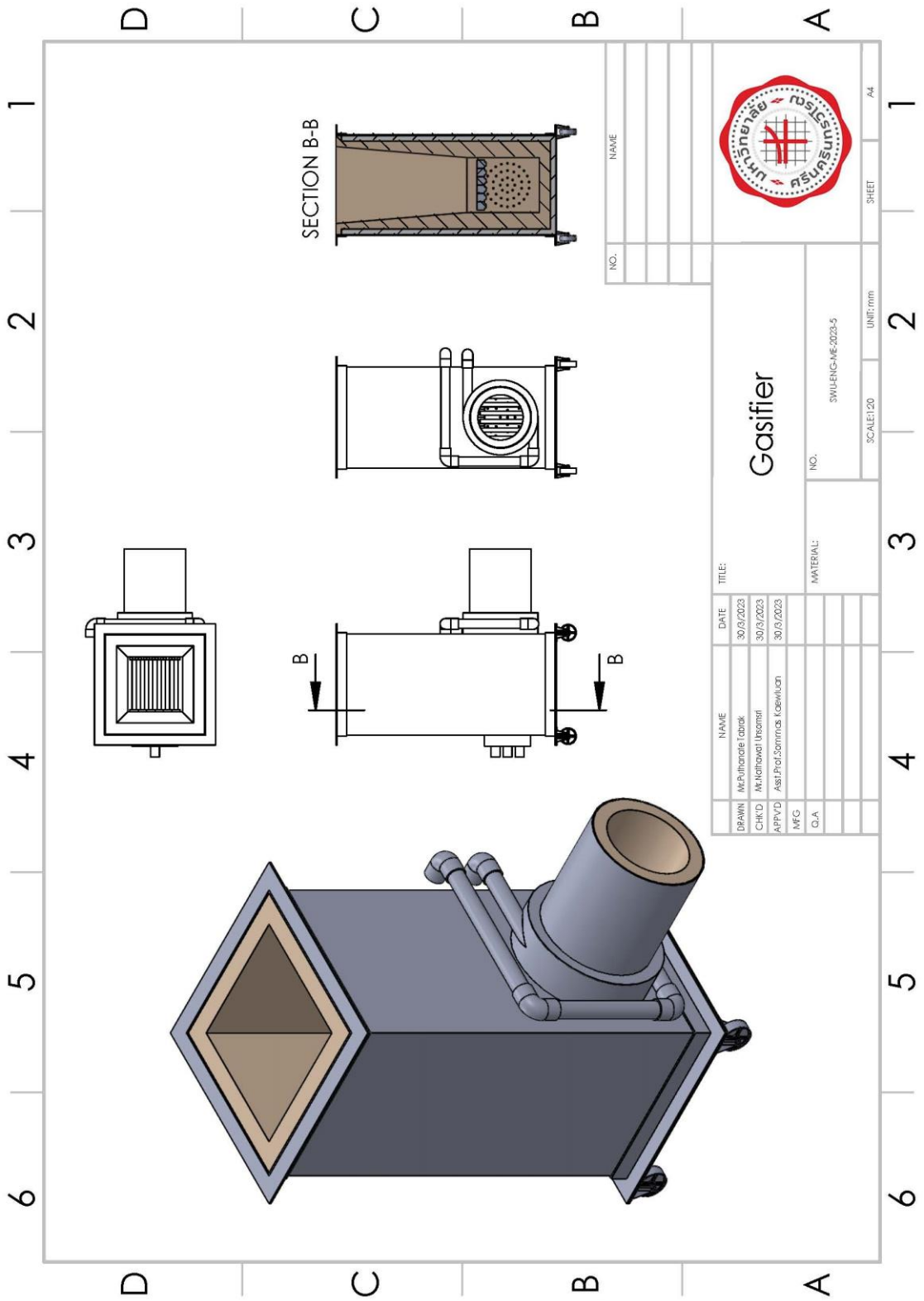




NO.	NAME

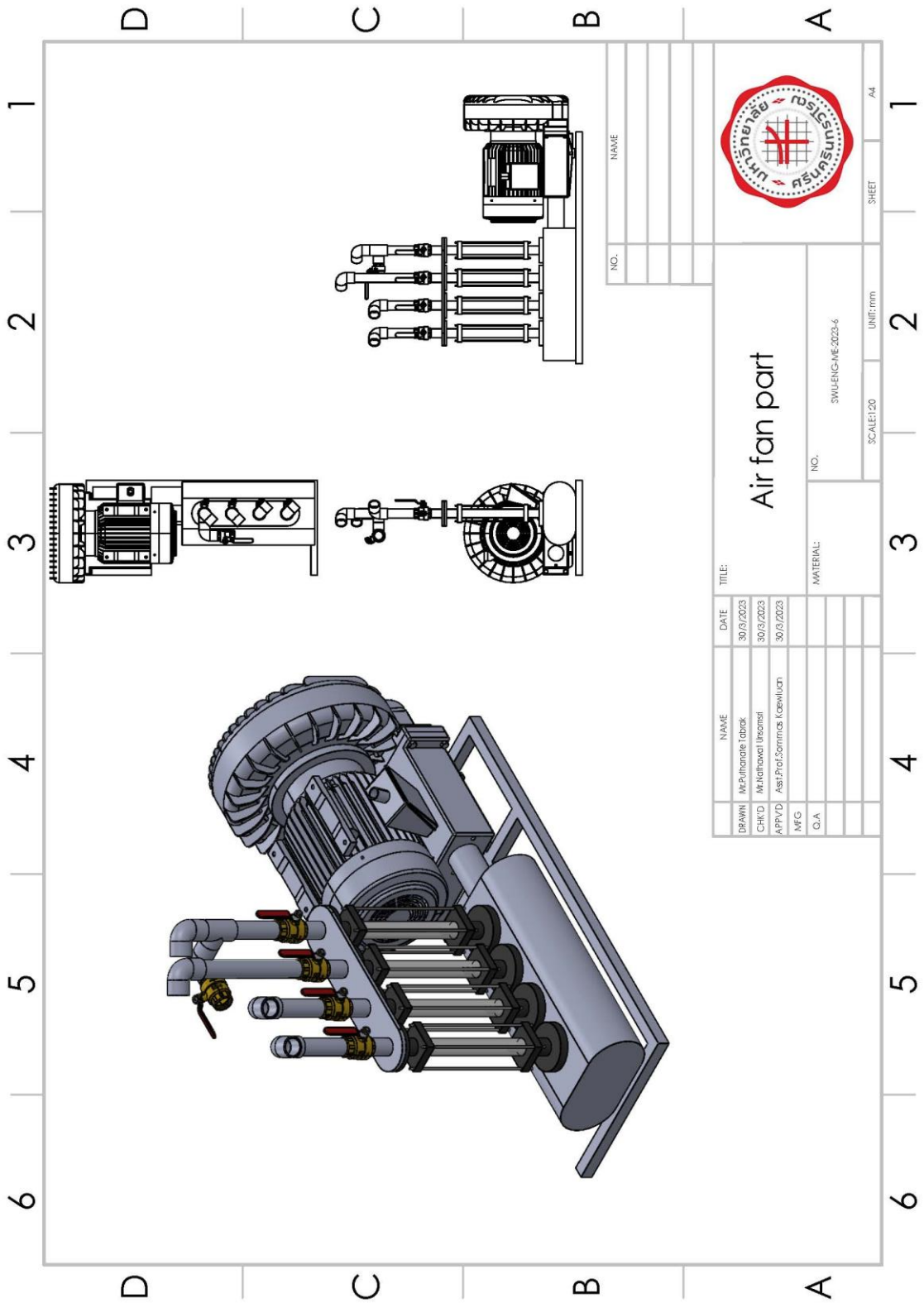
SHEET A4





		Gasifier		NO. SWU-ENG-ME-2023-5	UNIT: mm SCALE: 1:20	SHEET A4
TITLE:	DATE:	NAME:	MATERIAL:	NO.	UNIT: mm	SHEET
DRAWIN: M. Purnanatej Fabrik	30/5/2023	M. Purnanatej Fabrik	MFG	Q.A	UNIT: mm	SHEET
CHK'D: M. Hattawati Ibramsari	30/5/2023	M. Hattawati Ibramsari	APP'VD: Asst.Prof. Sarminas Koeswulan	MFG	UNIT: mm	SHEET
DATE:	30/5/2023	NAME:	MATERIAL:	NO.	UNIT: mm	SHEET

