

การศึกษาความเป็นไปได้เชิงเทคนิค ของการนำเชื้อเพลิงขยะมาใช้ใน  
อุตสาหกรรมเซรามิก



นายนนทกร ภาคภูมิ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2566

A TECHNICAL FEASIBILITY STUDY FOR REFUSE-DERIVED FUEL  
UTILIZATION IN CERAMIC INDUSTRY



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of  
Master of Engineering in Mechanical and Process System Engineering  
Suranaree University of Technology  
Academic Year 2023

การศึกษาความเป็นไปได้เชิงเทคนิค ของการนำเชื้อเพลิงขยะมาใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม  
หลักสูตรปริญญาโทฉบับนี้

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



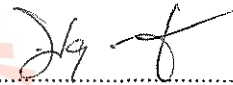
(รศ. ดร.เกียรติศักดิ์ แสงประดิษฐ์)

ประธานกรรมการ



(ผศ. ดร.พรรษา ลิบลับ)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



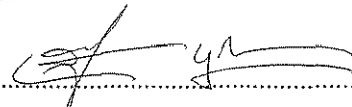
(ผศ. ดร.พวงศักดิ์ จุลยเสน)

กรรมการ



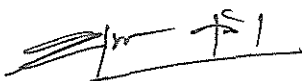
(ผศ. ดร.เทวรัตน์ ตรีอำนาจ)

กรรมการ



(อ. ดร.สามารถ บุญอาจ)

กรรมการ



(รศ. ดร.ยุพาพร รักสกุลพิวัฒน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

นันทกร ภาคภูมิ : การศึกษาความเป็นไปได้เชิงเทคนิค ของการนำเชื้อเพลิงขยะมาใช้ใน  
อุตสาหกรรมเซรามิก (A TECHNICAL FEASIBILITY STUDY FOR REFUSE-DERIVED FUEL  
UTILIZATION IN CERAMIC INDUSTRY)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรรษา ลิบลับ, 128 หน้า

คำสำคัญ : ชีวมวล / เชื้อเพลิงขยะ / เตาเผาภาชนะเครื่องปั้นดินเผา / พลังงานจากขยะ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้เชิงเทคนิค ของการนำเชื้อเพลิงขยะ (RDF) มาใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมในอุตสาหกรรมเซรามิก โดยจะทำการศึกษา 1) สมบัติของเชื้อเพลิงและการแปรรูป RDF-3 โดยใช้ SUT-MBT 2) เทคโนโลยีของเตาเผาเซรามิกและทดสอบการใช้เชื้อเพลิงขยะกับเตาเผาเซรามิกโดยตรง และ 3) การออกแบบและสร้างเตาเผาใหม่ รวมถึงทดสอบสมรรถนะของเตาเผาใหม่ร่วมกับเตาเผาเซรามิก โดยขั้นตอนการศึกษาจะเริ่มจากนำมูลฝอยชุมชนในพื้นที่ใกล้เคียง มาวิเคราะห์สมบัติเชื้อเพลิง แล้วนำไปแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงขยะประเภทที่ 3 โดยใช้เทคโนโลยีการบำบัดขยะ SUT-MBT จากนั้นออกแบบและสร้างเตาเผาใหม่และทดสอบสมรรถนะเตาเผาที่สร้างขึ้น รวมถึงการทดสอบร่วมกับเตาเผาภาชนะเครื่องปั้นดินเผา ผลการศึกษาพบว่าการแปรรูปเชื้อเพลิง RDF-3 มีสัดส่วนพลาสติกเบาร้อยละ 90 โดยคิดปริมาณที่ได้เป็น 70 wt. % d.b. ของ RDF-2 และมีค่าความร้อนสูง 25,790 kJ/kg ส่วนเตาเผาภาชนะเครื่องปั้นดินเผาที่ศึกษาเป็นเตาเผาชนิดทางเดินลมร้อนไหลลง ปริมาตรห้องเผาใหม่ ~9 m<sup>3</sup> ใช้ไม้พินแห้งเป็นเชื้อเพลิงทั้งหมดเมื่อใช้ RDF-3 ทดสอบร่วมกับไม้พิน พบว่าการใช้เชื้อเพลิงและพลังงานลดลงเมื่อเทียบกับไม้พินล้วนสามารถเผาไหม้ได้อุณหภูมิตามต้องการ ค่าสูงสุดอยู่ที่ 970 °C แต่ในก๊าซไอเสียมี O<sub>2</sub> ลดลงร้อยละ 82 ตรงกันข้ามกับ CO ที่มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ RDF-3 ส่วน CO<sub>2</sub> SO<sub>x</sub> NO<sub>x</sub> มีค่าไม่แตกต่างกัน ผ่านเกณฑ์ทุกพารามิเตอร์ มีประสิทธิภาพการเผาไหม้ของไม้พินล้วนและไม้พิน: RDF-3 ร้อยละ 99.92 และ 99.47 ตามลำดับ ผลการออกแบบและสร้างเตาเผาใหม่ เป็นเตาเผาใหม่โดยตรงชนิดเบตติ่ง ขนาด 0.43 m<sup>3</sup> ใช้การป้อนเชื้อเพลิงแบบผสมในทิศทางเดียวกับอากาศ โดยอากาศที่ต้องการในการเผาไหม้ อยู่ที่ 1,079 m<sup>3</sup>/h สมรรถนะของเตาเผาเมื่อใช้ไม้สับ: RDF-3 100: 0, 90: 10, 80: 20, และ 70: 30 เป็นเชื้อเพลิง พบว่าเมื่อสัดส่วน RDF-3 เพิ่มขึ้นส่งผลให้การใช้เชื้อเพลิงและพลังงานลดลง ที่สัดส่วน 80: 20 มีความแปรปรวนของอุณหภูมิ Flue gas น้อยสุด 963 ± 53°C สมบัติก๊าซไอเสียผ่านเกณฑ์ทุกพารามิเตอร์ ประสิทธิภาพการเผาไหม้ร้อยละ 99.71-99.80 จากนั้นใช้สัดส่วน 80:20 ในการเผา ร่วมกับเตาเซรามิก ได้อุณหภูมิตามที่ต้องการ อุณหภูมิสูงสุด 931°C สมบัติก๊าซไอเสียผ่านเกณฑ์ทุกพารามิเตอร์ และมีประสิทธิภาพการเผาไหม้ร้อยละ 99.84 สรุปได้ว่าในเชิงเทคนิคสามารถนำเชื้อเพลิงขยะมาใช้ร่วมกับเตาเผาเซรามิก โดยใช้เตาเผาใหม่ที่สร้างขึ้นได้

สาขาวิชา วิศวกรรมเกษตร  
ปีการศึกษา 2566

ลายมือชื่อนักศึกษา.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....



NONTAKORN PHAKPHOOM : A TECHNICAL FEASIBILITY STUDY FOR REFUSE-  
DERIVED FUEL UTILIZATION IN CERAMIC INDUSTRY.

THESIS ADVISOR : ASST. PROF. PANSA LIPLAP, PhD., 128 PP.

Keyword: BIOMASS / REFUSE-DERIVED FUEL / CERAMIC KILN / WASTE TO ENERGY

The purpose of this research is to study the technical feasibility of using RDF as a co-fuel in the ceramic industry. This was attained through the study of 1) fuel properties and RDF-3 processing by using SUT-MBT, 2) technology and RDF testing of ceramic kiln, 3) the design and construction of the combustion furnace, including performance testing during co-firing with the ceramic kiln. The research was begun by bringing MSW from local administrative organizations nearby. The fuel properties were analyzed and processed into RDF-3 using SUT-MBT, followed by the design and construction of a furnace along with subsequent performance testing. The study showed that the fuel processing of RDF-3 led to a light plastic content of 90 wt. %, constituting 70 wt. % d.b. of the total RDF-2. Additionally, RDF-2 exhibited a higher heating value of (HHV) of 25,790 kJ/kg. The studied ceramic kiln is a down-draft kiln with a combustion chamber of approximately 9 m<sup>3</sup>, utilizing dry firewood as its sole fuel source. During the test involving RDF-3 co-firing with firewood, it was observed that both fuel and energy consumption decreased in comparison to using pure firewood. Combustion at the desired temperature reached its peak at 970°C, but the flue gas exhibited an 82% decrease in O<sub>2</sub>. Conversely, the use of RDF-3 led to an increase in CO levels. CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub>, and NO<sub>x</sub> showed no significant differences, meeting all required parameters. The combustion efficiency of pure firewood was 99.92%, whereas with RDF-3 as a co-fuel, it was 99.47%. The results of the design and construction of the furnace revealed a fixed bed direct combustion furnace with a size of 0.43 m<sup>3</sup>. It could incorporate mixed fuel feed in the same direction as air, with an air requirement of 1,079 m<sup>3</sup>/h. The furnace's performance was assessed during co-firing scenarios with RDF-3 at 0%, 10%, 20%, and 30%, along with wood chips. The study demonstrates that an increase in RDF-3 feed resulted in a decrease in both fuel and energy consumption. At RDF-3 20%, the flue gas temperature exhibited the least fluctuation,

measuring  $963 \pm 53^{\circ}\text{C}$ , meeting all flue gas parameters. The combustion efficiency ranged from 99.71% to 99.80%. Subsequently, employing an 80:20 co-firing ratio with the ceramic kiln achieved a maximum temperature of  $931^{\circ}\text{C}$ , meeting all flue gas parameters, and attaining a combustion efficiency of 99.84%. In conclusion, RDF can be technically utilized with a ceramic kiln using the constructed furnace.



School of Agricultural Engineering  
Academic year 2023

Student's Signature.....  
Advisor's Signature.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี โดยได้รับคำปรึกษาและความช่วยเหลือทั้งด้านวิชาการ แนวทางปฏิบัติ สถานที่ เครื่องมือ และหลายสิ่งอย่าง ซึ่งประกอบด้วยบุคคลสำคัญ ดังต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรรษา ลิบลับ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้มอบโอกาสทางการศึกษา ชี้แนะแนวทางในการเรียน การวิจัย และให้คำปรึกษาที่ส่งเสริมการเรียนรู้ รวมถึงการแก้ไขปัญหาในด้านต่าง ๆ ทั้งการเรียนและการทำงาน ตลอดจนช่วยตรวจสอบและสะท้อนความคิดจนวิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรชัย อาจหาญ ที่ให้ข้อคิดและมุมมองการทำงานทั้งด้านวิชาการและการปฏิบัติ รวมถึงการสะท้อนความคิดเห็น ตั้งข้อสังเกตที่เป็นประโยชน์ และชี้แนะแนวทางในการปรับปรุงแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้มีความถูกต้องจนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.เกียรติศักดิ์ แสงประดิษฐ์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เทวรัตน์ ตรีอำนาจ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พยุงค์ จุลยุเสนา และอาจารย์ ดร.สามารถ บุญอาจ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่สะท้อนมุมมองความคิด และข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยและการประยุกต์ใช้

ขอขอบพระคุณ ดร.ทิพย์สุภินทร์ หินสุขุย ที่ให้คำแนะนำ/ปรึกษาด้านการเรียน เป็นทั้ง Consulting และ counseling ให้ความช่วยเหลือด้านต่าง ๆ ทั้งทางเทคนิคและการใช้เครื่องมือวัด

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เจนวิทย์ วรรณพิระ ที่ให้คำปรึกษาเกี่ยวกับแนวทางการวิจัย การตีพิมพ์บทความวิชาการ และอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกัวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ คุณธนรัช มุขพันธ์ ที่คอยช่วยเหลือด้านเทคนิคการปฏิบัติงาน การแก้ไขปัญหาและการซ่อมบำรุงเครื่องจักร การชี้แนะแนวทาง เสริมความคิด สร้างองค์ความรู้ให้เกิดความชำนาญและมีความเป็นมืออาชีพ ตลอดระยะเวลาการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณเพื่อนพี่น้อง ศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล คุณศศิธร ทะรา คุณพิมพ์ชนก พลทวี คุณรัตติยากร ศรีคุณ คุณอรุณภรณ์ หาดูชะ คุณจิตติกร กิจจนศิริ คุณพงษ์พัฒน์ ร่องเมือง คุณกาญจนาภรณ์ ศรีบุญเรือง และคุณชาริยา โยชน์ ที่คอยให้คำปรึกษาและหาแนวทางช่วยเหลือในทุกด้าน จนวิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณทีมช่าง คุณจำนวน หวังฟุ้งกลาง คุณอุบล เรือนจิ้งหรีด คุณพรชัย สวดยกลาง คุณศักดิ์ณรงค์ จงคะชาติ คุณจรัญ อุดมตะคุ คุณทศพล จันทรวิจิตร คุณภิญโญ ทุโคกกรวด และทีมงานผู้มีส่วนเกี่ยวข้อง ที่ช่วยเหลือในการสร้างเตาเผาไหม้จนสำเร็จลุล่วง

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่มอบโอกาสให้ทุนการศึกษา ศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่กรุณาให้ใช้สถานที่ อุปกรณ์ และเครื่องมือในการทดสอบ ตลอดจนนักวิจัย บัณฑิตศึกษา และบุคลากรในการช่วยเหลืองานวิจัย

## กิตติกรรมประกาศ (ต่อ)

ขอขอบพระคุณสาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้ให้โอกาสศึกษาเล่าเรียน และขอขอบพระคุณ คุณกรรณิกา ประเสริฐสังข์ ผู้เป็นทุกอย่าง ตลอดระยะเวลาการศึกษาในระดับชั้นปริญญาตรีและโท ที่ช่วยให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วง

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่สนับสนุนโครงการ แนวทางในการใช้ประโยชน์เชื้อเพลิงขยะ กับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้วิทยานิพนธ์นี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณทางหุ้นส่วนจำกัด แสงสุวรรณ พอตเทอรี่ ที่กรุณาให้ใช้สถานที่ เครื่องมือ และบุคลากรในการทดสอบเตาเผาไหม้เซรามิกมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ครอบครัว และญาติสนิทมิตรสหาย ที่คอยให้กำลังใจ ปรึกษาปัญหาชีวิต การเงิน การเรียน การทำงาน เป็นส่วนสำคัญในการผลักดันให้จบการศึกษา

นนทกร ภาคภูมิ



# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ข
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ .....	ฎ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b> .....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
<b>บทที่ 2 ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b> .....	5
2.1 บทนำ.....	5
2.2 กรอบแนวคิดการวิจัย.....	5
2.3 การทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.3.1 สถานการณ์ขยะมูลฝอยประเทศไทย.....	6
2.3.2 องค์ประกอบและสมบัติของขยะมูลฝอยชุมชน.....	6
2.3.3 เทคโนโลยีการจัดการขยะมูลฝอย.....	7
2.3.4 เทคโนโลยีการจัดการขยะเพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิง (Refuse-derived Fuel).....	9
2.3.5 เชื้อเพลิงขยะ (refuse-derived fuel: RDF).....	14
2.3.6 เทคโนโลยีการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงขยะ (RDF).....	18
2.3.7 เตาเผาเซรามิก (Ceramic kiln).....	26
2.3.8 โครงสร้างพื้นฐานและหลักการออกแบบเตาเผาอุตสาหกรรม.....	31
2.3.9 วิทยาศาสตร์การเผาไหม้.....	33
2.3.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	36
<b>บทที่ 3 เครื่องมือและวิธีการดำเนินงานวิจัย</b> .....	40
3.1 บทนำ.....	40
3.2 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	40
3.2.1 เชื้อเพลิงและเทคโนโลยีการแปรรูปเชื้อเพลิง.....	42

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.2	ศึกษาสมบัติของเชื้อเพลิง .....	47
3.2.3	ศึกษาความเป็นไปได้เชิงเทคนิค .....	52
3.2.5	สรุปพารามิเตอร์ วิธีการ และเครื่องมือในการทดสอบ .....	63
<b>บทที่ 4</b>	<b>ผลการดำเนินงานวิจัยและการอภิปรายผล .....</b>	<b>64</b>
4.1	บทนำ .....	64
4.2	ผลการศึกษาสมบัติและการแปรรูปเชื้อเพลิง .....	64
4.2.1	สมบัติทางกายภาพ (physical analysis) .....	64
4.2.2	องค์ประกอบแบบประมาณและองค์ประกอบของธาตุ .....	68
4.2.3	สมมูลมวลของระบบการจัดการขยะ SUT-MBT .....	68
4.3	ศึกษาความเป็นไปได้เชิงเทคนิค .....	69
4.3.1	ศึกษาเทคโนโลยีเตาเผาเซรามิกในปัจจุบัน .....	69
4.3.2	การออกแบบและสร้างระบบเผาไหม้ .....	78
4.3.3	การทดสอบสมรรถนะระบบเผาไหม้ .....	85
<b>บทที่ 5</b>	<b>สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ .....</b>	<b>94</b>
5.1	สรุปผลการทดลอง .....	94
5.1.1	การศึกษาสมบัติและการแปรรูปเชื้อเพลิงขยะ .....	94
5.1.2	การศึกษาเทคโนโลยีเตาเผาภาชนะเครื่องปั้นดินเผา .....	94
5.1.3	การทดสอบเชื้อเพลิงขยะประเภทที่ 3 ร่วมกับเตาเผาภาชนะเครื่องปั้นดินเผา .....	94
5.1.4	การออกแบบและสร้างเตาเผาไหม้ .....	94
5.1.5	การทดสอบสมรรถนะเตาเผาไหม้ที่สร้างขึ้น .....	95
5.1.6	การทดสอบเตาเผาไหม้ร่วมกับเตาเผาภาชนะเครื่องปั้นดินเผา .....	95
5.2	ข้อเสนอแนะ .....	95
	รายการอ้างอิง .....	97
	ภาคผนวก ก .....	101
	ประวัติผู้เขียน .....	128

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2- 1 องค์ประกอบเฉลี่ยของตัวอย่างขยะรวมในเทศบาลที่มีปริมาณมากกว่า 50 ตัน/วัน .....	7
2- 2 แสดงข้อมูลสมบัติเชิงเคมีของขยะมูลฝอยในประเทศไทย .....	7
2- 3 เครื่องจักรส่วนหลังของระบบ SUT-MBT .....	11
2- 4 สมบัติของเชื้อเพลิง RDF ที่ได้จากระบบ SUT-MBT .....	14
2- 5 ประเภทของเชื้อเพลิงขยะ .....	16
2- 6 สมบัติเบื้องต้นของเชื้อเพลิงขยะ ที่มา: (กรมควบคุมมลพิษ, 2561) .....	16
2- 7 สมบัติของเชื้อเพลิงขยะที่ต้องการ ของกลุ่มอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ .....	17
2- 8 สมบัติเชื้อเพลิงขยะที่ต้องการ ของกลุ่มอุตสาหกรรมโรงไฟฟ้าขยะ .....	17
3- 1 รายการประเมินวัสดุอุปกรณ์ในการก่อสร้างเตาเผาไหม้ .....	59
3- 2 แสดงรายการพารามิเตอร์ วิธีการ และเครื่องมือในการทดสอบ .....	63
4- 1 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพเชื้อเพลิง .....	65
4- 2 ผลการวิเคราะห์ค่าองค์ประกอบแบบประมาณและองค์ประกอบของธาตุ .....	68
4- 3 ผลการทดสอบใช้เชื้อเพลิง RDF-3 ร่วมกับไม้ฟืน .....	73
4- 4 ผลการวิเคราะห์สมบัติเถ้าถ่าน (Unburned carbon) .....	76
4- 5 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซเผาไหม้ .....	76
4- 6 องค์ประกอบเตาเผาไหม้ .....	79
4- 7 ผลการออกแบบขนาดห้องเผาไหม้ .....	81
4- 8 ผลการศึกษาปริมาณอากาศที่ต้องการในการเผาไหม้ .....	83
4- 9 ผลการศึกษาวัสดุและข้อมูลจำเพาะที่ใช้ในการทำเตาเผาไหม้ .....	84
4- 10 แสดงผลการตรวจวัดอุณหภูมิภายในและท่อทางออกของเตาเผาไหม้ .....	85
4- 11 องค์ประกอบแบบประมาณของเถ้า (Unburned carbon) .....	88
4- 12 แสดงผลการคำนวณประสิทธิภาพการเผาไหม้แต่ละสัดส่วน .....	89
4- 13 แสดงผลการตรวจวัดองค์ประกอบก๊าซเผาไหม้ .....	90
4- 14 องค์ประกอบแบบประมาณของเถ้า (Unburn carbon) .....	93
4- 15 แสดงผลการตรวจวัดองค์ประกอบก๊าซเผาไหม้ .....	93



## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2- 1 (ก) กระบวนหมักแบบเติมอากาศ และ (ข) กระบวนการหมักแบบไม่เติมอากาศ .....	8
2- 2 หลักการบำบัดขยะโดยวิธีทางกลและชีวภาพ (MBT) แบบธรรมชาติ .....	10
2- 3 เทคโนโลยีการบำบัดขยะ SUT-MBT (ที่มา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี).....	13
2- 4 แสดงประเภทของเชื้อเพลิงขยะ (RDF-1 – RDF-7).....	15
2- 5 เตาเผาแบบตะแกรงเคลื่อนที่ (Traveling Grate) (JGSEE, มปป).....	19
2- 6 เตาเผาแบบกระจาย (Traveling Grate) (สมศักดิ์ ขจรเฉลิมศักดิ์, 2560) .....	19
2- 7 ระบบเผาไหม้แบบ Underfeed Firing (JGSEE, มปป).....	20
2- 8 การเผาไหม้แบบ pulverized combustion (JGSEE, มปป) .....	21
2- 9 ระบบเผาไหม้แบบไซโคลน (ที่มา: อติศร มาลาแก้ว และธนวัฒน์ ไทยภัทรพงษ์, 2559).....	21
2- 10 เตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized Bed) (JGSEE, มปป).....	22
2- 11 ประเภทเตาผลิตแก๊ส (ก) แบบไหลขึ้น (ข) แบบไหลลง (ค) แบบไหลตามขวาง.....	24
2- 12 เตาผลิตแก๊สแบบฟลูอิดไดซ์เบด (ก) แบบบับบลิ้ง (ข) แบบหมุนเวียน (JGSEE, มปป).....	25
2- 13 เตาเผาเซรามิกชนิดทางเดินลมร้อนแนวนอน ที่มา: (Olsen, 2001).....	28
2- 14 (ก) ประเภทของเตาเผาเซรามิกชนิดทางลมร้อนขึ้น และ (ข) ทางลมร้อนลง .....	28
3- 1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	41
3- 2 ขั้นตอนการดำเนินงานสุ่มเก็บตัวอย่างขยะและการเคราะห์.....	43
3- 3 การเตรียมตัวอย่างวิเคราะห์.....	43
3- 4 ระบบบำบัดขยะทางกลและชีวภาพ SUT-MBT (ที่มา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี).....	45
3- 5 ประเภทไม้ฟืนและตำแหน่งในการป้อนของเตาเผาเซรามิก.....	46
3- 6 เชื้อเพลิงและการเตรียมเชื้อเพลิงสำหรับทดสอบระบบ .....	47
3- 7 การเตรียมเชื้อเพลิงและเครื่องมือในการหาค่าความร้อนเชื้อเพลิง .....	49
3- 8 เครื่องมือวิเคราะห์หองค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate Analysis).....	51
3- 9 เครื่องมือวิเคราะห์หองค์ประกอบธาตุ (Ultimate Analysis).....	52
3- 10 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิและองค์ประกอบของเตาเผาเซรามิก .....	53
3- 11 ขั้นตอนการทดสอบกับเตาเผาเซรามิกโดยตรง .....	54
3- 12 รูปแบบการเผาไหม้ร่วมกับเตาเผาเซรามิกโดยตรง .....	55
3- 13 ลักษณะห้องเผาไหม้.....	56
3- 14 ขั้นตอนการทดสอบกับเตาเผาเซรามิกโดยตรง .....	57
3- 15 ระบบป้อนเชื้อเพลิงขยะ.....	57



## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3- 16 รูปทรงห้องรองรับเก้าอี้ .....	58
3- 17 ขั้นตอนการดำเนินงานทดสอบ.....	60
3- 18 ขั้นตอนการดำเนินงานทดสอบ.....	62
4- 1 องค์ประกอบเชื้อเพลิงขยะ SUT-RDF-3 (wt. % w.b.).....	64
4- 2 การศึกษาสมบัติทางกายภาพเชื้อเพลิง .....	66
4- 3 องค์ประกอบ SUT-RDF-2 .....	67
4- 4 สมดุลมวลของระบบการจัดการขยะ SUT-MBT.....	69
4- 5 องค์ประกอบเตาเผาเซรามิก/เครื่องปั้นดินเผา.....	71
4- 6 อุณหภูมิเตาเผาเซรามิกจากการใช้เชื้อเพลิง (ก.) ไม้พินล้วน (ข.) ไม้พิน : RDF-3.....	72
4- 7 การใช้เชื้อเพลิงจากการทดสอบใช้ (ก.) ไม้พินล้วน (ข.) ไม้พิน : RDF .....	74
4- 8 การใช้พลังงานจากการทดสอบใช้ (ก.) ไม้พินล้วน (ข.) ไม้พิน: RDF.....	75
4- 9 เชื้อเพลิงและการเก็บข้อมูลปริมาณการใช้เชื้อเพลิง.....	77
4- 10 ผลการออกแบบและสร้างเตาเผาใหม่.....	78
4- 11 รูปทรงและทางเดินลมร้อน (ก.) แบบที่ 1 (ข.) แบบที่ 2 (ค.) แบบผสม .....	80
4- 12 ผลการออกแบบและสร้างห้องเผาใหม่ .....	81
4- 13 ผลการออกแบบและสร้างระบบป้อนเชื้อเพลิง .....	82
4- 14 ผลการออกแบบและสร้างระบบรองรับเก้าอี้.....	83
4- 15 อุณหภูมิ (ก.) ภายในเตา และ (ข.) ท่อทางออก.....	86
4- 16 ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงที่ (@ 3 h stable).....	87
4- 17 ปริมาณการใช้พลังงาน (@ 3 h stable) .....	88
4- 18 แสดงลักษณะเก้าอี้ของเชื้อเพลิงผสมทั้ง 4 สัตส่วน.....	89
4- 19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแต่ละตำแหน่งกับเวลาในเตาเผาภาชนะเครื่องปั้นดินเผา.....	91
4- 20 แสดงความสัมพันธ์ของการใช้เชื้อเพลิงเทียบกับเวลาในการเดินระบบ.....	92
4- 21 แสดงความสัมพันธ์ของการใช้พลังงานเทียบกับเวลาในการเดินระบบ.....	92

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

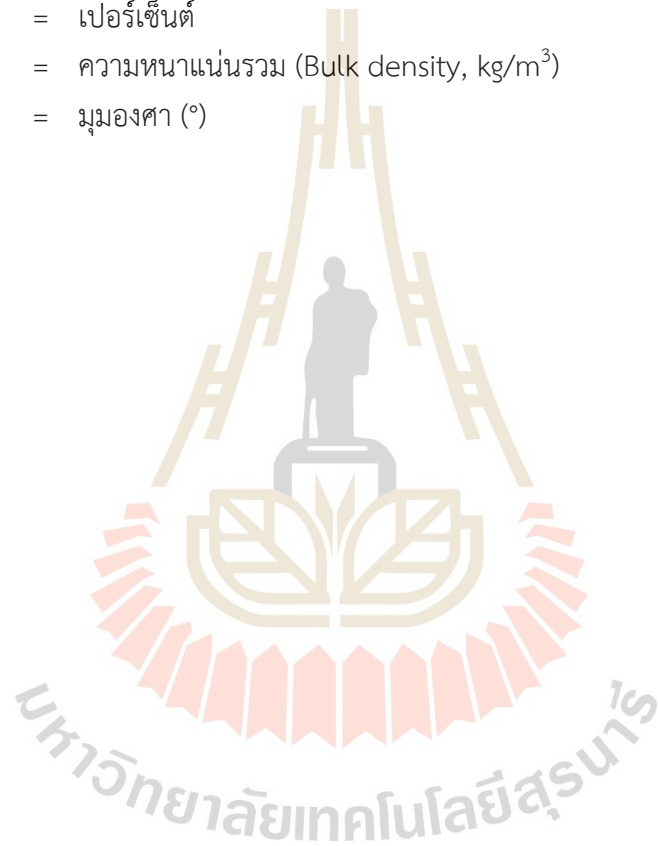
A.	=	เถ้า (Ash, wt. % d.b.)
ASTM	=	American Society of Testing and Material
A <sub>1</sub>	=	พื้นที่ช่องป้อนเชื้อเพลิงเตาเผาเซรามิก (เก่า)
A <sub>2</sub>	=	พื้นที่ช่องป้อนเชื้อเพลิงเตาเผาใหม่ (ใหม่)
BFB	=	เตาฟลูอิดไคซ์เบดแบบบับบลิ้ง (bubbling fluidized bed)
CFB	=	เตาฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน (circulating fluidized bed)
C.	=	ธาตุคาร์บอน (Carbon)
CO	=	ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon monoxide gas)
Cl	=	คลอไรด์ (Chloride)
CH <sub>4</sub>	=	Methane gas
°C	=	องศาเซลเซียส
H <sub>2</sub> S	=	Hydrogen Sulfide
FX	=	คาร์บอนคงตัว (Fixed carbon, wt. % d.b.)
H	=	ธาตุไฮโดรเจน (Hydrogen)
HHV.	=	ค่าความร้อนสูง (High heating value, MJ/kg, kJ/kg, kcal/kg)
H <sub>2</sub> O	=	น้ำ
h	=	ชั่วโมง (hour)
h.	=	ความสูงภายในเตาเผาใหม่
h <sub>1</sub>	=	ความสูงห้องเผาไหม้
h <sub>2</sub>	=	ความสูงห้องรองรับเถ้า
h <sub>3</sub>	=	ความสูงช่องป้อนไม้ฟืน
JGSEE	=	บัณฑิตวิทยาลัยร่วมด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม
kcal	=	กิโลแคลอรี (kilocalories)
kW	=	กิโลวัตต์
kJ	=	กิโลจูล (kilojoule)
LHV.	=	ค่าความร้อนต่ำ (Low heating value MJ/kg, kJ/kg, kcal/kg)
L	=	ความยาวภายในเตาเผาใหม่/ห้องรองรับเถ้า
MT	=	การผลิตเชื้อเพลิงขยะด้วยระบบเชิงกล (Mechanical Treatment)
MBT	=	การผลิตเชื้อเพลิงขยะรูปแบบเชิงกลและชีวภาพ (Mechanical and Biological Treatment)
M	=	ความชื้น (Moisture, % w.b., % d.b.)

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

mg.	=	มิลลิกรัม (milligram)
min.	=	นาที (minute)
MJ	=	เมกะจูล (Megajoule)
mm	=	มิลลิเมตร (millimeter)
m <sup>3</sup>	=	ลูกบาศก์เมตร (Cubic meter)
MPa	=	เมกะปาสคาล (Mega Pascal)
N	=	ธาตุไนโตรเจน (Nitrogen)
NO <sub>2</sub>	=	ไนโตรเจนไดออกไซด์ (Nitrogen dioxide)
NO <sub>x</sub>	=	ธาตุออกไซด์ของไนโตรเจน (Nitrogen oxide)
NH <sub>3</sub>	=	ก๊าซแอมโมเนีย (Ammonia gas)
N.D.	=	ตรวจไม่พบ (Not Detect)
N/A	=	ไม่มีข้อมูล/ไม่แสดงข้อมูล
O	=	ธาตุออกซิเจน (Oxygen)
O <sub>2</sub>	=	แก๊สออกซิเจน (Oxygen gas)
Q	=	อัตราการไหลเชิงปริมาตร (Volume flow rate, m <sup>3</sup> /h)
RDF	=	เชื้อเพลิงขยะ (Refuse-Derive Fuel)
RDF-1	=	เชื้อเพลิงขยะประเภทที่ 1
RDF-2	=	เชื้อเพลิงขยะประเภทที่ 2
RDF-3	=	เชื้อเพลิงขยะประเภทที่ 3
RDF-4	=	เชื้อเพลิงขยะประเภทที่ 4
RDF-5	=	เชื้อเพลิงขยะประเภทที่ 5
RDF-6	=	เชื้อเพลิงขยะประเภทที่ 6
RDF-7	=	เชื้อเพลิงขยะประเภทที่ 7
SMEs	=	กิจการหรือผู้ประกอบการขนาดเล็ก
SUT	=	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
SUT-MBT	=	ระบบบำบัดขยะเชิงกลและชีวภาพ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
S	=	ธาตุซัลเฟอร์ (Sulfur)
SO <sub>2</sub>	=	แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Sulfur dioxide)
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	=	เกลือซัลเฟต
T <sub>i</sub>	=	อุณหภูมิภายในเตาเผาไหม้
T <sub>o</sub>	=	อุณหภูมิที่ทางออกลมร้อนของเตาเผาไหม้
T <sub>1</sub>	=	อุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิก-ด้านหน้า
T <sub>2</sub>	=	อุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิก-ตรงกลาง

### คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

$T_3$	=	อุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิก-ด้านท้าย
VM	=	สารระเหย (Volatile Mater, wt. % d.b.)
% vol.	=	สัดส่วนโดยปริมาตร
% w.b.	=	ความชื้นมาตรฐานเปียก (% Wet basis)
% d.b.	=	ความชื้นมาตรฐานแห้ง (% Wet basis)
% wt.	=	สัดส่วนโดยน้ำหนัก
%	=	เปอร์เซ็นต์
$\rho$	=	ความหนาแน่นรวม (Bulk density, $\text{kg/m}^3$ )
$\theta$	=	มุมมองศา ( $^\circ$ )



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

ประเทศไทยอยู่ในช่วงของการประกาศให้ “ขยะเป็นวาระแห่งชาติ” ซึ่งมีขยะมูลฝอยเกิดขึ้นมากกว่า 25.70 ล้านตัน ในปี พ.ศ. 2565 ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2563 ขยะมูลฝอยประเทศไทยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งหลังจากการคัดแยกและใช้ประโยชน์ จะเหลือขยะที่ต้องกำจัดมากกว่าร้อยละ 59 โดยแบ่งเป็นการกำจัดแบบถูกต้องร้อยละ 38 เช่น การฝังกลบอย่างถูกหลักสุขาภิบาล เตาเผาขยะเพื่อผลิตพลังงาน เตาเผาที่มีการบำบัดมลพิษ การผลิตเชื้อเพลิงขยะ (Refuse-Derived Fuel: RDF) และระบบผสมผสาน นอกจากนี้ยังมีขยะมูลฝอยที่กำจัดแบบไม่ถูกต้องกว่าร้อยละ 21 หรือประมาณ 5.4 ล้านตัน เช่น การเทกองกลางแจ้ง ฝังกลบไม่ตรงตามหลักสุขาภิบาล การเผากลางแจ้ง และการเผาในเตาที่ไม่มีระบบบำบัดมลพิษทางอากาศ (กรมควบคุมมลพิษ, 2565) ซึ่งสาเหตุเกิดจากหลายพื้นที่อยู่ห่างไกลจากแหล่งกำจัด เช่น โรงไฟฟ้าขยะ โรงงานผลิตปูนซีเมนต์ เตาเผาขยะ เป็นต้น ทำให้มีค่าใช้จ่ายสูงในการขนส่งและไม่คุ้มทุน หลายพื้นที่จึงจำเป็นต้องกำจัดแบบไม่ถูกต้องและเทกองให้ขยะสะสมจนล้นพื้นที่ทิ้งขยะ เกิดมลพิษส่งผลกระทบต่อชุมชนในพื้นที่ใกล้เคียง จึงจำเป็นต้องหาแนวทางในการใช้ประโยชน์จากขยะมูลฝอยที่เหมาะสมกับพื้นที่ห่างไกล

ที่ผ่านมามีการนำเชื้อเพลิงขยะไปใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น Valdés et al. (2016) ได้ใช้เชื้อเพลิงขยะ (RDF) ร่วมกับถ่านหินและกะลาปาล์ม ในกระบวนการเผาอิฐ พบว่าสามารถลดการสูญเสียความร้อนได้ถึงร้อยละ 5 และยังลดการเกิดมลพิษเมื่อเทียบกับการใช้ถ่านหินอย่างเดียว เช่นเดียวกับ Hemidat et al. (2019) และ Kara (2012) ได้นำ RDF ไปใช้ร่วมกับถ่านหินในเตาเผาปูนซีเมนต์ พบว่าสามารถลดต้นทุนได้มากถึง 486 USD/h และ 94 USD/h ตามลำดับ ซึ่งส่วนมากเป็นการประโยชน์ใช้ร่วมกับอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ โดยอุตสาหกรรมขนาดเล็ก หรือ Small-Medium Enterprise: SMEs เช่น อุตสาหกรรมเครื่องปั้นดินเผา/เซรามิก โรงไฟฟ้าชีวมวล โรงงานอบไม้ ก็ถือเป็นอุตสาหกรรมที่มีศักยภาพในการใช้ประโยชน์จาก RDF ซึ่ง J. Hongrapipat et al. (2022) ได้ทดสอบ RDF-5 กับโรงไฟฟ้าชีวมวล โดยใช้กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน พบว่าอุณหภูมิการเผาไหม้มีแนวโน้มสูงกว่าชีวมวล มีความเสถียรเทียบเท่าชีวมวล อัตราการป้อนวัตถุดิบลดลงเมื่อใช้ RDF-5 เพิ่มขึ้น และไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพก๊าซเผาไหม้ที่ได้ รวมถึงไม่ก่อให้เกิดมลพิษที่เกินมาตรฐานอีกด้วย แต่ถ้าจะใช้ RDF 2 หรือ RDF-3 ร่วมด้วยยังมีข้อจำกัด เนื่องจากเชื้อเพลิงยังมีขนาดใหญ่และหลากหลาย ไม่เหมาะกับเครื่องจักรเดิมของอุตสาหกรรม จึงจำเป็นต้องหาแนวทางเพื่อใช้กับอุตสาหกรรมอื่น ที่สามารถใช้ RDF-2 หรือ 3 ได้โดยไม่ต้องแปรรูปเพิ่ม

อุตสาหกรรมเครื่องปั้นดินเผา/เซรามิก ถือเป็นอุตสาหกรรมที่น่าสนใจ เนื่องจากมีการใช้พลังงานความร้อนค่อนข้างสูง จากการทดสอบเตาเผาภาชนะเครื่องปั้นดินเผาด้านเหนียวของ พรรษา ลิปลับ และคณะ (2565) ใช้เวลาในการเผา 9-11 วัน/รอบ อุณหภูมิสูงสุด 950-970 °C ใช้ไม้พินแห้ง 3-4 ต้น/รอบ/เตา ซึ่งในอนาคตไม้พินแห้งเริ่มหายากและมีต้นทุนสูงขึ้น การใช้เชื้อเพลิงขยะเป็นเชื้อเพลิงเสริม น่าจะเป็นทางเลือกที่ดีในการลดต้นทุนและการขาดแคลนไม้พินในอนาคต ซึ่งข้อมูลนี้สอดคล้องกับมาตรฐานการเผาไหม้ในเตาเผาขยะตามประกาศของ กรมควบคุมมลพิษ (2561) อุณหภูมิการเผาไหม้ในเตาต้องไม่ต่ำกว่า 850 °C จึงจะทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ และต้องไม่เกิน 1,100 °C เพื่อไม่ให้เกิดก๊าซ NO<sub>x</sub> เพิ่มขึ้น นอกจากนี้อุตสาหกรรมเซรามิกยังมีกระจายอยู่ในหลายภูมิภาคในประเทศไทย และมีสินค้าส่งออกต่างประเทศอีกหลายแห่ง เช่น เชียงใหม่ นครราชสีมา ลำปาง ราชบุรี สมุทรสาคร ฯลฯ ซึ่งในตำบลด้านเหนียว จังหวัดนครราชสีมา ก็ถือเป็นแหล่งผลิตเครื่องปั้นดินเผาที่จำหน่ายทั้งไทยและต่างประเทศ อยู่ไม่ห่างจากแหล่งผลิตเชื้อเพลิงขยะ รัศมีไม่เกิน 30 km ได้แก่ เทศบาลนครนครราชสีมา เทศบาลเมืองเมืองปัก