NO.	NAME



DRAWN		NAME	DATE	TITLE	
CHK'D		Mc.Pulunganat'abdoq	30/6/2023	Air fan part	
APP'VD		Mc.Hafidhanat'ibansari	30/6/2023	NO.	
MFG		Asst.Prof.Sommas Kocawiluan		MATERIAL:	
Q.A				NO.	
				SWU-ENG-NE-2023-6	
				UNIT: mm	
				SCALE: 1:20	
				SHEET	
				A4	



NO.	NAME



ภาคผนวก ซ
ผลงานตีพิมพ์

ASTC 2023



ASTC 2023

PROCEEDINGS

การประชุมวิชาการระดับชาติ
วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
ระหว่างสถาบัน (ASTC) ครั้งที่ 9

วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเพื่อความยั่งยืน
SCIENCE AND TECHNOLOGY FOR SUSTAINABILITY



วันศุกร์ที่ 9 มิถุนายน 2566 (รูปแบบ ONLINE)

ณ มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย กรุงเทพฯ




วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเพื่อความยั่งยืน
Science and Technology
for Sustainability

เกียรติบัตรฉบับนี้ให้ไว้เพื่อแสดงว่า

ณัฐวัฒน์ อ้นสมศรี

ได้นำเสนอผลงานเรื่อง

การพัฒนาเครื่องผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แบบไหลขวางและหัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ เพื่อเป็นแหล่งความร้อนสำหรับเตาเผาเซรามิกขนาดเล็ก

ในการประชุมวิชาการระดับชาติ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีระหว่างสถาบัน ครั้งที่ 9
โดย คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย (รูปแบบออนไลน์)
เมื่อวันที่ 9 มิถุนายน 2566

ASTC 2023

อ.อิทธิพงษ์ ไทนิทร์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อิทธิพงษ์ ไทนิทร์
คณบดีคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย

P_IN_O_0121

การพัฒนาเครื่องผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แบบไหลขวางและหัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์

เพื่อเป็นแหล่งความร้อนสำหรับเตาเผาเซรามิกขนาดเล็ก

Development of Crossdraft Biomass Gasifier and Producer Gas Burner as Heat Source for Small Ceramic Kilns

ณัฐวัฒน์ อันสมศรี^{*1}, สิทธิรัตน์ ท่อแก้ว² และ สมมาส แก้วล้วน¹

Unsomsri N.^{*1}, Tawkaew S.² and Kaewluan S.¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

²ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

*ผู้ประสานงานหลัก อีเมล: nothawat.uss@g.swu.ac.th

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อสภาวะการทำงานของเครื่องผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แบบไหลขวางและหัวเผาที่สามารถผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์จากเศษไม้เพื่อใช้เป็นแหล่งความร้อนสำหรับเตาเผาเซรามิกขนาดเล็ก ผลจากการศึกษาพบว่าที่อุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิกต่ำกว่า 400 °C เศษไม้ถูกเผาไหม้โดยใช้อากาศส่วนที่ 1 ในเครื่องผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ ความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ถูกส่งผ่านไปยังเตาเผาเซรามิกส่งผลให้อุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิกค่อยๆเพิ่มขึ้น อัตราส่วนอากาศผสมอยู่ในช่วง 1.36 ถึง 2.07 โดยจะมีค่าลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ในช่วงที่อุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิกสูงกว่า 400 °C เศษไม้ถูกแปรสภาพเป็นแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์โดยใช้อากาศส่วนที่ 1 ในเครื่องผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ ค่าอัตราส่วนผสมอากาศส่วนแรกมีค่าอยู่ในช่วง 0.33-0.61 โดยจะมีค่าลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น และแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ถูกเผาไหม้กับอากาศส่วนที่ 2 ในหัวเผา อัตราส่วนผสมรวมมีค่าอยู่ในช่วง 1.20-1.30 อุณหภูมิที่ทางออกจากหัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์มีค่า 970 °C ความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ส่งผ่านไปยังเตาเผาเซรามิกส่งผลให้อุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิกค่อยๆเพิ่มขึ้นจนถึง 800 °C ผลการวิเคราะห์การปลดปล่อยมลพิษจากไอเสียพบว่าในช่วงอุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิกสูงกว่า 400 °C ปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) มีค่าต่ำกว่า 690 ppm และแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ (NOx) มีค่าสูงสุดเท่ากับ 225 ppm ผลผลิตถ่านกัมมันต์แก๊วเซรามิกที่ได้มีสีคล้ำกว่าผลผลิตถ่านกัมมันต์แก๊วเซรามิกที่เผาด้วยเตาเผาไฟฟ้า โดยมีค่าการหดตัว ความหนาแน่น และการดูดซึมน้ำ 2.69% 1.71 mg/mL และ 18.51% ตามลำดับ

คำสำคัญ: แก๊สซิโพรเอร์แบบไหลขวาง, แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์, แก๊สซิฟิเคชัน, เผาดิบ

Abstract

The purpose of this research was to study the parameters affecting the operating condition of a cross-draft biomass gasifier and burner that can produce and burn synthesis gas from scrap wood to be used as heat sources for small ceramic kilns. The results of the study showed that the temperature inside the ceramic kiln was lower than 400 °C, and the scrap wood was burned using primary air in a cross-draft gasifier. The heat generated by combustion is passed through the ceramic kiln, causing the temperature inside the ceramic kiln to slightly increase. The equivalent ratio ranges from 1.36 to 2.07, decreasing with increasing temperature. When the temperature inside the ceramic kiln exceeds 400 °C, the scrap wood is converted into a synthesis gas using primary air in a synthesis gas gasifier. The initial equivalence ratio was in the range of 0.33-0.61, decreasing with increasing temperature, and synthesis gas is burned with the secondary air in the burner. The total equivalence ratio was in the range of 1.20-1.30. The outlet temperature of the synthesis gas burner is 970 °C. The hot gas

from burning synthesis gas passes through the ceramic kiln causing the temperature inside the kiln to gradually increase to 800 °C. Flue gas emission analysis shows that at ceramic kiln temperatures above 400 °C, carbon monoxide (CO) is below 690 ppm and nitrogen oxides (NO_x) are at a maximum of 225 ppm. The color of the ceramic products from this experiment is darker than that of the electric kiln. The shrinkage and water absorption were 2.69%, 1.71 mg/ml and 18.51% respectively.