อย่างไรก็ตาม การนำเชื้อเพลิงขยะไปเผาพร้อมกับชีวมวลในเตาเผาภาชนะเครื่องปั้นดินเผา จำเป็นต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพการเผาไหม้และการปฏิบัติงานจริง ซึ่ง นนทกร ภาควงุมิ และคณะ (2565) พบว่าเมื่อป้อน ไม้พินและ RDF-3 ในอัตราส่วนเฉลี่ย 83: 17 wt. % w.b. มี Oxygen (O<sub>2</sub>) ที่เหลือจากการเผาไหม้ลดลงร้อยละ 82 เทียบกับการใช้ไม้พินล้วน แต่ไม่พบคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่แตกต่างกันมาก และไม่กระทบต่อสมรรถนะการเผาไหม้ แต่การป้อน RDF-3 มีอุณหภูมิค่อนข้างกว้างในระยษสั้น แต่การป้อน RDF-5 ในสัดส่วนเดียวกัน อุณหภูมิค่อนข้างเสถียรมากกว่า ประกอบกับหน่วยงานท้องถิ่นส่วนมากที่เป็นสถานที่กำจัดขยะมูลฝอย จะมีเชื้อเพลิงขยะในรูปของ RDF-2 และ RDF-3 เป็นหลัก แต่ RDF-2 ยังมีขนาดใหญ่และความชื้นสูง การเลือกใช้ RDF-3 จึงเหมาะสมกว่า แต่ในทางปฏิบัติ การป้อน RDF-3 ในเตาเผาเซรามิกทำได้ยาก เนื่องจากต้องเตรียมให้เป็นทรงกระบอกหรือจับก้อน เพื่อให้สามารถดันเชื้อเพลิงเข้าไปเผาไหม้ด้านในเตาเผาได้ บางครั้งอาจทำให้อุดตันช่องป้อนเชื้อเพลิงและทางเข้าอากาศ ที่จะส่งผลต่อปริมาณออกซิเจนสำหรับการเผาไหม้ลดลง เสี่ยงต่อการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ และอุณหภูมิไม่คงที่ ด้วยปัญหาเหล่านี้ จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาความเป็นไปได้เชิงเทคนิคของการนำเชื้อเพลิงขยะมาใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิก ที่สามารถป้อนเชื้อเพลิงขยะได้โดยไม่ต้องมีขั้นตอนยุ่งยากและไม่กระทบต่อสมรรถนะการเผาไหม้

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเพื่อประเมินความเป็นไปได้เชิงเทคนิค ของการนำเชื้อเพลิงขยะมาใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิก โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ช่วง 1) ศึกษาสมบัติเชื้อเพลิงและการแปรรูปเชื้อเพลิงขยะ 2) ศึกษาเทคโนโลยีเตาเผาภาชนะเครื่องปั้นดินเผาและทดสอบการใช้เชื้อเพลิงกับเตาเผาเซรามิกโดยตรง รวมถึงการออกแบบและสร้างเตาเผาไหม้ 3) ทดสอบเตาเผาไหม้ที่สร้างขึ้นและทดสอบร่วมกับเตาเผาภาชนะเครื่องปั้นดินเผา โดยขั้นตอนการศึกษาจะเริ่มจากนำ RDF-2 และชีวมวล มาวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ แบบประมาณ และทางเคมี จากนั้นนำ RDF-2 ไปแปรรูปเป็น RDF-3 โดยใช้เทคโนโลยีการจัดการขยะของ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (Suranaree University



of Technology, Mechanical and Biological Treatment: SUT MBT) เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงในงานวิจัย จากนั้นศึกษาเทคโนโลยีเตาเผาภาชนะเครื่องปั้นดินเผาและทดสอบใช้ RDF-3 ร่วมด้วย เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบและสร้างเตาเผาใหม่ ท้ายสุดเป็นการทดสอบสมรรถนะเตาเผาที่สร้างขึ้นและทดสอบร่วมกับเตาเผาภาชนะเครื่องปั้นดินเผา

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาสมบัติเชื้อเพลิงและการแปรรูปเชื้อเพลิงขยะโดยใช้เทคโนโลยีการบำบัดขยะด้วยวิธีทางกลและชีวภาพ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (SUT-MBT)
2. เพื่อศึกษาเทคโนโลยีเตาเผาภาชนะเครื่องปั้นดินเผาและทดสอบการใช้เชื้อเพลิงขยะเป็นเชื้อเพลิงร่วมในการเผาไหม้โดยตรง
3. เพื่อออกแบบและสร้างเตาเผาใหม่ที่สามารถใช้กับ RDF-3 เป็นเชื้อเพลิงร่วมกับเชื้อเพลิงดั้งเดิมในเตาเผาภาชนะเครื่องปั้นดินเผา
4. เพื่อทดสอบสมรรถนะเตาเผาใหม่ที่สร้างขึ้นและทดสอบร่วมกับเตาเผาภาชนะเครื่องปั้นดินเผา

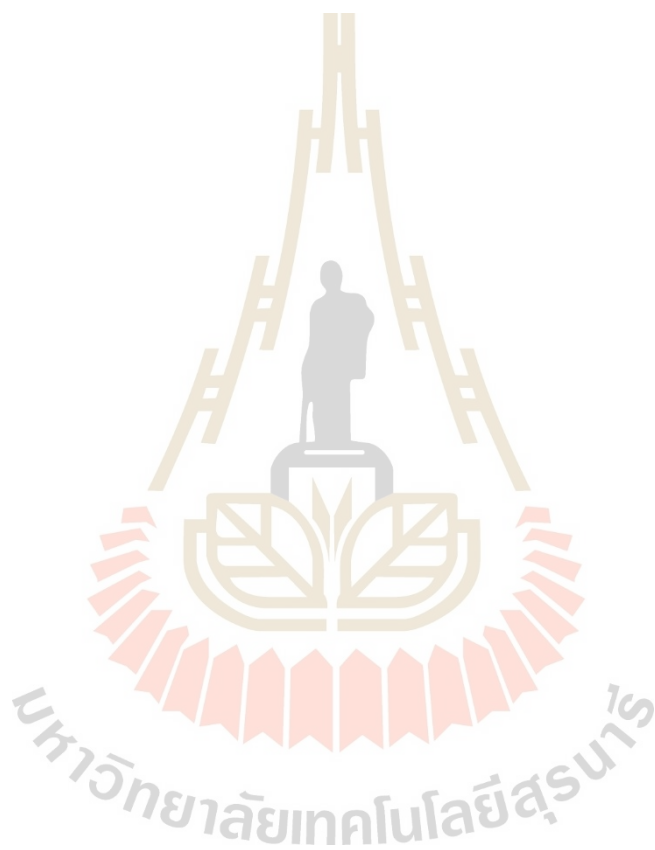
## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. อุตสาหกรรมที่นำไปทดสอบ เป็นอุตสาหกรรมเซรามิกในพื้นที่ ตำบลด่านเกวียน อำเภอโชคชัย จังหวัดนครราชสีมา โดยใช้เตาเผาเซรามิกประเภทภาชนะเครื่องปั้นดินเผา ชนิดทางเดินลมร้อนลง
2. เชื้อเพลิงขยะที่ใช้เป็นขยะมูลฝอยชุมชนในจังหวัดนครราชสีมา ที่ผ่านกระบวนการแปรรูปจาก RDF-2 เป็น RDF-3 โดยใช้ต้นแบบการแปรรูปเชื้อเพลิงขยะ ด้วยการบำบัดทางกลและชีวภาพของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (SUT-MBT)
3. เป็นการศึกษาในเชิงเทคนิคของการนำ RDF-3 มาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมเซรามิก ได้แก่ รูปแบบการเตรียมเชื้อเพลิง การออกแบบและสร้างเตาเผา การทดสอบสมรรถนะเตาเผาใหม่ (อุณหภูมิภายในเตา ก๊าซไอเสีย ประสิทธิภาพการเผาไหม้) โดยยังไม่คำนึงถึงมลพิษที่เกิดจากกระบวนการเผาไหม้และการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์
4. การทดสอบเตาเผาใหม่ร่วมกับเตาเผาภาชนะเครื่องปั้นดินเผา เป็นการทดสอบเตาเปล่า เนื่องจากภาชนะที่จะใช้เผามีมูลค่าสูง จึงจำเป็นต้องทดสอบในเตาเปล่า ดังนั้น ข้อมูลที่ได้จะไม่ถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดสอบอื่น

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. พัฒนาเทคโนโลยีที่สามารถนำเชื้อเพลิงขยะไปใช้ร่วมกับเชื้อเพลิงหลักในอุตสาหกรรมเซรามิกหรืออุตสาหกรรมประเภทอื่น ๆ ในลักษณะเดียวกัน
2. เกิดองค์ความรู้ในการใช้ประโยชน์จากเชื้อเพลิงขยะ สำหรับเป็นเชื้อเพลิงทดแทนหรือเชื้อเพลิงเสริมร่วมกับเชื้อเพลิงดั้งเดิมของอุตสาหกรรม

3. เป็นแนวทางในการนำเชื้อเพลิงขยะไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมเตาเผาภาชนะเครื่องปั้นดินเผา/เซรามิก หรืออุตสาหกรรมขนาดย่อมอื่น ๆ ที่มีลักษณะคล้ายกัน
4. เป็นข้อมูลพื้นฐานในการต่อยอดการวิจัยในอนาคต ในด้านการนำเชื้อเพลิงไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมขนาดเล็ก





## บทที่ 2

### ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 บทนำ

ในบทนี้เป็นการกล่าวถึงข้อมูลสถานการณ์ปัญหาขยะมูลฝอยและเทคโนโลยีต่าง ๆ ในการจัดการขยะมูลฝอย การแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงขยะ กระบวนการผลิตพลังงานจากขยะ และเทคโนโลยีทางด้านการเผาเซรามิก ซึ่งมีข้อมูลเกี่ยวกับเตาเผาและการนำเชื้อเพลิงขยะมาใช้กับอุตสาหกรรมเซรามิก รวมถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับประเด็นที่กำลังศึกษา

#### 2.2 กรอบแนวคิดการวิจัย

ปัจจุบันมีการส่งเสริมและสนับสนุนให้มีการนำขยะชุมชนมาใช้ประโยชน์ในรูปของเชื้อเพลิงขยะ (RDF) อย่างกว้างขวาง เพื่อป้อนเข้าสู่โรงไฟฟ้าหรืออุตสาหกรรมที่ใช้ความร้อน เช่น โรงงานผลิตปูนซีเมนต์ เป็นต้น อย่างไรก็ตาม สถานที่ที่ต้องการใช้เชื้อเพลิงขยะดังกล่าวมีอยู่จำกัด ไม่ครอบคลุมทั่วภูมิภาค หลายองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น (อปท.) หรือสถานที่กำจัดมูลฝอยชุมชน อยู่ในพื้นที่ห่างไกล ทำให้การขนส่งไม่คุ้มค่าต่อมูลค่าเชื้อเพลิงที่ได้ ทำให้ปัจจุบัน RDF ที่คัดแยกได้ยังคงสภาพเป็นขยะอยู่ในพื้นที่ชุมชนและเกิดปัญหาทางสิ่งแวดล้อมเช่นเดิม ดังนั้น การหารูปแบบการใช้ประโยชน์จาก RDF ในพื้นที่ใกล้เคียง เช่น วิสาหกิจชุมชนขนาดกลางและขนาดย่อม (SMEs) หรืออุตสาหกรรมต่าง ๆ ที่มีการใช้เชื้อเพลิงผลิตความร้อน น่าจะเป็นทางออกของปัญหานี้ได้

อุตสาหกรรมส่วนใหญ่ไม่ว่าจะเป็นขนาดใหญ่หรือเล็กต้องการพลังงานในกระบวนการผลิต โดยเฉพาะในพลังงานในรูปของความร้อน ซึ่งจากข้อมูลบัญชีรายการโรงงานอุตสาหกรรมในปี 2557 ได้มีการสรุปผู้ประกอบการที่มีความต้องการใช้เชื้อเพลิงสำหรับผลิตพลังงานกว่า 9,000 ราย แบ่งเป็นอุตสาหกรรม 10 ประเภท ได้แก่ 1) อุตสาหกรรมเคมี 2) อุตสาหกรรมโลหะมูลฐาน 3) อุตสาหกรรมไม้ 4) อุตสาหกรรมกระดาษ 5) อุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์โลหะ 6) อุตสาหกรรมสิ่งทอ 7) อุตสาหกรรมอลูมิเนียม 8) อุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม 9) อุตสาหกรรมโรงไฟฟ้า และ 10) อุตสาหกรรมอื่น ๆ ซึ่งแต่ละผู้ประกอบการก็ใช้เชื้อเพลิงต่างกันออกไป การจัดหาเชื้อเพลิงจึงมีความสำคัญมาก ไม่ว่าจะเป็นเชื้อเพลิงฟอสซิลหรือเชื้อเพลิงทดแทน สำหรับขยะชุมชนสามารถนำไปแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงทดแทน หรือ RDF ได้ ไม่ว่าจะเป็นในรูปของ เชื้อเพลิงแข็ง เชื้อเพลิงเหลว และแก๊สเชื้อเพลิง ซึ่งมีสมบัติที่แตกต่างกัน ดังนั้น การนำ RDF มาใช้เป็นเชื้อเพลิงจึงมีหลายรูปแบบตามไปด้วย นอกจากนี้การเลือกใช้ RDF ยังขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ประเภทของอุตสาหกรรม อุปกรณ์เผาไหม้เดิมที่มีราคาที่เหมาะสม เป็นต้น ในการสนับสนุนให้ผู้ประกอบการวิสาหกิจขนาดกลางและขนาด

ย่อม (SMEs) หรือโรงงานอุตสาหกรรมขนาดเล็กในท้องถิ่นมีการปรับเปลี่ยนมาทดลองใช้ RDF จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาความเป็นไปได้และแนวทางที่เหมาะสมในเชิงเทคนิค

ในงานวิจัยนี้ จะเลือกประเภทของวัสดุที่กระจายอยู่ในชุมชนต่าง ๆ สามารถรองรับการใช้เชื้อเพลิง RDF คือวัสดุเศษซากหรือเครื่องปั้นดินเผา เพื่อประเมินทั้งความเป็นไปได้ตั้งแต่กระบวนการแปรรูปขยะเป็น RDF และนำมาใช้ประโยชน์ในเชิงเทคนิค

## 2.3 การทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.3.1 สถานการณ์ขยะมูลฝอยประเทศไทย

กรมควบคุมมลพิษ (2565) ปี พ.ศ. 2565 ประเทศไทยมีปริมาณขยะ 25.70 ล้านตัน มีสถานกำจัดขยะมูลฝอยทั้งหมด 2,074 แห่ง สถานีขนถ่าย 33 แห่ง โดยมีสถานที่กำจัดแบบถูกต้อง 111 แห่ง คิดเป็นน้ำหนักมูลฝอย 9.8 ล้านตัน ร้อยละ 38 ของขยะมูลฝอยทั้งหมด ได้แก่ ระบบฝังกลบอย่างถูกหลักสุขาภิบาล ระบบเตาเผาผลิตพลังงาน ระบบเตาเผาที่มีการบำบัดมลพิษอากาศ ระบบผลิตเชื้อเพลิงขยะ (RDF) โดยใช้เทคโนโลยี MBT ระบบผสมผสานที่มีการกำจัด 2 แบบ และมีสถานที่ที่กำจัดแบบไม่ถูกต้องอีก 1,963 แห่ง คิดเป็นน้ำหนักมูลฝอย 5.4 ล้านตัน ร้อยละ 21 ได้แก่ การกำจัดขยะมูลฝอยโดยการเผาในเตาที่ไม่มีระบบบำบัดมลพิษทางอากาศ การเทกองกลางแจ้ง ฝังกลบไม่ถูกหลักสุขาภิบาล และการเผากลางแจ้ง และมีขยะมูลฝอยอีก 10.5 ล้านตัน ซึ่งเป็นการจัดการเอง ณ แหล่งกำเนิด 1.7 ล้านตัน คิดเป็นร้อยละ 7 และมีการคัดแยกและใช้ประโยชน์ 8.8 ล้านตัน คิดเป็นร้อยละ 34 เมื่อเปรียบเทียบดูแล้วยังมีขยะที่มีการจัดการแบบไม่ถูกต้องในปริมาณมาก ซึ่งส่งผลกระทบต่อสภาวะอากาศในวงกว้าง

ขยะมูลฝอย โดยทั่วไปจะหมายถึงเศษสิ่งของหรือวัสดุที่ไม่ต้องการทั้งที่เป็นขยะที่เผาไหม้ได้ (Combustible Material) เช่น เศษอาหาร สิ่งของเครื่องใช้ที่ชำรุด เศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและอุตสาหกรรม ซากพืชซากสัตว์ต่าง ๆ เสื้อผ้าเก่า พลาสติกเก่า และเศษขยะ ผสมปนไปกับขยะที่เผาไหม้ไม่ได้ (Noncombustible Material) ซึ่งได้แก่ ขยะเศษแก้ว รวมทั้งโลหะต่าง ๆ ซึ่งพบว่าขยะมูลฝอยเหล่านี้จะทำให้เกิดปัญหาตามมา คือ เป็นแหล่งเพาะพันธุ์แมลงและพาหะนำโรคต่าง ๆ ทำให้เกิดกลิ่นเหม็นและเป็นแหล่งแพร่กระจายสิ่งสกปรกสู่อากาศ แหล่งน้ำ และสิ่งแวดล้อมรอบด้าน ดังนั้นเพื่อเป็นการลดปัญหามลภาวะด้านต่าง ๆ การเพิ่มมูลค่าให้กับของเสียจึงเป็นวิธีการจัดการขยะมูลฝอยที่ดี ประหยัด และง่ายที่สุด

### 2.3.2 องค์ประกอบและสมบัติของขยะมูลฝอยชุมชน

องค์ประกอบขยะสมบัติมูลฝอยชุมชนในประเทศจะเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพของภูมิอากาศ ฤดูกาล และพฤติกรรมทางเศรษฐกิจสังคม วิธีชีวิตตลอดจนอุปนิสัยและแบบแผนในการบริโภคของแต่ละชุมชน/เมือง โดยทั่วไปมีองค์ประกอบแตกต่างกันไป ค่าเฉลี่ยองค์ประกอบและสมบัติทางเคมีของขยะมูลฝอยแสดงในตารางที่ 2-1 และ 2-2

ตารางที่ 2- 1 องค์ประกอบเฉลี่ยของตัวอย่างขยะรวมในเทศบาลที่มีปริมาณมากกว่า 50 ตัน/วัน

ลำดับที่	องค์ประกอบ	ขนาดของสถานที่กำจัดขยะมูลฝอย	
		>100 ตัน/วัน	50-100 ตัน/วัน
1	เศษอาหาร/ผัก/ผลไม้	53.49 %	57.18 %
2	พลาสติก	20.12 %	19.40 %
3	กระดาษ	8.95 %	8.38 %
4	แก้ว	5.02 %	3.47 %
5	โลหะ	1.80 %	1.52 %
6	อื่นๆ	10.62 %	10.05 %

สมบัติเชิงเคมีโดยรวมของขยะมูลฝอยในประเทศไทย ถือว่ามีสมบัติที่ดีในการเป็นเชื้อเพลิงแก่อุตสาหกรรม แต่อาจจะมีบางแหล่งที่ขยะมูลฝอยนั้นได้รับการจัดการที่ไม่ดี ทำให้มีการปนเปื้อนค่อนข้างมาก ส่งผลกระทบต่อสมบัติเชิงเคมีของขยะมูลฝอย

ตารางที่ 2- 2 แสดงข้อมูลสมบัติเชิงเคมีของขยะมูลฝอยในประเทศไทย

No	Heating value		Proximate Analysis					Ultimate Analysis				Ref.
	[MJ kg <sup>-1</sup> d.b.]		[wt.% d.b.]					[wt.% d.b.]				
	HHV	Ar.	VM	FC	A	C	H	N	S	O		
1	17.34	7.39	81.20	6.90	11.90	42.46	6.00	1.74	N/A	50.20	[1]	
2	21.25	10.00	77.53	8.74	13.73	51.81	5.17	0.87	0.09	42.06	[2]	
3	17.52	N/A	82.00	11.83	6.17	45.56	5.12	4.95	0.13	44.24	[3]	
4	N/A	12.8	58.61	16.31	25.08	25.50	6.70	0.70	0.00	42.00	[4]	
5	N/A	8.83	65.00	10.00	25.00	14.30	7.30	0.50	0.00	52.90	[4]	
6	16.42	12.92	80.67	15.74	3.59	44.48	5.67	N/A	N/A	49.85	[5]	
7	21.89	N/A	80.01	9.69	10.30	51.33	6.77	1.42	N/A	30.92	[6]	

N/A: ไม่มีข้อมูล, [1] อนุช ลีละเศรษฐกุลและสุธรรม ปทุมสวัสดิ์ (2016) [2] ปราณี แดงเขียว (2559) [3] Tuprakay et al. (2014). [4] K. Suksankraisorn et al. (2010) [5] P. Siritheerasas et al. (2017) [6] กระทรวงพลังงาน (2554)

### 2.3.3 เทคโนโลยีการจัดการขยะมูลฝอย

ในอดีตการกำจัดมูลฝอยชุมชน ส่วนใหญ่จะใช้วิธีการฝังกลบ (Landfill) เพราะง่ายและสะดวก แต่ปัจจุบันแหล่งฝังกลบมีปริมาณจำกัด รวมทั้งยังทำให้เกิดปัญหาการสะสมของมลพิษ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นในการนำขยะเหล่านี้มาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดและเกิดมลพิษน้อยที่สุด ส่วนการเผาขยะ เป็นกระบวนการที่ลดปริมาณขยะให้เหลือน้อยที่สุด และทำลายเชื้อโรคได้อย่างเบ็ดเสร็จ แต่ก็มีผลข้างเคียงบ้าง คือ มลพิษทางอากาศและน้ำ และซีเมนต์ที่ต้องนำไปฝังกลบพร้อมกับแก๊สร้อนที่นำไปเป็นพลังงานผลิตไฟฟ้าได้ อย่างไรก็ตาม จากองค์ประกอบของขยะข้างต้น จะเห็นว่าขยะนั้น

ไม่ใช่ของเหลือทิ้งที่ไร้ค่า แต่สามารถนำกลับมาเป็นพลังงานทดแทนได้ดี โดยเฉพาะในภาวะที่ราคาน้ำมันเชื้อเพลิงสูงขึ้นเรื่อย ๆ โดยทั่วไปการนำขยะมูลฝอยเหล่านี้ไปใช้ประโยชน์เพื่อผลิตพลังงานทดแทนจำเป็นต้องมีการคัดแยกก่อน เพื่อให้ระบบผลิตพลังงานมีประสิทธิภาพสูง

### 2.3.3.1 ระบบการจัดการทางชีวภาพ (Biological Conversion Technology)

เป็นการย่อยสลายสารอินทรีย์ โดยใช้กระบวนการทางชีววิทยาของจุลินทรีย์เป็นตัวย่อยสลายให้เปลี่ยนสภาพเป็นแร่ธาตุที่มีลักษณะค่อนข้างคงรูป มีสีดำค่อนข้างแห้ง และสามารถใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของดิน สามารถแบ่งเป็น 2 กระบวนการ ดังนี้

1) กระบวนการหมักแบบใช้ออกซิเจน (Aerobic Decomposition) เป็นการสร้างสภาพให้จุลินทรีย์ชนิดที่ดำรงชีพโดยใช้ออกซิเจน ย่อยสลายอาหารแล้วเกิดการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว กลายสภาพเป็นแร่ธาตุโดยไม่เกิดก๊าซกลิ่นเหม็น

2) กระบวนการเป็นกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Decomposition) เป็นการสร้างสภาพให้จุลินทรีย์ชนิดที่ดำรงชีพโดยไม่ใช้ออกซิเจน เป็นตัวช่วยย่อยสลายอาหาร และแปรสภาพกลายเป็นแร่ธาตุกระบวนการนี้มักจะเกิดก๊าซที่มีกลิ่นเหม็น เช่น ก๊าซไข่เน่า (Hydrogen Sulfide:  $H_2S$ ) แต่กระบวนการนี้ได้ผลผลิตเป็นก๊าซมีเทน (Methane gas:  $CH_4$ ) ซึ่งเป็นก๊าซติดไฟได้ สามารถนำไปใช้ประโยชน์เป็นเชื้อเพลิงได้



ก.



ข.

รูปที่ 2- 1 (ก) กระบวนการหมักแบบเติมอากาศ โดยใช้ SUT-MBT มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และ (ข) กระบวนการหมักแบบไม่เติมอากาศ ของเทศบาลนครนครราชสีมา

### 2.3.3.2 ระบบการเผาในเตาเผา (Thermal Conversion Technology)

เป็นการกำจัดขยะมูลฝอยด้วยวิธีการเผาในเตาเผา ซึ่งได้รับการออกแบบก่อสร้างที่ถูกต้องและเหมาะสม ในกระบวนการเผาไหม้จะต้องมีอุณหภูมิในการเผาอยู่ในช่วง  $850 - 1,200^{\circ}C$  เพื่อให้การเผาไหม้สมบูรณ์ แต่ในกระบวนการเผาไหม้มักก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศ ได้แก่ ฝุ่นละออง ก๊าซพิษต่าง ๆ เช่น ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Sulfur dioxide:  $SO_2$ ) ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon monoxide :  $CO$ ) เป็นต้น นอกจากนี้แล้วยังเกิดไดออกซิน (Dioxins) ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง



ดังนั้นจึงจำเป็นจะต้องมีระบบควบคุมมลพิษทางอากาศไม่ให้มีค่าเกินกว่ามาตรฐานคุณภาพอากาศจากเตาเผาที่กำหนด

### 2.3.3.3 ระบบฝังกลบอย่างถูกสุขาภิบาล (Sanitary Landfill)

เป็นการกำจัดมูลฝอยชุมชนโดยการนำไปฝังกลบในพื้นที่ที่ได้รับ การออกแบบอย่างถูกต้อง ผ่านเกณฑ์ตามหลักวิชาการ ในด้านเศรษฐกิจ สังคม สิ่งแวดล้อม วิศวกรรม สถาปัตยกรรม และการยินยอมจากประชาชน โดยมีการวางแผนป้องกันผลกระทบที่อาจเกิดขึ้น เช่น การปนเปื้อนน้ำเสียจากขยะมูลฝอย หรือน้ำชะขยะ (Leachate) ซึ่งเป็นน้ำเสียที่มีค่าความเข้มข้นสูง หากซึมลงสู่ชั้นบาดาลหรือน้ำใต้ดิน จะทำให้คุณภาพน้ำบาดาลเสื่อมสภาพลง จนส่งผลกระทบต่อผู้คนที่ใช้น้ำเพื่อการอุปโภคบริโภค นอกจากนี้ยังต้องมีการวางแผนป้องกันน้ำท่วม กลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ และผลกระทบต่อภูมิทัศน์ของพื้นที่โดยรอบ ซึ่งรูปแบบการฝังกลบอย่างถูกต้องตามหลักสุขาภิบาล อาจใช้วิธีชุกต์ให้กลิ้งไปในชั้นดินหรือการถมให้สูงขึ้นจากระดับพื้นดิน หรืออาจจะใช้ผสมสองวิธี ซึ่งจะขึ้นอยู่กับสภาพภูมิประเทศในบริเวณนั้น ๆ

### 2.3.4 เทคโนโลยีการจัดการขยะเพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิง (Refuse-derived Fuel, RDF)

สำหรับเทคโนโลยีการผลิตเชื้อเพลิงขยะในประเทศไทยมีหลายรูปแบบด้วยกัน ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่ใช้ในการจัดการขยะมูลฝอยที่เกิดขึ้นรายวัน (ขยะใหม่) และขยะมูลฝอยที่ฝังกลบแล้ว (ขยะเก่า) มารื้อร่อน โดยมีการใช้ระบบเครื่องจักรอย่างง่ายไปจนถึงการใช้เครื่องจักรที่สลับซับซ้อน หลาย ๆ เครื่อง และบางครั้งอาจใช้กระบวนการทางชีวภาพร่วมด้วย สามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ ใช้ระบบเชิงกล (Mechanical) และ ระบบเชิงกลและชีวภาพ (Mechanical and Biological Treatment)

#### 2.3.4.1 การผลิตเชื้อเพลิงขยะด้วยระบบเชิงกล (Mechanical Treatment: MT)

การผลิตเชื้อเพลิงขยะด้วยการบำบัดเชิงกล เป็นระบบที่มีการใช้เครื่องจักรในการผลิต เช่นการรื้อร่อนขยะเก่าเพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงขยะ เนื่องจากขยะอินทรีย์ส่วนใหญ่ได้ย่อยสลายเป็นปุ๋ยดินหมดแล้ว ดังนั้น รูปแบบนี้จะใช้เครื่องร่อนขยะ (Trommel) เป็นหลัก ในการคัดแยกขยะมูลฝอยที่เผาไหม้ได้ออกจากดิน เศษหิน หรือกรวด เพื่อมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงขยะเป็น RDF-2 และในบางครั้งก็อาจมีการเพิ่มกระบวนการลดขนาดโดยใช้เครื่องสับและยังเป็นการลดความชื้นของขยะมูลฝอยด้วย ทั้งนี้เชื้อเพลิงขยะที่ได้จะมีคุณภาพมากขึ้นเป็น RDF-3 ดังรูปที่ 2-2

#### 2.3.4.2 การผลิตเชื้อเพลิงขยะรูปแบบเชิงกลและชีวภาพ (Mechanical and Biological Treatment: MBT)

ระบบบำบัดเชิงกลและชีวภาพ (MBT) เป็นระบบที่ใช้กระบวนการทางชีวภาพร่วมด้วย ซึ่งในการจัดการขยะมูลฝอยใหม่ จะต้องย่อยสลายขยะอินทรีย์ที่อยู่ในขยะก่อน โดยใช้การบำบัดทางชีวภาพซึ่งอาจใช้ได้ทั้งแบบใช้อากาศและแบบไร้อากาศก่อน แล้วนำขยะมูลฝอยที่ผ่านการบำบัดทางชีวภาพและมาคัดแยก หรือลดขนาดด้วยกระบวนการเชิงกล ตัวอย่างระบบบำบัดเชิงกลและชีวภาพ (MBT)

1) การบำบัดขยะโดยวิธีทางกลและชีวภาพ (Passive Aeration) เทศบาลนครพิษณุโลก หลักการของระบบนี้ คือ การย่อยสลายขยะอินทรีย์ที่อยู่ในขยะก่อนด้วยระบบทางชีวภาพแบบใช้อากาศ แล้วนำขยะมูลฝอยที่ผ่านการบำบัดทางชีวภาพและมาทำการคัดแยก หรือลดขนาดด้วยกระบวนการเชิงกล สำหรับการเติมอากาศในที่นี้ จะใช้ไม้พาลาทรงพื้นด้านล่าง ก่อนนำขยะมาเททับด้านบน จะทำให้อากาศเกิดการเคลื่อนตัวตามธรรมชาติ (Passive Aeration) เมื่อเกิดกระบวนการหมักจะเกิดความร้อน อากาศที่ร้อนจะมีมวลที่เบาแล้วลอยขึ้นด้านบน ทำให้เกิดการแทนที่ของอากาศด้านล่างไม้พาลาท ทำให้มีอากาศหมุนเวียนในกองขยะได้ ดังแสดงในรูปที่ 2-2



รูปที่ 2- 2 หลักการบำบัดขยะโดยวิธีทางกลและชีวภาพ (MBT) แบบธรรมชาติ

2) การบำบัดขยะโดยวิธีทางกลและชีวภาพของ (SUT- MBT) หลักการทำงานของวิธีการบำบัดขยะด้วยวิธีทางกลและชีวภาพ ที่พัฒนาโดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (Suranaree University of Technology, Mechanical and Biological Treatment: SUT-MBT) ประกอบไปด้วย 3 ส่วน โดยส่วนที่ 1 ขยะชุมชนจะถูกนำมาบำบัดด้วยกระบวนการทางกล (Mechanical Pre-Treatment) ซึ่งเป็นขั้นการเตรียมขยะมูลฝอยให้พร้อมสำหรับการย่อยสลายโดยใช้อากาศ โดยการคัดแยกเบื้องต้นเพื่อแยกขยะรีไซเคิล (Recyclables) เศษผ้า ไม้ ขยะอันตราย (Hazardous Waste) และวัสดุอื่นที่เผาไหม้ไม่ได้ ออก แล้วนำขยะส่วนที่เหลือผ่านเครื่องฉีกถุงพลาสติก (Shredder) ก่อนนำเข้าสู่กระบวนการที่ 2 คือการบำบัดทางชีวภาพโดยใช้อากาศ หรือเรียกว่ากระบวนการหมักแบบใช้อากาศ ภายใต้สภาวะที่มีความชื้นและอุณหภูมิที่เหมาะสม เป็นเวลา 15-30 วัน จากนั้นจึงนำขยะที่ผ่านการหมักแล้ว เข้าสู่กระบวนการทางกลในส่วนที่ 3 (Mechanical Separation) โดยการนำเอาขยะมาร้อนผ่านเครื่องร่อนตะแกรงหมุน (Trommel) และเครื่องสะบัดพลาสติก (Spinner) เพื่อแยกเอาเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ได้ออกจากดินปุ๋ย จากนั้นเชื้อเพลิงที่ได้จะผ่านเข้า

สู่เครื่องคัดแยกด้วยลม (Air Classifier) เพื่อคัดแยกเชื้อเพลิงที่มีความหนาแน่นและคุณภาพต่างกัน โดยเชื้อเพลิงที่ได้จากระบบ แบ่งเป็น RDF-3 และเศษมูลฝอยเหลือทิ้ง

(1) องค์ประกอบของระบบการจัดการขยะด้วย SUT-MBT แบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก ๆ ได้แก่ 1) ส่วนหน้า (Front-End) 2) ส่วนหมัก (Composting) และ 3) ส่วนหลัง (Back-End) โดยแต่ละส่วนมีหน้าที่และองค์ประกอบหลักดังนี้

ก. ส่วนหน้า (Front-End) ชุดรับขยะส่วนหน้า (Front-End) ทำหน้าที่รับขยะสดจากชุมชน โดยใช้รถขนขยะนำมาเทกองบริเวณลานรับขยะสด (Dumping Hall) ขยะทั้งหมดจะถูกคัดแยกบนสายพานลำเลียง ควบคุมการเปิด-ปิดโดยใช้เท้า (Foot Switch) ในกรณีที่ต้องใช้เวลาในการคัดแยกวัสดุรีไซเคิลเพิ่มเติม จากนั้นขยะที่ถูกคัดแยกแล้วจะถูกส่งเข้าเครื่องสับย่อยชิ้นต้น เพื่อฉีกถุงและทำให้เศษวัสดุอินทรีย์หรืออาหารแยกออกจากถุงบรรจุ และจะถูกส่งเข้าห้องหมัก ในกระบวนการถัดไปด้วยสายพานลำเลียง

ข. ส่วนหมัก (Composting) ขยะมูลฝอยที่ผ่านการเตรียมข้างต้นจะถูกส่งเข้าสู่กระบวนการหมักแบบใช้อากาศ (Aerobic Digestion) โดยอินทรีย์วัตถุต่าง ๆ จะถูกย่อยสลายจากจุลินทรีย์เติบโตโดยใช้อากาศ ซึ่งมีอยู่ในกองขยะ ทำให้ได้เป็นปุ๋ยอินทรีย์ น้ำ ( $H_2O$ ) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) เกลือซัลเฟต ( $SO_4^{2-}$ ) แก๊สแอมโมเนีย ( $NH_3$ ) และพลังงาน ออกมาดังมีปฏิกิริยาดังต่อไปนี้



ค. ส่วนหลัง (Back-End) ระบบส่วนหลัง (Back-End) จะทำหน้าที่เพิ่มคุณภาพของขยะโดยการคัดแยกอินทรีย์วัตถุและวัสดุที่เผาไหม้ไม่ได้ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะอยู่ในรูปของเชื้อเพลิงขยะประเภทที่ 3 (RDF-3) ปุ๋ยอินทรีย์ และมูลฝอยเหลือทิ้ง โดยประกอบด้วยเครื่องจักรต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 2-3

ตารางที่ 2- 3 เครื่องจักรส่วนหลังของระบบ SUT-MBT

ที่	รายการเครื่องจักร	รายละเอียดการทำงาน
1	ถาดรับขยะ (Tray or Hopper)	ทำหน้าที่รับและพักขยะที่ผ่านการหมักจากรถตัก (Loader) เพื่อเตรียมป้อนเข้าสู่เครื่องร่อนคัดแยกแบบตะแกรงหมุน
2	สายพานลำเลียงเข้าตะแกรงร่อน (Belt Conveyor)	ทำหน้าที่ลำเลียงขยะจากถาดรับขยะขึ้นสู่เครื่องคัดแยกแบบตะแกรงหมุนตัวที่ 1
3	เครื่องคัดแยกแบบตะแกรงหมุน (Trommel) 1	ทำหน้าที่ร่อนขยะที่บับดแล้ว เพื่อแยกเอาส่วนที่เป็นปุ๋ยออกจากเชื้อเพลิง RDF คัดแยกโดยใช้หลักการของขนาดที่ต่างกัน

ที่มา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 2- 4 เครื่องจักรส่วนหลังของระบบ SUT-MBT (ต่อ)

ที่	รายการเครื่องจักร	รายละเอียดการทำงาน
4	เครื่องคัดแยกแบบตะแกรงหมุน (Trommel) 2	ทำหน้าที่ร่อนปุ๋ยที่ผ่านเครื่องร่อนตัวที่ 1 ให้ได้เป็นปุ๋ยละเอียดที่มีการปนเปื้อนของพลาสติกและมูลฝอยเหลือทิ้งเกรด A น้อยโดยอาศัยตะแกรงที่มีขนาดรูตะแกรงเล็กลง
5	ชุดคัดแยกด้วยแม่เหล็ก (Magnetic Separators)	ทำหน้าที่คัดแยกโลหะ เช่น ฝาขวด เศษตะปู เหล็กเส้น โดยนำมาติดตั้งที่ทางออกของ Trommel ตัวที่ 1 เพื่อนำมารีไซเคิล และป้องกันความเสียหายของเครื่องจักรลำถัดไป
6	เครื่องสับพลาสติก (Spinner)	ทำหน้าที่เหวี่ยงเศษปุ๋ยหรือสิ่งปนเปื้อนที่ยังติดไปกับถุงพลาสติกให้หลุดออก ซึ่งเครื่องจักรตัวนี้จะทำหน้าที่เพิ่มประสิทธิภาพการคัดแยกให้ได้เป็นเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพ (RDF-3) มากขึ้น และเศษปุ๋ยที่ได้ยังจะถูกนำไปส่งที่เครื่อง Trommel ตัวที่ 2 เพื่อเพิ่มปริมาณปุ๋ยอินทรีย์
7	เครื่องคัดแยกด้วยลม (Air Classifier)	ทำหน้าที่คัดแยกขยะหลังผ่านเครื่องสับ เพื่อให้ได้เป็นเชื้อเพลิงชนิดเบา (Light Fraction) และชนิดหนัก (Heavy Fraction) ซึ่งจะมีคุณภาพต่างกัน คือ ส่วนเบา ที่ประกอบไปด้วยถุงพลาสติก เป็นองค์ประกอบหลัก (หรือเรียกว่า RDF-3) ซึ่งมีค่าความร้อนสูง ในขณะที่ส่วนหนัก จะประกอบไปด้วยองค์ประกอบหลากหลาย ทั้งถุงพลาสติก ขวดพลาสติก เศษไม้ (หรือเรียกว่า Waste Reject B) ซึ่งมีค่าความร้อนต่ำกว่า
8	เครื่องปั้นเม็ดพลาสติก (Agglomerator)	ทำหน้าที่ปั้นหรือจับก้อน RDF-3 ให้มีลักษณะเป็นเม็ด (RDF-4) ทำให้มีความหนาแน่นสูง สะดวกต่อการขนส่งและเก็บรักษา

ที่มา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี





รูปที่ 2- 3 เทคโนโลยีการบำบัดขยะ SUT-MBT (ที่มา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี)

(2) ผลผลิตของเชื้อเพลิงขยะ (RDF) ที่ได้ ตารางที่ 2-4 แสดงสมบัติของ RDF ที่ได้จากระบบ โดยเชื้อเพลิงขยะที่ได้นั้นสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงได้เลย หรืออาจนำมาแปรรูปให้อยู่ในลักษณะเป็นแท่งหรือเป็นก้อนก่อนก็ได้ เพื่อความคุ้มค่าในการขนส่งและการจัดเก็บ รวมถึงค่าพลังงานความร้อนต่อปริมาตรจะเพิ่มขึ้นอีกด้วย ปัจจุบันวิธีการดังกล่าวได้รับความนิยมมากขึ้น เพราะเชื้อเพลิงที่ได้สามารถซื้อขายกันได้ในเชิงพาณิชย์ และขนส่งได้สะดวกโดยไม่ส่งกลิ่น ซึ่งเหมาะสมอย่างยิ่งที่จะใช้ในเตาเผาต่าง ๆ โดยเฉพาะเตาเผาปูนซีเมนต์และโรงงานผลิตไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงขยะ (Waste to energy)

ตารางที่ 2- 5 สมบัติของเชื้อเพลิง RDF ที่ได้จากระบบ SUT-MBT

พารามิเตอร์	ปริมาณ				
	RDF-3	RDF-4	RDF-5	Reject A	Reject B
ความชื้น A.r. Basis (%)		13.79		30.0	8.40
ซีเถ้า (%)		8.87		21.85	12.58
สารระเหย (%)		87.34		62.00	73.08
คาร์บอนคงตัว (%)		2.32		7.83	10.04
ค่าความร้อน (kcal/kg)		6,710		2,376	4,740
ค่าความหนาแน่น (kg/m <sup>3</sup> )	15	450	600	170	60
คาร์บอน (%)		68.51		37.62	37.62
ไฮโดรเจน (%)		10.85		4.83	7.24
ไนโตรเจน (%)		0.44		1.13	1.13
ออกซิเจน (%)		9.75		26.07	36.97
ซัลเฟอร์ (%)		0.11		0.18	0.16
คลอไรด์ (%)		0.56		1.79	6.79

ที่มา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

### 2.3.5 เชื้อเพลิงขยะ (refuse-derived fuel: RDF)

เชื้อเพลิงขยะ หมายถึง ขยะที่เผาไหม้ได้ โดยการนำขยะมูลฝอยชุมชนมาผ่านกระบวนการบำบัดทางกายภาพ เช่น การคัดแยก การลดขนาด การลดความชื้น เป็นต้น (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2551) เพื่อให้ได้วัสดุที่มีค่าความร้อน ขนาด และคุณลักษณะตามวัตถุประสงค์ของการใช้งาน สะดวกต่อการขนส่ง เหมาะสมในการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงหลัก หรือเชื้อเพลิงเสริมในภาคอุตสาหกรรม/ชุมชน โรงผลิตพลังงานจากขยะชุมชน หรือเตาเผาขยะมูลฝอยชุมชน ตารางที่ 2-5 แสดงประเภทของเชื้อเพลิงขยะที่แบ่งตามมาตรฐานของ ASTM



RDF-1



RDF-2



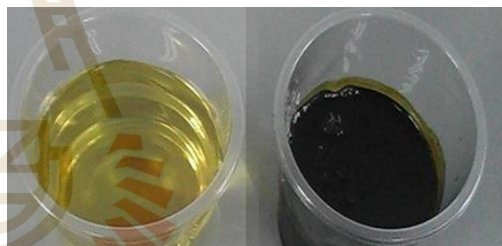
RDF-3



RDF-4



RDF-5



RDF-6



RDF-7

รูปที่ 2- 4 แสดงประเภทของเชื้อเพลิงขยะ (RDF-1 – RDF-7)



ตารางที่ 2- 6 ประเภทของเชื้อเพลิงขยะ

ประเภท	ลักษณะ
RDF-1 MSW	คัดแยกขยะส่วนที่เผาไหม้ได้ โดยยังมีขนาดตามสภาพเดิมของขยะ
RDF-2 Coarse RDF	คัดแยกขยะส่วนที่เผาไหม้ได้มาบด หรือตัดขยะมูลฝอยอย่างหยาบๆ
RDF-3 Fluff RDF	คัดแยกขยะมูลฝอยส่วนที่เผาไหม้ได้มาบด หรือตัดจนทำให้ร้อยละ 95 ของขยะมูลฝอยมีขนาดเล็กกว่า 2 inch
RDF-4 Dust RDF	คัดแยกขยะส่วนที่เผาไหม้ได้มาผ่านกระบวนการให้อยู่ในรูปผงฝุ่น
RDF-5 Densified RDF	คัดแยกขยะมูลฝอยที่เผาไหม้ได้มาผ่าน กระบวนการอัดแน่นมีลักษณะ เช่น แท่ง ก้อนกลม ลูกบาศก์ Pellets เป็นต้น
RDF-6 RDF Slurry	คัดแยกขยะมูลฝอยส่วนที่เผาไหม้ได้ ผ่านกระบวนการอยู่ในรูป Slurry
RDF-7 RDF Syngas	คัดแยกขยะมูลฝอยส่วนที่เผาไหม้ได้ ผ่านกระบวนการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง (Gasification) เพื่อผลิต Syngas ที่ สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงก๊าซได้

## 2.3.5.1 สมบัติเบื้องต้นของเชื้อเพลิงขยะ

กรมควบคุมมลพิษ (2561) ได้มีประกาศ เรื่อง คุณสมบัติที่เหมาะสม เบื้องต้นสำหรับเชื้อเพลิงขยะจากขยะมูลฝอยชุมชน เพื่อเป็นแนวทางให้องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น และหน่วยงานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง ใช้ในการผลิตหรือแปรรูปเชื้อเพลิงขยะ จากขยะมูลฝอยชุมชนให้มี สมบัติที่เหมาะสม สามารถนำไปใช้ประโยชน์โดยก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด ซึ่งได้ กำหนดคุณลักษณะของเชื้อเพลิงขยะเบื้องต้น ดังตารางที่ 2-6

ตารางที่ 2- 7 สมบัติเบื้องต้นของเชื้อเพลิงขยะ ที่มา: (กรมควบคุมมลพิษ, 2561)

จำแนกตามสมบัติ	หน่วย	ค่า/ปริมาณ
<b>คุณลักษณะทางกายภาพ</b>		
1. ปริมาณค่าความร้อนสุทธิ	MJ/kg (ขณะส่งมอบ)	> 6.5
2. ค่าความชื้น (Moisture Content)	% (ขณะส่งมอบ)	< 40 (wt.)
3. ความหนาแน่นรวม (Bulk Density)	kg /m <sup>3</sup>	> 100
<b>คุณลักษณะทางด้านเคมี</b>		
4. ปริมาณคลอรีน (Cl <sub>2</sub> )	%	< 0.8 (wt.)
5. ปริมาณเถ้า (Ash)	%	< 50 (wt.)
6. ความเข้มข้น/ปริมาณของปรอท (Hg)	mg/MJ (มัลติฐาน)	< 0.06
7. ความเข้มข้น/ปริมาณของแคดเมียม (Cd)	mg/MJ (มัลติฐาน)	< 7.5
8. ความเข้มข้น/ปริมาณของโลหะหนัก (Heavy Metals)	mg/MJ (ค่ามัลติฐาน)	< 190
	mg/MJ (เปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 80%)	< 380

สมบัติของเชื้อเพลิงขยะในเชิงพาณิชย์ที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงเสริมในภาคอุตสาหกรรมมีสมบัติของเชื้อเพลิงขยะจะมีความต้องการที่แตกต่างกันตามประเภทของอุตสาหกรรมที่จะนำไปใช้ประโยชน์ และกระบวนการผลิต ทั้งนี้สมบัติทั่วไปของเชื้อเพลิงขยะที่ภาคเอกชนในประเทศ ซึ่งมี 2 กลุ่มหลัก คือ กลุ่มอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ และกลุ่มโรงไฟฟ้า ซึ่งต้องมีสมบัติทางกายภาพ และเคมีเบื้องต้น (กรมควบคุมมลพิษ, 2560) ดังนี้

#### 2.3.5.2 สมบัติเชื้อเพลิงขยะที่ต้องการ ของกลุ่มอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์

โดยเฉลี่ย RDF จะมีสมบัติเทียบเท่า RDF-3 แสดงสมบัติดังตารางที่ 2-7

ตารางที่ 2- 8 สมบัติของเชื้อเพลิงขยะที่ต้องการ ของกลุ่มอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์

จำแนกตามสมบัติ	หน่วย	ค่า/ปริมาณ
<b>คุณลักษณะทางกายภาพ</b>		
1. ปริมาณค่าความร้อนสุทธิ	kcal/kg	ไม่น้อยกว่า 2,500
2. ค่าความชื้น (Moisture Content)	%	ไม่เกินร้อยละ 30 (wt.)
3. ความหนาแน่นรวม (Bulk Density)	kg /m <sup>3</sup>	ไม่น้อยกว่า 500
<b>คุณลักษณะทางด้านเคมี</b>		
4. ปริมาณคลอไรด์ (Cl)	%	ไม่เกินร้อยละ 1 (wt.)
5. ปริมาณเถ้า (Ash)	%	ไม่เกินร้อยละ 15 (wt.)
6. ปริมาณซัลเฟอร์ (S)	%	ไม่เกินร้อยละ 1 (wt.)

#### 2.3.5.3 สมบัติเชื้อเพลิงขยะที่ต้องการของกลุ่มอุตสาหกรรมโรงไฟฟ้าขยะ

สำหรับกลุ่มโรงไฟฟ้าสมบัติ RDF ส่วนใหญ่จะเทียบเท่า RDF-2 แต่ในกรณีที่น่าขยะมูลฝอยชุมชนมาใช้เป็นเชื้อเพลิงเสริมหรือหลัก สำหรับเตาเผาขยะมูลฝอยชุมชนไม่ได้มีการกำหนดสมบัติเฉพาะ เพียงแต่เน้นให้มีการคัดแยกวัสดุประเภทที่เผาไหม้ไม่ได้ ออก โดยเฉพาะภาชนะบรรจุสารเคมีที่ใช้แล้วและแบตเตอรี่ ซึ่งทำความเสียหายแก่เตาเผาได้ มีคุณสมบัติดังตารางที่ 2-8

ตารางที่ 2- 9 สมบัติเชื้อเพลิงขยะที่ต้องการ ของกลุ่มอุตสาหกรรมโรงไฟฟ้าขยะ

จำแนกตามสมบัติ	หน่วย	ค่า/ปริมาณ
<b>คุณลักษณะทางกายภาพ</b>		
1. ปริมาณค่าความร้อนสุทธิ	kcal/kg	ไม่น้อยกว่า 2,000
2. ค่าความชื้น (Moisture Content)	%	ไม่เกินร้อยละ 35 (wt.)
3. ความหนาแน่นรวม (Bulk Density)	kg/m <sup>3</sup>	ไม่น้อยกว่า 500
<b>คุณลักษณะทางด้านเคมี</b>		
4. ปริมาณคลอไรด์ (Cl)	%	ไม่เกินร้อยละ 1 (wt.)
5. ปริมาณเถ้า (Ash)	%	ไม่เกินร้อยละ 20 (wt.)
6. ปริมาณซัลเฟอร์ (S)	%	ไม่เกินร้อยละ 1 (wt.)

### 2.3.6 เทคโนโลยีการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงขยะ (RDF)

สำหรับเทคโนโลยีการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิง RDF จะอาศัยกระบวนการทางเคมี ความร้อน (Thermochemical Conversion) ซึ่งเป็นกระบวนการเปลี่ยนรูปเชื้อเพลิงเพื่อให้ได้เป็นพลังงานในรูปแบบต่าง ๆ เช่น ความร้อน แก๊สเชื้อเพลิง น้ำมัน เป็นต้น โดยในกระบวนการผลิตพลังงานในรูปของความร้อนและไฟฟ้า เทคโนโลยีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายได้แก่ เทคโนโลยีการเผาไหม้ สมบูรณ์ (Direct Combustion) เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) และ เทคโนโลยีไพโรไลซิส (Pyrolysis Technology)

#### 2.3.6.1 เทคโนโลยีการเผาไหม้โดยตรง (Direct Combustion)

เนื่องจากขยะมูลฝอยชุมชน ประกอบด้วยองค์ประกอบทางเคมีในปริมาณมาก การแปรรูปขยะมูลฝอยให้อยู่ในรูปของเชื้อเพลิงขยะ จึงเป็นทางเลือกในการกำจัดขยะมูลฝอย และเป็นการใช้ประโยชน์จากขยะมูลฝอยได้อีกด้วย ซึ่งวิธีการเผาขยะมูลฝอยด้วยความร้อนสูง จะเผาในเตาเผาที่ได้รับการออกแบบที่เหมาะสม เพื่อสามารถใช้งานได้กับสมบัติของเชื้อเพลิงขยะที่มีความชื้นสูง การปนเปื้อนสูง และมีค่าความร้อนที่ไม่คงที่ได้ โดยการเผาไหม้จะต้องมีการควบคุมไม่ให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม เช่น แก๊สพิษ เขม่า ฝุ่นละออง กลิ่น เป็นต้น แก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้จะต้องมีการบำบัดตามที่กฎหมายควบคุม ก่อนที่จะปล่อยออกสู่บรรยากาศ ส่วนเถ้าที่เหลือจากการเผาไหม้ จะปริมาณร้อยละ 10 โดยปริมาตร และร้อยละ 25-30 โดยน้ำหนักของขยะที่เข้าเตาเผา ซึ่งจะนำไปฝังกลบหรือใช้เป็นวัสดุปูพื้นสำหรับการสร้างถนน นอกจากนี้เชื้อเพลิงขยะยังสามารถที่จะนำพลังงานความร้อนที่ได้จากการเผาขยะ มาใช้ผลิตไอน้ำเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าต่อไป ซึ่ง บัณฑิตวิทยาลัยร่วมด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม (JGSEE.) (มปป) แบ่งเทคโนโลยีการเผาไหม้ออกเป็น 3 ประเภทหลัก ๆ ตามตำแหน่งของเชื้อเพลิงที่กำลังลุกไหม้ ดังนี้

1) ระบบเผาไหม้แบบเบตตันิ่ง (fixed bed combustion) อ้างอิงจาก สมศักดิ์ ขจรเฉลิมศักดิ์. (2560). ในระบบนี้เชื้อเพลิงจะเผาไหม้อยู่กับที่บนตะกรับ ซึ่งแบ่งตามลักษณะการป้อนเชื้อเพลิงได้ 2 แบบด้วยกัน คือ การใช้แรงงานคนป้อนและการใช้เครื่องจักรกลในการป้อนหรือระบบสโตเกอร์ (Stoker) โดยระบบ Stoker แบ่งเป็น 2 แบบด้วยเช่นกัน คือ การป้อนเชื้อเพลิงด้านบน (overfeed firing) และด้านล่าง (underfeed firing) รายละเอียดดังนี้

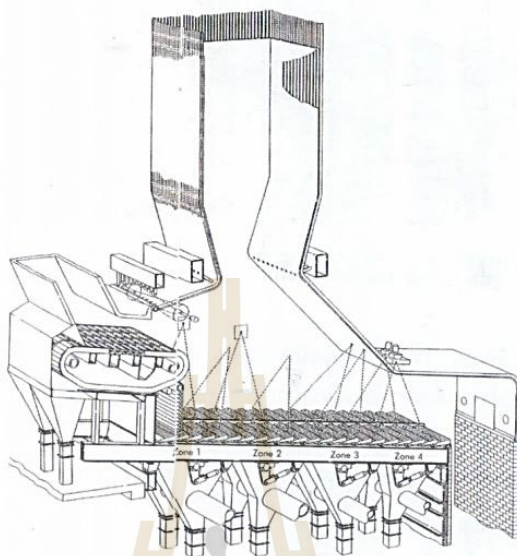
(1) ระบบใช้แรงงานคนป้อนเชื้อเพลิง ระบบนี้ใช้แรงงานคนในการป้อนเชื้อเพลิง โดยใช้ความชำนาญในการกระจายเชื้อเพลิงให้สม่ำเสมอบนตะกรับ

(2) ระบบสโตเกอร์ (Stoker) เป็นระบบที่ป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่เตาโดยอาศัยเครื่องกล แบ่งตามลักษณะการป้อนเชื้อเพลิงได้เป็น 2 ชนิด คือ

ก. ระบบ overfeed firing เชื้อเพลิงจะถูกป้อนด้านบน ในทิศทางตรงกันข้ามกับการไหลของอากาศ ซึ่งมี 2 แบบย่อยด้วยกัน ดังนี้

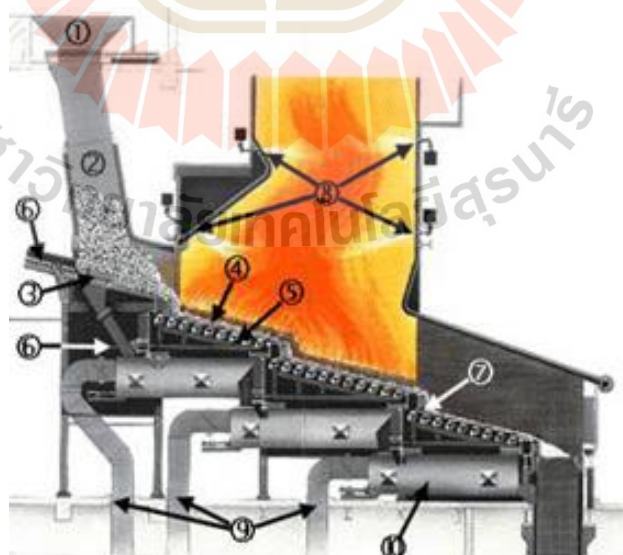
- แบบตะกรับเคลื่อนที่ เชื้อเพลิงจะถูกป้อนออกจากถังเก็บ (Hopper) โดยสายพานดินตะขาบ ซึ่งจะเคลื่อนที่พาเชื้อเพลิงผ่านเข้าไปในเตาเพื่อเผาไหม้ การเผา

ไหม้จะเกิดที่ชั้นบนสุดลดด้านล่างเชื้อเพลิง โดยตะกรับจะเคลื่อนที่ไปเรื่อย ๆ จนเกิดการเผาไหม้จนหมด เหลือเพียงเถ้าจะถูกปล่อยลงในห้องรองรับเถ้า ดังรูป 2-5



รูปที่ 2- 5 เตาเผาแบบตะกรับเคลื่อนที่ (*Traveling Grate*) (JGSEE, มปป)

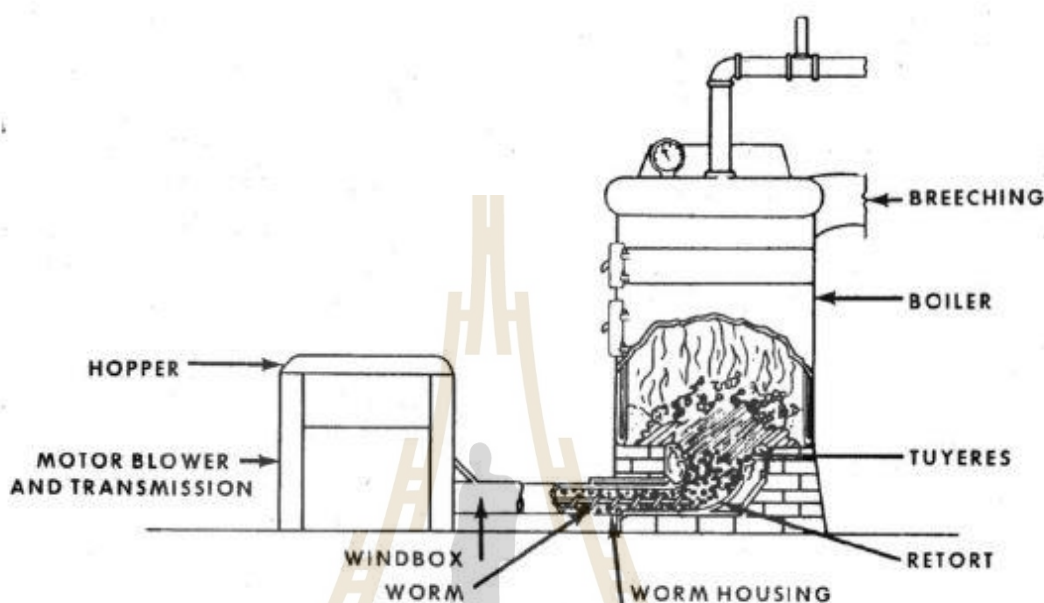
- แบบกระจาย เชื้อเพลิงถูกส่งเข้าเตาในลักษณะกระจายไปทั่วห้องเผาไหม้ มีระบบตะแกรงสั้นสำหรับถ่ายเถ้าลงด้านล่าง เต็มอากาศด้านหลังและด้านข้างเตา เพื่อเพิ่มปริมาณออกซิเจนให้พอเพียงต่อการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ ดังรูปที่ 2-6



รูปที่ 2- 6 เตาเผาแบบกระจาย (*Traveling Grate*) (สมศักดิ์ ขจรเฉลิมศักดิ์, 2560)

ข. ระบบ *underfeed firing* เชื้อเพลิงจะถูกป้อนทางด้านล่างตามทิศทางเดียวกับการไหลของอากาศ เชื้อเพลิงจะถูกป้อนเข้าสู่เตาทางด้านล่าง และดันเชื้อเพลิง

ส่วนบนให้ขยับขึ้นด้านบนได้ จะทำให้สารระเหยในเชื้อเพลิงระเหยขึ้นสู่ด้านบน ติดไฟได้ง่ายและเกิดการเผาไหม้ขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ ส่วนถ้ำด้านบนสุดจะถูกเชื้อเพลิงดันลงสู่ที่รองรับถ้ำ การควบคุมระบบนี้ทำได้โดยการเปลี่ยนความเร็วของตัวดันเชื้อเพลิง ส่วนปริมาณอากาศปรับให้พอเหมาะได้ทางช่องหรือพวยรับลม (Tuyeres) ดังรูปที่ 2-7



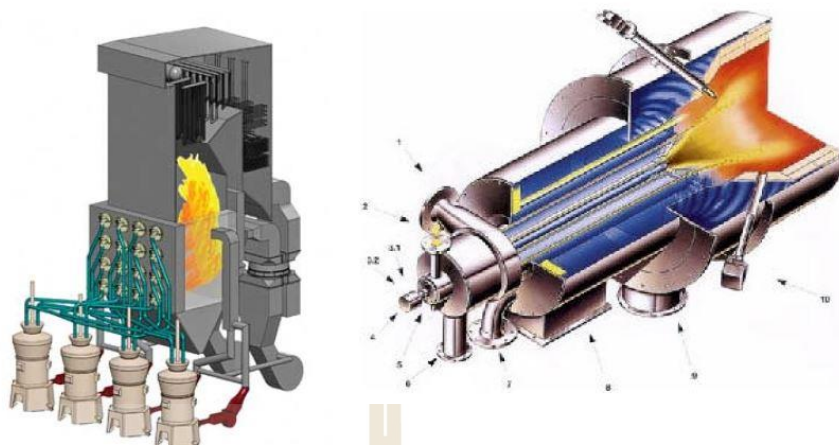
รูปที่ 2- 7 ระบบเผาไหม้แบบ Underfeed Firing (JGSEE, มปป)

2) ระบบเผาไหม้แบบเบดเคลื่อนที่ (transportation bed combustion)

ระบบเผาไหม้แบบเบดเคลื่อนที่หรือเบดลอย (transportation bed หรือ moving bed combustion) ในระบบนี้เชื้อเพลิงจะมีลักษณะเป็นผงอนุภาคขนาดเล็กเคลื่อนที่ขณะลุกไหม้ ได้แก่

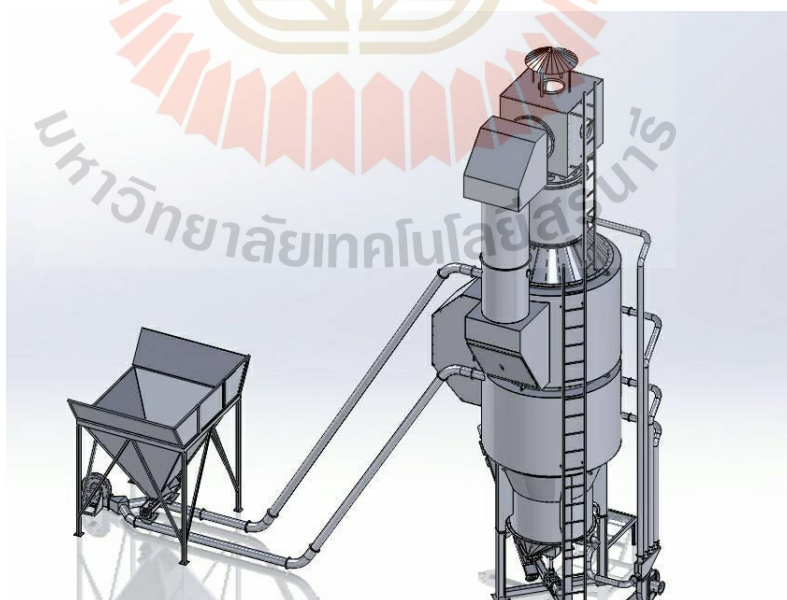
(1) ระบบพัลเวอร์ไรซ์ (pulverized combustion) ซึ่งในระบบพัลเวอร์ไรซ์เชื้อเพลิงจะถูกบดให้เป็นผงด้วยเครื่องบด และจะถูกพ่นเข้าห้องเผาไหม้พร้อมอากาศชั้นต้น ในลักษณะเดียวกับการพ่นละอองน้ำมันเชื้อเพลิงจะเผาไหม้ในลักษณะฟุ้งกระจายคล้ายแก๊ส นอกจากนี้ยังมีอากาศชั้นที่สองเข้ามาช่วยในการเผาไหม้ด้วย ทำให้ระบบนี้มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงถึงร้อยละ 90 ดังรูปที่ 2-8





รูปที่ 2- 8 การเผาไหม้แบบ *pulverized combustion* (JGSEE, มปป)

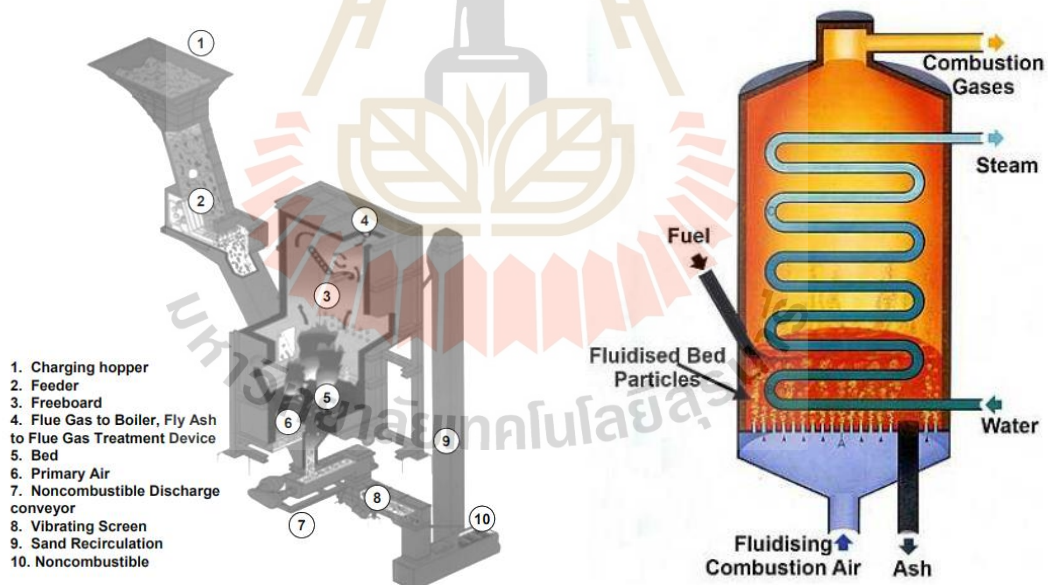
(2) ระบบไซโคลน (Cyclone combustion) สมศักดิ์ ขจรเฉลิมศักดิ์. (2560) เตาเผาแบบไซโคลน เชื้อเพลิงจะถูกป้อนเข้าเตาเผาโดยอาศัยแรงโน้มถ่วง เหมือนกับระบบพัลเวอร์ไรซ์ แต่ไม่จำเป็นต้องบดเชื้อเพลิงให้มีขนาดเล็ก ในระบบนี้จะใช้หัวเผา แบบ Horizontal water-cooled ขนาดเล็กทำให้เตาเผาแบบไซโคลนมีขนาดเล็กกว่าแบบระบบพัลเวอร์ไรซ์ ลักษณะการไหลของเชื้อเพลิงจะเกิดการหมุนวนแบบปั่นป่วน (Turbulence) ทำให้เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ได้อย่างทั่วถึงและดียิ่งขึ้น อุณหภูมิของการเผาไหม้ภายในเตาสูงถึง  $1,650^{\circ}\text{C}$  ทำให้เถ้าที่ได้เป็นเถ้าหลอม (Liquid Slag) ดังรูปที่ 2-9



รูปที่ 2- 9 ระบบเผาไหม้แบบไซโคลน (ที่มา: อติสร มาลาแก้ว และธนวัฒน์ ไทยภัทรพงษ์, 2559)

3) เตาเผาแบบฟลูอิดไธซ์เบด (Fluidized Bed) เป็นระบบที่ให้อากาศไหลผ่านชั้นของเชื้อเพลิง โดยเพิ่มความเร็วให้กับอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ให้สูงพอที่จะทำให้เชื้อเพลิงเกิดการลอยตัวบนวัสดุตัวกลาง ซึ่งมีสภาพเหมือนของไหล การเผาไหม้ที่เกิดขึ้นในขณะที่เชื้อเพลิงมีสภาพเป็นของไหลสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ การถ่ายเทความร้อน และการถ่ายเทมวลได้ โดยตัวกลางที่ใช้ในเตาเผา เป็นแร่ควอทซ์หรือทรายแม่น้ำขนาดประมาณ 1 มิลลิเมตร และขยะมูลฝอยจะต้องมีปริมาตรที่เล็กหรือเทียบเท่า RDF-4 ตัวกลางและขยะมูลฝอยจะถูกกวนผสมกันในเตา โดยใช้อุณหภูมิประมาณ 850-1,200 °C (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2558)

ระบบเผาไหม้แบบฟลูอิดไธซ์เบด (fluidized bed combustion) ในระบบนี้ขณะเผาไหม้เชื้อเพลิงจะเคลื่อนที่กระจายลอยตัวคล้ายน้ำเดือด หรือที่เรียกว่า สภาพฟลูอิดไธซ์เซชัน อยู่ในห้องเผาไหม้ ในระบบนี้อนุภาคเชื้อเพลิงและอนุภาคเบดจะถูกพองให้ลอยตัวอยู่ในแก๊สโดยกระแสลมที่มีความเร็ว 0.6 – 4.6 เมตรต่อส อนุภาคของเชื้อเพลิงจะกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอและจะผสมผสานกับอากาศในลักษณะคล้ายน้ำเดือด ทำให้การเผาไหม้เกิดขึ้นได้ดี เชื้อเพลิงจะเผาไหม้ได้สูงถึงร้อยละ 97 – 99 ดังนั้นระบบเผาไหม้แบบฟลูอิดไธซ์เบดจึงใช้เผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีคุณภาพต่ำได้ ระบบเผาไหม้แบบนี้เชื้อเพลิงจะลอยตัวอยู่ในอนุภาคเบดได้นาน อุณหภูมิในเบดจึงไม่จำเป็นต้องสูงมาก ซึ่งการเผาไหม้จะรวดเร็วขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ดังรูปที่ 2-10



รูปที่ 2- 10 เตาเผาแบบฟลูอิดไธซ์เบด (Fluidized Bed) (JGSEE, มปป)

### 2.3.6.2 เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification Technology)

กระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากเชื้อเพลิงแข็งประกอบไปด้วยกระบวนการสลายตัว (Decomposition) และกระบวนการกลั่นสลาย (Devolatilization) ของโมเลกุลสารอินทรีย์ในขณะมุลฝอยชุมชน ที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1,200–1,400 °C หรือสูงกว่า 700 °C ในสภาวะที่จำกัดอากาศ เพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ และจะได้ผลผลิตที่เป็นแก๊สผสม (Syngas) ที่สามารถเผาไหม้ได้ (Combustible gas) ซึ่งประกอบด้วยแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แก๊สมีเทน (CH<sub>4</sub>) แก๊สไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>) ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นใน Gasification Process จะเป็นตัวกำหนดองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง ปัจจัยหลักที่กำหนดการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าว คืออุณหภูมิ ภายในเครื่องปฏิกรณ์ เช่น ถ่าน Residence Time ในบริเวณ Hot Zone ของเครื่องปฏิกรณ์น้อยเกินไป หรืออุณหภูมิต่ำเกินไป จะทำให้โมเลกุลขนาดกลางไม่เกิดการสันดาปและจะหลุดออกไปเกิดการควบแน่นที่บริเวณ Reduction Zone เป็นน้ำมันทาร์

โดยแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้สามารถนำไปใช้งานได้หลากหลายประเภท เช่น นำไปเป็นเชื้อเพลิงให้กับเครื่องยนต์หรือยานพาหนะต่าง ๆ เทคโนโลยีเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (gasifier) สามารถแบ่งประเภทตามลักษณะการทำงาน ได้ดังนี้

1) เตาผลิตแก๊สแบบเบดนิ่ง (Fixed bed gasifiers) เตาผลิตก๊าซแบบเบดนิ่งเชื้อเพลิงจะวางนิ่งบนตะแกรง หรืออาจเรียกว่าเป็นแบบเบดเคลื่อนที่ (moving bed) เนื่องจากเชื้อเพลิงจะเคลื่อนตัวไปภายในเตาแบบเป็นกลุ่มก้อน (plug flow) ทำให้การถ่ายเทความร้อนและการผสมรวมตัวกันภายในเตาเป็นไปอย่างไม่มีประสิทธิภาพมากนัก ซึ่งทำให้การกระจายตัวของเชื้อเพลิงและอุณหภูมิ รวมถึงองค์ประกอบของแก๊สเผาไหม้ เกิดการผลิตแก๊สไม่สม่ำเสมอ จึงเหมาะกับระบบผลิตแก๊สเชื้อเพลิงขนาดเล็ก อย่างไรก็ตามเตาผลิตแก๊สแบบเบดนิ่งนี้สามารถสร้างได้อย่างง่ายและมีราคาไม่แพง โดยเตาผลิตแก๊สแบบเบดนิ่งสามารถแบ่งตามทิศทางการไหลของเชื้อเพลิงและแก๊สเชื้อเพลิง ได้ดังนี้

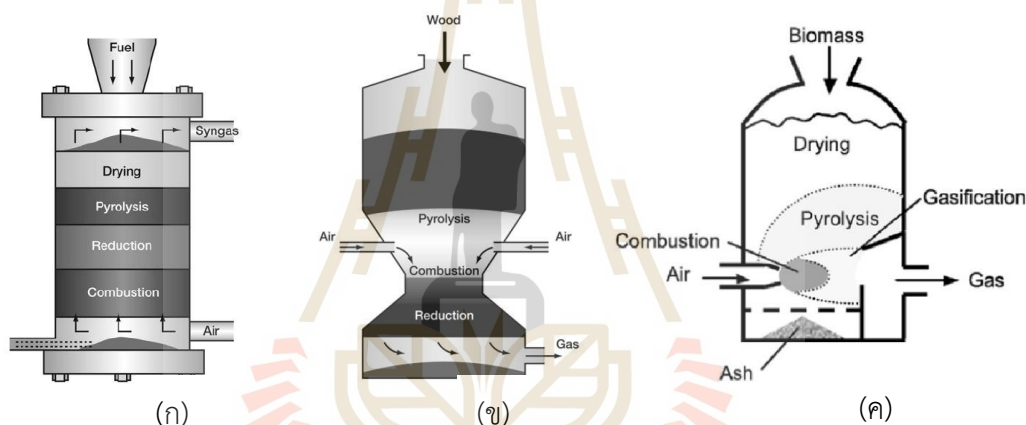
(1) เตาผลิตแก๊สแบบไหลขึ้น (Updraft or Counter-current Gasifiers) เตาผลิตแก๊สแบบไหลขึ้น ดังรูปที่ 2-11 (ก) เป็นเตาที่มีการไหลของแก๊สตัวกลางสวนทางกับทิศทางป้อนการเชื้อเพลิง โดยแก๊สตัวกลางจะไหลขึ้นด้านบน ในขณะที่เชื้อเพลิงจะไหลลงด้านล่างด้วยแรงโน้มถ่วง ข้อเสียของเตาประเภทนี้คือจะมีน้ำมันทาร์เกิดขึ้นในปริมาณมาก จึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้กับเชื้อเพลิงที่มีไอระเหยสูง ในทางตรงกันข้าม เนื่องจากลักษณะการไหลสวนทางกันระหว่างแก๊สและเชื้อเพลิงแข็ง ส่งผลให้มีสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูงและได้ประสิทธิภาพ (cold gas efficiency) สูงตามไปด้วย แก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ เหมาะที่จะนำไปใช้ในการเผาไหม้โดยตรงโดยที่ไม่ต้องมีการทำความสะอาด เช่น การเผาไหม้เพื่อให้ความร้อนในหม้อไอน้ำ เป็นต้น

(2) เตาผลิตแก๊สแบบไหลลง (Downdraft or Co-current Gasifiers) เตาผลิตแก๊สแบบไหลลง ดังรูปที่ 2-11 (ข) เป็นเตาที่มีการไหลของตัวกลางและเชื้อเพลิงแข็งไปในทิศทางเดียวกัน โดยตัวกลางจะไหลเข้าสู่เตา ณ ความสูงระดับหนึ่งได้ระดับผิวของเชื้อเพลิง ในขณะที่

แก๊สเชื้อเพลิงที่เกิดขึ้นจะไหลลงทางด้านล่าง โดยไหลผ่านชั้นของถ่านที่มีความร้อนสูง ส่งผลให้น้ำมันทาร์เกิดการสลายตัวด้วยความร้อน ดังนั้นเตาแบบนี้จึงมีน้ำมันทาร์เกิดขึ้นน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับเตาแบบอื่นๆ

(3) เตาผลิตแก๊สแบบไหลตามขวาง (Cross-Draft Gasifiers) เตาผลิตแก๊สแบบไหลตามขวาง ดังรูปที่ 2-11 (ค) เป็นเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่เชื้อเพลิงจะถูกป้อนจากทางด้านบนของเตา และตัวกลางที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาจะถูกฉีดผ่านหัวฉีดเข้าไปในเตาบริเวณด้านข้าง แก๊สเชื้อเพลิงที่เกิดขึ้นจะไหลออกจากเตา ณ ตำแหน่งตรงกันข้ามกับบริเวณที่ฉีดตัวกลางเข้าไปในเตา เตาผลิตแก๊สประเภทนี้นิยมใช้กับระบบผลิตแก๊สจากชีวมวลขนาดเล็ก เนื่องจากมีบริเวณที่

เกิดปฏิกิริยาค่อนข้างแคบและมีค่าความจุความร้อน (thermal capacity) ต่ำ ส่งผลให้เตาแบบนี้ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงภาวะได้อย่างรวดเร็วกว่าเตาชนิดอื่นๆ และมีปริมาณน้ำมันทาร์น้อย



รูปที่ 2- 11 ประเภทเตาผลิตแก๊ส (ก) แบบไหลขึ้น (ข) แบบไหลลง (ค) แบบไหลตามขวาง  
(ที่มา: JGSEE, มปป)

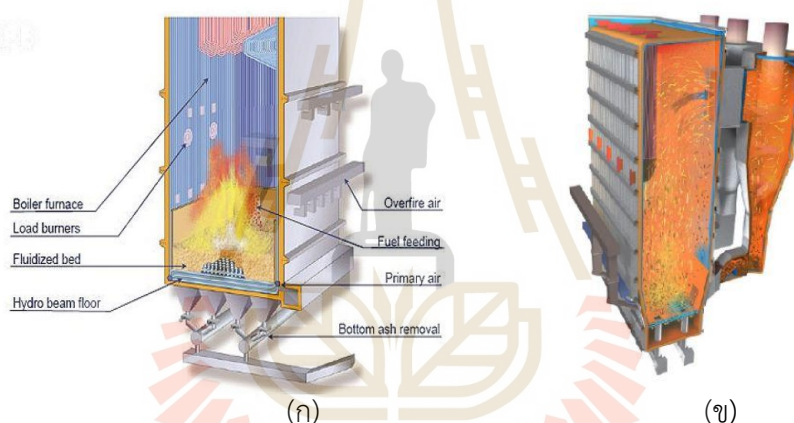
2) เตาผลิตแก๊สแบบฟลูอิดไคซ์เบด (Fluidized Bed Gasifiers) เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบฟลูอิดไคซ์เบดจะมีตัวกลางของแข็งหรือวัสดุเบดช่วยในการผสมผสานกันระหว่าง เชื้อเพลิงกับตัวออกซิแดนต์ (oxidant) ของผสมจะเคลื่อนที่ในลักษณะเหมือนของไหล หรือที่เรียกว่าสภาพฟลูอิดไคซ์เซชัน (fluidization) ซึ่งทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนและมวลสารได้ดีก่อให้เกิดปฏิกิริยาเกิดได้สมบูรณ์ แม้อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาจะต่ำกว่าเตาผลิตแก๊สประเภทอื่น โดยอุณหภูมิในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจะอยู่ในช่วงระหว่าง 800 – 950 °C ซึ่งทำให้เกิดน้ำมันทาร์เจือปนในแก๊สสังเคราะห์มากขึ้น