Keywords: Crossdraft Gasifier, Synthesis Gas, Gasification, Biscuit Firing

บทนำ

ในประเทศไทยมีการผลิตผลิตภัณฑ์เซรามิกอยู่หลากหลายชนิด เช่น เครื่องสุขภัณฑ์ เครื่องใช้บนโต๊ะอาหาร ลูกถ้วยไฟฟ้า เป็นต้น มีทั้งอุตสาหกรรมเซรามิกขนาดเล็ก ขนาดกลางและขนาดใหญ่ จากรายงานเศรษฐกิจการค้าระหว่างประเทศ ประจำเดือน พฤษภาคม 2564⁽¹⁾ พบว่าการผลิตและการจำหน่ายผลิตภัณฑ์เซรามิกในประเทศไทยมีแนวโน้มฟื้นตัวดีขึ้น โดยมีมูลค่าการส่งออกกว่า 359 ล้านดอลลาร์สหรัฐ ซึ่งเพิ่มขึ้นร้อยละ 23.93 เมื่อเทียบกับปี 2563 ซึ่งเป็นการฟื้นตัวช่วงหลังจากวิกฤตการณ์การแพร่ระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 อย่างไรก็ตามผู้ประกอบการยังคงต้องเจอกับปัญหาราคาเชื้อเพลิงแก๊สแอลพีจี (LPG) ภายในประเทศที่มีแนวโน้มสูงขึ้นซึ่งสูงชันตามราคาน้ำมันดิบในตลาดโลกที่สูงขึ้นและสถานการณ์สงครามระหว่างรัสเซียและยูเครนซึ่งยูเครนเป็นประเทศที่เป็นผู้ส่งออกน้ำมันดิบรายใหญ่ของโลก⁽²⁾ เมื่อราคาแก๊สแอลพีจีพุ่งสูงขึ้นจึงส่งผลกระทบต่อการผลิตของอุตสาหกรรมเซรามิกในประเทศไทยโดยเฉพาะอุตสาหกรรมเซรามิกขนาดเล็กและขนาดกลาง การเพิ่มขึ้นของต้นทุนการผลิตจึงทำให้ขีดความสามารถในการแข่งขันลดลงเป็นอย่างมากเมื่อเทียบกับประเทศคู่แข่งโดยเฉพาะประเทศจีนที่มีข้อได้เปรียบทั้งในด้านวัตถุดิบ ราคาเชื้อเพลิง และมีกำลังการผลิตเซรามิกที่ใหญ่ที่สุดในโลก⁽¹⁾ กิตติศักดิ์ สมุทรารักษ์⁽³⁾ ได้สำรวจอุตสาหกรรมเซรามิกในจังหวัดลำปางซึ่งเป็นจังหวัดที่ผลิตผลิตภัณฑ์เซรามิกที่ใหญ่ที่สุดในประเทศ ผลการศึกษาพบว่าปัญหาหนักที่สุดคือราคาของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาผลิตภัณฑ์เซรามิก รองลงมาคือปัญหาการลดต้นทุนการผลิต และปัญหาที่พบน้อยคือราคาของเครื่องจักร

ปัจจุบันการผลิตผลิตภัณฑ์เซรามิกต้องใช้พลังงานเชื้อเพลิงจากแก๊สแอลพีจี (LPG) ซึ่งมีราคาสูงทำให้ผู้ประกอบการต้องหาพลังงานทางเลือกเพื่อลดต้นทุนในการผลิต ในขณะที่ด้วยกันของเสียที่ได้จากการเผาไหม้มีการเหลือทิ้งในปริมาณมากจึงเหมาะแก่การนำไปแปรรูปเป็นพลังงานทางเลือกได้อย่างหลากหลาย ปัจจุบันมีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับด้านพลังงานชีวมวล โดยการใช้ของเสียจากการแปรรูปทางการเกษตรหรือเศษวัสดุที่เหลือใช้จากธรรมชาติ เช่น ธาพลง ต้นไม้ตัดย่อย และคอกะ⁽⁴⁾ ได้ศึกษาเรื่องพลังงานทดแทนชุมชนจากเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งจากทางมะพร้าว เช่นเดียวกับ ลดาวัลย์ วัฒนยะจิระ⁽⁵⁾ ได้ศึกษาการนำเศษฟางข้าวผสมเศษลำไยเหลือทิ้งมาผลิตเป็นก้อนเชื้อเพลิง และสมมต แก้วล้วน⁽⁶⁾ ใช้ไม้ยูคาปัดเป็นเชื้อเพลิงสำหรับเตาชีวมวลขนาด 20 kW เปรียบเทียบประสิทธิภาพกับเตาแก๊สหัวต้มชนิดหัวแรงประสิทธิภาพต่ำ และหัวแรงประสิทธิภาพสูง เป็นต้น ซึ่งในปัจจุบันมีผู้ที่สนใจประยุกต์ใช้แก๊สชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานให้กับการผลิตผลิตภัณฑ์เซรามิก เช่น กฤษฏาภา คีร์ระมูล⁽⁷⁾ ได้ศึกษาการผลิตโปรติวเซอร์แก๊สจากเตาชีวมวลแบบไหลขึ้นโดยใช้ขี้ข้าวโพดเป็นเชื้อเพลิงในการเผาเม็ดมะยมดินเผา รวมถึงวีรณัฐ แฉ่งสว่าง⁽⁸⁾ ได้ศึกษาการเผาผลิตภัณฑ์เซรามิกแบบปัดกึ่งโดยใช้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์จากชีวมวล สามารถควบคุมให้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตลอดช่วงของการเผาให้มีลักษณะใกล้เคียงกับกราฟควบคุมอุณหภูมิการเผาปกติและพบว่าระบบผลิตแก๊สเชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนตลอดช่วงระยะเวลาการเผาใกล้เคียงกัน โดยมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนเฉลี่ยร้อยละ 73.14 เครื่องผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์เป็นส่วนสำคัญในการผลิตเป็นแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ วิรัตน์ เจริญบุญ⁽⁹⁾ สร้างเตาชีวมวลแบบอากาศไหลขึ้นโดยใช้กลบเป็นเชื้อเพลิง อุณหภูมิเปลวไฟที่ผลิตได้อยู่ที่ 416-684 องศาเซลเซียส ใกล้เคียงกับ⁽⁷⁾ ใช้โปรติวเซอร์แก๊สจากเตาชีวมวลแบบอากาศไหลขึ้น โดยใช้ขี้ข้าวโพดเป็นเชื้อเพลิงในการเผาเม็ดมะยมดินเผา สามารถทำอุณหภูมิสูงสุดของเตาอยู่ที่ 716.1 องศาเซลเซียส รวมถึงกำพล ถาวร⁽¹⁰⁾ ศึกษาการใช้เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แบบอากาศไหลขวางโดยออกแบบให้ทำงานร่วมกับถัง 200 ลิตรเพื่อผลิตถ่านและน้ำส้มควันไม้คุณภาพดีโดยสามารถสร้างแก๊สร้อนที่มีปริมาณออกซิเจนต่ำที่ระดับอุณหภูมิสูงถึง 1,000 องศาเซลเซียสให้กับระบบเผาถ่านขนาด 200 ลิตร เช่นเดียวกับณัฐวัฒน์ อันสมศรี และคณะ⁽¹¹⁾ ได้ออกแบบ

การประชุมวิชาการระดับชาติ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีระหว่างสถาบัน ครั้งที่ 9
The 9th Academic Science and Technology Conference 2023
วันศุกร์ที่ 9 มิถุนายน 2566

และสร้างเครื่องผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แบบอากาศไหลขวางและห้องผสมเพื่อทำอากาศร้อนสำหรับอบไม้ยางพารา โดยสามารถทำอุณหภูมิของแก๊สร้อนได้ถึง 982.3 องศาเซลเซียส โดยใช้ PLC ในการควบคุมการทำงานของเครื่องสามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งไม้พลาเลทได้ร้อยละ 70 เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แบบอากาศไหลขวางนอกจากนี้ได้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่สะอาด ทำอุณหภูมิได้สูง และไร้ซัลเฟอร์ อาจหาญ⁽¹²⁾ ยังกล่าวอีกว่าเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แบบอากาศไหลขวางยังมีข้อได้เปรียบในเรื่องการเริ่มต้นการทำงานและการเร่งอุณหภูมิเตาสามารถทำได้ดีกว่าเตาผลิตแก๊สแบบอากาศไหลขึ้นและเตาผลิตแก๊สแบบอากาศไหลลง ใช้เวลาเพียง 5-10 นาที

จากปัญหาดังกล่าวผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะพัฒนาเครื่องผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แบบอากาศไหลขวางและหัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ โดยใช้เศษไม้ที่เหลือจากกระบวนการผลิตพลาเลทไม้เป็นเชื้อเพลิงแทนการใช้แก๊ส LPG ซึ่งจะช่วยลดต้นทุนเชื้อเพลิงในการเผาผลิตภัณฑ์เซรามิก รวมถึงช่วยลดปริมาณเศษไม้ที่เหลือจากกระบวนการผลิตพลาเลทไม้