เตาแบบฟลูอิดไคซ์เบดสามารถใช้กับเชื้อเพลิงแข็งได้หลากหลาย เนื่องจากมีวัสดุเบดเป็นตัวช่วยรักษาความร้อนทำให้เตามีความเสถียรไม่ดับง่ายและเกิดปฏิกิริยาในตัวเตาได้อย่างทั่วถึง อย่างไรก็ตามระบบแบบนี้มีข้อจำกัดคือ มีโอกาสในการเกิดการลอมตัวติดกันเป็นก้อน



ของเถ้า (agglomeration) ทำให้การเคลื่อนที่เหมือนของไหลของอนุภาคหรือสภาพฟลูอิดซ์เซชัน ลดลงหรือหยุดลง

เทคโนโลยีเตาผลิตแก๊สแบบฟลูอิดซ์เบดมี 2 ประเภท คือ แบบบับบลิ้ง (bubbling fluidized bed, BFB) และแบบหมุนเวียน (circulating fluidized bed, CFB) ซึ่งแตกต่างกันโดยใช้ความเร็วของอากาศที่ป้อนเพื่อการเกิดสภาวะฟลูอิดซ์เซชันทำให้เกิดพฤติกรรมที่ต่างกัน ในเตาแบบบับบลิ้งฟลูอิดซ์เบด (BFB) โชนทำปฏิกิริยาเกือบทั้งหมดเกิดขึ้นในเบดซึ่งหนาแน่นอยู่ด้านล่างของเตา ในขณะที่ความเร็วของอากาศที่ป้อนสำหรับเตาแบบฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียน (CFB) นั้นสูงเพียงพอที่ทำให้อนุภาคต่างๆภายในเตาส่วนล่างสามารถลอยตัวและเคลื่อนที่ไปกับอากาศในขณะที่เกิดปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็ว ในเตาแบบฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียน (CFB) ทำให้เกิดการผสมกันได้ดีระหว่างแก๊สและอนุภาคของแข็ง ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทมวลและความร้อนได้อย่างดี อัตราการให้ความร้อนแก่อนุภาคเชื้อเพลิงสูง จึงก่อให้เกิดน้ำมันทาร์น้อย ดังรูปที่ 2-12



รูปที่ 2- 12 เตาผลิตแก๊สแบบฟลูอิดซ์เบด (ก) แบบบับบลิ้ง (ข) แบบหมุนเวียน (JGSEE, มปป)

3) เตาผลิตแก๊สแบบ Entrained Flow เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบ entrained flow นั้น เชื้อเพลิงที่ถูกป้อนเข้าไปต้องมีขนาดเล็กมาก (เล็กกว่า 100 ไมครอน) เพื่อให้สามารถเคลื่อนที่ไปพร้อมกับแก๊สได้และมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่สูง ถึงแม้ว่าจะมีระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาภายในเตาปฏิกิริยาสั้น (ประมาณ 2s -3s) ส่วนใหญ่มักจะทำปฏิกิริยาที่ความดันสูงกว่าความดันบรรยากาศหลายเท่า ข้อดีของการใช้เทคโนโลยี entrained flow คือ สามารถใช้เชื้อเพลิงที่มีความหลากหลาย โดยได้แก๊สที่สะอาดและมีทาร์น้อยมาก ในขณะที่เดียวกันเถ้าที่ออกมาจะอยู่ในรูปของเถ้าหลอม (slag) หรือเป็นก้อนผลึก แต่กระบวนการนี้ต้องอาศัยออกซิเจนปริมาณมาก เพื่อการเกิดกระบวนการออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูง

### 2.3.6.3 เทคโนโลยีไพโรไลซิส (Pyrolysis Technology)

กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) คือ กระบวนการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของเชื้อเพลิงแข็ง โดยใช้ความร้อนที่อุณหภูมิปานกลาง (400°C–700°C)

ในสภาวะไร้ออกซิเจน โดยเกิดการแตกพันธะเคมีของโมเลกุลขนาดใหญ่หรือสายโซ่ยาว กลายเป็นโมเลกุลขนาดเล็กหรือสายโซ่สั้น ได้ผลิตภัณฑ์ 3 ชนิด คือ ของแข็ง (Char) ของเหลว (Oil) และแก๊ส โดยองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันที่ได้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของเชื้อเพลิงแต่ละชนิด โดยกระบวนการไพโรไลซิสสามารถแบ่งตามอัตราการให้ความร้อนของเชื้อเพลิงได้ดังนี้

1) กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า (Slow Pyrolysis) เป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของเชื้อเพลิง โดยใช้อัตราการให้ความร้อนต่ำ ประมาณ 10 °C/min โดยผลิตภัณฑ์หลักที่ได้ คือ ของแข็ง

2) กระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว (Fast Pyrolysis) เป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของเชื้อเพลิง โดยใช้อัตราการให้ความร้อนกับเชื้อเพลิงที่สูง ประมาณ 100-1000 °C/s โดยผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จากกระบวนการนี้คือ น้ำมัน สามารถเกิดกระบวนการนี้ได้ภายในเตาปฏิกรณ์ (Reactor) หลายชนิด

### 2.3.7 เตาเผาเซรามิก (Ceramic kiln)

การเผาเซรามิก หรือเรียกอีกแบบว่าการทำให้เซรามิกสุกตัว โดยแบ่งเป็น 3 รูปแบบ คือ การเผาดิบ (Biscuit firing) การเผาเคลือบ (Gloss firing) และการเผาตกแต่ง (Decorating firing) เริ่มแรกเป็นการเผาแบบกึ่งผลิตภัณฑ์ที่จะเผาบนพื้นดิน ใช้เชื้อเพลิงชีวมวล ให้ความร้อนแก่วัสดุ โดยต่อมาได้มีการเรียนรู้การสร้างเตาเผาเซรามิกแบบใหม่ขึ้นหลากหลายประเภทโดยจะนำเสนอข้อมูล การเผาและควบคุมการเผาเซรามิก (ธนกร วาสนาเพียรพงศ์, 2563) ประเภทของเตาเผาเซรามิก 3 ประเภทหลัก ๆ ทั้งประเภทของทางเดินลมร้อน ลักษณะการใช้เชื้อเพลิง (สุชุมาล เล็กสวัสดิ์, 2548) และลักษณะของเปลวไฟ (ทวี พรหมพฤกษ์, 2525) รายละเอียดดังนี้

#### 2.3.7.1 บรรยากาศที่ใช้เผาเซรามิก

บรรยากาศที่ใช้ในการเผาเซรามิกโดยทั่วไป ประกอบด้วย 3 ประเภทดังนี้

1) บรรยากาศออกซิเดชัน (Oxidation firing) เป็นกระบวนการเผาไหม้สมบูรณ์ หรือมีออกซิเจนเกินพอต่อการเผาไหม้ จะทำให้จะได้องค์ประกอบก๊าซไอเสียหลัก ๆ คือ คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ การเผาไหม้แบบออกซิเดชันสามารถกำจัดสิ่งเจือปนและความชื้นออกจากชิ้นงานได้ ทำให้สีของชิ้นงานเปลี่ยนแปลง มีสีเข้มขึ้น ลดความเครียดของชิ้นงาน มีความแข็งแรง และทนทานต่อการกัดกร่อนมากขึ้น รวมถึงสามารถใช้ในการเผาไหม้กับชิ้นงานเซรามิกได้หลากหลายประเภท

2) บรรยากาศรีดักชัน (Reduction firing) เป็นกระบวนการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ คือ มีออกซิเจนไม่เพียงพอต่อการเผาไหม้ ทำให้คาร์บอนในเชื้อเพลิงไปดึงเอาออกซิเจนในโลหะออกไซด์ในดินมาใช้ในกระบวนการเผาไหม้ ทำให้เกิดสีส้มตามประเภทของโลหะนั้น ๆ ซึ่งจะได้ องค์ประกอบก๊าซไอเสียหลัก ๆ คือ คาร์บอนมอนอกไซด์ ข้อดีของบรรยากาศช่วงนี้คือทำให้ได้สีที่เปลี่ยนไปตามองค์ประกอบของโลหะออกไซด์ที่อยู่ในดิน มีความแข็งแรง ทนต่อการแตกร้าว

3) บรรยากาศนิวทรัล (Neutral firing) เป็นกระบวนการเผาไหม้ที่สมบูรณ์พอดี คือ มีปริมาณออกซิเจนพอดีต่อการเผาไหม้ การเผาไหม้แบบนี้จะช่วยให้งานมีความเรียบ ไม่มีตำหนิ ลดการเปลี่ยนแปลงสีของชิ้นงาน มีคุณภาพและปลอดภัยจากมลพิษทางอากาศ

### 2.3.7.2 ขั้นตอนการเผาผลิตภัณฑ์เซรามิก

ขั้นตอนการเผาเซรามิกโดยทั่วไป ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนดังนี้

1) การเผาดิบ (Biscuit firing) เป็นกระบวนการเผาชิ้นงานเริ่มต้น เพื่อไล่ความชื้นและสารอินทรีย์ออกจากผลิตภัณฑ์ ก่อนที่จะนำไปเผาเคลือบ เพื่อลดความเสียหายที่จะเกิดขึ้นขณะเผาเคลือบ จากการประทุของความชื้นหรือสารอินทรีย์ในผลิตภัณฑ์ และสามารถทำให้การเผาเคลือบทำได้ง่ายขึ้นอีกด้วย โดยการเผาดิบจะใช้บรรยากาศแบบออกซิเดชันหรือการเผาไหม้สมบูรณ์ทั้งหมดในการเผา เพื่อเปลี่ยนเหล็กออกไซด์ในผลิตภัณฑ์ให้อยู่ในรูปสารประกอบเฟอร์ริกออกไซด์ อุณหภูมิการเผาอยู่ในช่วง 750-800°C ใช้เวลา 6-7 h ให้งานอยู่ในเตาจนกว่าอุณหภูมิภายในเตาจะต่ำกว่า 150°C

2) การเผาเคลือบ (Gloss firing) เมื่อชิ้นงานผ่านการเผาดิบมาแล้ว จะผ่านการชุบเคลือบ โดยการเผาเคลือบจะแบ่งเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงที่ 1 ใช้อุณหภูมิ 24-950°C ใช้เวลา 5-6 h จากนั้น ช่วงที่ 2 จะใช้อุณหภูมิ 950-1,250°C เป็นเวลา 3-4 h โดยทั้ง 2 ช่วงเป็นการเผาแบบออกซิเดชัน หรือช่วงที่ 2 จะเผาต่อที่อุณหภูมิ 950-1,250°C เป็นเวลา 4-5 h แต่เผาในบรรยากาศแบบรีดักชันได้เช่นกัน ช่วงที่ 3 เป็นระยะการยีนไฟหรือใช้อุณหภูมิการเผาคงที่ 1,250°C เป็นเวลา 15 min ซึ่งการเผาเคลือบต้องใช้ในการเผาแบบรีดักชันด้วย เพื่อให้กระบวนการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ออกซิเจนจากอากาศไม่เพียงพอ คาร์บอนจากเชื้อเพลิงจึงไปดึงเอาออกซิเจนจากโลหะออกไซด์ในเนื้อดินและน้ำเคลือบ ทำให้ได้สีออกมามีคล้ายกับโลหะนั้น ๆ

3) การเผาตกแต่ง (Decorating firing) เป็นการเผาชิ้นงานที่ผ่านการเผาเคลือบแล้วและมีการลงสีเพื่อตกแต่ง เรียกว่าการตกแต่งบนเคลือบ เป็นการเผาเพื่อให้สีติดทนอยู่กับผลิตภัณฑ์ ใช้อุณหภูมิการเผา 650-850°C เผาแบบออกซิเดชันตลอดการเผา ถ้าหากต้องการตกแต่งสีเงินหรือสีทอง ใช้การเผาแบบออกซิเดชันที่ 750°C

### 2.3.7.3 ประเภทเตาเผาเซรามิก

ขั้นตอนการเผาเซรามิกโดยทั่วไป ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนดังนี้

#### 1) แบ่งตามประเภทของทางเดินลมร้อน (Draft Kiln)

เป็นการออกแบบเตาเผาที่ให้ความร้อนเดินทางไปในทิศทางที่ต้องการ เพื่อเผาผลิตภัณฑ์เซรามิก ให้ได้ผลตามความต้องการ สามารถแบ่งย่อยได้เป็น 4 ชนิดดังนี้

(1) เตาเผาชนิดทางเดินลมร้อนในแนวนอน (Horizontal Draft Kiln) หรือ Cross Draft โดยส่วนใหญ่เป็นเตาเผาที่มีรูปร่างยาวขนานกับพื้นดิน หลังคาโค้ง และเป็นเตาที่ใช้ฟืนหรือชีวมวลเป็นเชื้อเพลิง ให้อุณหภูมิที่สูงได้ แต่ไม่เป็นที่นิยมเนื่องจากต้นทุนการผลิตสูง ประกอบ



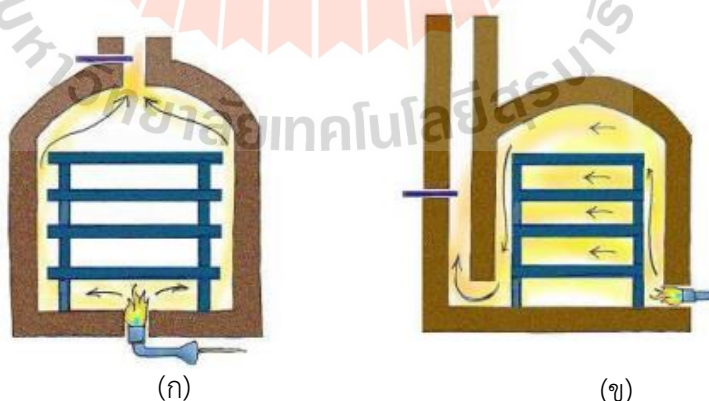
กับเชื้อเพลิงชีวมวลเริ่มหายากขึ้น และการใช้ฟืนเป็นเชื้อเพลิง จำเป็นต้องมีความชำนาญและควบคุม การเผาตลอดเวลา ถึงจะรักษาอุณหภูมิให้สม่ำเสมอได้



รูปที่ 2- 13 เตาเผาเซรามิกชนิดทางเดินลมร้อนแนวนอน ที่มา: (Olsen, 2001)

(2) เตาเผาชนิดทางลมร้อนขึ้น (Updraft Kiln) เป็นเตาที่อุณหภูมิการเผา ไม่สูงมาก  $900^{\circ}\text{C}$ – $1,050^{\circ}\text{C}$  เพื่อให้ความร้อนภายในเตาสม่ำเสมอเท่ากันทั้งเตา จะต้องออกแบบโดย เรียงตะกรับเตา (Checker Work) หลายชั้น โดยความร้อนจะมาจากด้านล่างของเตาและลอยผ่าน ผลิตภัณฑ์ขึ้นสู่ด้านบนปล่อย แต่อุณหภูมิช่วงล่างมักสูงกว่าด้านบน

(3) เตาเผาชนิดทางลมร้อนลง (Downdraft kilns) สามารถเผาให้อุณหภูมิ สูงได้ โดยทำจากอิฐทนไฟ (Insulating Brick) ที่สามารถทนอุณหภูมิสูงและทนต่อสภาวะต่าง ๆ ของ การเผาได้ดี โดยเป็นการออกแบบเพื่อให้ความร้อนถูกเก็บอยู่ในเตาได้นานขึ้น และประหยัดเชื้อเพลิง กว่าเตาแบบทางเดินลมร้อนขึ้น หลักการของเตาเผาชนิดนี้คือ ความร้อนจะเข้าทางด้านหน้าเตาและ ด้านข้างบางส่วน ซึ่งอยู่บริเวณพื้นล่าง จากนั้นความร้อนจะลอยขึ้นด้านบนและผ่านผลิตภัณฑ์ลงสู่ ด้านล่างแล้วออกสู่ปล่องควันในลำดับสุดท้ายดังรูป 2-14 (ข) เนื่องจากความร้อนไหลขึ้นด้านบน ทำ ให้อุณหภูมิด้านบนจะสูงกว่าด้านล่าง



รูปที่ 2- 14 (ก) ประเภทของเตาเผาเซรามิกชนิดทางลมร้อนขึ้น และ (ข) ทางลมร้อนลง (Peterson, 2012)

(4) เตาแบบทางเดินลมร้อน 2 ระบบ (Double Draft Kiln) เตาแบบนี้ เป็นการนำข้อดีจากเตาระบบทางเดินลมร้อนขึ้นและทางเดินลมร้อนลง มาผนวกเข้าด้วยกัน โดย

ช่วงแรกเผาแบบทางเดินลมร้อนขึ้น จะทำให้อุณหภูมิด้านล่างสูงกว่าและไล่ความชื้นในช่วงแรกของการเผาได้ดี จากนั้นเผาแบบทางเดินลมร้อนลง ซึ่งเพื่อให้ความร้อนแก่ด้านบนของเตาและเก็บความร้อนภายในเตาได้นาน

## 2) แบ่งตามลักษณะการใช้เชื้อเพลิง

เตาเผาเซรามิกจะต้องออกแบบให้เหมาะสมกับเชื้อเพลิงที่เลือกใช้ ซึ่งเชื้อเพลิงในการเผาจะส่งผลต่อการกำหนดรูปร่าง ขนาดวัสดุในการก่อสร้าง และการควบคุมการเผา สุขุมาล เล็กสวัสดิ์ (2548) ได้แบ่งประเภทของเตาเผาตามลักษณะการใช้เชื้อเพลิงเป็น 5 ประเภท ดังนี้

(1) เตาชนิดที่ใช้ฟืนเป็นเชื้อเพลิง (Wood Firing Kiln) หรือชีวมวลอื่น ๆ การใช้ฟืนในการเผาเซรามิก จะมีเอกลักษณ์เรื่องสีเนื่องจากควันไม้ ซึ่ง ภัญจนา บุญเกียรติ (2544) กล่าวว่า ข้อดีของไม้ฟืนคือ มีปริมาณเถ้าต่ำมาก ประมาณร้อยละ 1 ไม่มีกำมะถันหรือโลหะหนักปนเปื้อน ซึ่งเตาเผาชนิดนี้ควรมีช่องใส่ฟืนที่กว้าง มีตะแกรงเตาสำหรับใส่เชื้อเพลิง และควรมีช่องวางใต้ตะแกรงไว้ถ่ายเถ้า ปล่องควันที่ใหญ่และกว้างจะช่วยให้เปลวไฟและความร้อนลอยผ่านตลอดเวลา ซึ่งการเผาโดยใช้ฟืนจะใช้เวลาในการเผา ขึ้นอยู่กับขนาดและลักษณะของเตา รวมถึงผลิตภัณฑ์ที่อยู่ภายในเตาด้วย โดยใช้เวลาอุ่นเตาประมาณ 2 วัน ต่อด้วยการเผาอีก 3 – 4 วัน หลังจากเผาเสร็จให้ปิดเตาและปล่อยให้เย็นตัวอีก 5 – 6 วัน

(2) เตาที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง (Coal Firing Kiln) เป็นเตาที่เผาได้อุณหภูมิที่สูง แต่ระบบการเผาไหม้โดยใช้ถ่านหิน จะต้องออกแบบให้เหมาะสม เพื่อความสมดุลทั้งระบบป้อนเชื้อเพลิงและการถ่ายเถ้า โดยเตาที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง มักมีปัญหาเรื่องคุณภาพของผลิตภัณฑ์และเขม่าควัน เนื่องจากถ่านหินเกิดการเผาไหม้ จะมีแก๊สที่เกิดจากกำมะถันผสมปนไปกับลมร้อน ทำให้ผลิตภัณฑ์ได้รับความเสียหายและมีเขม่าเคลือบเตาเผา ดังนั้นการใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงจะต้องสร้างห้องไฟ (Fire Box) ห้องเผาไหม้หลายห้องรอบ ๆ เตา เพื่อให้ความร้อนที่สูงเพียงพอและลดปริมาณเขม่าที่จะเข้าไปสัมผัสกับผลิตภัณฑ์

(3) เตาชนิดใช้แก๊สเป็นเชื้อเพลิง (Gas Firing kiln) เป็นเตาเผาที่ให้อุณหภูมิสูง สามารถเผาในบรรยากาศแบบไม่มีเขม่า (Oxidizing) หรือ บรรยากาศแบบมีเขม่า (Reduction) ซึ่งเตาเผาที่ใช้แก๊สเป็นเชื้อเพลิง ใช้ได้สะดวก ควบคุมง่าย สามารถผลิตขนาดต่าง ๆ ได้ตามความต้องการ มีหัวพ่นไฟ (Burner) เพื่อกระจายความร้อนไปยังจุดต่าง ๆ ข้อเสียของเตาแก๊สควรเว้นพื้นที่ไว้เพื่อการถ่ายเทอากาศในกรณีที่เกิดควัน ซึ่งปัจจุบันก็มีงานวิจัยที่นำเชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ มาเผาโดยใช้กระบวนการ gasification เพื่อให้ได้เป็น syngas ออกมา จากนั้นนำไปเป็นเชื้อเพลิงในการเผาวัสดุเซรามิก เช่น Valdés et al. (2016) ได้ผลิตแก๊สจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยนำเชื้อเพลิงผสมกัน ระหว่างถ่านหินกับกะลาปาล์ม เพื่อใช้ในการเผาอิฐ ผลที่ได้ คือ สามารถลดการสูญเสียความร้อนของระบบได้ถึง 5% และสามารถลดการปล่อยมลพิษสู่บรรยากาศจากกระบวนการเผาอิฐ เมื่อเทียบกับวิธีดั้งเดิม

(4) เตาเผาชนิดใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิง (Oil Firing kiln) มีการออกแบบให้ใช้น้ำมันประเภทน้ำมันเบา (Light oil) หรือน้ำมันเตา (Heavy Oil) ซึ่งน้ำมันเป็นเชื้อเพลิงที่มีการใช้งานทั่วไปและหาง่าย การใช้หัวพ่นไฟที่เหมาะสมทำให้สามารถเผาไหม้ในเตาขนาดใหญ่ได้ทั้งในบรรยากาศแบบออกซิเดชันและรีดักชัน ห้องเผาไหม้สำหรับเตาน้ำมันจะต้องสร้างจากอิฐทนไฟและมีขนาดที่เหมาะสมต่อการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์

(5) เตาเผาชนิดไฟฟ้า (Electric Firing kiln) เป็นเตาเผาที่ให้อุณหภูมิสูง และสามารถปรับระดับความเร็วในการให้ความร้อนได้ตามต้องการ โดยเป็นเตาเผาที่ใช้การเผาแบบ oxidizing เท่านั้น ซึ่งเตาไฟฟ้ามีหลายลักษณะรูปทรง เช่น เตากลม เตาสี่เหลี่ยม เตาที่เปิดด้านบน (Top Loading) เตาที่เปิดด้านหน้า (Front Loading) เป็นต้น ผนังเตาทำจากอิฐทนไฟหรือไฟเบอร์ซึ่งเตาไฟฟ้าเป็นเตาที่มีความปลอดภัยสูง สะอาด แต่มีข้อจำกัดคือ ไม่เหมาะที่จะเผาวัสดุแบบเตาแก๊ส เพราะบรรยากาศแบบรีดักชันทำให้ขดลวดความร้อนเสื่อมสภาพไว ซึ่งจะใช้ขดลวด Kanthal Wire ผึงพอดอยู่กับผนังเตา เกิดความร้อนขึ้นเมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน โดยสามารถเผาได้อุณหภูมิสูงถึง 1,200°C -1,300°C

### 3) แบ่งตามประเภทของเปลวไฟ (Firing Kiln)

เตาเผาผลิตภัณฑ์ในปัจจุบัน ออกแบบให้เปลวไฟสัมผัสหรือไม่สัมผัสกับชิ้นงาน ขึ้นอยู่กับผลิตภัณฑ์ที่เผา ถ้าเป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่ได้เคลือบ ก็อาจจะให้เปลวไฟสัมผัสกับผลิตภัณฑ์ได้ แต่ถ้าเป็นผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการเคลือบ จะต้องออกแบบไม่ให้เปลวไฟสัมผัสกับชิ้นงานได้เลย ซึ่งแบ่งประเภทออกเป็น 3 ลักษณะแตกต่างกัน คือ

(1) เตาเผาชนิดเปลวไฟสัมผัส (Direct Firing Kiln) เป็นเตาขนาดใหญ่ ใช้เผาผลิตภัณฑ์ประเภทสิ่งก่อสร้าง (Terra-Cotta) อิฐ กระจก เบื้อง ท่อ อิฐทนไฟ เป็นเตาเผาที่ให้อุณหภูมิสูง ส่วนมากใช้เผาผลิตภัณฑ์ที่ไม่เคลือบ

(2) เตาเผาชนิดกึ่งป้องกันเปลวไฟ (Semi Muffle Kiln) เป็นเตาชนิดที่ออกแบบให้มีกำแพงไฟ (Baffle Wall) ให้เปลวไฟสัมผัสกำแพงไฟโดยตรง โดยสร้างกำแพงไฟอยู่เหนือช่องเผา (Firing Chamber) เตาชนิดนี้ใช้เผาเคลือบได้ดี

(3) เตาเผาชนิดเตาปิด (Muffle Kiln) เป็นเตาที่ออกแบบให้มีระบบป้องกันเปลวไฟสัมผัส โดยใช้วัสดุทนไฟสร้างเป็นหีบป้องกันไฟโดยตรง ใช้เผาเคลือบได้ดี หรือจะใช้ผลิตภัณฑ์ชนิดบนเคลือบก็ได้หีบทนไฟ (Sager) ขนาดเล็กที่ใช้บรรจุผลิตภัณฑ์เข้าเตาเผา

#### 2..3.7.4 เทคนิคและการควบคุมการเผาเซรามิก

การควบคุมการเผาทางเซรามิก สามารถทำได้โดยใช้เครื่องมือวัด 5 ประเภทด้วยกัน ดังนี้

- 1) สังกะสีของไฟ (Color temperature)
- 2) เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple)
- 3) ไพโรมิเตอร์ (Pyrometer)

- 4) โคนวัดอุณหภูมิ (Pyrometric cone equivalent)
- 5) แหวนวัดอุณหภูมิ (Thermal ring or bullers ring)

### 2.3.8 โครงสร้างพื้นฐานและหลักการออกแบบเตาเผาอุตสาหกรรม

สำนักพัฒนาทรัพยากรบุคคลด้านพลังงาน (มปป). โดยทั่วไปเตาเผาอุตสาหกรรมจะประกอบด้วยส่วนประกอบดังต่อไปนี้

#### 2.3.8.1 โครงสร้างพื้นฐานของเตาเผาอุตสาหกรรม

1) ฐานเตา หากเตาเผาไม่ได้มีน้ำหนักเบา โดยทั่วไปจะต้องมีฐานคอนกรีตเพื่อรองรับน้ำหนักของเตาด้วย และจะเป็นฉนวนป้องกันการสูญเสียความร้อนของเตาด้วย

2) เปลือกเตา เป็นแผ่นเหล็กเชื่อมรอบตัวเตา เพื่อเสริมความแข็งแรงและห่อหุ้มฉนวนด้านในอีกชั้นหนึ่ง โดยเปลือกเตาจะประกอบด้วย พื้นเตา ผนังเตา เพดานเตา ฯลฯ นอกจากนี้ยังป้องกันก๊าซเผาไหม้ภายในเตารั่วไหลออกไปด้านนอกและป้องกันอากาศภายนอกเข้ามาอีกด้วย

3) โครงสร้างฉนวนความร้อน โครงสร้างฉนวนความร้อนของผนังเตาประกอบด้วยฉนวนความร้อน วัสดุทนไฟต่าง ๆ เช่น อิฐ เซรามิกบอร์ด โยแก้ว โยหิน เป็นต้น ฉนวนความร้อน จะต้องเลือกใช้วัสดุและโครงสร้างที่เหมาะสมแก่การใช้ รวมทั้งต้องลดการสูญเสียความร้อนเนื่องจากการแผ่รังสีและการนำความร้อนให้เหลือน้อยที่สุด

4) อุปกรณ์ให้ความร้อน ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ๆ คือการให้ความร้อนด้วยการเผาไหม้เชื้อเพลิงและการให้ความร้อนด้วยพลังงานไฟฟ้า

5) เครื่องลำเลียงวัตถุดิบ เป็นอุปกรณ์ลำเลียงวัตถุดิบเข้า-ออกจากเตา หรือเคลื่อนย้ายวัตถุดิบ

6) อุปกรณ์นำความร้อนกลับมาใช้ใหม่ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ประโยชน์จากความร้อนทิ้งของก๊าซไอเสียวนกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ เนื่องจากความร้อนทิ้งนี้ยังมีอุณหภูมิที่สูงเพียงพอต่อการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

7) เครื่องควบคุม เป็นอุปกรณ์ปรับค่าของ อุณหภูมิ ความดัน อัตราไหลต่าง ๆ ไฟฟ้า รวมถึงการลำเลียงต่าง ๆ เพื่อรักษาสภาพการทำงานของเตาให้มีเสถียรภาพ

#### 2.3.8.2 หลักการออกแบบเตาเผาอุตสาหกรรม (กรณีศึกษา: เตาเผาขยะมูลฝอย)

กรมควบคุมมลพิษ (2563) เทคโนโลยีของเตาเผาที่นำมาใช้งานในด้านการกำจัดขยะมูลฝอย จะต้องมีความเหมาะสมในทุก ๆ ด้าน และมีองค์ประกอบที่จะทำให้เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ รายละเอียดดังนี้

1) เลือกใช้เทคโนโลยีที่เหมาะสม ซึ่งจะต้องสัมพันธ์กับปริมาณขยะมูลฝอยที่ต้องการกำจัด มีความสามารถในการบำบัดมลพิษ มีองค์ประกอบที่ทำให้การเผาไหม้ได้ดี และมีความเหมาะสมในเชิงของงบประมาณ การติดตั้ง และความสะดวกในการบำรุงรักษา

2) ห้องเผาไหม้ ขนาดห้องเผาไหม้ที่ใช้ในการออกแบบ จะต้องให้ก๊าซที่เกิดขึ้น หลังจากการแตกตัวของโมเลกุลเชื้อเพลิง ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศไม่ต่ำกว่า 2 s โดยสามารถแบ่งโซนภายในเตาเพื่อความเหมาะสมได้ 3 โซน คือโซนที่ใช้ในการอบแห้งเชื้อเพลิง โซนเผาไหม้ และโซนที่นำความร้อนจากการเผาไหม้ไปใช้ประโยชน์

3) พื้นเตาเผา เพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ พื้นเตาที่ออกแบบควรมีพื้นที่ ให้อากาศได้แทรกซึมเพื่อทำปฏิกิริยาการเผาไหม้กับเชื้อเพลิงได้ทั่วถึง เช่น แบบแผงตะแกรง (Stoker) หรือแบบทรงกระบอกหมุนแกนนอน (Rotary-Kiln) แบบใช้ตัวกลางนำความร้อน (Fluidized Bed) เป็นต้น

4) การกระจายตัวของอากาศภายในเตา อากาศมีความสำคัญในการเผาไหม้ สมบูรณ์ ถ้ามีการกระจายตัวสัมผัสกับเชื้อเพลิงอย่างรวดเร็วและทั่วถึง จะทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ สมบูรณ์และเผาไหม้ได้อย่างรวดเร็ว อากาศที่ไหลเข้าสู่เตา สามารถออกแบบให้ไหลเข้าได้ทั้งทาง ด้านบนเตา (Over Fired) หรือใต้เตา (Under Fired) หรือด้านข้างของเตา การไหลของอากาศเข้า ทางด้านล่างของขยะมูลฝอย จะทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ดี เช่น การไหลของอากาศเข้าด้านล่างของขยะ มูลฝอย ของเตาเผาแบบแผงตะแกรง (Stoker) หรือเตาเผาแบบใช้ตัวกลางนำความร้อน (Fluidized Bed) เป็นต้น

5) การควบคุมการไหลของอากาศ อากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ต้องมีมากเกิน พอในปริมาณที่เหมาะสมและสามารถควบคุมได้ โดยอากาศที่ใช้สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การไหล ตามธรรมชาติ (Natural Draft) ซึ่งเกิดจากระบบการพาความร้อน การใช้พัดลมอัดอากาศ (Forced Draft Fan, FDF) และการใช้พัดลมดูดอากาศ (Induced Draft Fan, IDF) หรือสามารถใช้ พัดลมทั้งสองแบบร่วมกันเพื่อควบคุมให้มีปริมาณอากาศที่เหมาะสมและเกิดความดันภายในเตาคงที่ ได้ โดยการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่เป็นขยะมูลฝอย ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงแข็ง ควรควบคุมให้มีออกซิเจน ( $O_2$ ) คงเหลือจากการเผาไหม้ 10-12% ของก๊าซไอเสีย

6) การควบคุมความดันภายในเตา ความดันภายในเตา เกิดจากการเคลื่อนที่ เข้า-ออกของอากาศและก๊าซไอเสีย ซึ่งถ้ามีการใช้พัดลมอัดอากาศ จะทำให้เกิดความดันเป็นบวก การ ใช้พัดลมดูดอากาศและการไหลตามธรรมชาติ จะทำให้เกิดความดันเป็นลบภายในเตา ซึ่งถ้าแรงดัน ภายในเตาเป็นบวก จะส่งผลกระทบต่อสภาวะแวดล้อมรอบข้าง เนื่องจากอาจมีควันหรือก๊าซเผาไหม้ต่าง ๆ ออกมาตามรูรั่วของเตา ดังนั้น จึงควรมีการตรวจวัดและควบคุมความดันภายในเตาให้เป็นลบหรือคงที่ ตลอดเวลา

7) การเตรียมเตาเผา การเริ่มเผาหรือการอุ่นเตาเผา เป็นการทำให้สภาวะ อุณหภูมิเหมาะสมในการเผาไหม้ ลดการเกิดมลพิษจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ซึ่งต้องมีอุณหภูมิสูง ในช่วง  $800^{\circ}\text{C}$ - $900^{\circ}\text{C}$



8) การทำให้ก๊าซไอเสียอุณหภูมิต่ำลง ซึ่งเป็นการลดอุณหภูมิก๊าซไอเสียที่จะนำไปใช้ประโยชน์หรือปล่อยทิ้งสู่บรรยากาศ เพื่อลดการเกิดสารประกอบไดออกซิน ซึ่งเป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม โดยจะต้องลดอุณหภูมิลงให้อยู่ในช่วง 250°C-300°C

### 2.3.9 วิทยาศาสตร์การเผาไหม้

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (มปป) การเผาไหม้ เป็นปฏิกิริยาเคมีระหว่างเชื้อเพลิงกับออกซิเจนจากอากาศ และปลดปล่อยความร้อนออกมาในรูปสารประกอบออกไซด์ การเผาไหม้ที่สมบูรณ์จะได้ก๊าซเผาไหม้ออกมาเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ส่วนการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์จะได้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ออกมาแทน ซึ่งก่อให้เกิดมลพิษกับสิ่งแวดล้อมได้ แต่อย่างไรก็ตามการเผาไหม้แม้จะสมบูรณ์หรือไม่สมบูรณ์ ก็สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ทั้งสองรูปแบบ และการเข้าใจหลักการเผาไหม้ทั้งสองแบบ จะมีความสำคัญต่อการอนุรักษ์พลังงานและป้องกันการทำลายสิ่งแวดล้อมได้ด้วย

#### 2.3.9.1 เชื้อเพลิง

หมายถึง สสารที่สามารถเผาไหม้ได้ เมื่อทำปฏิกิริยากับอากาศหรือออกซิเจนและความร้อน การนำวัตถุดิบใดมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้นั้น จำเป็นต้องคำนึงถึงความสามารถในการผลิตสะดวกในการจัดหา เก็บรักษาขนส่ง และใช้งานได้ง่าย นอกจากนี้สิ่งที่เกิดจากการเผาไหม้ เช่น ไอเสีย เถ้า น้ำเสีย เป็นต้น ต้องไม่ทำให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมทางอากาศ ทางน้ำ ฯลฯ โดยเชื้อเพลิงสามารถแบ่งออกได้ตามสภาพทางกายภาพเป็นเชื้อเพลิงก๊าซ เชื้อเพลิงเหลว และเชื้อเพลิงแข็ง รายละเอียดดังนี้

1) เชื้อเพลิงก๊าซ เป็นเชื้อเพลิงที่อยู่ในสถานะก๊าซ ภายใต้อุณหภูมิและความดันปกติ แบ่งออกเป็นก๊าซธรรมชาติและก๊าซที่ผลิตขึ้นจากการแยกเชื้อเพลิงแข็งหรือเชื้อเพลิงเหลวชนิดอื่น โดยแบ่งออกเป็น 5 ชนิด ได้แก่ ก๊าซธรรมชาติ LPG ก๊าซหุงต้ม ก๊าซที่ได้จากการแยกสลายน้ำมัน และก๊าซเชื้อเพลิงชนิดอื่น ๆ

2) เชื้อเพลิงเหลว เป็นเชื้อเพลิงที่อยู่ในสถานะของเหลวภายใต้อุณหภูมิและความดันปกติ เชื้อเพลิงเหลวที่ใช้กันทั่วไปในปัจจุบันเกือบทั้งหมดเป็นเชื้อเพลิงปิโตรเลียม การผลิตเชื้อเพลิงเหลวนำน้ำมันดิบที่ขุดได้จากบ่อน้ำมันมากลั่น แยกสลายโดยใช้ Catalyst หรือการทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจน เป็นต้น โดยทำ Alkylation และกลั่นลำดับส่วน เพื่อแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสมกับใช้งานแต่ละประเภท ได้แก่ น้ำมันดิบ น้ำมันเบนซิน น้ำมันก๊าด น้ำมันดีเซล และน้ำมันเตา โดยแบ่งประเภทตามช่วงของจุดเดือดและความหนาแน่นของน้ำมัน

3) เชื้อเพลิงแข็ง หมายถึงเชื้อเพลิงที่ใช้งานในสภาพที่เป็นของแข็ง เชื้อเพลิงแข็งหลัก ๆ ได้แก่ เชื้อเพลิง ธรรมชาติ เช่น ถ่านหิน ลิกไนต์ ถ่านพีท ไม้ เป็นต้น และเชื้อเพลิงที่ได้จากการนำเชื้อเพลิงธรรมชาติมาผลิตเป็นถ่าน (Carbonization) เช่น ถ่านโค้ก (Coke) ถ่านเคมีโค้ก (Semi-coke) ถ่านลิกไนต์โค้ก (Lignite coke) และถ่านไม้

### 2.3.9.2 ปฏิกริยาและกระบวนการเผาไหม้

1) ปฏิกริยาการเผาไหม้ เป็นปฏิกริยาอุณหภูมิต่ำ มีอะตอมและอนุโมลอิสระ โดยสมบัติจะขึ้นพลทางกลศาสตร์ของก๊าซ นั่นก็คือปฏิกริยาเผาไหม้ทั่วไป ซึ่งจะเปลี่ยนรูปเป็นปฏิกริยาคายความร้อนในสถานะก๊าซ เมื่อเริ่มกระบวนการเผาไหม้ เชื้อเพลิงแข็งและเชื้อเพลิงเหลวจะถูกเผาไหม้และระเหยกลายเป็นไอ จากนั้นทำปฏิกริยาคายความร้อนในสถานะก๊าซ ระหว่างก๊าซของเชื้อเพลิงกับสารออกซิเดชัน

เชื้อเพลิงทั้ง 3 ประเภทข้างต้น มีองค์ประกอบของคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) และออกซิเจน (O) ในบางเชื้อเพลิงก็จะมีองค์ประกอบธาตุของ ไนโตรเจน (N) และ ซัลเฟอร์ (S) พันธะกันในรูปแบบต่าง ๆ องค์ประกอบเหล่านี้จะทำปฏิกริยาอย่างรวดเร็วกับออกซิเจน จนเกิดเป็นแสงและความร้อน ในกระบวนการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ จะได้องค์ประกอบก๊าซไอเสียในรูปของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) และน้ำ (H<sub>2</sub>O) แต่ถ้าหากเป็นกระบวนการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ก๊าซไอเสียที่ได้จะอยู่ในรูปของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) หรือถ้าหากเชื้อเพลิงมีองค์ประกอบของซัลเฟอร์และไนโตรเจน ก๊าซไอเสียที่ได้ก็จะมีก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO<sub>2</sub>) และไนโตรไดออกไซด์อยู่ด้วย

ปฏิกริยาระหว่างไฮโดรเจนและออกซิเจนที่ได้สัดส่วนตามทฤษฎีมีดังต่อไปนี้



อย่างไรก็ตาม สมการนี้เป็นเพียงการแสดงสภาวะก่อนและหลังการเกิดปฏิกริยาเท่านั้น ไม่ได้แสดงกระบวนการเกิดปฏิกริยาระหว่างกระบวนการ ซึ่งในระหว่างการทำปฏิกริยาที่เปลวไฟมีอุณหภูมิสูง น้ำจึงเกิดการสลายตัวทำให้เกิดสารประกอบอื่น เช่น H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, OH, H, และ O เมื่อปฏิกริยาเกิดเป็นก๊าซไอเสียแล้ว ปฏิกริยาทั้งหมดจะสิ้นสุด ตามสมการ 2.1

2) การติดไฟกับการเคลื่อนที่ของเปลวไฟ เมื่อรักษาอุณหภูมิการเผาไหม้ให้คงที่แล้ว เชื้อเพลิงจะเริ่มติดไฟได้ด้วยตัวเอง ซึ่งเวลาที่ใช้ในการจุดติดไฟเรียกว่า Ignition delay หรือ Explosion delay โดยการจุดไฟเริ่มต้นจะได้มาจากระบบที่สร้างขึ้น เช่น ไฟฟ้า วัตถุที่มีอุณหภูมิสูง หรือ Pilot flame เป็นต้น

3) กระบวนการเผาไหม้ในทางปฏิบัติ โดยเชื้อเพลิงก๊าซจะแบ่งออกเป็นการเผาไหม้ด้วย Burner และการเผาไหม้ในภาชนะ เพื่อให้เกิดเปลวไฟที่คงที่และสม่ำเสมอ

นอกจากนี้ยังสามารถแบ่งวิธีการเผาไหม้โดยใช้วิธี Premix combustion, Partial premix combustion และ Diffuse combustion โดยวิธีการ Premix combustion จะนำเชื้อเพลิงกับอากาศผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันก่อน จากนั้นจึงนำไปเผาไหม้ ข้อดีคือ เปลวไฟจะลามเข้าไปในก๊าซผสมเอง ในขณะที่ Diffuse combustion จะใช้กลุ่มก้อนเชื้อเพลิงกับกลุ่มก้อนของอากาศในการเผาไหม้ ข้อดีคือเปลวไฟไม่เคลื่อนที่ ส่วนวิธีการ Partial premix combustion จะใช้วิธีการระหว่าง 2 แบบ ข้างต้น โดยใช้ก๊าซผสม Premix ที่มีความเข้มข้นสูงกว่า Flammability limit แทนเชื้อเพลิง



นอกจากนี้การเผาไหม้ยังแบ่งออกตามลักษณะการไหลของก๊าซบริเวณเปลวไฟ ได้แก่การไหลแบบราบเรียบ (Laminar flame) และการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flame) เมื่อลักษณะการไหลเปลี่ยนจากแบบราบเรียบเป็นการไหลปั่นป่วน ลักษณะของเปลวไฟจะเปลี่ยนแปลงอย่างมาก ทำให้มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นและทำให้ความเร็วของเปลวไฟในการเผาไหม้แบบ Premix combustion เพิ่มขึ้นอีกด้วย ส่วนการเผาไหม้แบบ Diffuse combustion จะทำให้ Combustion rate ของเปลวไฟเพิ่มขึ้น

4) การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแข็ง รูปแบบการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งแบ่งออกเป็น 4 รูปแบบ ได้แก่ (1) Evaporating combustion (2) Decomposing combustion (3) Surface combustion และ (4) Smoldering

(1) Evaporating combustion เป็นรูปแบบที่เชื้อเพลิงแข็งที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ ถูกหลอมเหลวก่อนเกิดการเผาไหม้ จากนั้นจะระเหยแบบเดียวกันกับเชื้อเพลิงเหลว หลังจากนั้นจึงเกิดการเผาไหม้ขึ้น รูปแบบนี้จะเกิดขึ้นได้ในกรณีที่อุณหภูมิสารระเหยมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิที่สลายตัวด้วยความร้อน

(2) Decomposing combustion เป็นรูปแบบที่เกิดขึ้นในกรณีที่อุณหภูมิสลายตัวด้วยความร้อนมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิสารระเหย เมื่อได้รับความร้อนขึ้น เชื้อเพลิงจะสลายตัวด้วยความร้อน จนกระทั่งสารระเหยถูกปลดปล่อยกลายเป็นไอ จึงจะเกิดการเผาไหม้ขึ้น

(3) Surface combustion พบได้ในการเผาไหม้อ่านไม้หรืออ่านไค้ก ซึ่งเชื้อเพลิงเหล่านี้มีค่าสารระเหยน้อย แต่มี Fixed carbon สูง หลังจากผ่านการเผาไหม้แบบ Decomposing combustion โดยออกซิเจนหรือก๊าซที่มีสมบัติออกซิเดชัน (เช่น  $\text{CO}_2$ ) จะแพร่เข้าไปในพื้นที่ผิวหรือช่องว่างภายในเชื้อเพลิงแล้วทำให้เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้

(4) Smoldering สำหรับเชื้อเพลิงที่มีอุณหภูมิสลายตัวด้วยความร้อนต่ำ เช่น กระดาษ หลังจากเกิดการสลายตัวด้วยความร้อน ถ้าหาก Volatile ไม่ถูกจุดติดไฟ บางครั้งจะเกิดปฏิกิริยาที่พื้นผิวทำให้เกิดควันปริมาณมาก เรียกสิ่งนี้ว่า Smoldering สาเหตุเกิดจากปฏิกิริยาที่ผิวเกิดขึ้นต่อเนื่อง ภายใต้อุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิติดไฟของ Volatile ถ้ามีการจุดไฟที่ควันหรือเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นมากกว่าอุณหภูมิจุดติดไฟของควัน การเผาไหม้จะเปลี่ยนรูปเป็นการเผาไหม้ที่เกิดเปลวไฟ

5) วิธีการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งแบ่งออกเป็น 3 แบบหลัก ๆ ด้วยกัน คือ

(1) Fixed bed combustion (2) Fluidized bed combustion และ (3) Pulverized coal firing

(1) Fixed bed combustion หรือ Grate firing คือ การสร้าง Fixed bed ของเชื้อเพลิงแข็งซึ่งเรียกว่าตะแกรง (Grate) แล้วจึงใช้อากาศไหลผ่านเชื้อเพลิงเพื่อทำปฏิกิริยาเผาไหม้ โดยอัดอากาศเข้าทางด้านล่างตะแกรง โดยเชื้อเพลิงจะอยู่กับที่ซึ่งเป็นกระบวนการเผาไหม้แบบ Fixed bed

(2) Fluidized bed combustion หรือ Grate firing combustion คือ การผ่านอากาศเข้าทางด้านล่างของเชื้อเพลิง โดยใช้ความเร็วของอากาศที่สามารถทำให้เชื้อเพลิง ลอยตัวได้ และเคลื่อนที่ในลักษณะเดียวกับของไหล เรียกว่าสภาวะ Fluidization โดยมีตัวกลางที่มี สมบัติทนไฟ เช่น ทราย เป็นเบด โดยสามารถแบ่งตามทิศทางการป้อนเชื้อเพลิงและอากาศ 2 รูปแบบ คือ Overfeed firing กับ Underfeed firing Overfeed firing ซึ่งเป็นการป้อนเชื้อเพลิงในทิศทาง ตรงกันข้ามกับการป้อนอากาศ ส่วน Underfeed firing เป็นการป้อนเชื้อเพลิงในทิศทางเดียวกับการ ป้อนอากาศ

(3) Pulverized firing คือ เป็นวิธีการเผาไหม้ที่ใช้เชื้อเพลิงรูปแบบผง ซึ่ง ผ่านการบดย่อยให้มีอนุภาคขนาดเล็กกว่าตะแกรง 200-mesh ในปริมาณมากกว่าร้อยละ 80 โดย นำไปฉีดพ่นพร้อมกับอากาศแล้วเกิดการเผาไหม้ในเตาเผา

### 2.3.9.3 การวัดสมบัติก๊าซเผาไหม้

1) การวิเคราะห์องค์ประกอบหลักในก๊าซไอเสียจากการเผาไหม้ได้แก่  $N_2$ ,  $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$  ซึ่งเป็นการเผาไหม้สมบูรณ์ แต่ในบางครั้งการเผาไหม้ก็ยากที่จะควบคุมให้เกิดการเผา ไหม้สมบูรณ์ ซึ่งทำให้เกิดก๊าซต่าง ๆ ได้แก่  $CO$ ,  $SO_2$ ,  $NO$ ,  $NO_2$ ,  $HCL$  และไฮโดรคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้ นอกจากนี้ยังมีอนุภาคของแข็งอื่นด้วย เช่น เขม่าควัน ฝุ่นละออง เป็นต้น การวิเคราะห์องค์ประกอบ ต่าง ๆ มีความสำคัญต่อการประเมินสัดส่วนอากาศที่จำเป็นในการเผาไหม้ สมดุลทางความร้อน การ ปรับปรุงสภาวะการเผาไหม้ เป็นต้น เครื่องมือในการวิเคราะห์ก๊าซเหล่านี้สามารถแบ่งออกได้เป็น เครื่องวิเคราะห์ทางเคมีและฟิสิกส์ ดังนี้

2) วิเคราะห์ทางฟิสิกส์ คือการวิเคราะห์เพื่อหาความเข้มข้นของ chemical species ที่อยู่ในก๊าซด้วยการวัดสมบัติทางฟิสิกส์ เช่น การดูดกลืนและการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สัมประสิทธิ์การนำความร้อน ความหนาแน่น เป็นต้น

3) วิเคราะห์ทางเคมี คือ Orsat gas analyzer, Hempel gas analyzer และการวิเคราะห์ปริมาตรด้วยการไตเตรตแบบต่าง ๆ เท่านั้น อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย จากการเผาไหม้ ในทางเคมีจะต้องเก็บตัวอย่างก๊าซมาวิเคราะห์ การวิเคราะห์ทางฟิสิกส์มีความ ได้เปรียบในเชิงความรวดเร็วและการวัดแบบ real-time

### 2.3.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Valdés et al. (2016) ศึกษาการผลิตแก๊สจากกระบวนการผลิตแก๊สซิฟิเคชัน แบบ ฟลูอิดไธด์เบด เพื่อใช้ในการอุตสาหกรรมเซรามิก โดยใช้เชื้อเพลิงผสมระหว่างถ่านหิน (Sub-bituminous) กับกะลาปาล์ม ที่ความชื้น 90 และ 10% w.b. ตามลำดับ กำลังการผลิตของเตาเผาอยู่ที่ 700 kg/h ซึ่งในส่วนผสม จะใช้อากาศหรือน้ำเป็นตัวทำปฏิกิริยาให้เกิดแก๊สร้อนที่ประมาณ 800 °C โดยใช้อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ 0.5 และ 0.7 อัตราส่วนน้ำต่อเชื้อเพลิงที่ 0.2 จะได้ ผลผลิตที่อยู่ในรูปของ syngas ที่มีค่าความร้อน (HHV) เท่ากับ 5.0 MJ/Nm<sup>3</sup> ซึ่งมีศักยภาพในการ

ทดแทนเชื้อเพลิงดั้งเดิมได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังสามารถดมลพิษในกระบวนการเผาไหม้เมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงดั้งเดิม คือ ถ่านหินอย่างเดียว และลดการสูญเสียความร้อนของระบบได้ถึง 5%

Hemidat et al. (2019) ได้ศึกษาศักยภาพในการนำเชื้อเพลิงขยะ มาเป็นเชื้อเพลิงทางเลือกในการใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ โดยใช้เชื้อเพลิงขยะที่ผ่านกระบวนการลดความชื้น ศึกษาสมบัติขยะ ประเมินผลทางด้านเศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อม พบว่าขยะที่ผ่านการลดความชื้นโดยกระบวนการทางชีวภาพ มวลแห้งของขยะที่ส่งไปยังบ่อฝังกลบจะลดลง 35% ในกรณีที่เป็นการกู้ขยะเก่าหรือขยะตกค้าง มวลแห้งของขยะจะลดลง 69% และการลดความชื้น จะทำให้ค่าความร้อนของขยะ (LHV) เพิ่มขึ้นถึง 58% อยู่ที่ 15.58 MJ/kg ซึ่งจากการลดความชื้นเชื้อเพลิงขยะทำให้เชื้อเพลิงขยะมีค่าความร้อนที่ค่อนข้างสูง และมีปริมาณคลอรีนอยู่ในระดับที่ไม่เกินมาตรฐาน และพบว่าการเติม RDF เป็นเชื้อเพลิงเสริมร่วมกับเชื้อเพลิงหลัก ในเตาเผาปูนซีเมนต์เป็นปริมาณ 15% หรือเทียบเท่า 4.92 tons/h. สามารถลดต้นทุนด้านเชื้อเพลิงลง 486 USD/h โดยเทียบกับต้นทุนถ่านหิน (Pet coke) และสามารถลดปริมาณการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์สู่ชั้นบรรยากาศถึง 2.27 tons/h ประหยัดสุทธิ 389 USD/h

Kara (2012) ได้ศึกษาข้อได้เปรียบด้านสิ่งแวดล้อมและเศรษฐกิจ ของการใช้เชื้อเพลิงขยะ (RDF) ในเตาเผาปูนซีเมนต์ โดยพัฒนาคุณภาพเชื้อเพลิงขยะ ที่ได้จากขยะมูลฝอยที่ไม่ได้นำไปรีไซเคิลซึ่งเชื้อเพลิงขยะ มีศักยภาพในการใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนในการผลิตปูนซีเมนต์และการอนุรักษ์พลังงาน โดยในงานวิจัย จะตรวจวัดปริมาณการลดลงของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและการคำนวณความเป็นไปได้ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เมื่อใช้ RDF ทดแทนเชื้อเพลิงถ่านหิน (Coke) เริ่มแรกจะใช้ RDF ที่เป็นเชื้อเพลิงเก่าในบ่อฝังกลบ (Solid recovery fuel-SRF) ที่ได้จากมูลฝอยชุมชน มาผสมกับเชื้อเพลิงหลักในอัตราส่วน 0%, 8%, 12% และ 15% โดยที่อัตราส่วน 15% หรือ 6,030.77 kg/h จะลดต้นทุนการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในถ่านโค้กได้ 9.50 USD/h และจะลดต้นทุนจริงทั้งหมด 94 USD/h

J. Hongrapipat et al. (2022) ได้ศึกษาการใช้เชื้อเพลิงขยะประเภทที่ 5 ร่วมกับไม้สับในโรงไฟฟ้าชีวมวล อำเภอหนองบัว จังหวัดนครสวรรค์ โดยใช้กระบวนการเผาไหม้รูปแบบ fluidized bed steam gasifier เพื่อประเมินผลของสัดส่วนมวล RDF ต่ออัตราการป้อนวัตถุดิบ สมรรถนะทั้งระบบ และสมบัติแก๊สที่ได้ ผลการศึกษาพบว่าการใช้ RDF-5 ในสัดส่วนที่น้อย 10% - 30% ไม่มีผลต่อการเดินระบบ ในส่วนความเข้มข้นแก๊ส H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, and CH<sub>4</sub> ผลที่ได้คล้ายกับการใช้เชื้อเพลิงไม้สับล้วน มีค่าความร้อนต่ำของแก๊สที่ได้ค่อนข้างสูงตั้งแต่ 13.2-13.6 MJ/Nm<sup>3</sup> ของทุกสัดส่วนการป้อน ซึ่งถือเป็นเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพดีสำหรับโรงไฟฟ้าชีวมวลแห่งนี้ แต่อย่างไรก็ตาม การใช้ RDF ร่วมด้วยยังมีปริมาณคาร์บอนสูงกว่าการใช้ไม้สับล้วน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องกำจัดคาร์บอนออก ก่อนที่แก๊สที่ได้จะเข้าสู่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อไป

กษมา ศิริสมบูรณ์ และคณะ (2017) ได้ศึกษาผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิต (LCA) ของการผลิตไฟฟ้าด้วยเทคโนโลยีการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากเชื้อเพลิงขยะมูลฝอย ซึ่ง

พบว่า เทคโนโลยีในการผลิตไฟฟ้ามีผลกระทบรวมจากทุกกระบวนการทั้งสิ้น  $9.10E+05$  NETS หรือคิดเป็น  $2.23E-03$  NETS/kWh โดยในกระบวนการผลิตก๊าซ ทำความสะอาด และผลิตไฟฟ้า มีผลกระทบสูงสุด  $7.06E+05$  NETS ถัดมาเป็นกระบวนการขนส่งขยะ  $1.10E+05$  NETS และการแปรรูปเชื้อเพลิง  $9.83E+04$  NETS ตามลำดับ โดยส่งผลกระทบต่อมลพิษทางอากาศสูงสุดถึง  $7.94E+05$  NETS เกิดจากก๊าซไนตริกออกไซด์และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เมื่อเปรียบเทียบกับโรงไฟฟ้าต่าง ๆ ในประเทศไทย พบว่ามีค่าผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่ต่ำกว่าโรงไฟฟ้าจากน้ำมันดีเซล กังหันแก๊ส และพลังงานถ่านหินตามลำดับ

Wan et al. (2008) ได้ศึกษาการปลดปล่อยมลพิษระหว่างการเผาไหม้เชื้อเพลิงขยะ RDF-5 ร่วมกับถ่านหินปิทูมินัส ภาคตะกอนกระดาษ และยางรถยนต์ ในเตา gasifier แบบ Fluidized bed หมุนเวียน ขนาด 130 ton/h ที่สัดส่วน RDF-5 0% 10% 20% 25% และ 30% อัตราการไหลของก๊าซไอเสีย  $2,100-2,600$  Nm<sup>3</sup>/min ควบคุมอุณหภูมิภายในเตาและปล่องไอเสียอยู่ที่ 850 °C และ 160 °C ตามลำดับ พบว่าออกซิเจนในก๊าซเสียอยู่ในช่วง 43.-5.1% เมื่อป้อนเชื้อเพลิงที่สัดส่วน RDF-5 เพิ่มขึ้น พบว่ามีการปลดปล่อย SO<sub>x</sub> และ NO<sub>x</sub> ในก๊าซไอเสียลดลง แต่ CO และไดออกซินมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนมลพิษในเถ้าลอยและเถ้าหนักพบว่ามี LOI CL และ dioxin เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน แต่ค่ามลพิษที่เกิดขึ้นยังอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดของประเทศไต้หวัน ซึ่งยังสามารถใช้ RDF-5 ที่สัดส่วนมากกว่า 30% เพิ่มได้อีก

K. Suksankraisorn (2010) ได้ศึกษาผลจากการใช้เชื้อเพลิงจากขยะมูลฝอย (MSW) ที่มีความชื้นสูงร่วมกับถ่านหินลิกไนต์ต่อการเผาไหม้และการปลดปล่อยมลพิษ ในเตาเผาแบบ fluidized bed โดยทดสอบที่ความชื้น MSW 35% และ 60% สัดส่วนการผสม MSW 0% 10% 20% 30% และ 40% ผลการศึกษาพบว่า MSW ที่ความชื้นน้อย 35% ให้อุณหภูมิและประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงกว่า 60% เมื่อเผาไหม้ร่วมกับลิกไนต์ พบว่าก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) ลดลงและไวต่อระดับอากาศส่วนเกินน้อยกว่าความชื้น 60% มาก ส่วนค่า SO<sub>2</sub> พบว่ามีค่าลดลงเมื่อป้อน MSW เพิ่มขึ้น ปริมาณอากาศส่วนเกินไม่ค่อยมีผลมากนักของทั้งสองความชื้น เชื้อเพลิงผสมที่ความชื้นต่ำซึ่งมีธาตุ N สูงกว่า ปลดปล่อยก๊าซ NO และ N<sub>2</sub>O มากกว่า MSW ที่ความชื้นสูง โดยเฉพาะเมื่อมีอากาศส่วนเกินสูง

Soleh et al. (2019) ได้ศึกษา เกี่ยวกับปัญหาในการดำเนินงานของการใช้เชื้อเพลิงขยะ (RDF) ในการเผาพร้อมกับเชื้อเพลิงหลัก ในเตาเผาผลิตไอน้ำ Fluidized bed แบบหมุนเวียน ขนาด 25 MW ซึ่งพารามิเตอร์หลักในการดำเนินงานประกอบด้วย อุณหภูมิและแรงดันภายในเตา ซึ่งแสดงถึงสถานะ fluidization และการเผาไหม้เชื้อเพลิง. นอกจากนี้พารามิเตอร์อื่นที่จำเป็นในการ monitor การเดินระบบ คือ ผลกระทบจากชนิดเชื้อเพลิงต่อก๊าซไอเสียที่ได้ ซึ่ง RDF ที่ใช้ ได้เกิดขึ้นจาก Klungkung-Bali, ซึ่งแปรรูปจากขยะชุมชนในพื้นที่ด้วยวิธีการ bio-drying โดย STT PLN. RDF ที่ผ่านกระบวนการแปรรูปเป็น RDF-5 แล้ว มีค่าความร้อนประมาณ 3,270 kcal/kg ซึ่งมากกว่า 90% เป็นอินทรีย์วัตถุ ผสม RDF-5 ในสัดส่วน 5% 10% และ 15% ในระหว่างการเผาไหม้ร่วม ที่ RDF 5%

พารามิเตอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงหลัก ๆ คือ ความดันภายในเตา ด้วย RDF-5 และถ่านหินมีการผสมกันที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน จึงทำให้การเผาไหม้บางจุดไม่เท่ากัน และเกิดเถ้าหลอมเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ RDF-5 เพิ่มขึ้น ในส่วนของมลพิษอากาศในก๊าซไอเสียของ RDF 5% พบว่า SO<sub>x</sub> และ NO<sub>x</sub> มีปริมาณลดลง เมื่อเทียบกับการใช้ถ่านหินล้วน ซึ่ง NO<sub>x</sub> ลดลง บ่งบอกได้ว่ากระบวนการเผาไหม้ลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก





## บทที่ 3

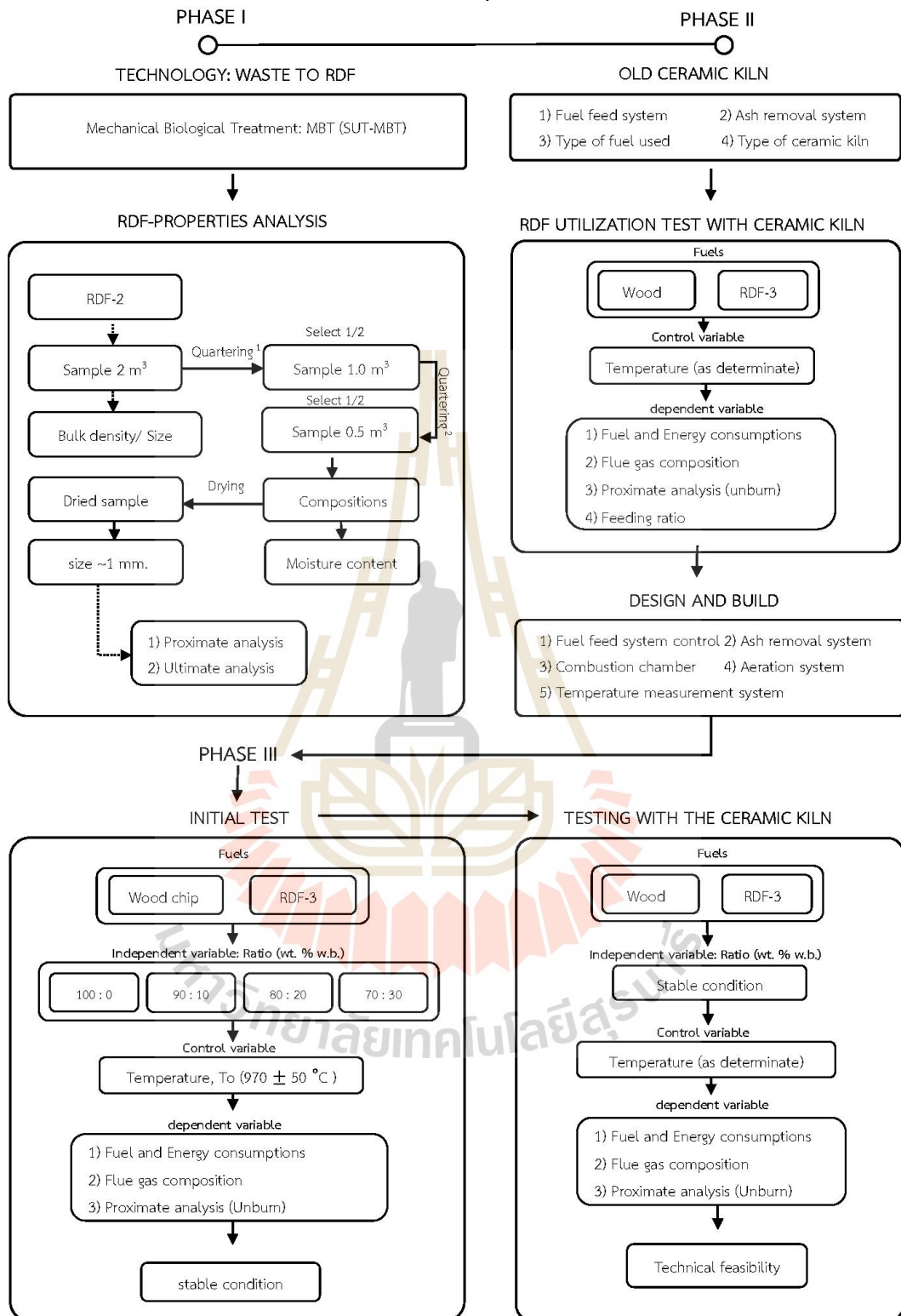
### เครื่องมือและวิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 บทนำ

ในส่วนของภาพรวมบทนี้ กล่าวถึงวิธีการในการดำเนินงานวิจัยและเครื่องมือที่ใช้ในการตั้งแต่งกระบวนการศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับเทคโนโลยีการผลิตเชื้อเพลิงขยะ การทดสอบสมบัติของเชื้อเพลิง การนำเชื้อเพลิงขยะมาใช้กับอุตสาหกรรมเซรามิก การออกแบบและสร้างเตาเผาไหม้ จากนั้นทดสอบห้องเผาไหม้ที่สร้างขึ้น

#### 3.2 วิธีการดำเนินการวิจัย

วิธีการดำเนินการวิจัยแสดงดังรูปที่ 3-1 ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ได้แก่ 1) การศึกษาเทคโนโลยีการแปรรูปขยะเป็นเชื้อเพลิงพลังงาน จากนั้นศึกษาสมบัติของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดสอบ ประกอบด้วย สมบัติทางกายภาพ องค์ประกอบแบบประมาถ และองค์ประกอบธาตุ 2) ส่วนที่ 2 เป็นการศึกษาเทคโนโลยีการเผาเซรามิกที่อุตสาหกรรมฯ ใช้ในปัจจุบัน เกี่ยวกับการป้อนเชื้อเพลิง การถ่ายเถ้า การใช้เชื้อเพลิง และประเภทของเตาเผา จากนั้นทดสอบการเผาไหม้กับเตาเซรามิกโดยตรง โดยใช้เชื้อเพลิงหลัก (ไม้ฟืน) และเชื้อเพลิงขยะประเภทที่ 3 (RDF-3) ร่วมกับไม้ฟืน ตามค่าอุณหภูมิและเวลาที่เตาเผากำหนด เพื่อนำข้อมูลไปใช้ในการออกแบบและสร้างเตาเผาไหม้สำหรับเผาเซรามิกที่สามารถใช้ RDF-3 ร่วมในการเผาไหม้ 3) ส่วนที่ 3 เป็นการศึกษาทดสอบเตาเผาไหม้ที่ได้จากการออกแบบและสร้างขึ้น โดยมีการทดสอบ 2 ช่วงด้วยกัน คือ ช่วงแรกเป็นการทดสอบเพื่อหาสถานะที่มีความเสถียรภาพในการควบคุมอุณหภูมิ โดยใช้เชื้อเพลิงไม้สับและ RDF-3 ทดสอบ 4 สัดส่วน ได้แก่ ไม้สับล้วนและไม้สับ : RDF-3 ที่ 90 : 10 wt. % w.b., 80 : 20 wt. % w.b., 70 : 30 wt. % w.b. ควบคุมอุณหภูมิให้หนึ่งประมาณ  $970 \pm 50^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 5 h แล้วเลือกพิจารณาช่วงที่อุณหภูมิหนึ่ง 3 h โดยตัวแปรตามที่ได้คือ ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงและพลังงาน อัตราการเกิดเถ้า และองค์ประกอบก๊าซเผาไหม้ จากนั้นเลือกสัดส่วนที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้เสถียรภาพที่สุดไปทดสอบกับเตาเผาเซรามิก โดย การทดสอบจะใช้มาตรฐานการควบคุมอุณหภูมิของทางอุตสาหกรรมเป็นตัวแปรควบคุม ประเมินสมรรถนะของเตาในการเผาไหม้โดยมีอุณหภูมิเป้าหมายที่  $970^{\circ}\text{C}$  ตัวแปรตามที่ได้ประกอบด้วย ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงและพลังงาน อัตราการเกิดเถ้า และองค์ประกอบก๊าซเผาไหม้



รูปที่ 3- 1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

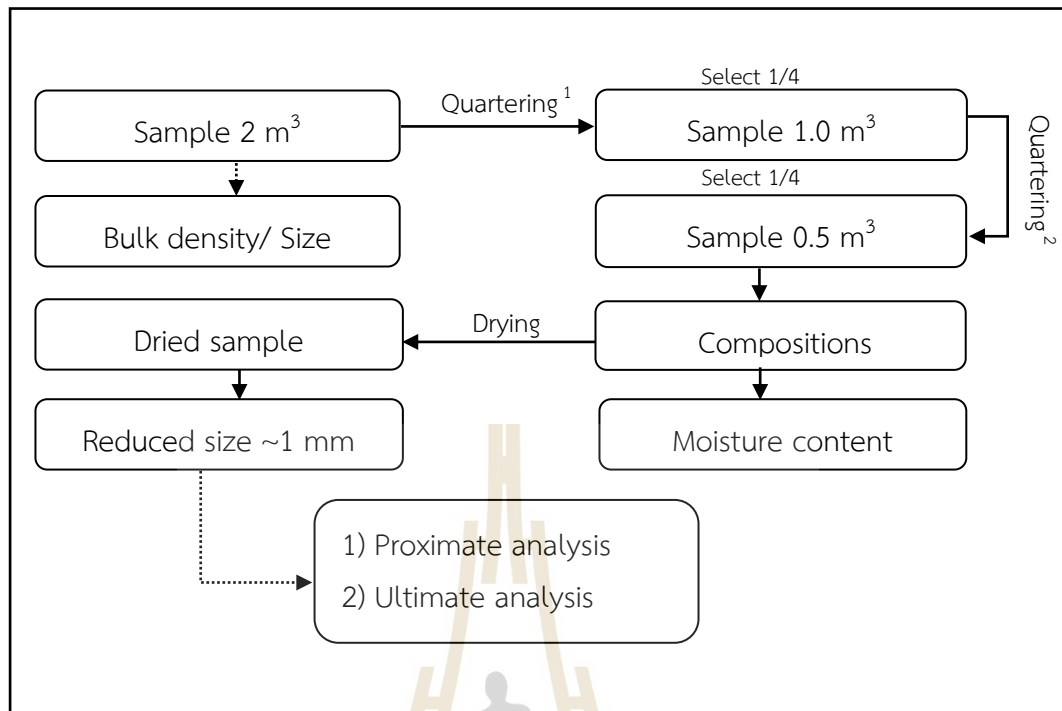
### 3.2.1 เชื้อเพลิงและเทคโนโลยีการแปรรูปเชื้อเพลิง

เชื้อเพลิงที่ใช้ในการศึกษาสมบัติและทดสอบสมรรถนะของระบบ ได้แก่ ไม้พิน ไม้สับ และเชื้อเพลิงขยะประเภทที่ 2-4 (RDF-2-4) โดย RDF-2 และ RDF-4 จะใช้ในการศึกษาสมบัติของเชื้อเพลิง RDF-3 จะใช้ในการทดสอบระบบ โดยในการศึกษาสมบัติจำเป็นต้องมีการลดขนาดเชื้อเพลิงและผสมให้เข้ากันก่อนวิเคราะห์ ส่วนในการทดสอบจะเลือกใช้เชื้อเพลิงตามลักษณะการทดสอบ ซึ่งมีอยู่ 3 การทดสอบ ได้แก่ ทดสอบนำเชื้อเพลิงขยะไปใช้กับเตาเผาเซรามิกโดยตรง ทดสอบเพื่อหาเสถียรภาพของเตาเผาที่สร้างขึ้น และทดสอบสมรรถนะของเตาเผาที่สร้างขึ้นร่วมกับเตาเผาเซรามิก โดยเชื้อเพลิงและขั้นตอนการเตรียมแสดงรายละเอียดดังนี้

#### 3.2.1.1 การเตรียมตัวอย่างตรวจวิเคราะห์

1) การสุมเก็บตัวอย่าง ดังรูปที่ 3-2 และ 3-3 ในส่วนการวิเคราะห์ตัวอย่างที่เป็นมูลฝอยหรือเชื้อเพลิงขยะมีความจำเป็นต้องสุมเก็บตัวอย่างให้ละเอียดถี่ถ้วน เนื่องจากมีองค์ประกอบหลากหลาย ดังนั้นการสุมตัวอย่างจะใช้วิธีการแบ่งตัวอย่างออกเป็นสี่ส่วน (Quartering) เพื่อเก็บตัวอย่าง 1 ส่วน จำนวน 2 รอบ โดยใช้ตัวอย่างที่ผ่านการคลุกเคล้าเป็นอย่างดีจำนวน  $2 \text{ m}^3$  แล้วนำมาทำ Quartering รอบที่ 1 โดยแบ่งออกเป็น 4 ส่วน แล้วเลือกมา 2 ส่วน ประมาณ  $1 \text{ m}^3$  จากนั้นผสมให้เข้ากันแล้วทำ Quartering อีกครั้งแล้วเลือก 2 ส่วนเช่นเดิม ซึ่งจะเป็นตัวแทนของการเก็บตัวอย่างประมาณ  $0.5 \text{ m}^3$  หรือประมาณ 500 L ในส่วนไม้พินซึ่งมีลักษณะเป็นท่อนสั้นและยาวจะสุมตามสัดส่วนของไม้ที่ใช้ตามตำแหน่งต่าง ๆ ของเตาเผาเซรามิก ซึ่งประกอบด้วยไม้ที่ใช้ป้อนหน้าเตาและข้างเตา ให้ได้ตัวอย่างประมาณ 100 kg ไม้สับถือว่ามีผสมเข้ากันดีแล้วจะสุมมา 100 L

2) การเตรียมเชื้อเพลิงให้เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ ในการวิเคราะห์องค์ประกอบบางชนิดของเชื้อเพลิง จำเป็นต้องมีการเตรียมเชื้อเพลิงให้เหมาะสม เนื่องจากการวิเคราะห์บางค่า ใช้ตัวอย่างไม่เกิน 4 mg การสุมตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่อาจจะได้ตัวแทนที่แท้จริงเกิดความผิดพลาดได้ ในส่วนของเชื้อเพลิงขยะจะนำ RDF-3 แปรรูปเป็น RDF-4 โดยใช้ Agglomerator หรือเครื่องปั้นเม็ดพลาสติก เชื้อเพลิงที่ได้จากเครื่องจะมีลักษณะเป็นผง-ก้อนละเอียดปนหยาบ มีการปั่นผสมคลุกเคล้ากันได้ดี ส่วนตัวอย่างไม้พินที่มีลักษณะเป็นท่อน จะใช้เลื่อยลันดาเลื่อยให้ขาดตามแนวขวาง โดยจะใช้ซี่เลื่อยที่มีลักษณะเป็นผงในการตรวจวิเคราะห์ ส่วนไม้สับที่มีขนาดชิ้นเล็ก แต่ยังมีใหญ่สำหรับตรวจวิเคราะห์ จะนำไม้สับเข้าเครื่องบด (Hammer mill) ขนาดตะแกรง 5 mm ซึ่งขนาดของไม้สับที่บดแล้วจะมีขนาดที่เล็กกว่า 5 mm



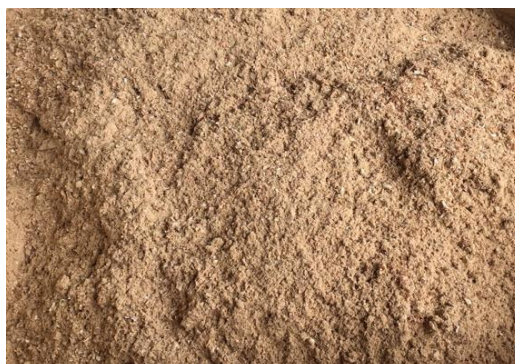
รูปที่ 3- 2 ขั้นตอนการดำเนินงานสุ่มเก็บตัวอย่างขยะและการเคราะห์



ก. เครื่องปั่นเม็ดพลาสติกจาก RDF-3



ข. RDF-4



ค. ไม้สับบดละเอียด



ง. ไม้เลื่อยไม้พิน

รูปที่ 3- 3 การเตรียมตัวอย่างวิเคราะห์



### 3.2.1.2 เชื้อเพลิงและการแปรรูปเชื้อเพลิงสำหรับการทดสอบระบบ

การทดสอบแบ่งเป็น 3 ช่วง 1) ทดสอบนำเชื้อเพลิงขยะไปใช้กับเตาเผาเซรามิกโดยตรง จะไม่เชื้อเพลิงไม้ฟืนและ RDF-3 2) ทดสอบเพื่อหาเสถียรภาพของเตาเผาที่สร้างขึ้น จะใช้ไม้สับและ RDF-3 และ 3) ทดสอบสมรรถนะของเตาเผาที่สร้างขึ้นร่วมกับเตาเผาเซรามิก จะใช้ไม้ฟืนและ RDF-3 ดังแสดงในรูปที่ 3-4, 3-5 และ 3-6 โดยมีขั้นตอนการเตรียมเชื้อเพลิงดังนี้

1) RDF-3 ได้จากโรงคัดแยกขยะแบบครบวงจร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (Suranaree University of Technology: SUT) ซึ่งเป็นขยะที่มาจากเทศบาลตำบลสุรนารี และภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ใช้วิธีการบำบัดขยะทางกลและชีวภาพ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (Suranaree University of Technology, Mechanical and Biological treatment: SUT-MBT) ดังภาพที่ 3-4 โดย เพื่อให้ได้เป็น RDF-3 ที่มีองค์ประกอบของพลาสติกและวัสดุเผาไหม้ได้มากขึ้น แต่ RDF-3 ที่ได้จาก RDF-2 ยังมีความชื้นสูงประมาณ 20-30% w.b. ด้วยความชื้นที่สูงจะทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ต่ำลง ดังนั้นจำเป็นต้องลดความชื้นลงให้ต่ำกว่า 15% w.b. โดยการตากแดด แต่สำหรับการนำ RDF-3 ไปทดสอบกับเตาเผาเซรามิกโดยตรง จำเป็นต้องทำให้มีลักษณะเป็นท่อน-ก้อน เพื่อให้สะดวกต่อการป้อน ดังรูปที่ 3-4

2) ไม้ฟืน ใช้สำหรับเป็นเชื้อเพลิงหลักในการทดสอบกับเตาเผาเซรามิกและใช้สำหรับอุ่นเตาในการทดสอบหาเสถียรภาพของเตาเผาไหม้ที่สร้างขึ้น ลักษณะเป็นไม้รวม ส่วนมากไม้ที่ใช้เป็นไม้กระถินยักษ์ ไม้จามจรี ไม้สน และไม้อยางนา ซึ่งเป็นไม้ที่หาได้ทั่วไปในพื้นที่ ไม้ที่เลือกใช้จะเป็นไม้ที่แห้งแล้ว ความชื้นไม่เกิน 15 wt. % w.b. โดยมีขนาดตั้งแต่  $\varnothing$  30-200 mm ความยาว 300-2,000 mm ประเภทและขนาดไม้ ขึ้นอยู่กับการเผาในแต่ละจุด ซึ่งมีอยู่ 5 ประเภท ดังรูปที่ 3-5 และ 3-6

3) ไม้สับ ใช้สำหรับเป็นเชื้อเพลิงหลักในการทดสอบความเสถียรภาพของเตาเผาไหม้ที่สร้างขึ้น เนื่องจากการทดสอบเสถียรภาพต้องใช้ไม้ที่มีขนาดเท่า ๆ กัน เพื่อลดข้อผิดพลาดที่เกิดจากขนาดและชนิดไม้ที่ต่างกัน ซึ่งได้จากบริษัท โคราซไปโอแมสโปรดักส์ จำกัด จังหวัดนครราชสีมา มีขนาดอยู่ที่ 10-40 mm ความชื้นขณะรับมาประมาณ 60 wt. % w.b. ซึ่งมีความชื้นที่สูงมาก จำเป็นต้องลดความชื้นลงให้ต่ำกว่า 15 wt. % w.b. ก่อนนำมาทดสอบ โดยใช้วิธีการตากแดด ดังรูปที่ 3-6





รูปที่ 3- 4 ระบบบำบัดขยะทางกลและชีวภาพ SUT-MBT (ที่มา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี)



ก. ไม้ท่อนใหญ่ป้อนหน้าเตา (ใช้อุ่นเตา)



ข. ไม้ท่อนสั้นป้อนหน้าเตา (ใช้เร่งอุณหภูมิ)



ค. เศษไม้ป้อนหน้าเตา (ใช้เร่งอุณหภูมิ)



ง. ไม้ยาวป้อนหน้าเตา (ใช้เร่งอุณหภูมิ)



จ. ไม้ยาวป้อนด้านข้าง (ใช้เร่งอุณหภูมิด้านข้าง)

รูปที่ 3- 5 ประเภทไม้ฟืนและตำแหน่งในการป้อนของเตาเผาเซรามิก





ก. RDF-3 สำหรับทดสอบกับเตาเซรามิก



ข. RDF-3 สำหรับทดสอบเตาเผาไหม้ที่สร้างขึ้น



ฉ. การเตรียมไม้สับสำหรับทดสอบความเสถียรภาพเตาเผาไหม้ที่สร้างขึ้น



ช. การเตรียมไม้ฟืนสำหรับอุ่นเตาเผาไหม้ที่สร้างขึ้นและใช้ทดสอบร่วมกับเตาเผาเซรามิก



รูปที่ 3- 6 เชื้อเพลิงและการเตรียมเชื้อเพลิงสำหรับทดสอบระบบ

### 3.2.2 ศึกษาสมบัติของเชื้อเพลิง

เชื้อเพลิงดั้งเดิมของเตาเผาเครื่องปั้นดินเผาหรือเซรามิก ใช้ไม้ฟืนเป็นหลัก ได้แก่ ไม้กระถินยักษ์ ไม้ยางนา ไม้จามจรี และไม้ยูคาลิปตัส ส่วนเชื้อเพลิงขยะที่ใช้ในงานวิจัย ได้จากการบำบัดโดยใช้ระบบบำบัดขยะ SUT – MBT มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จากนั้นสุมเก็บตัวอย่างเชื้อเพลิงขยะ เพื่อวิเคราะห์หาสมบัติต่าง ๆ ประกอบด้วยซึ่งจะวิเคราะห์หาสมบัติต่าง ๆ ประกอบด้วย

### 3.2.2.1 สมบัติทางกายภาพ (physical analysis)

1) องค์ประกอบ (Composition) การหาองค์ประกอบของขยะมูลฝอย โดยการคัดเลือกขยะมูลฝอยแต่ละประเภทซึ่งได้แก่ พลาสติกอ่อน พลาสติกแข็ง กระดาษ เศษผ้า เศษไม้/อินทรีย์ แก้ว/โลหะ ยาง/โฟม และอื่นๆ แล้วชั่งน้ำหนักและบันทึกข้อมูล รายงานในรูปแบบของร้อยละโดยน้ำหนัก

2) ขนาด (Size) ขนาดของเชื้อเพลิง เป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาว ที่วัดขนาดโดยตรง โดยใช้ไม้บรรทัดหรือเครื่องมือวัดที่มีสเกลมาตรฐาน

3) ค่าความร้อน (Heating value) เป็นค่าพลังงานความร้อนของเชื้อเพลิง เทียบต่อ 1 หน่วยน้ำหนักหรือปริมาตรของเชื้อเพลิง มีหน่วยเป็น kJ/kg, kcal/kg, Btu/lb. หรือ kcal/L โดยค่าความร้อน เป็นค่าที่บ่งบอกถึงคุณภาพของเชื้อเพลิง ที่ขึ้นอยู่กับชนิด ความชื้น และถ้าแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ค่าความร้อนสูง (High Heating Value : HHV) หรือเป็นค่าความร้อนของวัสดุที่ไม่มี ความชื้นหรือผ่านการอบแห้ง และค่าความร้อนต่ำ (Low Heating Value : LHV) หรือค่าความร้อนของวัสดุที่ยังมีความชื้น โดยจะไม่รวมพลังงานที่ได้จากการควบแน่นของไอน้ำที่รวมอยู่ในค่าความร้อนสูง ดังนั้นค่าความร้อนต่ำจะมีค่าน้อยกว่าค่าความร้อนสูงเสมอ วิธีการวิเคราะห์อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM E711-87 โดยใช้เครื่อง bomb calorimeter (IKA C2000, I.K.A., Germany) ด้วยเทคนิค Isoperibol ทั้งนี้ การรายงานค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิง จะรายงานในรูปมาตรฐานแห้ง (Dry basis: d.b.) การคำนวณค่าความร้อนต่ำแสดงดังสมการที่ 3.1 การเตรียมเชื้อเพลิงและเครื่องมือการหาค่าความร้อนแสดงในรูปที่ 3-7

$$LHV = HHV - 211.19H \quad (3.1)$$

โดย  $LHV$  คือ ค่าความร้อนต่ำ (kJ/kg, d.b.)