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ด้วยเตาแก๊สซีพีเอฟแอร์แบบไหลขวางที่ทำงานร่วมกับหัวเบิร์นเนอร์
2. ศึกษาผลพิษจากเตาแก๊สซีพีเอฟแอร์แบบไหลขวางที่ทำงานร่วมกับหัวเบิร์นเนอร์
3. ศึกษาการใช้แก๊สร้อนจากเตาผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์เพื่อเผาผลิตภัณฑ์เซรามิกด้วยเตาเผาขนาดเล็ก

วิธีดำเนินการวิจัย

ไม้เชื้อเพลิงสำหรับกระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์

ไม้เชื้อเพลิงเป็นเศษไม้ที่เหลือจากกระบวนการผลิตพลาเลทไม้ที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัด 1×3 นิ้ว และมีความยาวในช่วง 3-6 นิ้ว ตัวอย่างเศษไม้ถูกนำไปวิเคราะห์หาปริมาณธาตุ (Ultimate Analysis) CHNS/O โดยมีวิธีทดสอบ/วิเคราะห์อ้างอิงตามมาตรฐาน (ASME D 5373 D4239) ด้วยเครื่องวิเคราะห์ Truspec CHN Truspec S ยี่ห้อ LECO และวิเคราะห์ทางองค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate Analysis) โดยวิธีทดสอบ/วิเคราะห์อ้างอิงตามมาตรฐาน (ASTM D3172-3175) ด้วยเครื่องวิเคราะห์ TGA701 Thermogravimetric Analyzer ส่วนค่าความร้อน HHV วิเคราะห์โดยอ้างอิงตามมาตรฐาน ASME D5865 ด้วยเครื่องวิเคราะห์ Bomb Calorimeter AC600 Automatic Calorimeter

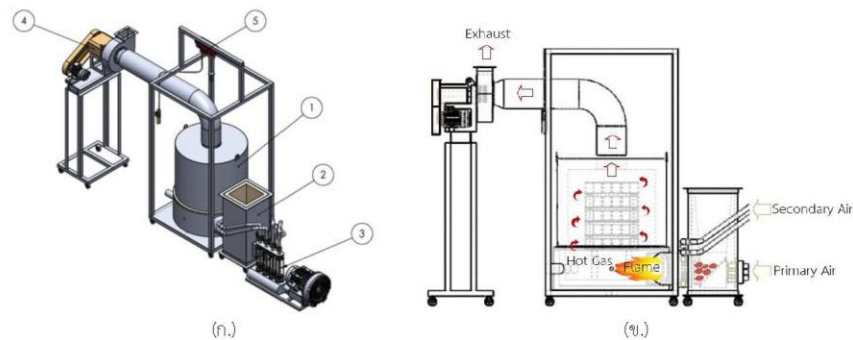
เตาผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่ทำงานร่วมกับเตาเผาผลิตภัณฑ์เซรามิกขนาดเล็ก

เตาผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แบบไหลขวาง (2) ที่ใช้เชื้อเพลิงจากเศษไม้สามารถแบ่งการควบคุมออกเป็น 2 ช่วง ได้แก่

ช่วงที่ 1 เป็นช่วงที่อุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิกมีอุณหภูมิระหว่าง 100-400 °C การทำงานของเตาผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ เริ่มจากการใส่ไม้เชื้อเพลิงประมาณ 1-2 กิโลกรัม ลงในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ (2) เปิดวาล์วพัดลมป้อนอากาศ (3) ส่วนที่ 1 (Primary Air) ที่อัตราการไหล 11 m³/hr และเปิดพัดลมดูดไอเสีย (Exhaust fan part) (4) ที่อัตราการไหล 1,500 m³/hr จากนั้นจุดไม้เชื้อเพลิงในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ (2) ให้ติดไฟ ช่วงนี้เป็นการใช้ความร้อนจากกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง (Wood Combustion) เพื่อเป็นแหล่งพลังงานให้กับเตาเผาเซรามิก แก๊สร้อนที่ได้จากกระบวนการเผาไหม้จะถูกส่งไปยังเตาเผาเซรามิกผ่านทางห้องเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ โดยอาศัยแรงดูดจากพัดลมดูดไอเสีย (Exhaust fan part) (4) ขณะเดียวกันในช่วงนี้อากาศในส่วนที่ 2 (Secondary Air) จะยังคงถูกปิดอยู่ การเพิ่มของอุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิกเป็นผลมาจากการทำปฏิกิริยาระหว่างไม้เชื้อเพลิงและออกซิเจนในอากาศ การเติมไม้เชื้อเพลิงและการป้อนอากาศจะเพิ่มขึ้นตามอัตราการเพิ่มอุณหภูมิของการเผาปัสกิต ซึ่งระดับเชื้อเพลิงในช่วงแรกของการเผาจะไม่สูงมากนัก

ช่วงที่ 2 เป็นช่วงที่อุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิกอยู่ระหว่าง 400 - 800 °C เมื่ออุณหภูมิหัวเบิร์นเนอร์ถึงประมาณ 400 °C ให้ทำการเปิดวาล์วป้อนอากาศ (3) ส่วนที่ 2 (Secondary Air) ที่อัตราการไหล 22 m³/hr ส่งไปยังห้องเผาไหม้แก๊ส

เชื้อเพลิงสังเคราะห์ (Burner) เพื่อเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ การทำปฏิกิริยาในช่วงนี้เป็นการทำปฏิกิริยาแบบแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) ซึ่งจะได้แก๊สร้อนที่มีอุณหภูมิสูงสำหรับใช้ในกระบวนการเผาเซรามิก ในช่วงนี้ปริมาณเชื้อเพลิงและอากาศที่ป้อนเข้าสู่เตาผลิตและเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ต้องมีความสัมพันธ์กัน ถ้าชั้นเชื้อเพลิงมากเกินไปจะส่งผลทำให้อุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิกต่ำลง เนื่องจากความชื้นในแก๊สเชื้อเพลิงดูดความร้อนไปบางส่วน ทำให้อุณหภูมิในห้องผลิตและเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ต่ำลง ส่งผลทำให้อุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิกต่ำลงด้วยเช่นกัน แต่ถ้าชั้นเชื้อเพลิงน้อยเกินไปก็จะส่งผลทำให้การเผาไหม้เชื้อเพลิงเปลี่ยนจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) กลายเป็นการเผาไหม้สมบูรณ์ (Combustion) แทนได้ ซึ่งจะส่งผลทำให้ค่ามลพิษสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนด



ภาพที่ 1 (ก.) ส่วนประกอบของชุดเตาเผาผลิตก้อนเซรามิกได้แก่ (1) เตาเผาเซรามิก, (2) เตาผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์, (3) พัดลมป้อนอากาศ, (4) พัดลมดูดไอเสีย, (5) รอกไฟฟ้า (ข.) แสดงการไหลของอากาศภายในชุดการทดลองเตาเผาเซรามิก

เตาเผาเซรามิก (1) ออกแบบให้เป็นลักษณะเป็นตาทรงกระบอกที่มีฐานเตาและฝาครอบ ฐานเตาเชื่อมต่อกับหัวแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ในตำแหน่งแนวสัมผัสเส้นโค้งด้านในของฐานเตาเผาเซรามิก เพื่อให้แก๊สร้อนเคลื่อนที่ไปตามแนวสัมผัสกับเส้นโค้งและไหลวนเป็นวงกลมลักษณะคล้ายไซโคลนจากฐานเตาทรงกระบอกจากส่วนล่างไปยังฝาครอบเตาทรงกระบอกส่วนบน ซึ่งจะช่วยให้แก๊สร้อนสามารถกระจายตัวได้ทั่วถึงตลอดทั้งเตา และชิ้นงานภายในเตาเผาเซรามิกได้รับความร้อนที่สม่ำเสมอ ฝาครอบเตาสามารถยกขึ้น-ลงได้ โดยใช้ระบบรอกไฟฟ้า (5) เพื่อสะดวกแก่การใส่ชิ้นงานและนำชิ้นงานตัวอย่างแก้วเซรามิกออกจากเตาเผา ด้านบนฝาครอบเตาทรงกระบอกมีรูเพื่อระบายไอเสียจากเตาเผาเซรามิก โดยมีพัดลมดูดไอเสีย (4) ดูดไอเสียออกสู่บรรยากาศ พัดลมดูดไอเสียยังทำหน้าที่ควบคุมความดันภายในเตาเผาเซรามิก รวมทั้งเตาผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ให้มีค่าต่ำกว่าความดันบรรยากาศเล็กน้อย เพื่อป้องกันไม่ให้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ไหลย้อนออกทางช่องป้อนเชื้อเพลิง