$HHV$  คือ ค่าความร้อนสูง (kJ/kg, d.b.)

$H$  คือ ไฮโดรเจน (wt. %, d.b.)

4) ความหนาแน่นรวม (Bulk density) คือ ปริมาณมวลของเชื้อเพลิงต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร โดยรวมปริมาตรช่องว่างที่เกิดจากรูปร่างและขนาดของเชื้อเพลิงที่แตกต่างกันด้วยตามมาตรฐาน ASTM E873-82 ได้กำหนดวิธีการหาความหนาแน่นรวม ดังนี้ กล่องสำหรับบรรจุเชื้อเพลิงที่ต้องการหาความหนาแน่น มีความคงทนต่อการเปลี่ยนรูป ขนาด คือ 12 x 12 x 12 in การใส่ตัวอย่างที่ระยะความสูง 2 in. จากขอบกล่อง จากนั้นปล่อยกล่องตกเพื่ออัดแน่นตัวอย่างที่ความสูง 6 in จำนวน 5 ครั้ง การคำนวณความหนาแน่นรวมสามารถหาได้ดังสมการ 3.2

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3.2)$$

โดย  $\rho$  คือ ความหนาแน่นรวม ( $\text{kg/m}^3$ )  
 $m$  คือ มวลของตัวอย่าง ( $\text{kg}$ )  
 $V$  คือ ปริมาตรกล่อง ( $\text{m}^3$ )



ก. การเตรียมตัวอย่างเพื่อหาค่าความร้อน

ข. bomb calorimeter

รูปที่ 3- 7 การเตรียมเชื้อเพลิงและเครื่องมือในการหาค่าความร้อนเชื้อเพลิง

### 3.2.2.2 สมบัติแบบประมาณ (proximate analysis)

1) ความชื้น (Moisture: M) การหาปริมาณความชื้น หาได้จากการอบตัวอย่างในเตาอบลมร้อนเป็นเวลา 24 h หรือจนกว่าน้ำหนักของตัวอย่างคงที่ ที่อุณหภูมิ  $105\text{ }^{\circ}\text{C}$  โดยมวลที่หายไปหลังจากการอบเป็นมวลของน้ำที่อยู่ในตัวอย่าง นิยมรายงานเป็นฐานน้ำหนักเปียก (wet basis, w.b.) หรือ ฐานได้รับมา (as-received basis, a.r.) การคำนวณแสดงดังสมการที่ 3.2 เครื่องมือในการหาค่าความชื้นแสดงในรูปที่ 3-8 ก. ส่วนเครื่องมือในการหา A และ VM แสดงในรูปที่ 3-8 ข.

$$\%M = \frac{(w_i - w_f)}{(w_i - w_c)} \times 100 \quad (3.2)$$

โดย  $\%M$  คือ ความชื้น (wt. % w.b.)  
 $w_c$  คือ น้ำหนักภาชนะ (g)  
 $w_i$  คือ น้ำหนักตัวอย่างและภาชนะก่อนอบแห้ง (g)  
 $w_f$  คือ น้ำหนักตัวอย่างและภาชนะหลังอบแห้ง (g)



2) ปริมาณสารระเหย (volatile mater: VM) ปริมาณสารระเหย หรือ ปริมาณน้ำหนักรวมที่สามารถระเหยไปในรูปของก๊าซจากการสลายตัวด้วยความร้อน ของวัสดุที่ผ่านการอบแห้งแล้ว ที่อุณหภูมิ 950°C เป็นเวลา 7 min หรือจนกว่าน้ำหนักจะคงที่ หลีกเลี่ยงการสัมผัสกับอากาศของตัวอย่างโดยบรรจุใน crucible ที่มีฝาปิด การคำนวณร้อยละโดยน้ำหนักของสารระเหยแสดงดังสมการที่ 3.3 ปริมาณสารระเหยสามารถวิเคราะห์ได้โดยอ้างอิงจากมาตรฐาน ASTM E872-82 โดยชีวมวลต้องไม่สัมผัสกับอากาศ ซึ่งในการดำเนินการวิเคราะห์ตามมาตรฐานนี้ สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3.3

$$\%VM = \left[ \frac{(w_i - w_f)}{(w_i - w_c)} \times 100 \right] - \%M \quad (3.3)$$

โดย %VM คือ ปริมาณสารระเหย (wt. % d.b.)  
 $w_c$  คือ น้ำหนักภาชนะ (g)  
 $w_i$  คือ น้ำหนักตัวอย่างและภาชนะก่อนเผา (g)  
 $w_f$  คือ น้ำหนักตัวอย่างและภาชนะหลังเผา (g)  
 %M คือ ความชื้น (wt. % w.b.)

3) ปริมาณเถ้า (Ash: A) เป็นสารอนินทรีย์ที่เหลือจากการเผาไหม้ เป็นตัวบ่งชี้ได้ถึงคุณภาพของเชื้อเพลิง ถ้าในกระบวนการเผาไหม้เกิดเถ้ามาก ประสิทธิภาพการผลิตพลังงานอาจจะลดลง นอกจากนี้เชื้อเพลิงที่มีเถ้าน้อย จะมีความหนาแน่นทางพลังงานน้อยกว่าเชื้อเพลิงที่มีเถ้ามาก การหาปริมาณเถ้า สามารถทำได้โดยให้ความร้อนอย่างช้า ๆ แก่ตัวอย่างที่ผ่านการอบแห้งแล้ว ตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิประมาณ 575-600 °C และทำซ้ำจนกว่าน้ำหนักของเถ้าที่ได้จะคงที่ อ้างอิงมาตรฐาน ASTM E1755-01 หรือ ASTM D1102-84 การคำนวณปริมาณเถ้าแสดงดังสมการที่ 3.4

$$\%A = \left( \frac{w_1}{w_2} \right) \times 100 \quad (3.4)$$

โดย %A คือ ปริมาณเถ้า (wt. % d.b.)  
 $w_1$  คือ น้ำหนักเถ้า (g)  
 $w_2$  คือ น้ำหนักตัวอย่างอบแห้ง (g)

4) ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon: FC) ตามมาตรฐานของ ASTM D1762-84 และ ASTM D2015-77 ปริมาณคาร์บอนคงตัวเป็นปริมาณของโครงสร้างส่วนที่เสถียรของเชื้อเพลิงซึ่งส่วนใหญ่เป็นโครงสร้างของคาร์บอน หรือเป็นส่วนหนึ่งของของแข็งที่หลงเหลือจากสารระเหยและเถ้าออก ปริมาณคาร์บอนคงตัวในรูปของร้อยละโดยน้ำหนัก สามารถคำนวณได้จากผลต่าง

ของร้อยละน้ำหนักตัวอย่างทั้งหมด กับร้อยละปริมาณความชื้น (%M) ร้อยละปริมาณสารระเหย (%VM) และร้อยละปริมาณเถ้า (%A) ดังสมการที่ 3.5 ซึ่งการคำนวณจะใช้ฐานเดียวกัน

$$\%FC = 100 - (\%M + \%VM + \%A) \quad (3.5)$$

โดย %FC คือ ปริมาณคาร์บอนคงตัว (wt. % d.b.)

%M คือ ความชื้น (wt. % w.b.)

%VM คือ ปริมาณสารระเหย (wt. % d.b.)

%A คือ ปริมาณเถ้า (wt. % d.b.)



ก. ตู้อบลมร้อน (FD 240, Binder)

ข. เตาเผาไฟฟ้า (CWF 12-13, Carbolite)

### รูปที่ 3- 8 เครื่องมือวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate Analysis)

#### 3.2.2.3 วิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (ultimate analysis)

เชื้อเพลิงแข็งโดยทั่วไปจะมีองค์ประกอบของธาตุ โดยเฉพาะเชื้อเพลิงแข็งที่เป็นสารอินทรีย์จะมีองค์ประกอบธาตุที่สำคัญ ได้แก่ คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ไนโตรเจน (N) ซัลเฟอร์ (S) และออกซิเจน (O) ในส่วนของเชื้อเพลิงขยะที่มีความหลากหลายค่อนข้างสูง จะมีธาตุอื่น ๆ รวมอยู่ด้วย เช่น คลอรีน ฟอสฟอรัส ซิลิคอน และธาตุหมู่โลหะต่าง ๆ โดยใช้เครื่อง CHNS element analyzer ในการวิเคราะห์ โดยหลักการการวิเคราะห์ของเครื่องมือนี้คือ การใช้การเผาไหม้ที่สมบูรณ์ของตัวอย่างที่อุณหภูมิมากกว่า 900°C ภายใต้บรรยากาศของออกซิเจน เพื่อเปลี่ยนให้องค์ประกอบธาตุในตัวอย่างเป็นก๊าซเผาไหม้ ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) น้ำ (H<sub>2</sub>O) ไนโตรเจนออกไซด์ (NO<sub>x</sub>) และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO<sub>2</sub>) จากนั้นจึงสามารถคำนวณกลับมาเป็นปริมาณธาตุ C H N S ได้ตามลำดับ ส่วนธาตุ O จะได้จากการคำนวณ ซึ่งรวมปริมาณธาตุอื่น ๆ อยู่ด้วย เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ แสดงในรูปที่ 3-9



ค. เครื่องมือวิเคราะห์ธาตุ (CHNS)

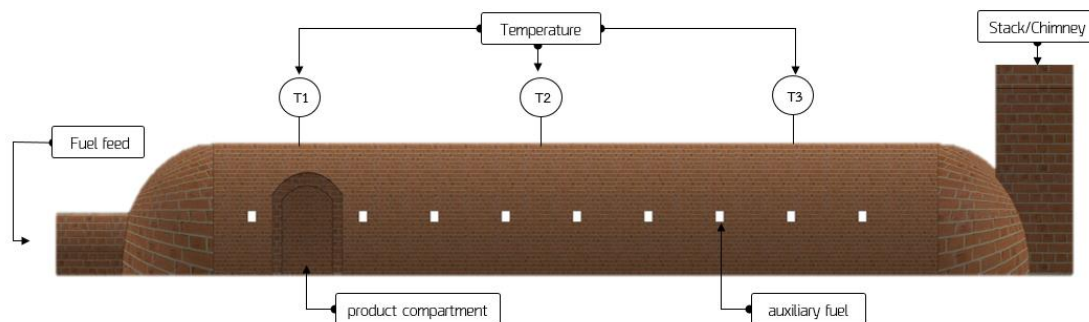
ง. เครื่องมือวิเคราะห์ธาตุ (ED-XRF)

### รูปที่ 3- 9 เครื่องมือวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ (Ultimate Analysis)

#### 3.2.3 ศึกษาความเป็นไปได้เชิงเทคนิค

เป็นการศึกษาความเป็นไปได้เชิงเทคนิค เมื่อนำเชื้อเพลิงขยะไปใช้ร่วมกับเตาเผาเครื่องปั้นดินเผา ออกแบบและสร้างระบบเผาไหม้แยก และทดสอบสมรรถนะของระบบเผาไหม้ที่สร้างขึ้น โดยใช้เผาไหม้ร่วมกับเตาเดิม ซึ่งเป็นเตาเผาเซรามิกชนิดทางเดินลมร้อนลง ของห้างหุ้นส่วนจำกัด โคราชแสงสุวรรณ พ็อดเทอร์รี่ ตำบลด่านเกวียน อำเภอโชคชัย จังหวัดนครราชสีมา

หลักการทำงานของเตาเผาเซรามิก จะใช้อุณหภูมิหน้าเตา ( $T_1$ ) อ้างอิงเพื่อควบคุมการป้อนของทุกช่วง ยกเว้นช่วงไล่ไฟด้านข้างเตา ซึ่งจะป้อนเชื้อเพลิงหลังจากอุณหภูมิ  $T_1$  ขึ้นถึงประมาณ  $970^{\circ}\text{C}$  จะใช้อุณหภูมิกลางเตา ( $T_2$ ) และ ( $T_3$ ) ในการควบคุมการป้อนเชื้อเพลิง โดยในเริ่มแรกจะใช้ไม้ฟืนค่อนข้างใหญ่ในการอุ่นเตา ใช้เวลา 3-4 วัน อุณหภูมิไม่เกิน  $700^{\circ}\text{C}$  จากนั้นจะเร่งอุณหภูมิขึ้นสูงสุดประมาณ  $950^{\circ}\text{C}$ - $970^{\circ}\text{C}$  ใช้เวลาประมาณ 10 h จึงหยุดป้อนหน้าเตา แล้วเร่งอุณหภูมิ  $T_2$  และ  $T_3$  โดยการป้อนไม้ยาวด้านข้างเตา ซึ่งกำหนดอุณหภูมิไว้ประมาณ  $880^{\circ}\text{C}$  และ  $810^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ จากนั้นจะปิดเตา (Cool down) ประมาณ 4 วัน หรือจนกว่าอุณหภูมิจะเย็นตัวลงต่ำกว่า  $70^{\circ}\text{C}$  จึงนำผลิตภัณฑ์ออกมาได้ รวมระยะเวลาในการเผาแต่ละรอบประมาณ 9-11 วัน โดยช่วงเวลาที่เหมาะสมสำหรับป้อนเชื้อเพลิงขยะ จะอยู่ในช่วงเร่งอุณหภูมิ ประมาณ 10 h โดยเป็นการป้อนด้านหน้าเตา เพราะเปลวไฟที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงขยะจะถูกกำบังไฟบังไว้ได้ ไม่สัมผัสกับผลิตภัณฑ์โดยตรง ในส่วนด้านข้างเตาจะไม่สามารถป้อนได้ เนื่องจากช่องป้อนมีขนาดเล็กและการป้อนด้านข้างเปลวไฟจะสัมผัสกับผลิตภัณฑ์โดยตรง อาจจะทำให้เกิดสารพิษตกค้างหรือลักษณะสีผิวเปลี่ยนแปลงไป โดยตำแหน่งการวัดอุณหภูมิและองค์ประกอบของเตาเผาเซรามิก แสดงดังรูปที่ 3-9



รูปที่ 3- 10 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิและองค์ประกอบของเตาเผาเซรามิก

### 3.2.3.1 ศึกษาและทดสอบการนำเชื้อเพลิงขยะไปใช้กับเตาเผาเซรามิกในปัจจุบัน

เป็นการศึกษาเทคโนโลยีเตาเผาเซรามิกที่ทางอุตสาหกรรมใช้ในปัจจุบันและทดสอบนำ RDF-3 ไปเผาพร้อมกับเตาเซรามิกโดยตรง เพื่อนำมาเป็นข้อมูลในการออกแบบและสร้างระบบเผาไหม้ให้มีความเหมาะสมและสมรรถนะที่ดีในการนำเชื้อเพลิงขยะมาใช้ร่วมกับเชื้อเพลิงหลัก

(1) ศึกษาองค์ประกอบหลักของเตาเผาเซรามิก ได้แก่ ห้องเผาไหม้ ระบบป้อนเชื้อเพลิงขยะ ระบบควบคุมอากาศ ระบบถ่ายเถ้า

(2) ทดสอบนำเชื้อเพลิงขยะไปใช้กับเตาเผาเซรามิกโดยตรง เป็นการทดสอบเพื่อเก็บข้อมูลไปใช้ในการออกแบบเตาเผาไหม้ เชื้อเพลิงที่ใช้ประกอบด้วยไม้ล้วนและนำ RDF-3 ไปเผาพร้อม โดยจะควบคุมอุณหภูมิและเวลาตามที่เตาเผากำหนดและขั้นตอนการดำเนินงาน ดังรูปที่ 3-11 เริ่มจากการอุ่นเตา 3-4 วัน อุณหภูมิไม่เกิน  $700^{\circ}\text{C}$  จากนั้นจะเร่งอุณหภูมิขึ้นสูงสุดประมาณ  $950 - 970^{\circ}\text{C}$  ใช้เวลาประมาณ 10 h โดยในช่วงนี้จะเป็นช่วงที่ป้อนเชื้อเพลิงขยะและพิจารณาในการเก็บข้อมูลที่เป็นตัวแปรตาม ได้แก่ ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงและพลังงาน องค์ประกอบก๊าซไอเสีย และสัดส่วนที่ใช้ในการป้อน เมื่อได้เวลาและอุณหภูมิที่กำหนดแล้วจะหยุดป้อนหน้าเตา โดยจะหยุดป้อนเชื้อเพลิงขยะพร้อมด้วย แล้วเร่งอุณหภูมิ  $T_2$  และ  $T_3$  โดยการป้อนไม้ยาวด้านข้างเตา ให้ได้อุณหภูมิประมาณ  $880^{\circ}\text{C}$  และ  $810^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ จากนั้นปิดเตาประมาณ 4 วัน หรือจนกว่าอุณหภูมิจะเย็นตัวลงต่ำกว่า  $70^{\circ}\text{C}$  จึงนำผลิตภัณฑ์ออกมาได้ รวมระยะเวลาในการเผาแต่ละรอบประมาณ 9-11 วัน จากนั้นเก็บข้อมูลปริมาณและองค์ประกอบแบบประมาณของเถ้า

1) การตรวจวัดอุณหภูมิ อุณหภูมิที่วัดประกอบด้วย 3 ตำแหน่ง ได้แก่ หน้าเตา ( $T_1$ ) กลางเตา ( $T_2$ ) และท้ายเตา ( $T_3$ ) โดยใช้ Thermocouple Type k แสดงผลผ่านตู้ควบคุมเก็บข้อมูลทุก 15 min

2) การใช้เชื้อเพลิงและพลังงาน การป้อนเชื้อเพลิงจะป้อนร่วมกันที่ด้านหน้าเตาที่เดียว การป้อนขึ้นอยู่กับการควบคุมอุณหภูมิและเวลาที่กำหนด ชั่งน้ำหนักไม้ฟืนและ RDF-3 บันทึกผลการป้อนทุก 30 min

3) สมบัติของเถ้า ประกอบด้วยองค์ประกอบแบบประมาณ แบบธาตุและอัตราการเกิดเถ้า โดยองค์ประกอบแบบประมาณประกอบด้วย ร้อยละของเถ้า ความชื้น สาร

ระเหย และคาร์บอนคงตัว สามารถหาได้ตามวิธีการในหัวข้อ 3.2.2.2 จากนั้นหาอัตราการเกิดเถ้า โดยเทียบกับปริมาณเชื้อเพลิงที่ป้อนในฐานน้ำหนักแห้ง (% d.b.)

4) ประสิทธิภาพการเผาไหม้ ได้จากการคำนวณโดยใช้ร้อยละคาร์บอนคงตัวใน Char (Unburned carbon) และร้อยละของเถ้า (Ash) ในเชื้อเพลิง สามารถคำนวณได้ในสมการที่ 3.6 (Ikeda *et al*, 2003).

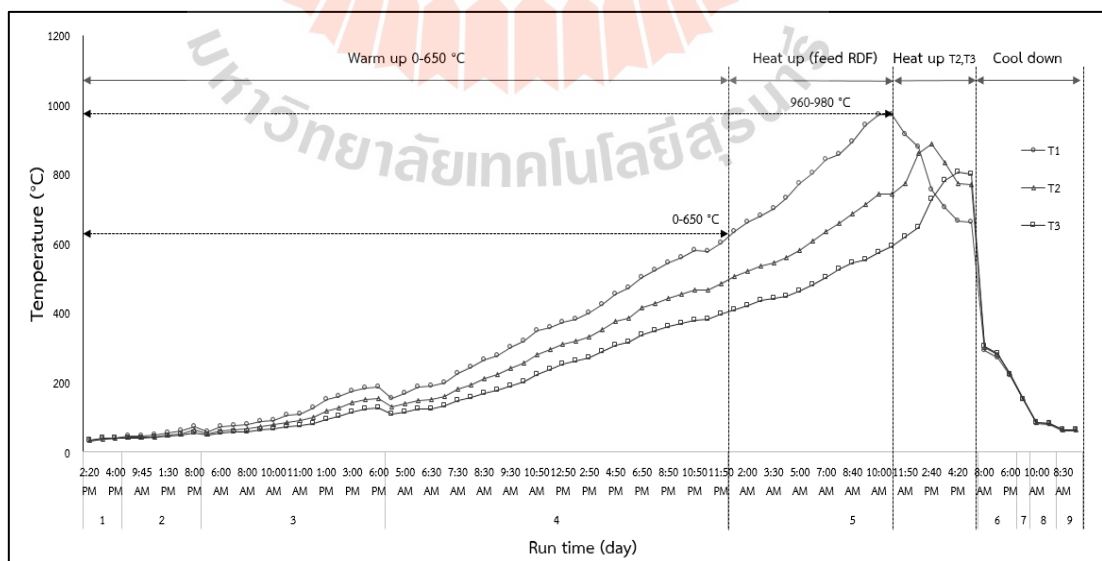
$$\text{Combustion Eff. (\%)} = 100 - \left[ \left( \frac{U_n}{100 - U_n} \right) \left( \frac{A_0}{100 - A_0} \right) \times 100 \right] \quad (3.6)$$

โดย Combustion Eff คือ ประสิทธิภาพการเผาไหม้ (%)

$U_n$  คือ ปริมาณคาร์บอนคงตัวในเถ้าถ่าน (%)

$A_0$  คือ ปริมาณเถ้าในเชื้อเพลิง (%)

5) องค์ประกอบก๊าซเผาไหม้ ในส่วนนี้เป็นการศึกษาองค์ประกอบของก๊าซที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้และเพื่อให้สามารถ Monitor การเผาไหม้ได้ ประกอบด้วย อัตราการไหลเชิงปริมาตร (Q) ออกซิเจน ( $O_2$ ) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) คาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) ออกไซด์ของไนโตรเจน ( $NO_x$  as  $NO_2$ ) และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $S_2O$ ) โดยใช้เครื่องมือวัด Testo 350-XL ที่ผ่านการสอบเทียบแล้ว สภาวะการตรวจวัดที่ ออกซิเจนส่วนเกิน 7 % สภาวะแห้ง โดยจะวัดทุก 30 min อ่านผลเป็นค่าเฉลี่ย



รูปที่ 3- 11 ขั้นตอนการทดสอบกับเตาเผาเซรามิกโดยตรง

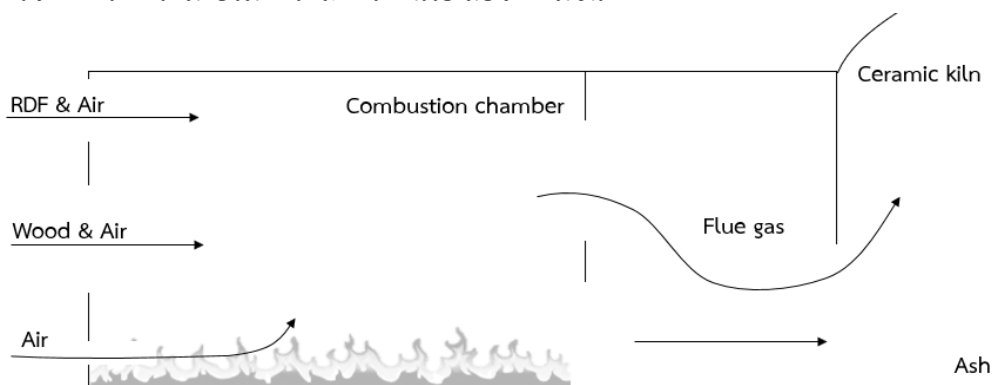


### 3.2.3.2 การออกแบบและสร้างเตาเผาไหม้

เป็นการออกแบบและสร้างเตาเผาไหม้เพื่อให้มีความเหมาะสมและสมรรถนะในการเดินระบบ ได้แก่ รูปทรงและทางเดินลมร้อน ห้องเผาไหม้ ระบบป้อนเชื้อเพลิงขยะ ระบบควบคุมอากาศ ระบบถ่ายเถ้า และระบบตรวจวัดอุณหภูมิ นอกจากนี้ชนิดของเตาเผายังมีส่วนสำคัญในการออกแบบ ซึ่งชนิดเตาเผาไหม้ที่เลือกใช้ เป็นเตาเผาไหม้โดยตรงชนิดเบตนิ่ง ใช้ระบบป้อนแบบผสม คือ Stoker ป้อนเชื้อเพลิงขยะทางด้านบนและช่องป้อนไม้พินด้านหน้าเตา โดยเป็นการป้อนเชื้อเพลิงทิศทางเดียวกับอากาศ ข้อเสียของระบบนี้เมื่อเผาเป็นเวลานาน เชื้อเพลิง ถ่าน และเถ้า จะมีความหนาแน่นขึ้น เนื่องจากเป็นแบบเบตนิ่งและไม่มีตะแกรงหรือตะกรับในการเคลื่อนย้ายเถ้าถ่านเหล่านี้ แต่ในการออกแบบเตาเผาพร้อมกับเตาเผาเซรามิก จำเป็นต้องใช้ประโยชน์จากเถ้าถ่าน โดยดันเข้าไปในห้องเผาไหม้ด้านใน ปริมาณเถ้าที่เกิดขึ้นจึงไม่ค่อยมีผลต่อกระบวนการเผาไหม้ แต่ระบบนี้ยังมีข้อดีที่อากาศสามารถไหลผ่านทั้งด้านล่าง ด้านหน้า และด้านบนเตาเผา ซึ่งจะทำให้มีออกซิเจนเพียงพอต่อการเผาไหม้สมบูรณ์ได้ ด้วยเตาชนิดเผาไหม้โดยตรงมีระบบการทำงานที่ง่าย การก่อสร้างไม่ยุ่งยาก จึงนำมาใช้ในการออกแบบและสร้างสำหรับงานวิจัยครั้งนี้

1) ห้องเผาไหม้ เป็นพื้นที่ให้เกิดการเผาไหม้ระหว่าง ความร้อน เชื้อเพลิง และออกซิเจน ซึ่งห้องเผาไหม้ที่มีความเหมาะสม ขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง ได้แก่ รูปทรงและทางเดินลมร้อน ขนาดห้องเผาไหม้ ตะแกรง วัสดุที่ใช้ในการสร้าง แสดงรายละเอียดดังนี้

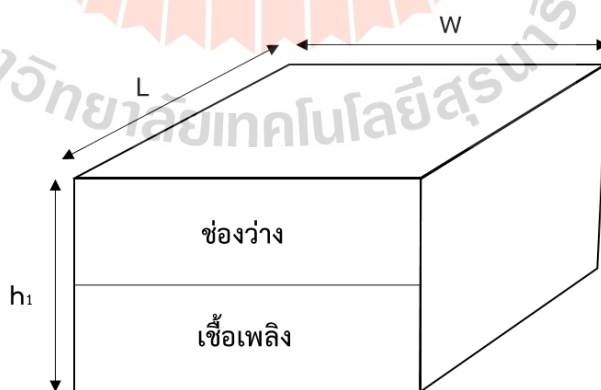
(1) รูปทรงและทางเดินลมร้อน แสดงดังรูปที่ 3-12 ท่อทางเดินลมร้อนจะให้อยู่สูงจากชั้นรองรับเถ้าประมาณ (0.2 – 0.6) m ขนาด (0.4 x 0.4) m<sup>2</sup> เพื่อให้การไหลของลมร้อนเป็นไปตามธรรมชาติของเปลวไฟ คือ ไหลขึ้นด้านบน จากนั้นจะโดนบังคับให้หมุนตัวลงด้านล่าง เนื่องจากช่องป้อนเตาเซรามิกจะอยู่ด้านล่างรวมถึงช่องสำหรับดันเถ้าถ่านด้วย และการไหลของลมร้อนจะไหลตามหลักการพาความร้อน จากอุณหภูมิสูงไปสู่อุณหภูมิต่ำ หรือเมื่อเกิดการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูง ก๊าซเผาไหม้ที่ถูกปลดปล่อยออกมาจะมีความหนาแน่นต่ำ ตามหลักการก๊าซอุดมคติ ซึ่งความหนาแน่นก๊าซจะแปรผกผันกับอุณหภูมิ ดังนั้นยิ่งอุณหภูมิสูงขึ้น ความหนาแน่นก๊าซจะยิ่งต่ำลง ทำให้ไอเสียลอยออกทางปล่องสู่บรรยากาศ แล้วอากาศเย็นภายนอกจะเข้ามาแทนที่ และด้วยการแตกตัวจากการเผาไหม้ ปริมาตรและแรงดันไอเสียจะเพิ่มขึ้น



รูปที่ 3- 12 รูปแบบการเผาไหม้ร่วมกับเตาเผาเซรามิกโดยตรง

(2) ขนาดห้องเผาไหม้ แสดงดังรูปที่ 3-13 อ้างอิงข้อมูลปริมาณการใช้เชื้อเพลิงจากการทดสอบเผา RDF-3 ร่วมกับไม้ฟืนกับเตาเซรามิก ซึ่งจะใช้ข้อมูลปริมาณการใช้เชื้อเพลิงในช่วงเร่งอุณหภูมิ  $T_1$  ซึ่งคิดที่ความถี่การป้อนทุก 15-30 min ซึ่งเป็นความถี่ที่มีการป้อนเชื้อเพลิงหรืออุณหภูมิเริ่มลดลง เป็นระยะเวลา 10 h และเนื่องจากการเร่งอุณหภูมิจะมีการใช้เชื้อเพลิงมากที่สุด อุณหภูมิสูงสุด ดังนั้นจะเป็นช่วงที่มีเหมาะในการใช้ RDF ร่วมด้วย การป้อนเชื้อเพลิงมากที่สุดจะเป็นข้อมูลในการใช้ออกแบบขนาดห้องเผาไหม้ โดยขนาดห้องเผาจะประกอบด้วยพื้นที่รองรับถ้ำ ถ่าน พื้นที่สำหรับป้อนเชื้อเพลิง และพื้นที่ว่าง ซึ่งพื้นที่ว่างมีไว้เพื่อให้โมเลกุลที่เกิดจากการแตกตัวของเชื้อเพลิงทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ทั้งหมด หรือเป็นพื้นที่สำหรับให้ Volatile ถูกเผาไหม้จนหมด โดยมีเวลาอยู่ในเตาไม่ต่ำกว่า 2 s (กรมควบคุมมลพิษ, 2563) เพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ โดยใช้ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของก๊าซเผาไหม้ที่ทำให้เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ คำนวณเพื่อหาปริมาตรช่องว่าง แต่หากมีพื้นที่ว่างมากเกินไปจะทำให้ขนาดห้องเผาใหญ่ขึ้น ต้นทุนก็สูงขึ้นตามไปด้วย และหากขนาดพื้นที่ว่างน้อยไปก็ทำให้พื้นที่สำหรับทำปฏิกิริยาน้อยและทำให้ช่องทางสำหรับอากาศไหลเข้าน้อยลง เกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ได้ ถึงอย่างไรก็ตามปริมาตรช่องว่างไม่ควรน้อยกว่าปริมาตรเชื้อเพลิง เนื่องจากเป็นปริมาตรของ Volatile ในรูปของของแข็ง

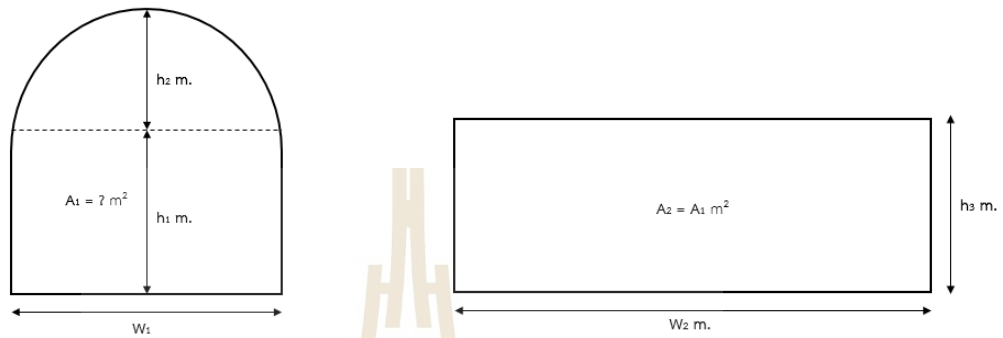
โดยโครงสร้างเหล็กที่ใช้จะได้จากการปรับปรุงเตาเก่า ซึ่งจะใช้ระยะ  $L$  เท่าเดิม คือ 1 m ส่วน  $h_1$  เป็นความสูงของเตา จะไม่ให้เตามีความสูงมาก ด้วยข้อจำกัดเรื่องพื้นที่ โครงหลังคาค่อนข้างต่ำ หากมีความสูงมากจะทำให้ขนย้ายเข้าลำบาก อีกทั้งปากเตาอยู่ติดพื้นดิน เปลวไฟที่เกิดขึ้นจะลอยขึ้นแล้วม้วนตัวลงมาด้านล่างอีกครั้ง ดังนั้นไม่จำเป็นต้องทำเตาสูง โดยจะกำหนดความสูงห้องเผารวมห้องเก็บถ้ำไม่เกิน 1 m สุดท้ายค่า  $W$  คำนวณจากปริมาตรเชื้อเพลิงที่ได้ และ ค่า  $W$  โดยกำหนดความหนาแน่นของ RDF-3 ให้ประมาณ RDF-4 เนื่องจากเมื่อ RDF-3 เมื่อเข้าเตาเผาแล้วจะหดตัวอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะคล้าย RDF-4



รูปที่ 3- 13 ลักษณะห้องเผาไหม้

2) ระบบป้อนเชื้อเพลิงไม้และขยะ ในระบบนี้จะออกแบบป้อนเชื้อเพลิงทั้ง 2 แยกกัน เพื่อให้สามารถป้อน RDF ได้ง่ายขึ้น โดยช่องป้อนไม้ฟืนจะอ้างอิงพื้นที่หน้าตัดของเตาเผาเดิม ( $A_1 = \pi h_2^2 = A_2$ ) เพื่อไม่ให้ตัวเตาสูงเกินไปเพราะจะทำให้เข้าหน้างานยาก (โครงหลังคาค่อนข้างต่ำ

~2.5 m) จะเพิ่มพื้นที่ออกทางด้านข้างในรูปทรงสี่เหลี่ยม โดยค่าความสูงของช่องป้อนจะคิดตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่สุดของไม้พื้นที่ใช้ตลอดกระบวนการ ใช้ค่าเพื่อรูปทรงไม้ที่ไม่เท่ากันและการขยับ 10 cm จากนั้นจะสามารถคำนวณความกว้างของช่องป้อนได้จาก  $W_2 = h_3 / A_2$  แสดงดังภาพที่ 3-14

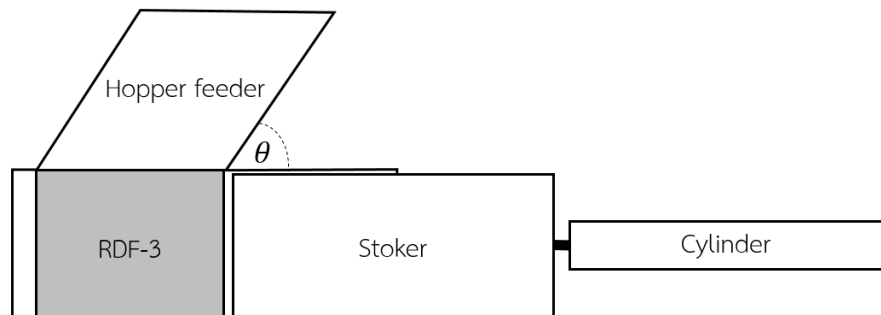


ก. ช่องป้อนเชื้อเพลิงเตาเดิม

ข. ช่องป้อนเชื้อเพลิงเตาใหม่

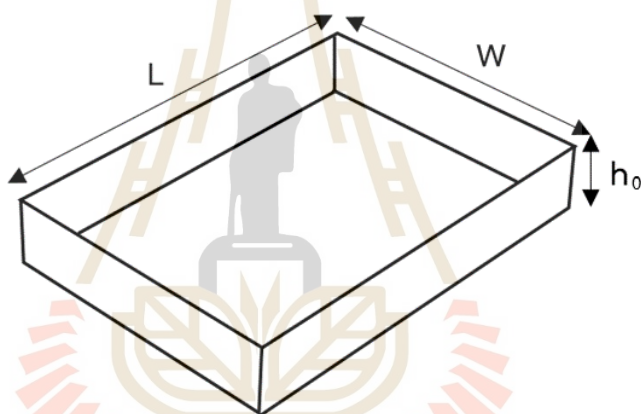
รูปที่ 3- 14 ขั้นตอนการทดสอบกับเตาเผาเซรามิกโดยตรง

ในส่วน Stoker สำหรับเชื้อเพลิงขยะอ้างอิงปริมาณการป้อนเชื้อเพลิงขยะจากการทดสอบ ซึ่งจะใช้ความถี่การป้อนที่ 5 min เนื่องจากคุณสมบัติพลาสติกทั่วไปจะมีค่าสารระเหยที่สูงและคาร์บอนคงตัวต่ำ การปลดปล่อยโมเลกุลการเผาไหม้จะเกิดขึ้นในระยะเวลาที่รวดเร็ว ดังนั้นการป้อนเชื้อเพลิงขยะจะต้องทยอยป้อนทีละน้อย เพื่อไม่ให้อุณหภูมิแตกต่างกันมาก โดยจะใช้อัตราการป้อนและความหนาแน่นเชื้อเพลิงขยะจากการทดสอบ คำนวณปริมาตรเชื้อเพลิงขยะที่ป้อน โดยกำหนดให้ความกว้างของ Hopper feeder เท่ากับความสูงของช่อง Stoker อ้างอิงตามขนาดสูงสุดของ RDF-3 ดังนั้นจะสามารถคำนวณความยาวตามขวางของ Hopper feeder และช่อง Stoker ได้ รวมถึงออกแบบให้มีฝาปิดด้านในกันไฟย้อนกลับ โดยกำหนดให้  $\theta = 70^\circ$  ซึ่งเป็นมุมกองที่เชื้อเพลิงขยะไหลลงโดยไม่ตกค้าง แสดงดังรูปที่ 3-15



รูปที่ 3- 15 ระบบป้อนเชื้อเพลิงขยะ

3) ระบบรองรับเถ้า จากปริมาณเถ้าตามองค์ประกอบแบบประมาณของ เชื้อเพลิงไม้ฟืนและเชื้อเพลิงขยะ (RDF-3) หรือปริมาณเถ้าจากการทดสอบ จะสามารถหาปริมาณเถ้า ที่เกิดจากการเผาไหม้ได้ หากคำนวณตามค่า Proximate จะใช้ปริมาณการใช้ไม้ฟืน และ RDF-3 คำนวณน้ำหนักเถ้าออกมาได้ จากนั้นหาความหนาแน่นเถ้ารวม แล้วหาปริมาตรเถ้า ซึ่งจะเป็น ปริมาตรของห้องรองรับเถ้า โดยจะใช้ค่าเผื่ออยู่ที่ 30% เป็นการเผื่อเนื่องจากปริมาณการป้อนอาจจะ มีการเปลี่ยนแปลง ค่าที่ได้จะสามารถรองรับหรือถ่ายเถ้าได้ตลอดการเผา เมื่อได้ปริมาตรเถ้าแล้ว นำไปหาขนาดความสูงของห้องรองรับเถ้า จากปริมาตรห้องเผาไหม้ที่ได้จากการออกแบบ โดยความ กว้าง (W) และความยาว (L) ของถาดรองรับเถ้าจะใช้ค่าเท่ากับกับขนาดของห้องเผาไหม้ จากนั้นจะ ได้ขนาดความสูงของห้องรองรับเถ้า แต่ระบบนี้ จะออกแบบให้มีการดันเถ้าเข้าไปในเตาเผาเซรามิกตามวิธีดั้งเดิม เพื่อให้ความร้อนจากเถ้าสามารถรักษาอุณหภูมิให้มีความเสถียรภาพ แสดงดังรูปที่ 3-16



รูปที่ 3- 16 รูปทรงห้องรองรับเถ้า

4) ระบบควบคุมอากาศ ออกซิเจนเป็นส่วนประกอบสำคัญในการเผาไหม้ การที่เชื้อเพลิงจะเผาไหม้ได้สมบูรณ์ จำเป็นต้องมีออกซิเจนที่เพียงพอหรือเกินพอ โดยควบคุมให้มี ปริมาณก๊าซออกซิเจนที่เหลือจากการเผาไหม้ไม่ต่ำกว่า 10-12 % จึงจะลดความเสี่ยงการเกิดการเผา ไหม้ที่สมบูรณ์ (กรมควบคุมมลพิษ, มปป) ซึ่งการหาปริมาณออกซิเจนที่ต้องการใช้ในการเผาไหม้จาก ปริมาณมวลสารสัมพันธ์ สมการที่ 3.7-3.10 สำนักพัฒนาทรัพยากรบุคคลด้านพลังงาน (มปป) จากนั้น คำนวณปริมาตรอากาศที่ต้องใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงจากสมการที่ 3.10 โดยใช้อากาศ ส่วนเกินของเชื้อเพลิงแข็งที่ 20 % (The Engineering ToolBox, 2003) โดยปริมาณการใช้เชื้อเพลิง ได้จากการทดสอบตามหัวข้อที่ 3.2.4.1 องค์ประกอบธาตุได้จากผลการทดสอบตามหัวข้อที่ 3.2.3.4. สัดส่วนระหว่างไม้และ RDF-3 อ้างอิงจากผลการทดสอบในหัวข้อที่ 3.2.4.1 อ้างอิงสถานะมาตรฐาน ที่อุณหภูมิ 273.15 k (0°C) ความดันสัมบูรณ์ 101.325 kPa



$$Pv = nRT \quad (3.10)$$

5) ระบบตรวจวัดอุณหภูมิ ในระบบห้องเผาไหม้ จะมีอยู่ 2 ส่วนที่จะติดตั้ง อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ คือ ห้องเผาไหม้ (T<sub>i</sub>) และทางเดินลมร้อนขาออก (T<sub>o</sub>) ซึ่งเป็นลมร้อนที่จะนำไปเผาเซรามิก โดยจะใช้ Thermal couple type k ที่สามารถใช้กับอุณหภูมิสูงถึง 1,800 °C

6) รายการประเมินวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการก่อสร้าง โครงสร้างพื้นฐานของเตาเผา ออกแบบและเลือกใช้วัสดุตามหลักการออกแบบเตาเผาไหม้ สำนักพัฒนาทรัพยากรบุคคล ด้านพลังงาน (มปป) โดยมีรายละเอียดวัสดุอุปกรณ์ที่ต้องใช้ในการดำเนินงานดังตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3- 1 รายการประเมินวัสดุอุปกรณ์ในการก่อสร้างเตาเผาไหม้

ลำดับ	พารามิเตอร์	ข้อมูลจำเพาะ
1	อิฐทนไฟ (Straight: ST) 230 x 115 x 76 mm	ST 76
2	เซรามิกไฟเบอร์บอร์ด 25 x 600 x 900 mm	1,260 C/300 kg/m
3	ปูนทนไฟ 25 kg	SK-30 Hm
4	คอนกรีตทนไฟ 25 kg	Cast – 16
5	เหล็กแผ่นรอบตัวเตา 1,219 x 2,438 x 6 mm	Grade SS400
6	เหล็กแผ่นรอบตัวเตา 1,219 x 2,438 x 4 mm	Grade SS400
7	เหล็กแผ่นรอบตัวเตา 1,219 x 2,438 x 3 mm	Grade SS400
8	เหล็กรางน้ำ 4 inch 100 x 50 x 7.5 mm	Grade SS400
9	เหล็กรางน้ำ 3 inch 75 x 40 x 7 mm	Grade SS400
10	ลูกกลิ้งล้อเลื่อนสำหรับ (Stoker) ขนาด 3 inch	SUS 304 STL 4
11	ลูกกลิ้งล้อเลื่อนสำหรับ (Stoker) ขนาด 1 inch	SUS 304 STL 4
12	กระบอกลมส่งกำลัง (Stoker)	-
13	ท่อค้ำยันตะแกรง ½ inch	Sch 40
14	เทอร์โมคัปเปิล	Type K
15	Blower เต็มอากาศ	-
16	ปั๊มลม	-
17	สายลม Pneumatic 8 x 3.5 mm	-

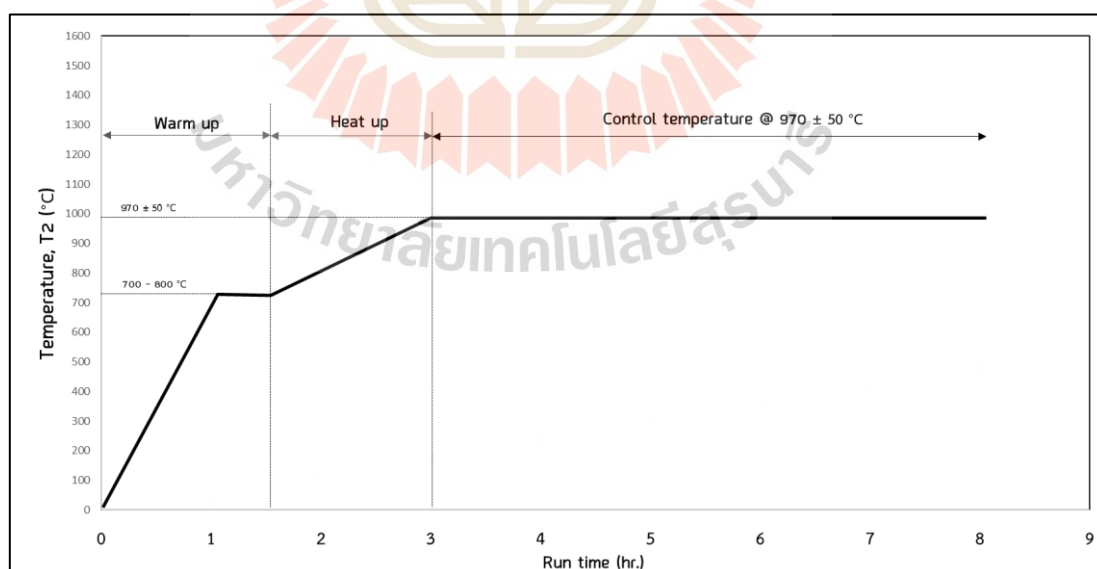


### 3.2.3.3 การทดสอบสมรรถนะระบบเผาไหม้ที่สร้างขึ้น

ในการทดสอบแบ่งเป็น 2 ช่วง ได้แก่ การทดสอบเสถียรภาพการผลิตพลังงานความร้อน เพื่อเป็นข้อมูลในการเลือกใช้สัดส่วนเหมาะสม สำหรับการทดสอบสมรรถนะร่วมกับเตาเผาเซรามิก แสดงดังรูปที่ 3-17 พารามิเตอร์ที่ศึกษามีดังต่อไปนี้

(1) ช่วงที่ 1 การทดสอบการทดสอบเสถียรภาพการผลิตพลังงานความร้อน เนื่องจากเตาเผาเซรามิก มีข้อจำกัดเรื่องความแตกต่างของอุณหภูมิ เพราะจะส่งผลต่อผลิตภัณฑ์โดยตรง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการทดสอบเสถียรภาพในการควบคุมอุณหภูมิ และประเมินสมรรถนะที่ได้ โดยให้อุณหภูมิเป็นตัวแปรควบคุมที่  $970 \pm 50$  °C สัดส่วนระหว่างเชื้อเพลิง (ไม้สับ : RDF-3) เป็นตัวแปรต้น ประกอบด้วย 4 สัดส่วน คือ ไม้สับ, 90 : 10, 80 : 20 และ 70 : 30 wt. % w.b. โดยมีตัวแปรตาม ได้แก่ 1) ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงในหน่วย kg, kg/h 2) ปริมาณการใช้พลังงาน ในหน่วย MJ, 3) องค์กรประกอบก๊าซเผาไหม้ 4) องค์กรประกอบแบบประมาณและอัตราการเกิดเถ้า

1) การตรวจวัดอุณหภูมิ ภายในเตาเผาโดยวัดอุณหภูมิทั้งหมด 2 ตำแหน่ง ได้แก่ ห้องเผาไหม้ ( $T_c$ ) และท่อลมร้อนขาออก ( $T_o$ ) โดยใช้เครื่องมือวัด Thermocouple Type k เก็บข้อมูลผ่าน Data logger ทุก 15 min โดยจะแบ่งเป็น 3 ช่วง ช่วงแรกเป็นการอุ่นเตาให้ได้อุณหภูมิในช่วง 700 – 800 °C เป็นเวลาประมาณ 1-1.5 h จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิขึ้นไปอยู่ที่ 970 °C ภายในเวลา 1.5 h จากนั้นควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง  $970 \pm 50$  °C หรือให้ใกล้เคียง 970 °C มากที่สุด เป็นเวลา 5 h โดยจะใช้ช่วงที่อุณหภูมิมีความเสถียรมากที่สุดเป็นเวลา 3 h ในการนำไปวิเคราะห์ผล รวมระยะเวลาการทำงาน 8 h



รูปที่ 3- 17 ขั้นตอนการดำเนินงานทดสอบ

2) การใช้เชื้อเพลิง การป้อนเชื้อเพลิงจะป้อนตามสัดส่วนที่ใช้ทดสอบ โดยอัตราการป้อนขึ้นอยู่กับ การควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งการป้อนจะไม่ผสมก่อนป้อน เนื่องจาก RDF-3 มี

ขนาดใหญ่ เมื่อผสมกับไม้สับจะผสมไม่เข้ากันดี จึงจะชั่งน้ำหนักไม้สับและ RDF-3 ตามสัดส่วนในปริมาณที่น้อย แล้วทยอยป้อนให้สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ บันทึกผลการป้อนทุก 15 min

3) องค์ประกอบแบบประมาณและอัตราการเกิดเถ้า (Unburned carbon) โดยองค์ประกอบแบบประมาณประกอบด้วย ร้อยละของเถ้า ความชื้น สารระเหย และคาร์บอนคงตัว สามารถหาได้ตามวิธีการในหัวข้อ 3.2.3.3 จากนั้นหาอัตราการเกิดเถ้า โดยสามารถดึงเถ้าออกมาจากเตา แล้วชั่งน้ำหนัก บันทึกผล โดยอัตราการเกิดเถ้า จะเทียบกับปริมาณเชื้อเพลิงที่ป้อนในฐานน้ำหนักแห้ง (% d.b.)

4) ประสิทธิภาพการเผาไหม้ ได้จากการคำนวณ โดยใช้ร้อยละคาร์บอนคงตัวในเถ้าถ่านและร้อยละเถ้า (Ash) ในเชื้อเพลิง สามารถคำนวณได้ในสมการที่ 3.9

5) องค์ประกอบก๊าซเผาไหม้ ในส่วนนี้เป็นการศึกษาองค์ประกอบของก๊าซที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้และเพื่อให้สามารถ Monitor การเผาไหม้ได้ ประกอบด้วย ออกซิเจนที่เหลือจากการเผาไหม้ ( $O_2$ ) คาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) คาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) ออกไซด์ของไนโตรเจน ( $NO_x-NO_2$ ) และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $SO_2$ ) ตรวจวัดที่ตำแหน่งปล่องทางออกของ Flue gas โดยใช้เครื่องมือวัด Testo 350 XL ที่ผ่านการสอบเทียบแล้ว สภาวะการตรวจวัดที่ ออกซิเจนส่วนเกิน 7 % สภาวะแห้ง โดยจะวัดทุก 30 min อ่านผลเป็นค่าเฉลี่ย

(2) ช่วงที่ 2 การทดสอบนี้จะเหมือนกับการทดสอบกับเตาเผาเซรามิกโดยตรง แต่จะใช้เตาเผาไหม้ที่สร้างขึ้น ทดสอบร่วมกับเตาเผาเซรามิก โดยใช้ RDF-3 เผาร่วมกับไม้พิน ควบคุมอุณหภูมิและเวลาตามที่เตาเผากำหนด มีขั้นตอนการดำเนินงาน ดังรูปที่ 3-18 ขั้นตอนเริ่มจากการอุ่นเตา 3-4 วัน อุณหภูมิไม่เกิน  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$  จากนั้นจะเร่งอุณหภูมิขึ้นสูงสุดประมาณ  $960 - 980\text{ }^{\circ}\text{C}$  ใช้เวลาประมาณ 10 h ในช่วงนี้จะเป็นช่วงที่ป้อนเชื้อเพลิงขยะและเก็บข้อมูลที่เป็นตัวแปรตาม ได้แก่ ปริมาณการใช้เชื้อเพลิง พลังงาน และองค์ประกอบก๊าซไอเสีย เมื่อได้เวลาและอุณหภูมิที่กำหนดแล้ว จะหยุดป้อนหน้าเตา หยุดป้อนเชื้อเพลิงขยะพร้อมด้วย จากนั้นเร่งอุณหภูมิ  $T_2$  และ  $T_3$  โดยการป้อนไม้ยาวด้านข้างเตา ให้ได้อุณหภูมิประมาณ  $880\text{ }^{\circ}\text{C}$  และ  $810\text{ }^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ แล้วปิดเตาประมาณ 4 วัน หรือจนกว่าอุณหภูมิจะเย็นตัวลงต่ำกว่า  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  จึงนำผลิตภัณฑ์ออกมาได้ รวมระยะเวลาในการเผาแต่ละรอบประมาณ 9-11 วัน เมื่อเตาเย็นแล้ว เก็บตัวอย่างเถ้าเพื่อหาปริมาณและองค์ประกอบแบบประมาณของเถ้า โดยมีรายละเอียดการเก็บข้อมูลดังนี้

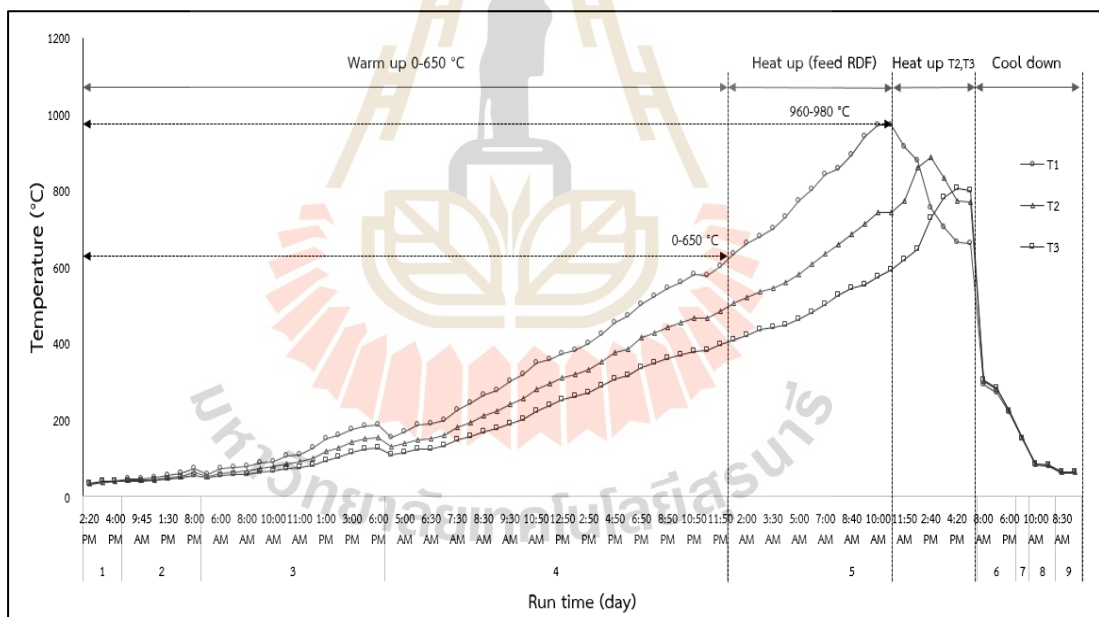
1) การตรวจวัดอุณหภูมิ อุณหภูมิที่วัดประกอบด้วย 5 ตำแหน่ง ได้แก่ ห้องเผาไหม้ ( $T_c$ ) และท่อลมร้อนขาออก ( $T_o$ ) อีก 3 ตำแหน่งจะเป็นอุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิก  $T_1$   $T_2$  และ  $T_3$  โดยใช้ Thermocouple Type k เก็บข้อมูลผ่าน Data logger แสดงผลทุก 15 min

2) การใช้เชื้อเพลิงและพลังงาน การป้อนเชื้อเพลิงจะแยกช่องป้อน โดยใช้สัดส่วนที่ได้จากการทดสอบเสถียรภาพ (wt. % w.b.) การป้อนขึ้นอยู่กับควบคุมอุณหภูมิและเวลาที่กำหนดของอุตสาหกรรม ชั่งน้ำหนักไม้พินและ RDF-3 ตามสัดส่วนแล้วทยอยป้อน บันทึกผลการป้อนทุก 15 min

3) องค์ประกอบแบบประมาณและอัตราการเกิดเถ้า (Unburned carbon) โดยองค์ประกอบแบบประมาณประกอบด้วย ร้อยละของเถ้า ความชื้น สารระเหย และคาร์บอนคงตัว สามารถหาได้ตามวิธีการในหัวข้อ 3.2.3.3 จากนั้นหาอัตราการเกิดเถ้า โดยสามารถดึงออกจากเตาเผาเซรามิก แล้วชั่งน้ำหนัก บันทึกรูป โดยอัตราการเกิดเถ้า จะเทียบกับปริมาณเชื้อเพลิงที่ป้อนในฐานน้ำหนักแห้ง (% d.b.)

4) ประสิทธิภาพการเผาไหม้ ได้จากการคำนวณ โดยใช้ร้อยละคาร์บอนคงตัวในเถ้าถ่านและร้อยละเถ้า (Ash) ในเชื้อเพลิง สามารถคำนวณได้ในสมการที่ 3.9

5) องค์ประกอบก๊าซเผาไหม้ ในส่วนนี้เป็นการศึกษาองค์ประกอบของก๊าซที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้และเพื่อให้สามารถ Monitor การเผาไหม้ได้ ประกอบด้วย ออกซิเจนที่เหลือจากการเผาไหม้ ( $O_2$ ) คาร์บอนมอนอกไซด์ ( $CO$ ) คาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) ออกไซด์ของไนโตรเจน ( $NO_x-NO_2$ ) และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $S_2O$ ) ตรวจวัดที่ตำแหน่งปล่องทางออกของ Flue gas โดยใช้เครื่องมือวัด Testo 350 XL ที่ผ่านการสอบเทียบแล้ว สภาวะการตรวจวัดที่ ออกซิเจนส่วนเกิน 7 % สภาวะแห้ง โดยจะวัดทุก 30 min อ่านผลเป็นค่าเฉลี่ย



รูปที่ 3- 18 ขั้นตอนการดำเนินงานทดสอบ

### 3.2.5 สรุปพารามิเตอร์ วิธีการ และเครื่องมือในการทดสอบ

พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่จะต้องใช้ในการทดสอบทั้งหมดได้แก่ สมบัติทางกายภาพ องค์ประกอบแบบประมาณ องค์ประกอบทางเคมี และองค์ประกอบก๊าซเผาไหม้ต่าง ๆ สรุปดังแสดงในตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3- 2 แสดงรายการพารามิเตอร์ วิธีการ และเครื่องมือในการทดสอบ

พารามิเตอร์	วิธีการ		เครื่องมือ
	ไม้/ไม้สับ	RDF-3	
<b>Physical Analysis (% wt. db.)</b>			
1. Composition	-	Quartering	sort by hand
2. Size (mm)		measuring	measuring tool
3. Bulk density		ASTM E873-82	Scales, Box
4. HHV (kJ/kg)		ASTM: E711-87	Bom calorimeter
5. LHV (kJ/kg)		Calculate	Equation 3.1
<b>Proximate Analysis (% wt. db.)</b>			
6. Moisture (w.t.% w.b.)		ASTM: E 949-88	Hot air oven
7. Ash		ASTM: E 1755-01	Muffle Furnace
8. Volatile Matter		ASTM: E 872-82	Muffle Furnace
9. Fixed Carbon		Calculate	Equation 3.5
<b>Ultimate Analysis (% wt. db.)</b>			
10. Carbon (C)		ASTM: D5373-08	CHNS Analyzer
11. Hydrogen (H)		ASTM: D5373-08	CHNS Analyzer
12. Nitrogen (N)		ASTM: D5373-08	CHNS Analyzer
13. Sulphur (S)		ASTM: D775	CHNS Analyzer
14. Oxygen (O) + Other		Calculate	Calculate
<b>Combustion gas elements (% vol)</b>			
15. Temperature (°C)		-	Thermal couple
16. Flow rate, Q (m <sup>3</sup> /hr.)		U.S. EPA Method 2	Testo 350-XL
17. Carbon dioxide, CO <sub>2</sub> (%)		U.S. EPA Method 3	Testo 350-XL
18. Oxygen, O <sub>2</sub> (%)		U.S. EPA Method 3	Testo 350-XL
19. Nitrogen oxide, NO <sub>x</sub> (ppm)		U.S. EPA Method 7E	Testo 350-XL
20. Carbon monoxide, CO (%)		U.S. EPA Method 3	Testo 350-XL
21. Sulphur dioxide, SO <sub>2</sub> (ppm)		U.S. EPA Method 6C	Testo 350-XL
<b>Char conversion</b>			
22. Combustion efficiency (%)		Calculate	Equation 3.6

## บทที่ 4

### ผลการดำเนินงานวิจัยและการอภิปรายผล

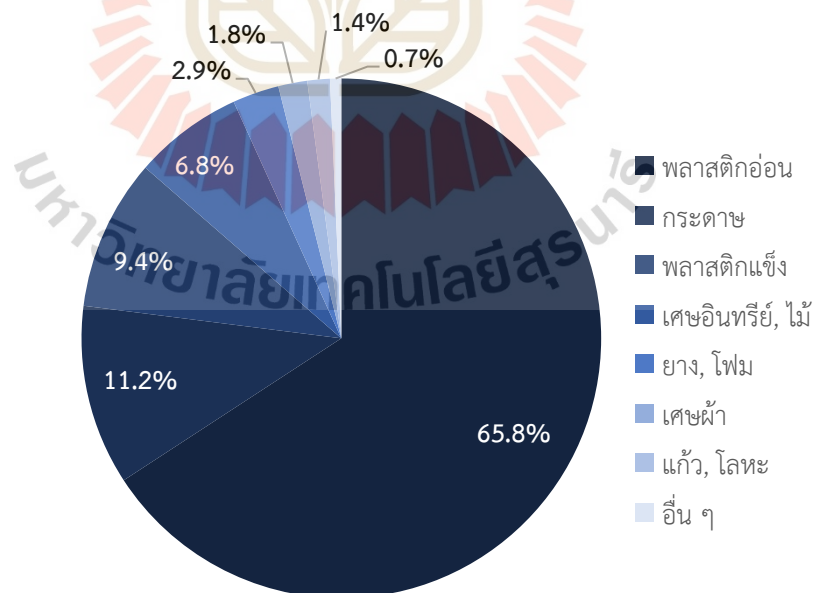
#### 4.1 บทนำ

ในส่วนของบทนี้ เป็นการนำเสนอผลการดำเนินการวิจัยและอภิปรายผล ของสมบัติเชื้อเพลิง การทดสอบเก็บข้อมูลเตาเผาเซรามิก การทดสอบหาเสถียรภาพ และการทดสอบใช้งานกับเตาเผาเซรามิก

#### 4.2 ผลการศึกษาสมบัติและการแปรรูปเชื้อเพลิง

##### 4.2.1 สมบัติทางกายภาพ (physical analysis)

รูปที่ 4-1 ผลการศึกษาองค์ประกอบของเชื้อเพลิงขยะประเภทที่ 3 พบว่าพลาสติกอ่อนจำพวกถุงพลาสติกมีสัดส่วนมากที่สุดร้อยละ 65.8 รองลงมาเป็นกระดาษร้อยละ 11.2 พลาสติกแข็ง ร้อยละ 9.4 เศษอินทรีย์ร้อยละ 6.8 ตามลำดับ ในส่วนองค์ประกอบอื่น ได้แก่ ยาง โฟม เศษผ้า แก้ว โลหะ และอื่น ๆ มีในสัดส่วนที่น้อยร้อยละ 6.8 ซึ่งถ้าคิดในส่วนที่เป็นวัสดุเผาไหม้ได้จะอยู่ที่ร้อยละ 86.4 และในส่วนที่เป็นพลาสติกร้อยละ 75.2 ความชื้น 52.8 % w.b. ซึ่งถือเป็นสัดส่วนที่มีศักยภาพในการแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงประเภทอื่น ๆ ต่อไป



รูปที่ 4- 1 องค์ประกอบเชื้อเพลิงขยะ SUT-RDF-3 (wt. % w.b.)



ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพเชื้อเพลิงทั้ง 3 ประเภท ดังตารางที่ 4-1 รูปที่ 4-2 พบว่า ไม้สับมีขนาดโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 10-40 mm ไม้พินมีหลายขนาดโดยเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ที่ 50-200 mm ความยาวตั้งแต่ 300-2,000 mm ซึ่งขนาดและความยาวขึ้นอยู่กับการใช้งานในแต่ละส่วนของเตา ส่วน RDF-3 มีลักษณะค่อนข้างฟู ขึ้นเล็กปนใหญ่ ขนาดตั้งแต่ 100-400 mm ค่าความร้อนของไม้สับและไม้พินมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน เนื่องจากเป็นไม้ลักษณะเดียวกัน ต่างกันเพียงแค่นขนาดจากการแปรรูป อยู่ที่ 17,370 และ 17,570 kJ/kg d.b. ส่วน RDF-3 มีค่าความร้อนที่ค่อนข้างสูงเทียบเท่าน้ำมัน โดยมีความหนาแน่น 225, 350 และ 80 kg/m<sup>3</sup> w.b. ตามลำดับ เมื่อสังเกตปริมาณพลาสติกจะพบว่าส่วนมาเป็นพลาสติกกลุ่ม PP/PE ซึ่งไม่มีปริมาณคลอรีน และไม่มี PVC ในองค์ประกอบ จึงมั่นใจได้ว่าเชื้อเพลิงขยะที่ใช้จะไม่ส่งผลกระทบต่อสารประกอบไดออกซิน เมื่อนำไปเผาไหม้หรือใช้ประโยชน์ทางความร้อน

ตารางที่ 4- 1 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพเชื้อเพลิง

พารามิเตอร์	เชื้อเพลิง		
	ไม้สับ	ไม้พิน	RDF-3
ขนาดโดยแบ่งเป็นช่วง (mm)	10-40	∅ 30-200 L 300-2,000	50-300
ค่าความร้อนสูง, HHV (kJ/kg, d.b.)	17,370	17,570	25,790
ค่าความหนาแน่นรวม (kg/m <sup>3</sup> , w.b.)	225	200-350	50-80
ค่าความชื้น (w.t. % w.b.)	12.8	8.14	13.79



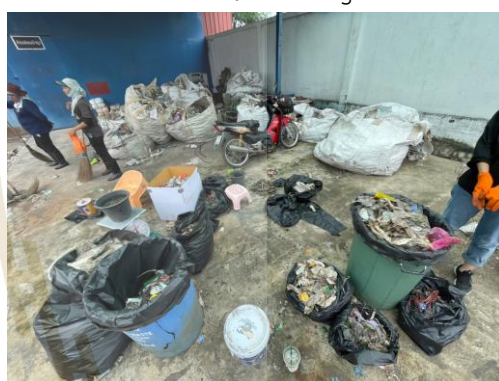
ก. การสุ่มเก็บตัวอย่างขยะ



ข. Quartering



ค. การหาความหนาแน่น RDF



ง. การแยกองค์ประกอบขยะ



จ. ไม้ฟืน



ฉ. ไม้สับ

รูปที่ 4- 2 การศึกษาสมบัติทางกายภาพเชื้อเพลิง





ก. พลาสติกอ่อน



ข. พลาสติกแข็ง



ค. กระดาษ



ง. เศษผ้า



จ. เศษไม้ เศษอินทรีย์



ฉ. ยาง โฟม



ช. แก้วและโลหะต่าง ๆ



ซ. อื่น ๆ

รูปที่ 4-3 องค์ประกอบ SUT-RDF-3

#### 4.2.2 องค์ประกอบแบบประมาณและองค์ประกอบของธาตุ

ผลการศึกษารวบรวมองค์ประกอบแบบประมาณดังตารางที่ 4-2 พบว่า ไม้สับ ไม้พิน และ RDF-3 มีความชื้นที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ โดยมีค่า 12.8 8.14 และ 13.79 % w.b. ตามลำดับ โดยไม้พินความชื้นน้อยที่สุด เนื่องจากทางเตาเผาจะใช้ไม้แห้งเป็นส่วนมากในการเผา และการใช้เชื้อเพลิงที่มีความชื้นน้อยจะทำให้เกิดการเผาไหม้ได้ดี มีความเสถียรภาพ เพราะไม่ต้องสูญเสียพลังงานความร้อนในการระเหยน้ำมาก ในส่วนของปริมาณเถ้าที่เกิดขึ้น ไม้สับและไม้พินมีค่าน้อยกว่า เมื่อเทียบกับ RDF-3 ที่มีมากถึง 10.84 % แสดงให้เห็นว่าทั้งไม้สับและไม้พิน มีสมรรถนะในการผลิตพลังงานที่น้อยกว่า RDF-3 แต่มีความหนาแน่นทางพลังงานน้อยกว่า ในส่วนของค่าสารระเหยมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน 82-87.34 w.t. % d.b. สุกทำเป็นค่าคาร์บอนคงตัว ทั้งไม้สับและไม้พินมีค่ามากกว่าอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่า ไม้สับและไม้พินสามารถรักษาระยะเวลาในการเผาไหม้ได้นานกว่า RDF-3

ผลการศึกษารวบรวมองค์ประกอบของธาตุ ดังตารางที่ 4-2 พบว่าปริมาณคาร์บอนและไฮโดรเจนของไม้สับและไม้พินมีค่าน้อยกว่า RDF-3 ในส่วนของค่าไนโตรเจนและซัลเฟอร์ มีค่าน้อยทั้ง 3 เชื้อเพลิง ค่าออกซิเจนและองค์ประกอบอื่น ๆ เชื้อเพลิงไม้มีมากกว่า RDF-3 ดังนั้นการเผาไหม้ที่มี RDF-3 เป็นส่วนผสม จะเกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์มากกว่าเชื้อเพลิงไม้ เนื่องจากมีออกซิเจนในเชื้อเพลิงที่น้อยกว่า และยังมีปริมาณสารระเหยที่มากกว่าไม้ ดังนั้นการเผาไหม้ควรมีระบบเติมอากาศเพื่อให้มีออกซิเจนเพียงพอต่อการเผาไหม้ได้อย่างสมบูรณ์

ตารางที่ 4- 2 ผลการวิเคราะห์ค่าองค์ประกอบแบบประมาณและองค์ประกอบของธาตุ

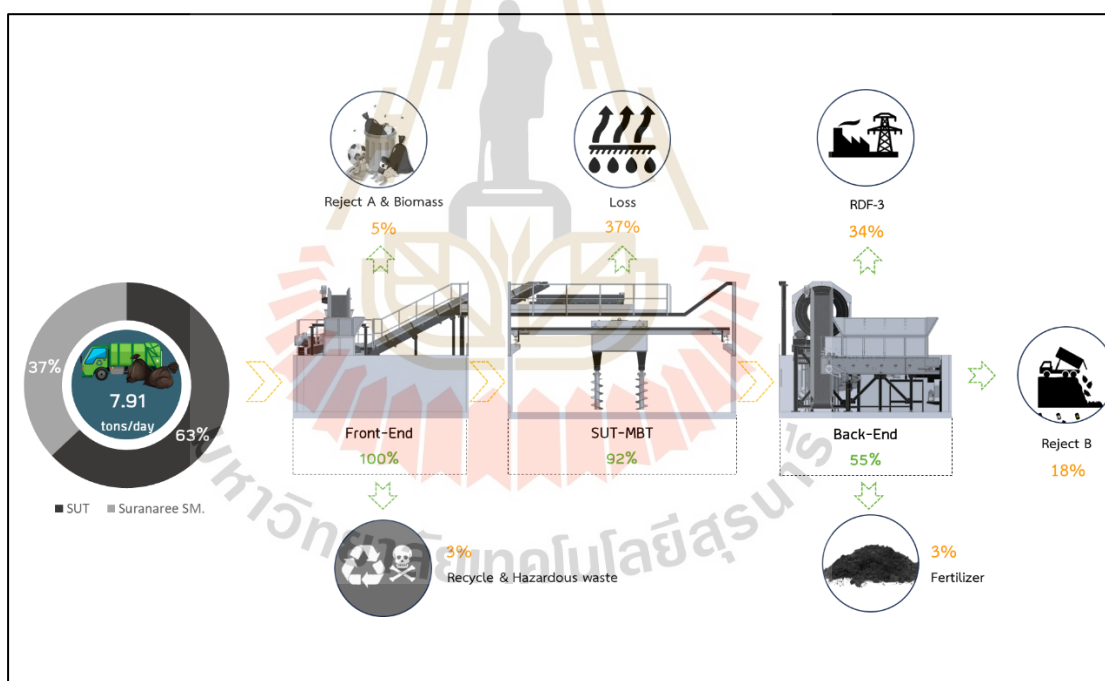
การวิเคราะห์	พารามิเตอร์	เชื้อเพลิง		
		ไม้สับ	ไม้พิน	RDF-3
Proximate Analysis (wt. % db.)	Moisture Content (w.t. % w.b.)	12.80	8.14	13.79
	Ash (A)	2.20	0.73	8.87
	Volatile Matter (VM)	82.00	84.79	87.34
Ultimate Analysis (wt. % db.)	Fixed Carbon (FC)	15.80	14.48	3.79
	Carbon (C)	46.75	48.74	68.51
	Hydrogen (H)	6.46	6.39	10.85
	Nitrogen (N)	0.387	0.31	0.44
	Sulphur (S)	N.D.	0.15	0.11
	Oxygen (O) + Other	46.40	44.42	20.20

#### 4.2.3 สมดุลมวลของระบบการจัดการขยะ SUT-MBT

ผลการวิเคราะห์สมดุลมวล SUT-MBT แสดงดังรูปที่ 4-4 พบว่ามีปริมาณขยะมูลฝอยชุมชนเข้าระบบ 7.91 ตัน/วัน ร้อยละ 63 เป็นขยะจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่เหลือเป็นขยะจากเทศบาลตำบลสุรนารี ส่วนหน้าของระบบมีการคัดแยกขยะเหลือทิ้ง (Reject A และซีวมวล) และ

ขยะอันตราย ร้อยละ 5 และ 3 ตามลำดับ จากนั้นขยะร้อยละ 92 ที่เหลือจะเข้าสู่ห้องหมัก ซึ่งในกระบวนการหมักจะเกิดการสูญเสียความชื้นและก๊าซต่าง ๆ ร้อยละ 37 จากนั้นขยะจะเข้าสู่กระบวนการส่วนหลัง ได้ผลผลิตของมาเป็น RDF-3 ร้อยละ 34 มูลฝอยเหลือทิ้ง (Reject B) ร้อยละ 18 และปุ๋ยร้อยละ 3

ขยะชุมชน มทส มีความชื้นสูงถึง 49.1 % w.b. ซึ่งเมื่อผ่านการคัดแยกขยะรีไซเคิล ขยะอันตราย และผ่านการสับย่อย ให้อยู่ในรูปของ RDF-2 พบว่ามีความชื้น 52.8 % w.b. เมื่อผ่านกระบวนการหมักมีความชื้นหายจากระบบ 22.6 % w.b. จะได้ RDF-2 ที่ผ่านกระบวนการหมักซึ่งมีความชื้นอยู่ที่ 30.2 % w.b. มีปริมาณ 4.35 ตัน/วัน หรือ 55 wt. % w.b. ของขยะชุมชนที่เข้าระบบ จากนั้นนำมาร่อนด้วยระบบส่วนหลัง พบว่าซึ่ง RDF-3 ที่ได้จากระบบ มีความชื้น 21 % w.b. มีปริมาณ 2.69 ตัน/วัน หรือ 34 wt. % w.b. เมื่อเปรียบเทียบโดยน้ำหนักแห้ง พบว่า RDF-3 มีปริมาณร้อยละ 70 ของ RDF-2 โดยร้อยละ 90 เป็นพลาสติก นอกนั้นเป็นเศษกระดาษและอื่น ๆ เมื่อผ่านการลดความชื้น RDF-3 ด้วยการตากแดด ความชื้นสุดท้ายอยู่ที่ 13.79 % w.b.