การเผาดิบ จะใช้อุณหภูมิที่ 800 °C โดยช่วงแรกเป็นการไล่ความชื้นออกจากชิ้นงานที่ 100-120 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นเพิ่มอุณหภูมิที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิเท่ากับ 160 °C/hr จนถึงอุณหภูมิ 800 °C จะขึ้นไฟที่อุณหภูมินี้อีกเป็นเวลา 30 นาที

การวิเคราะห์แก๊สไอเสีย

แก๊สไอเสีย วิธีทดสอบ/วิเคราะห์ หาปริมาณแก๊สไอเสียเพื่อวิเคราะห์หาแก๊สมลพิษ CO และ NO_x ด้วยเครื่อง Gas Analyzer ยี่ห้อ Testo รุ่น 350XL

การวิเคราะห์ตัวอย่างแก้วเซรามิก

ค่าการดูดซึมน้ำ

$$\text{ค่าการดูดซึมน้ำ (\%)} = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100 \quad (1)$$

$W_1 =$ น้ำหนักของแก้วเซรามิกตัวอย่างแห้งหลังจากเผาดิบ (g), $W_2 =$ น้ำหนักของแก้วเซรามิกตัวอย่างแห้งแช่น้ำ (g)
ค่าการหดตัว

$$\text{ค่าการหดตัว (\%)} = \frac{L_1 - L_2}{L_1} \times 100 \quad (2)$$

$L_1 =$ ความหนาของแก้วเซรามิกตัวอย่างก่อนเผาดิบ (g), $L_2 =$ ความหนาของแก้วเซรามิกตัวอย่างหลังเผาดิบ (g)
ค่าความหนาแน่น

$$\text{ค่าความหนาแน่น (kg/m}^3\text{)} = \frac{m}{V} \quad (3)$$

$m =$ มวลของแก้วเซรามิกตัวอย่าง (kg), $V =$ ปริมาตรของแก้วเซรามิกตัวอย่าง (m³)

ผลการวิจัย

ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของเศษไม้

ตารางที่ 1 แสดงผลการวิเคราะห์โดยประมาณ (Proximate analysis) และการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) ของเศษไม้ที่เหลือจากกระบวนการผลิตพลาเลทไม้

Proximate Analysis (wet base, wt.%)	
Moisture	13.42
Volatile matter	63.61
Fixed Carbon	22.08
Ash	0.89
Ultimate Analysis (dry base, wt.%)	
Carbon (C)	45.62
Hydrogen (H)	6.73
Nitrogen (N)	4.33
Sulfur (S)	0.08
Chloride (Cl)	0
Oxygen (O)	42.36
Thermal analysis by calculation method (dry base, wt.%)	
High Heating value (HHV) (kJ/kg)	17,682
Lower Heating value (LHV) (kJ/kg)	15,887

ผลการทำงานของเตาผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่สอดคล้องกับอุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิก

เพื่อให้ได้อุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิกสูงสุดที่ 800 °C โดยมีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิตามเส้นควบคุม (160 °C/hr) จึงต้องควบคุมการทำงานของเตาผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ด้วยการควบคุมการป้อนอากาศส่วนที่ 1 สำหรับเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ และอากาศส่วนที่ 2 สำหรับเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ โดยควบคุมปริมาณเศษไม้ในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ให้มีปริมาณที่เหมาะสม ผลการทดลองควบคุมการทำงานของเตาผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แสดงดังตารางที่ 2 โดยการทำงานของเตาผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แบ่งเป็น 2 ช่วง ที่สอดคล้องกับอุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิก

ช่วงที่ 1 เป็นช่วงที่อุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิกต่ำกว่า 400 °C การทำงานของเตาผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ อยู่ในช่วงเริ่มต้น (Initial period) ในช่วงนี้จะเป็นช่วงเริ่มต้นจุดไฟในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ จึงป้อนเพียงอากาศส่วนที่ 1 (Primary Air) ที่ 13 m³/hr และใส่เศษไม้ในเตาเพียงเล็กน้อยก่อนและใช้เศษกระดาษชุบน้ำมันจุดไฟใส่ตามลงไปเพื่อทำให้เศษไม้ในเตาติดไฟ ช่วงนี้เป็นการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งเพราะอากาศส่วนที่ 1 เพียงพอให้เศษไม้เกิดการเผาไหม้ ความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ส่งผ่านไปยังเตาเผาเซรามิกส่งผลให้อุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิกค่อยๆเพิ่มขึ้น จากนั้นคอยเติมเชื้อเพลิงลงไปในเตาโดยความสูงของชั้นเชื้อเพลิงต้องต่ำกว่าระดับช่องป้อนอากาศส่วนแรก อุณหภูมิการเผาไหม้เพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราการเผาเศษไม้เพิ่มขึ้นตามเวลาเมื่ออุณหภูมิในเตาเผาเซรามิกสูงถึง 100 °C จึงปรับอัตราการป้อนอากาศส่วนที่ 1 เป็น 15 m³/hr และปรับเพิ่มเป็น 18 และ 24 m³/hr เมื่ออุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิกมีค่า 200 และ 300 °C ตามลำดับ จนกระทั่งอุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิกสูงถึง 400 °C ความร้อนที่ป้อนให้เตาเผาเซรามิกมาจากกระบวนการเผาไหม้เศษไม้ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงแข็ง (Wood Combustion) ปริมาณการใช้ไม้เศษไม้และอากาศส่วนที่ 1 แสดงในตารางที่ 2 ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราการเผาไหม้ที่เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิกที่เพิ่มขึ้น เมื่อวิเคราะห์อัตราส่วนการป้อนอากาศส่วนที่ 1 และอัตราการใช้เศษไม้พบว่ามีค่า อัตราส่วนอากาศผสมอยู่ในช่วง 1.36 ถึง 2.07 ซึ่งบ่งบอกว่าใช้อากาศในการเผาไหม้เศษไม้เชื้อเพลิงโดยใช้อากาศมากกว่า 1 เท่าในช่วง 36-107% ซึ่งปริมาณการใช้อากาศส่วนเกินมีแนวโน้มลดลงตามอุณหภูมิในเตาเผาเซรามิกที่เพิ่มขึ้น โดยผลการทดลองเผาเชื้อเพลิงเศษไม้สอดคล้องกับการทดลองของ Vladimir และคณะ⁽¹³⁾ ที่ใช้อากาศในการเผาไหม้มากกว่าอากาศทางทฤษฎีในช่วง 50-100% เพื่อเผาไหม้ขาน้อยที่ก่อให้เกิดประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงกว่า 99%

ตารางที่ 2 แสดงอัตราการป้อนอากาศและปริมาณเชื้อเพลิงสำหรับเตาผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์

อุณหภูมิ เตาเผา เซรามิก (°C)	ช่วงเวลา (hr)	อัตราการป้อนอากาศ (m ³ /hr)			อัตราการ ป้อนไม้ เชื้อเพลิง (kg/h)	อัตราส่วนอากาศ ผสมส่วนผลิต แก๊ส ER _{PA}	อัตราส่วน อากาศผสม ส่วนเผาแก๊ส ER _{SA}	อัตราส่วน อากาศ ผสมรวม ER _T
		Primary Air	Secondary Air	Total Air				
30	0.01	13	0	13	1.5	2.07	0.00	2.07
100	0.50	15	0	15	2.2	1.63	0.00	1.63
100	1.00	15	0	15	2.0	1.79	0.00	1.79
200	0.55	18	0	18	2.6	1.65	0.00	1.65
300	0.55	24	0	24	3.8	1.51	0.00	1.51
400	0.55	24	0	24	4.2	1.36	0.00	1.36
401	0.00	24	27	51	9.4	0.61	0.69	1.30
500	0.55	24	40	64	12.0	0.48	0.80	1.27
600	0.55	24	54	78	15.0	0.38	0.86	1.24
700	0.55	26	70	96	18.5	0.34	0.90	1.24
800	0.55	30	80	110	21.8	0.33	0.88	1.20
800	0.50	18	50	68	7.4	0.58	1.61	2.19

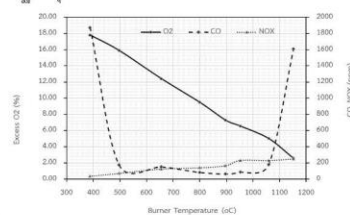
ช่วงที่ 2 เป็นช่วงที่อุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิกสูงกว่า 400 °C การทำงานของเตาผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ เข้าสู่ช่วงปกติ (Normal working period) โดยเศษไม้เชื้อเพลิงถูกป้อนเข้าเตาเพิ่มขึ้นจนมีระดับสูงกว่าระดับช่องป้อนอากาศส่วนที่ 1 เพื่อให้เกิดกระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ (Wood Gasification) ในขณะเดียวกันมีการป้อนอากาศส่วนที่ 2 (Secondary Air) โดยมีอัตราการไหลที่ 27 m³/hr เพื่อเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ (Producer gas Combustion) ได้ความร้อน

การประชุมวิชาการระดับชาติ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีระหว่างสถาบัน ครั้งที่ 9
The 9th Academic Science and Technology Conference 2023
วันศุกร์ที่ 9 มิถุนายน 2566

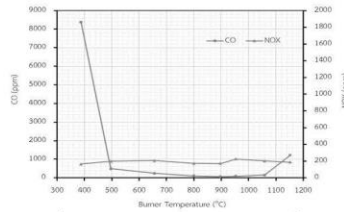
ป้อนเข้าสู่เตาเผาเซรามิกอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้ได้อุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิกเพิ่มขึ้นจาก 400 °C เป็น 800 °C จึงต้องเพิ่มทั้งระดับอุณหภูมิและปริมาณความร้อนจากอัตราการผลิตและเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์โดยต้องเพิ่มทั้งอัตราการป้อนอากาศส่วนที่ 1 และ 2 โดยคอยเติมเศษไม้เชื้อเพลิงเข้าสู่เตาเพื่อรักษาระดับเศษไม้ในเตาให้สูงกว่าช่องป้อนอากาศส่วนที่ 1 ตลอดเวลา ปริมาณการใช้เศษไม้ อัตราการป้อนอากาศส่วนที่ 1 และ 2 แสดงในตารางที่ 2 เมื่อวิเคราะห์อัตราส่วนการป้อนอากาศส่วนที่ 1 และอัตราการใช้เศษไม้พบว่าค่าอัตราส่วนสมมูลส่วนผลิตแก๊ส (ER_{ps}) อยู่ในช่วง 0.33 ถึง 0.61 ซึ่งบ่งบอกว่าใช้อากาศในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์จากเศษไม้ไม่น้อยกว่าอากาศที่ใช้เผาไหม้เศษไม้ทางทฤษฎี ซึ่งจำเป็นต้องป้อนอากาศส่วนที่สองเข้าไปเผาไหม้กับแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่หัวเบิร์นเนอร์โดยมีอัตราส่วนสมมูลส่วนเผาแก๊ส (ER_{gs}) อยู่ในช่วง 0.69 ถึง 0.90 ซึ่งจะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนสมมูลรวม (ER_T) มีค่าอยู่ในช่วง 1.20-1.30 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ในขั้นตอนแรกและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ในขั้นตอนที่สองส่งผลให้อัตราส่วนสมมูลรวมต่ำกว่าอัตราส่วนสมมูลของการเผาไหม้เศษไม้ในช่วงเริ่มต้น โดยใช้อากาศส่วนเกินเพียง 20-30% เมื่ออากาศส่วนเกินที่ใช้ในการเผาไหม้เศษไม้ไม่ถึงจึงส่งผลให้อุณหภูมิการเผาไหม้สูงขึ้น โดยสอดคล้องกับการทดลองและแบบจำลองของ Vidian and Hakim⁽¹⁴⁾ ที่พบว่าอุณหภูมิเปลวไฟเพิ่มขึ้นเมื่ออากาศส่วนเกินในการเผาไหม้เชื้อเพลิงสังเคราะห์ลดลง

ผลการวิเคราะห์แก๊สพิษที่ปลดปล่อยจากเครื่องผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์

ผลการวัดปริมาณการปลดปล่อยแก๊สพิษที่ออกจากเครื่องผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่แสดงดังภาพที่ 2 เมื่อนำผลการวัดการปลดปล่อยแก๊สพิษภาพที่ 2 มาคำนวณหาปริมาณแก๊สไอเสียที่ปล่อยออกจากชุดเตาเผาเซรามิกตามมาตรฐานควบคุมการปล่อยทิ้งอากาศเสียที่ความดัน 1 บรรยากาศ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ในสภาวะแห้ง (Dry Basis) เมื่อปริมาณออกซิเจนส่วนเกิน (Excess Oxygen) ในการเผาไหม้ที่ร้อยละ 7 ให้ผลการคำนวณดังภาพที่ 3 จากภาพที่ 3 พบว่า เมื่ออุณหภูมิที่หัวเบิร์นเนอร์อยู่ในช่วงอุณหภูมิ 100 - 400 °C เป็นช่วงที่ใช้ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงไม้ฟืนแบบเผาไหม้สมบูรณ์ ปริมาณออกซิเจนที่วัดได้มีค่าเท่ากับ 18 เปอร์เซ็นต์ ดังภาพที่ 2 เมื่อพิจารณาปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ภาพที่ 3 พบว่ามีค่าเท่ากับ 8,400 ppm ซึ่งมีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพไอเสียที่กำหนด ทั้งนี้เนื่องจากการเผาในช่วงแรกเป็นการเผาเชื้อเพลิงแข็ง (Wood Combustion) จึงต้องใช้ออกซิเจนในการเผาไหม้จำนวนมาก เพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ อีกทั้งเชื้อเพลิงเป็นเชื้อเพลิงแข็ง การเผาไหม้จึงยากกว่าการเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ จึงทำให้เชื้อเพลิงบางส่วนเกิดการเผาไหม้แบบไม่สมบูรณ์ เมื่อช่วงอุณหภูมิหัวเบิร์นเนอร์มากกว่า 400 °C พบว่าปริมาณออกซิเจนที่วัดได้มีค่าลดลงตามอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในเตา ปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ จาก 8,400 ppm เป็น 400 ppm ที่ช่วงอุณหภูมิจาก 400 °C เป็น 500 °C และเมื่ออุณหภูมิหัวเบิร์นเนอร์สูงกว่า 1,100 °C พบว่าปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เพิ่มขึ้นจาก 600 ppm เป็น 800 ppm ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณออกซิเจนที่อุณหภูมิดังกล่าวมีค่าลดลง จึงส่งผลทำให้เกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์อีกครั้ง เป็นสาเหตุทำให้ปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เพิ่มขึ้น ส่วนแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ (NOx) ตลอดช่วงการเผาไหม้ค่าสูงสุดเท่ากับ 225 ppm ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพไอเสียที่สามารถปล่อยออกจากโรงงานอุตสาหกรรมอยู่เล็กน้อย



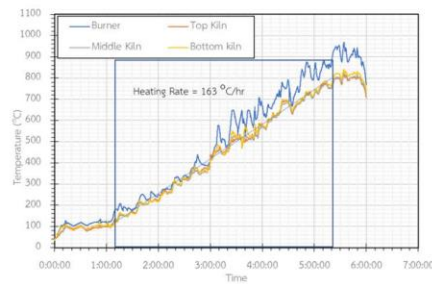
ภาพที่ 2 แสดงปริมาณแก๊สไอเสียที่ปล่อยออกจากชุดเตาเผาเซรามิก



ภาพที่ 3 แสดงปริมาณแก๊สไอเสียที่ปล่อยออกจากชุดเตาเผาเซรามิกเมื่อคำนวณอากาศส่วนเกินที่ร้อยละ 7

ผลการศึกษการใช้แก๊สร้อนจากเตาผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์เพื่อเผาผลิตภัณฑ์เซรามิกขนาดเล็ก

จากผลการทดลองควบคุมอุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิกให้เป็นไปตามกราฟควบคุมมาตรฐานการเผาใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิเท่ากับ 160 °C/hr พบว่าการใช้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์จากเศษไม้สามารถเป็นแหล่งความร้อนในการผลิตภัณฑ์เผาเซรามิกได้ รวมถึงควบคุมอุณหภูมิภายในเตาเผาให้เป็นไปตามกราฟควบคุมอุณหภูมิมาตรฐานสอดคล้องกับผลการทดลองวรันซ์ แจ็งสว่าง⁽⁶⁾ จากภาพที่ 4 แสดงอุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิกและเบิร์นเนอร์ จากการทดลองพบว่า ใช้เวลาในการเผาทั้งหมด 5.83 ชั่วโมง อัตราการเพิ่มอุณหภูมิเท่ากับ 163 °C/hr ใช้ไม้เชื้อเพลิง 49.4 กิโลกรัม อุณหภูมิสุดท้ายถูกรักษาไว้เป็นเวลา 30 นาที อุณหภูมิเฉลี่ยที่เบิร์นเนอร์และอุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิกมีค่าเท่ากับ 969.6 และ 828.3 °C ตามลำดับ ค่าความแปรปรวนของอุณหภูมิเตาเผาเซรามิกเท่ากับ 801 ± 10 °C สีของตัวอย่างแก้วเซรามิกให้สีที่คล้ำกว่าแก้วเซรามิกที่เผาด้วยเตาเผาไฟฟ้าดังภาพที่ 5 เมื่อวิเคราะห์หาค่าการหดตัว ค่าความหนาแน่น และค่าการดูดซับน้ำ มีค่าเท่ากับ 2.69% 1.71 mg/mL และ 18.51% ตามลำดับ



ภาพที่ 4 แสดงอุณหภูมิของชุดเตาเผาเซรามิกเมื่ออัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 163 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง



ภาพที่ 5 แสดงตัวอย่างผลิตภัณฑ์เซรามิกก่อนและหลังเผา (ก) จากชุดการทดลอง (ข) เตาไฟฟ้า

สรุปผลการวิจัยและอภิปรายผล

เตาผลิตและเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แบบไหลขวางที่ใช้เศษไม้ที่เหลือจากการผลิตพลาสมาไม้เป็นเชื้อเพลิงสามารถทำอุณหภูมิเบิร์นเนอร์สูงสุด 1,152 °C ซึ่งเพียงพอต่อการเผาปัสติลที่อุณหภูมิ 800 °C สอดคล้องกับผลการทดลองของกำพล ถาวร⁽¹⁰⁾ ที่ศึกษาเตาแก๊สซีฟเอร์แบบไหลขวางที่ทำงานร่วมกับเตาเผาถ่านสามารถทำอุณหภูมิเบิร์นเนอร์สูงสุด 999.6 °C ซึ่งข้อดีของเตาชนิดนี้สามารถผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่สะอาด อุณหภูมิสูง และยังมีข้อได้เปรียบในเรื่องการเริ่มระบบการทำงานเตารวมถึงการเร่งอุณหภูมิเตาสามารถซึ่งทำได้เร็วกว่าเตาผลิตแก๊สแบบไหลขึ้นและเตาผลิตแก๊สแบบไหลลง ใช้เวลาเพียง 5-10 นาที⁽¹²⁾ ปัจจุบันที่ส่งผลกระทบต่อควบคุมเตาเผาเซรามิกคือ ปริมาณการป้อนไม้เชื้อเพลิง รวมถึงระดับความหนาของชั้นเชื้อเพลิงที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น และอัตราการป้อนอากาศซึ่งในช่วงเริ่มต้นจะต้องใช้อากาศในปริมาณที่มากกว่าเพื่อทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ส่งผลทำให้ค่าอัตราส่วนอากาศผสมมูล (ER) ในช่วงแรกมีแนวโน้มลดลงที่อุณหภูมิ 100 200 300 และ 400 °C ค่าอัตราส่วนอากาศผสมมูลค่าเท่ากับ 1.79 1.65 1.51 และ 1.36 ตามลำดับ ในช่วงที่ 2 เมื่ออุณหภูมิเตาเผาเซรามิกสูงกว่า 400 °C ค่าอัตราส่วนอากาศผสมมูลในส่วนผลิตแก๊ส (ER_g) มีค่าอยู่ในช่วง 0.33-0.61 ให้ผลการทดลองสอดคล้องกับพิษณุ แก้วคุณงาม⁽¹⁵⁾ ซึ่งได้กล่าวในช่วงอัตราส่วนผสมมูลที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์อยู่ระหว่าง 0.2-0.4 ส่งผลทำให้ค่าอัตราส่วนอากาศผสมมูลรวม (ER_t) อยู่ในช่วง 1.20-1.30

คำลพิษที่ปลดปล่อยจากเตาเผาเซรามิก พบว่าปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ในช่วงแรกสูงกว่า 690 ppm ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดเนื่องจากการเผาไหม้ในช่วงแรกยังไม่สมบูรณ์นัก เมื่อถึงช่วงการเผาไหม้แบบแก๊สซีฟเอร์พบว่ามีปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลงจนอยู่ในเกณฑ์ค่ามาตรฐาน เป็นผลมาจากการเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่มีความสมบูรณ์กว่าการเผาไหม้เชื้อเพลิงไม้ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงแข็ง ส่วนแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) ตลอดช่วงการเผาไหม้ค่าสูงสุดเท่ากับ 225 ppm ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพไอเสียที่สามารถปล่อยออกจากโรงงานอุตสาหกรรมอยู่เล็กน้อย ซึ่งเป็นผลจากการเกิด Thermal NO_x เมื่ออุณหภูมิสูงจะส่งผลทำให้ปริมาณไนโตรเจนออกไซด์สูงขึ้น เนื่องจากไนโตรเจนอะตอมคู่ (N₂) เกิดการแตกตัวเป็นไนโตรเจนอะตอมเดี่ยว (N) ส่งผลทำให้สามารถทำปฏิกิริยากับสารอื่นได้ง่าย ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ที่ปลดปล่อยสู่บรรยากาศมีค่าเฉลี่ย 10.46 % ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับธนาคาร วาสนาเพียร์พงค์⁽¹⁶⁾ พบว่าแก๊สแอลพีจีเมื่อผ่านการเผาไหม้จะปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 13.8-15.1 % ซึ่งเห็นได้ว่าเชื้อเพลิงจากเศษไม้สามารถลดการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สู่ธรรมชาติได้ ส่งผลทำให้ลดภาวะโลกร้อน และช่วยจัดการปัญหาเชื้อเพลิงฟอสซิลที่กำลังจะหมดลง รวมถึงปัญหาการเกิดแก๊สแอลพีจี (LPG) ที่มีแนวโน้มสูงขึ้น ทำให้สามารถช่วยแก้ปัญหาในด้านต้นทุนเชื้อเพลิงในอุตสาหกรรมเซรามิกได้

การใช้เศษไม้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเตาเผาเซรามิกนั้นสามารถช่วยลดต้นทุนการผลิตในแง่ของราคาเชื้อเพลิงที่ใช้สำหรับเผาผลิตถ้วยเซรามิกได้ จากการสำรวจราคาเมื่อวันที่ 9 มีนาคม 2566 จากบริษัท พี ที เอ็ม วัสดุ จำกัด ซึ่งประกอบธุรกิจเกี่ยวกับการผลิตพลาสมาไม้ พบว่าไม้สำหรับแปรรูปพลาสมาไม้ราคาเท่ากับ 900 บาทต่อตัน และจากการสืบค้นราคาแก๊ส LPG ในขณะเดียวกันพบว่าไม้ราคาเท่ากับ 30 บาทต่อตัน⁽¹⁷⁾ เมื่อคิดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงเทียบกับขนาดเตาที่เท่ากันพบว่า เตาที่ใช้เชื้อเพลิงแก๊ส LPG ใช้ปริมาณเชื้อเพลิงจำนวน 5 กิโลกรัม จึงสรุปได้ว่าเชื้อเพลิงจากเศษไม้สามารถลดต้นทุนการผลิตในแง่ของต้นทุนเชื้อเพลิงร้อยละ 70.4 เมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงแก๊ส LPG เห็นได้ว่าการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลสามารถนำมาทดแทนการใช้เชื้อเพลิงแก๊ส LPG ได้ เช่นเดียวกับการทดลองของวรรณุช แจงสว่าง⁽⁸⁾ ตัวอย่างแก้วเซรามิกจากชุดการทดลองให้สีคล้ำกว่าแก้วเซรามิกที่เผาด้วยเตาเผาไฟฟ้าเช่นเดียวกับการทดลองของสิทธิพร ชิวสาธิน⁽¹⁸⁾ ทั้งนี้เนื่องจากอาจมีเขม่าจากการเผาไหม้ไม้เชื้อเพลิงมาเคลือบที่ผิวชิ้นงาน และเมื่อนำแก้วเซรามิกตัวอย่างที่ผ่านการเผาแล้วมาวิเคราะห์สมบัติค่าการหดตัว ความหนาแน่น และค่าการดูดซึมน้ำ พบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ใช้เตาเผาแบบไฟฟ้าให้ผลที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

แนวทางในการนำไปใช้ประโยชน์และต่อยอดงานวิจัย

1. เครื่องผลิตและเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์สามารถนำไปต่อยอดสำหรับสร้างความร้อนให้กับอุตสาหกรรมอบแห้ง ต่าง ๆ
2. การใช้เชื้อเพลิงจากเศษไม้ที่เหลือจากการผลิตพลาสมาไม้สามารถทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิล และช่วยลดภาวะโลกร้อนได้

3. แก๊สไอเสียที่ปล่อยสู่บรรยากาศสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้โดยอาศัยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อนำความร้อนที่เหลือไปใช้งานและลดการสูญเสียความร้อนจากระบบ

เอกสารอ้างอิง

1. กรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ รายงานเศรษฐกิจการค้าระหว่างประเทศ ประจำเดือนพฤษภาคม 2564 2565 [Available from: https://ditp.go.th/ditp_web61/article_sub_view.php?filename=contents_attach/732719/732719.pdf&title=732719&cate=592&cl=0].
2. กรมเชื้อเพลิงธรรมชาติ. ข่าวพลังงานประจำวัน 2566 [Available from: <https://dmf.go.th/public/list/data/detail/id/18172/menu/593>].
3. กิตติศักดิ์ ส. ปัญหาและความต้องการของผู้ประกอบการผลิตอุตสาหกรรมเซรามิก ในจังหวัดลำปาง. Industry Technology Lampang Rajabhat University. 2558.
4. ธนาพล ต. สุริยา พ. ปรีชญ์ ปวีณ ก. ภาณุวัฒน์ โ. พลังงานทดแทนชุมชนจากเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งจากทางมะพร้าว. Thai Science and Technology Journal. 2558.
5. ลดาวัลย์ ว. การพัฒนาก้อนเชื้อเพลิงชีวมวลจากเศษฟางข้าวผสมเศษลำไยเหลือทิ้ง. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร ปีที่ 39, ฉบับที่ 2 (เมษายน 2559), หน้า 239-255. 2559.
6. สมมาต น. การทดสอบสมรรถนะเตาชีวมวลขนาด 20 kW. วิศวกรรมศาสตร์ มศว ปีที่ 8, ฉบับที่ 1 (มกราคม 2556), หน้า 24-33. 2556.
7. กฤษฎาณันต์ ศ. อุชา โ. กฤตยชญ์ ค. กิตติโชคิ ศ. BIOMASS GASIFIER PRODUCES PRODUCER GAS FOR CERAMIC KILN. VRU Research and Development Journal Science and Technology. 2562.
8. วรณัฐ น. การศึกษาประสิทธิภาพระบบผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากชีวมวล เพื่อประยุกต์ใช้งานด้านความร้อนในเตาเผาเซรามิก. วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา ปีที่ 27, ฉบับที่ 4 (ตุลาคม 2559), หน้า 37-45. 2559.
9. วิรัตน์ ี. Rice Husk Gasifier Stove-Energy for Thai Agriculturalist. KRU Science Journal. 2565.
10. กำพล ถ. การศึกษาสมรรถนะและมลพิษของเตาเผาถ่านขนาด 200 ลิตรที่ทำงานร่วมกับแก๊สไฟฟ้าเออร์เบิร์นเนอร์: ปริญญาณีพนธ์ (วศ.ม.(วิศวกรรมเครื่องกล)) -- มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 2562; 2562.
11. ณัฐวัฒน์ อ. การออกแบบและสร้างเครื่องผลิตแก๊สร้อนเพื่อทำอากาศร้อนสำหรับอบไม้ยางพารา [วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต วศ.บ (วิศวกรรมเครื่องกล)]. มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์: วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ; 2563.
12. วีรชัย อ. การศึกษาแนวทางการจัดการขยะชุมชน เพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทนแบบครบวงจร [ระดับชุมชน]: รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์: นครราชสีมา: ศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี; 2553.
13. Vladimir I. Kuprianov WP. Experimental Study on Firing of Some Viable Thai Biomass Fuels in a Conical Fluidized-bed Combustor. Asian Journal on Energy and Environment. 2006;7(1):277-88.
14. F.Vidian ARH. Thermodynamic Simulation of Producer Gas Combustion from Biomass Gasification. EAI Endorsed Transactions on Energy Web. 2022;9(5).
15. พิษณุ น. การศึกษาสมรรถนะและมลพิษของชุดอุปกรณ์ผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ จากชีวมวลอัดเม็ดเพื่อผลิตแก๊สร้อนสะอาด: ปริญญาณีพนธ์ (วศ.ม.(วิศวกรรมเครื่องกล)) -- มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 2564; 2564.
16. ธนากร ว. เซรามิกส์: เตาเผา และเทคนิคการเผา: ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ร่วมกับ สมาคมเซรามิกส์ไทย; 2563.

การประชุมวิชาการระดับชาติ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีระหว่างสถาบัน ครั้งที่ 9
The 9th Academic Science and Technology Conference 2023
วันศุกร์ที่ 9 มิถุนายน 2566

17. กระทรวงพลังงาน สส. ราคา LPG 2566 [Available from:
<https://www.eppo.go.th/index.php/th/petroleum/lpg/price-lpg>.
18. ลิทธิพร ช, นารถพล บ. เตาผลิตก๊าซชีววมวลพลังงานทางเลือกในอุตสาหกรรมเซรามิก. วารสารเซรามิกส์. 2551:49-53.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล ญัฐวัฒน์ อ้นสมศรี
วัน เดือน ปี เกิด 3 พฤษภาคม 2542
สถานที่เกิด กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา พ.ศ. 2563 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์
จาก มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ที่อยู่ปัจจุบัน 55/2 หมู่ 1 ตำบล ศรีนาวา อำเภอ เมืองนครนายก จังหวัด นครนายก
26000