รูปที่ 4- 4 สมดุลมวลของระบบการจัดการขยะ SUT-MBT

## 4.3 ศึกษาความเป็นไปได้เชิงเทคนิค

### 4.3.1 ศึกษาเทคโนโลยีเตาเผาเซรามิกในปัจจุบัน

#### 4.3.1.1 ศึกษาองค์ประกอบหลักของเตาเผาเซรามิก

พบว่าเทคโนโลยีเตาเผาเซรามิกที่ทางอุตสาหกรรมใช้ในปัจจุบันเป็นเตาชนิดทางเดินลมร้อนไหลลง (Peterson, 2012) โดยลมร้อนที่ได้จากการเผาไหม้จะลอยขึ้นด้านบนก่อน



จากนั้นจะถูกบังคับไหลผ่านชั้นงานแล้วมีวนตัวลงออกทางปล่องควัน ซึ่งจะอยู่ด้านล่าง จึงเป็นที่มาของชื่อทางเดินลมร้อนลง ซึ่งเตาประเภทนี้สามารถรักษาอุณหภูมิเผาไหม้ได้ดี โดยที่นี้จะเป็นการเผาไหม้โดยตรง ใช้ไม้พินแห้งเป็นเชื้อเพลิงทั้งหมด ลักษณะห้องเผาไหม้จะอยู่ด้านหน้าสุดภายในเตามีปริมาตรประมาณ 9 m<sup>3</sup> ซึ่งปริมาตรเตารวมทั้งหมดประมาณ 47 m<sup>3</sup> ถัดจากนั้นจะเป็นกำแพงกันไฟ มีไว้เพื่อป้องกันเปลวไฟสัมผัสกับผลิตภัณฑ์โดยตรง ซึ่งจะใช้กระถางที่มีตำหนิวางกันสูง 1.5 m จำนวน 1 ชั้น การป้อนเชื้อเพลิงจะป้อนด้านหน้าห้องเผาไหม้โดยใช้คนป้อน มีช่องป้อนขนาด 0.3 m<sup>2</sup> เป็นระบบการเผาแบบเปิด ไม่มีระบบควบคุมอากาศ แต่จะควบคุมการใช้เชื้อเพลิงเพื่อให้ได้อุณหภูมิที่กำหนด ส่วนระบบถ่ายเถ้า เมื่อเถ้าถ่านเริ่มเยอะขึ้นคนงานจะดันเถ้าเข้าไปในห้องเผาไหม้ เพื่อสะสมความร้อนและรักษาระดับอุณหภูมิให้เสถียร เมื่อกระบวนการเผาภาชนะดินเผาเสร็จสิ้น จึงจะดึงเถ้าออกมาด้านนอก ซึ่งโดยรวมแล้วจะใช้คนงานทำงานทุกขั้นตอน ดังแสดงในรูปที่ 4-5





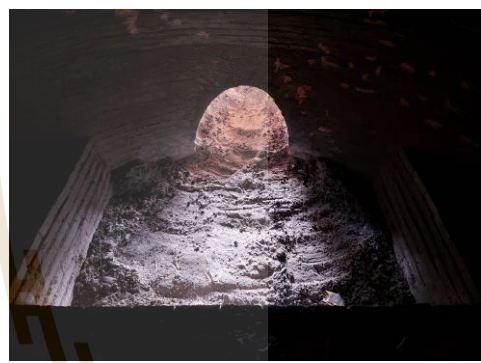
ก. ผลิตภัณฑ์ที่นำมาเผา



ข. ช่องสำหรับป้อนเชื้อเพลิง



ค. กำแพงไฟ



ง. ห้องเผาไหม้



จ. ปล่องควัน



ฉ. เเทอร์โมคัปเปิล



ช. ช่องสำหรับใส่ไฟด้านข้างเตา

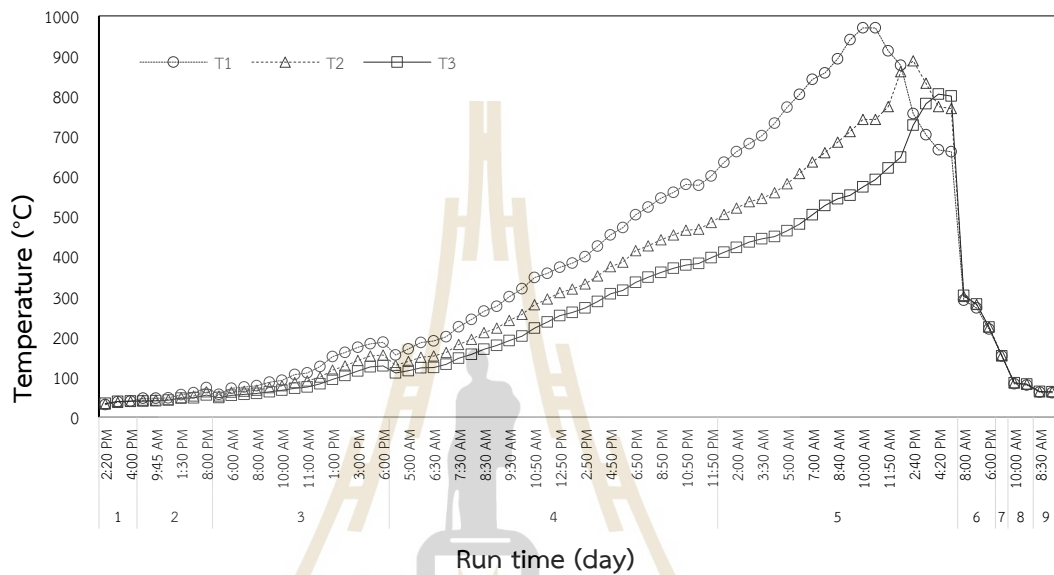


ซ. ช่องสำหรับใส่ผลิตภัณฑ์

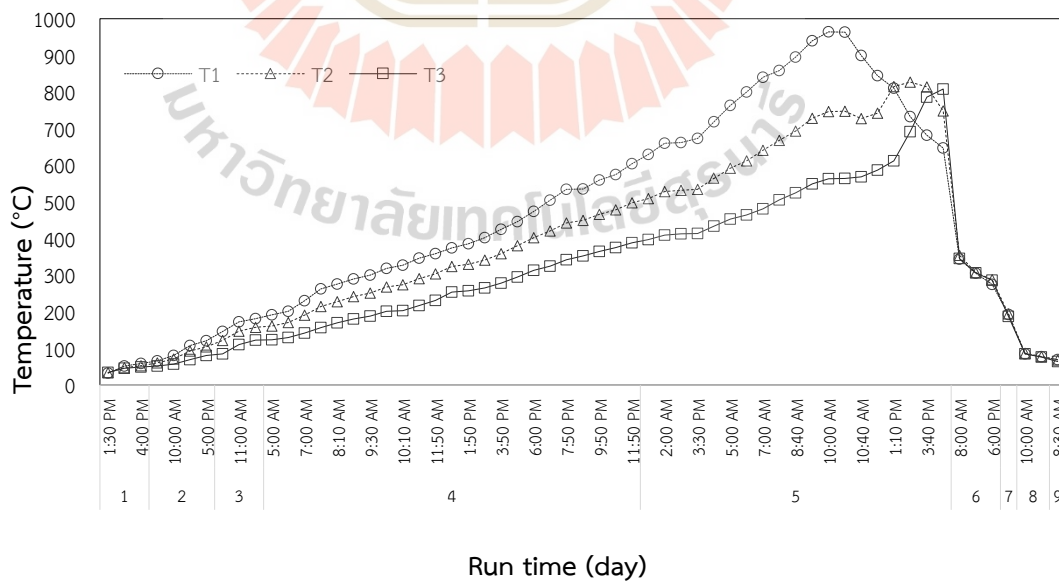
รูปที่ 4- 5 องค์ประกอบเตาเผาเซรามิก/เครื่องปั้นดินเผา

#### 4.3.1.2 ผลการทดสอบนำเชื้อเพลิงขยะไปใช้กับเตาเผาเซรามิกโดยตรง

1) อุณหภูมิภายในเตา จากรูปที่ 4-6 เป็นอุณหภูมิที่ได้จากการเผาตามเวลา และอุณหภูมิที่กำหนด โดยควบคุมปริมาณการป้อนเชื้อเพลิง ในช่วงเวลาสั้น ๆ อุณหภูมิของ RDF-3 จะแกว่งมากกว่าไม้พิน เนื่องจาก RDF-3 มีค่าสารระเหยค่อนข้างมาก คาร์บอนคงตัวน้อย ค่าความร้อนสูง และความหนาแน่นต่ำ จึงทำให้เกิดการเผาไหม้ที่รวดเร็ว จะต่างจากไม้พินที่มีค่าคาร์บอนคงตัวเยอะ เลยทำให้จุดติดไฟได้นานกว่าและอุณหภูมิความเสถียรมากกว่า ควบคุมได้ง่าย



ก. การทดสอบโดยใช้ไม้พินล้วน



ข. การทดสอบโดยใช้เชื้อเพลิงผสม (ไม้พิน: RDF-3)

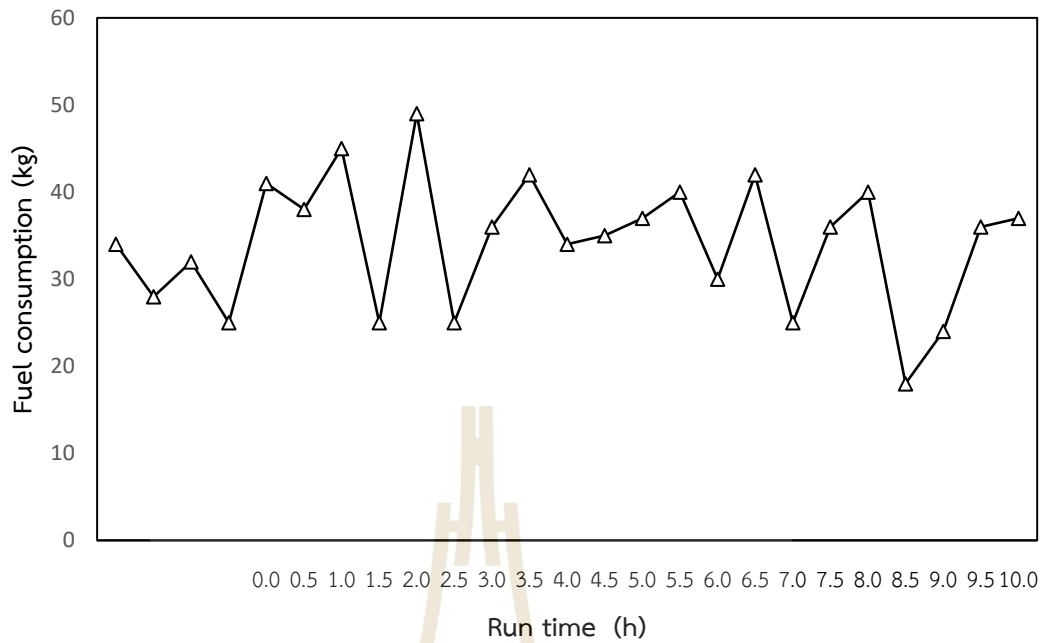
รูปที่ 4- 6 อุณหภูมิเตาเผาเซรามิกจากการใช้เชื้อเพลิง (ก.) ไม้พินล้วน (ข.) ไม้พิน : RDF-3

2) การใช้เชื้อเพลิงและพลังงาน จากตารางที่ 4-3 พบว่าการใช้เชื้อเพลิงทั้งหมดค่อนข้างใกล้เคียงกัน เนื่องด้วยระยะเวลาการทำงานที่ยาว การป้อนเชื้อเพลิงขยะในช่วงเร่งอุณหภูมิอาจจะไม่มีผลต่อการใช้เชื้อเพลิงมากนักในหน่วย kg แต่เมื่อเทียบกับในช่วงเร่งอุณหภูมิ จะเห็นได้ว่าการใช้ไม้ฟืนลดลง 17 wt. % การใช้เชื้อเพลิงทั้งหมดลดลง 2.3 wt. % เนื่องจาก RDF มีสมบัติทางพลังงานที่ดีกว่าไม้ฟืน จึงทำให้มีการใช้เชื้อเพลิงลดลงเมื่อใช้ RDF ร่วมด้วย ซึ่งสอดคล้องกับ J. Hongrapipat et al. (2022) ที่ใช้ RDF ร่วมกับไม้สับในการผลิตพลังงานความร้อนโดยใช้กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน แต่เมื่อเทียบในเชิงการใช้พลังงานแล้ว เมื่อมีการใช้ RDF-3 ร่วมด้วย จะมีการใช้พลังงานเพิ่มขึ้น 3.2% ในส่วนการใช้เชื้อเพลิงและพลังงาน ดังรูปที่ 4-7 และ 4-8 พบว่าการใช้ไม้ฟืนล้วน มีอัตราการป้อนค่อนข้างเสถียรกว่าการใช้ไม้ผสม RDF-3 ถ้าเทียบในเชิงพลังงานที่ใช้ จะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน แต่จะมีบางช่วงที่การป้อนเชื้อเพลิงผสม มีการป้อนไม้สูงกว่าช่วงอื่นมาก เนื่องจากการป้อน RDF-3 ร่วมอุณหภูมิจะขึ้น-ลง เร็ว ทำให้บางช่วงอุณหภูมิขึ้นสูงเลยลดปริมาณไม้ แต่พออุณหภูมิลดลงมาก เลยต้องป้อนไม้มากตามไปด้วย แต่โดยเฉลี่ยรวมแล้ว การใช้เชื้อเพลิงและพลังงานของทั้ง 2 สัดส่วนค่อนข้างใกล้เคียงกัน

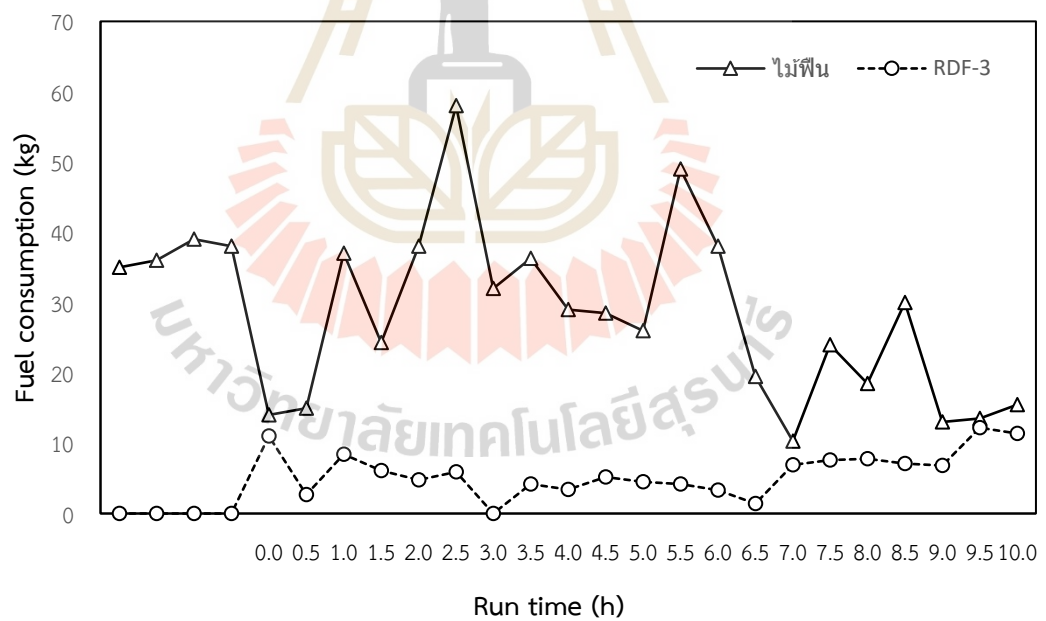
ตารางที่ 4- 3 ผลการทดสอบใช้เชื้อเพลิง RDF-3 ร่วมกับไม้ฟืน

ลำดับ	พารามิเตอร์	เชื้อเพลิง			
		ไม้ล้วน	ไม้ฟืน : RDF-3		
			ไม้ฟืน	RDF-3	รวม
1	การใช้เชื้อเพลิงทั้งหมด (kg w.b.)	2,977	2,894	125	3,019
2	การใช้เชื้อเพลิงทั้งหมด (kg d.b.)	2,735	2,658	108	2,766
3	การใช้พลังงานทั้งหมด (MJ, d.b.)	52,306	46,701	2,785	49,486
4	การใช้เชื้อเพลิงช่วง Heat up (kg w.b.)	735	569	125	694
5	สัดส่วนโดยเฉลี่ย (Heat up) (wt. % d.b.)	100	82.8	17.2	100
6	การใช้เชื้อเพลิงช่วง Heat up (kg d.b.)	675	522	108	630
7	การใช้พลังงานช่วง Heat up (MJ, d.b.)	13,880	11,543	2,785	14,328
8	การใช้เชื้อเพลิงสูงสุดช่วง Heat up (kg/0.5 h w.b.)	49	58	12.20	70.2
9	การใช้เชื้อเพลิงสูงสุดช่วง Heat up (kg/0.5 h d.b.)	45	53.28	10.52	63.8
10	การใช้พลังงานสูงสุดช่วง Heat up (MJ/0.5 h d.b.)	791	936	131	1067
11	การใช้เชื้อเพลิงเฉลี่ยช่วง Heat up (kg/0.5 h w.b.)	35	27.1	5.95	33.1
12	การใช้เชื้อเพลิงเฉลี่ยช่วง Heat up (kg/0.5 h d.b.)	32.15	24.89	5.13	30.02
13	การใช้พลังงานเฉลี่ยช่วง Heat up (MJ/0.5 h d.b.)	565	437	132	569





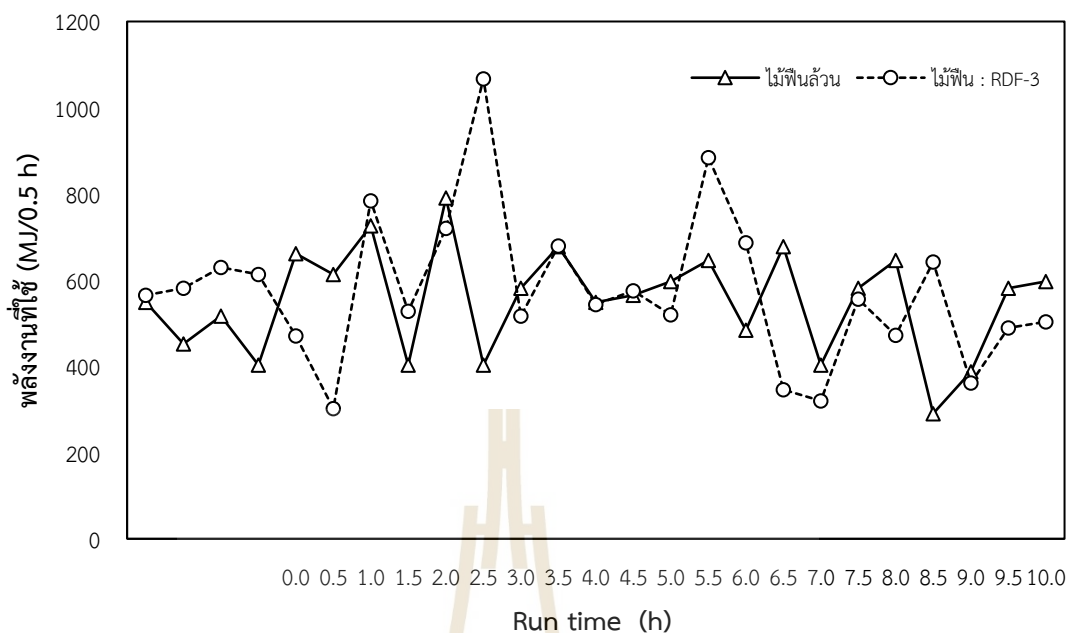
ก. การทดสอบโดยใช้เชื้อเพลิงไม้พินล้วน



ข. การทดสอบโดยใช้เชื้อเพลิงผสม (ไม้พิน: RDF-3)

รูปที่ 4- 7 การใช้เชื้อเพลิงจากการทดสอบใช้ (ก.) ไม้พินล้วน (ข.) ไม้พิน : RDF





รูปที่ 4- 8 การใช้พลังงานจากการทดสอบใช้ (ก.) ไม้พินล้วน (ข.) ไม้พิน: RDF

3) ผลการวิเคราะห์สมบัติเถ้า จากตารางที่ 4-4 พบว่าปริมาณเถ้าที่เกิดขึ้นมีสัดส่วนใกล้เคียงกันทั้งสองเชื้อเพลิง โดยสัดส่วนที่มีการผสม RDF-3 จะมีเถ้ามากกว่า เนื่องจากปริมาณเถ้าในองค์ประกอบแบบประมาณของเชื้อเพลิง RDF-3 มีมากถึง 8.87 wt. % d.b. ส่วนไม้พินมีแค่ 0.73 wt. % d.b. ในส่วนองค์ประกอบแบบประมาณของเถ้า มีสัดส่วนเถ้าของไม้พินล้วน 85.67 wt. % d.b. ไม้พิน: RDF มีสัดส่วนเถ้า 87.87 wt. % d.b. ไม้พิน : RDF-3 มีค่ามากกว่า ค่าสารระเหย ไม้พิน: RDF-3 มีค่ามากกว่าเช่นเดียวกัน ค่าคาร์บอนคงตัว ไม้พินล้วนจะมีค่ามากกว่า ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับผลวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณของเชื้อเพลิง ในส่วนค่าองค์ประกอบแบบแยกธาตุ จะเห็นได้ว่าปริมาณคาร์บอนคงตัวเหลือเพียง 5.119 และ 3.064 wt. % d.b. ตามลำดับ ส่วนค่าอื่น ๆ มีค่าน้อยมาก ซึ่งโดยรวมแล้วทั้งสองเชื้อเพลิงมีการเผาไหม้ได้ดี

ตารางที่ 4- 4 ผลการวิเคราะห์สมบัติเถ้าถ่าน (Ash and Unburned carbon)

การวิเคราะห์	พารามิเตอร์	เชื้อเพลิงที่ใช้ป้อน	
		ไม้พินล้วน	ไม้พิน: RDF-3
Proximate Analysis (% wt. db.)	Ash (A)	85.67	87.87
	Volatile Matter (VM)	4.72	6.95
	Fixed Carbon (FM)	9.61	5.18
Ultimate Analysis (% wt. d.b.)	Carbon (C)	5.12	3.06
	Hydrogen (H)	N.D.	1.81
	Nitrogen (N)	N.D.	N.D.
	Sulphur (S)	0.48	0.10
Ash (Unburned Carbon)	Ash content (kg d.b.)	76.40	84.80
	Ash rate (wt. % d.b.)	2.79	2.96
	Ash density (kg/m <sup>3</sup> , d.b.)	732	779
	Combustion eff. (%)	99.92	99.47

N.D. = Not detected

4) ประสิทธิภาพการเผาไหม้ การเผาไหม้โดยใช้ไม้พินล้วนมีประสิทธิภาพอยู่ที่ 99.92 % ส่วนการเผาไหม้โดยใช้เชื้อเพลิงผสม ไม้: RDF-3 มีประสิทธิภาพการเผาไหม้อยู่ที่ 99.47 % ซึ่งน้อยกว่าไม้ล้วนเล็กน้อย เนื่องด้วย RDF-3 มีสัดส่วนเถ้าที่ค่อนข้างเยอะกว่าไม้ จึงทำให้ส่วนของเถ้าถ่านมีปริมาณเยอะกว่า แต่โดยรวมทั้งสองเชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพการเผาที่ตีเทียม

5) ผลการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบก๊าซเผาไหม้ จากตารางที่ 4-5 ผลพบว่าเมื่อมีการป้อน RDF-3 ร่วมกับไม้พิน ออกซิเจนที่เหลือจากการเผาไหม้จะมีค่าลดลงถึง 82 % เนื่องจากตรงปากเตามีขนาดเล็ก เวลาจะป้อน RDF-3 จะต้องยัดเข้าไปในช่องว่าง ทำให้ต้นทางเข้าของอากาศจึงมีอากาศส่วนเกินน้อยลง แต่โดยรวมแล้วองค์ประกอบก๊าซผ่านเกณฑ์ที่มาตราฐานกำหนด

ตารางที่ 4- 5 ผลวิเคราะห์ห้องค์ประกอบก๊าซเผาไหม้

พารามิเตอร์	เชื้อเพลิงที่ใช้ป้อน		STD. <sup>a</sup>
	ไม้พิน	ไม้พิน : RDF-3	
อัตราการไหลเชิงปริมาตรลมร้อน, V (m <sup>3</sup> /h)	565	531	N/A
อุณหภูมิลมร้อนตำแหน่งปล่องควัน (°C)	182	230	300
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์, CO <sub>2</sub> (% vol.)	7.04	18	N/A
ก๊าซออกซิเจนที่เหลือจากการเผาไหม้, O <sub>2</sub> (% vol.)	13.88	2.51	N/A
ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์, CO (% vol.)	< 0.1	< 0.1	690 <sup>a</sup>
ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์, SO <sub>2</sub> (ppm)	< 0.1	< 0.1	60 <sup>a</sup>
ก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน, NO <sub>x</sub> as NO <sub>2</sub> (ppm)	59	34	200 <sup>a</sup>

STD., Standard: <sup>a</sup>กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (2549)



ก. ไม้ท่อนใหญ่ใช้อุ่นเตา



ข. ไม้ท่อนสั้นป้อนหน้าเตา



ค. เศษไม้ป้อนหน้าเตา



ง. ไม้ยาวป้อนหน้าเตา



จ. ไม้ยาวใช้ไล่ไฟด้านข้าง



ฉ. บรรจุ RDF-3 ใส่ถุง



ช. ป้อน RDF-3 ร่วมกับไม้ฟืน



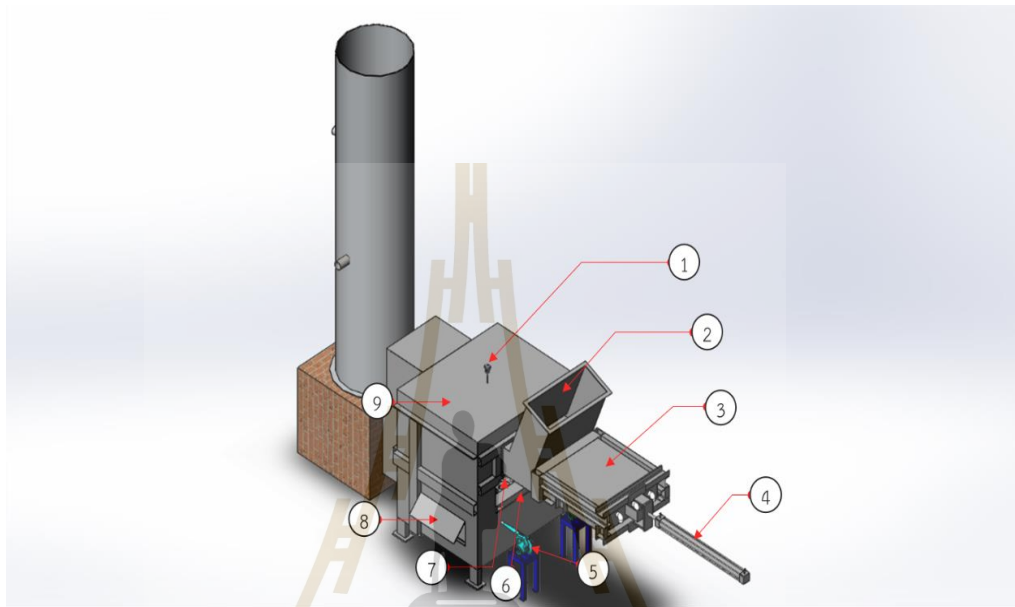
ซ. จุดวัดมลพิษก๊าซไอเสีย

รูปที่ 4- 9 เชื้อเพลิงและการเก็บข้อมูลปริมาณการใช้เชื้อเพลิง



### 4.3.2 การออกแบบและสร้างระบบเผาไหม้

ตารางที่ 4-6 และรูปที่ 4-10 เป็นการออกแบบและสร้างระบบเผาไหม้เพื่อให้มีความเหมาะสมและสมรรถนะในการเดินระบบ ได้แก่ ห้องเผาไหม้ ระบบป้อนเชื้อเพลิงขยะ ระบบควบคุมอากาศ ระบบถ่ายเถ้า



ก. ผลการออกแบบเตาเผาไหม้



ข. ผลการสร้างเตาเผาไหม้

รูปที่ 4- 10 ผลการออกแบบและสร้างเตาเผาไหม้

#### ตารางที่ 4- 6 องค์ประกอบเตาเผาไหม้

ลำดับ	องค์ประกอบเตาเผาไหม้
1.	จุดวัดอุณหภูมิ ประกอบด้วยภายในห้องเผาและท่อทางออกลมร้อน
2.	Hopper feeder สำหรับป้อนเชื้อเพลิงขยะ
3.	Stoker สำหรับดันเชื้อเพลิงขยะเข้าด้านใน
4.	Cylinder
5.	Blower
6.	ช่องป้อนเชื้อเพลิงไม้
7.	ห้องรับรองเถ้าและถ่านเถ้า
8.	ห้องเผาไหม้

##### 4.3.2.1 ผลการออกแบบและสร้างห้องเผาไหม้

1) รูปทรงทางเดินลมร้อน ผลจากการออกแบบและสร้าง จะได้ทางเดินลมร้อนแบบไหลลง โดยเปลวไฟจะไหลขึ้นตามธรรมชาติก่อน จากนั้นค่อยม้วนตัวลงด้านล่างเข้าปากเตาเผา ลักษณะนี้จะทำให้การเผาไหม้เป็นไปตามธรรมชาติ เกิดการไหลแทนที่ของอากาศด้านล่างได้ดี เปรียบเทียบกับการทำทางเดินลมร้อนด้านล่างโดยตรงแล้ว จะมีสมรรถนะในการผลิตความร้อนได้มากกว่า เนื่องจากทางเดินลมร้อนด้านล่าง เปลวไฟจะถูกบังคับให้ม้วนลงด้านล่างเลย ทำให้การไหลของอากาศมาจากด้านบน ส่วนใต้ตะแกรงอากาศจะไหลผ่านไปยังปล่องไอเสียเลย ทำให้อุณหภูมิที่ได้ค่อนข้างต่ำกว่า จึงปรับช่องทางออกให้อยู่ด้านบน เพื่อให้เกิดการเผาไหม้ตามธรรมชาติและอากาศสามารถเข้ามาทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของเชื้อเพลิงได้มากขึ้น ซึ่งเมื่อทดสอบกับปล่องที่จำลองขึ้น พบว่ามีการเผาไหม้ที่ดีขึ้น อุณหภูมิการเผาไหม้สูงกว่าในแบบแรก แต่เมื่อนำไปทดสอบกับเตาเผาเซรามิก พบว่าการพาความร้อนภายในเตาเผาเซรามิกเกิดขึ้นได้น้อยมาก เลยทำให้ลมร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ในเตาเผาไหม้ ไม่สามารถไหลเข้าไปในเตาเผาเซรามิกได้เต็มที่

ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการเผาไหม้โดยตรงและนำเถ้าถ่านเข้าด้านในเตาเผาเซรามิกเพื่อรักษาความร้อน ตามรูปแบบการเผาแบบดั้งเดิม เนื่องจากเถ้าถ่านที่เหลือส่วนมากเป็นเถ้าและคาร์บอนคงตัว ซึ่งมีสมบัติที่ทำให้การเผาไหม้มีความเสถียรภาพ จึงปรับปรุงเป็นระบบท่อทางออกเป็นแบบผสม คือ มีช่องทางออกด้านล่างเหมือนในแบบที่ 1 (รูปที่ 4-11 ก.) และตัดตะแกรงออกเพื่อสามารถดันเถ้าถ่านและเชื้อเพลิงเข้าด้านในได้ ส่วนในแบบที่ 2 (รูปที่ 4-11 ข.) จะคงปล่องท่อทางออก Flue gas ด้านบนไว้คงเดิม เพื่อให้เกิดทิศทางการเผาไหม้ตามธรรมชาติ ดังนั้นจะได้รูปแบบห้องเผาไหม้แบบที่ 3 (รูปที่ 4-11 ค.) เป็นรูปแบบผสม





ก. รูปทรงและทางเดินลมร้อนจากการสร้างและทดสอบครั้งที่ 1



ข. รูปทรงทางเดินลมร้อนจากการสร้างและทดสอบครั้งที่ 2



ค. รูปทรงทางเดินลมร้อนจากการสร้างและทดสอบครั้งที่ 3

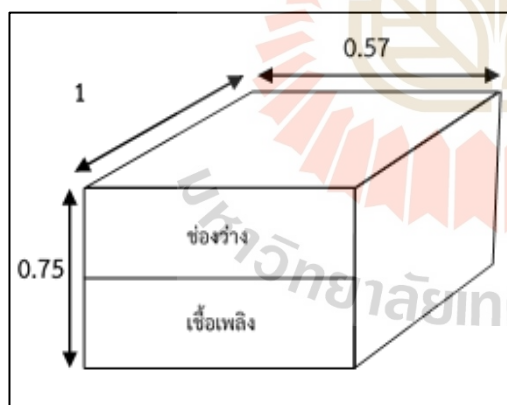
รูปที่ 4- 11 รูปทรงและทางเดินลมร้อน (ก.) แบบที่ 1 (ข.) แบบที่ 2 (ค.) แบบผสม

2) ขนาดห้องเผาไหม้ ผลการทดสอบใช้ RDF-3 ร่วมกับไม้พินกับเตาเผาเซรามิกโดยตรง จากตารางที่ 4-3 และรูปที่ 4-7 พบว่ามีการใช้เชื้อเพลิงสูงสุดของไม้พินและ RDF-3 อยู่ที่ 58 kg และ 12.2 kg ตามลำดับ สารระเหยเชื้อเพลิงรวม 85.22 wt. % d.b. ปริมาตรไม้พินและ RDF-3 ที่หัดตัวแล้ว 0.166 m<sup>3</sup> และ 0.027 m<sup>3</sup> จะได้ปริมาตรเชื้อเพลิงรวมอยู่ที่ 0.193 m<sup>3</sup> ปริมาตรช่องว่างชั้นต่ำ 0.193 m<sup>3</sup> จะได้ปริมาตรห้องเผาไหม้รวมค่าเผื่อ 10% เท่ากับ 0.425 m<sup>3</sup> จากปริมาตรถ้ำรวมค่าเผื่อ 0.142 m<sup>3</sup> ปริมาตรเตาเผา รวม 0.567 m<sup>3</sup> สามารถคำนวณความสูงห้องเผาไหม้ (h<sub>1</sub>) และความกว้างเตาเผาได้จากปริมาตรรวมของห้องเผาไหม้และห้องเก็บถ้ำ ซึ่งความสูงเตาเผา รวม

กำหนดให้เท่ากับ 1 m ความยาวเตาเดิม 1 m จะได้ความกว้าง  $W$  เท่ากับ 0.567 m หรือประมาณ 0.57 m<sup>3</sup> ดังนั้น  $h_1 = 0.749$  m หรือประมาณ 0.75 m ดังแสดงในตารางที่ 4-7 และรูปที่ 4-12

ตารางที่ 4- 7 ผลการออกแบบขนาดห้องเผาไหม้

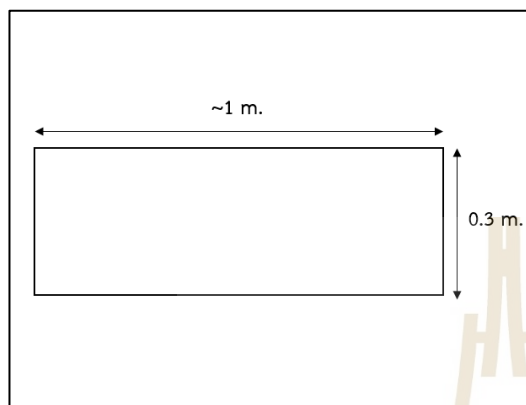
ลำดับ	รายการ	ค่าที่ได้
1	ความหนาแน่นไม้ฟืน (kg/m <sup>3</sup> )	200 - 350
2	ความหนาแน่น RDF-3 (kg/m <sup>3</sup> )	50 - 80
3	ความหนาแน่น RDF-3 @ สภาวะหดตัว ~ RDF-4 (kg/m <sup>3</sup> )	450
4	ปริมาตรไม้ฟืน (m <sup>3</sup> )	0.166
5	ปริมาตร RDF-3 @ สภาวะหดตัว (m <sup>3</sup> )	0.027
6	ปริมาตรเชื้อเพลิงรวม (m <sup>3</sup> )	0.193
7	ปริมาตรช่องว่างชั้นต่ำ คัดตามปริมาตรเชื้อเพลิง (m <sup>3</sup> )	0.193
8	ปริมาตรห้องเผาไหม้ชั้นต่ำ (m <sup>3</sup> )	0.386
9	ปริมาตรห้องเผาไหม้เผื่อ 10% (m <sup>3</sup> )	0.425
10	ความกว้างห้องเผาไหม้, $W$ (m)	0.57
11	ความยาวห้องเผาไหม้, $L$ (m) * ขนาดเตาเดิมที่นำมาปรับปรุง	1.00
12	ความสูงห้องเผาไหม้, $h_1$ (m)	0.75



รูปที่ 4- 12 ผลการออกแบบและสร้างห้องเผาไหม้

3) ระบบป้อนเชื้อเพลิงไม้และขยะ ผลการออกแบบอ้างอิงพื้นที่ช่องป้อนเตาเดิม ซึ่งจากตารางที่ 4-1 พบว่าองค์ประกอบก๊าซเผาไหม้ของเชื้อเพลิงไม้ล้วน มีออกซิเจนเหลือจากการเผาไหม้ 13.88 % ซึ่งอยู่ในช่วงที่ถือว่ามีการเผาไหม้สมบูรณ์ ซึ่งขนาดพื้นที่ปากเตาเดิมเท่ากับ 0.30 m<sup>2</sup> ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อนไม้ 0.3 m รวมค่าเผื่อ จะได้ขนาดของช่องป้อนไม้ฟืน แสดงดังรูปที่ 4-13 ก. และ ข.

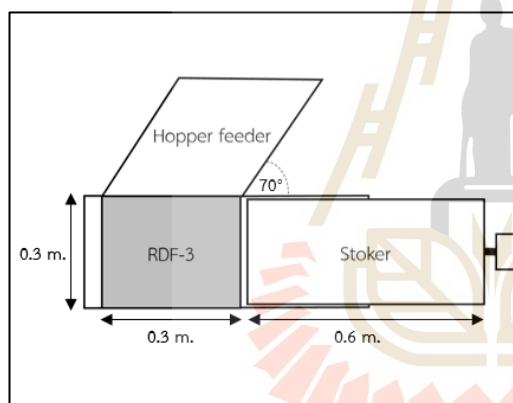
ในส่วนขนาดของช่องป้อนเชื้อเพลิงขยะ ขนาด RDF-3 ประมาณ 300 mm ความหนาแน่นขยะต่ำสุด  $50 \text{ kg/m}^3$  อัตราการป้อนประมาณ  $2 \text{ kg} / 5 \text{ min}$  จะได้ปริมาตรเชื้อเพลิงขยะที่ป้อนเท่ากับ  $0.04 \text{ m}^3$  ดังนั้นจะได้ความยาวช่องป้อนประมาณ 0.45 m



ก. ขนาดช่องป้อนไม้พิน (ออกแบบ)



ข. ลักษณะช่องป้อนไม้พิน (สร้าง)



ค. ขนาดช่องป้อนเชื้อเพลิงขยะ (ออกแบบ)

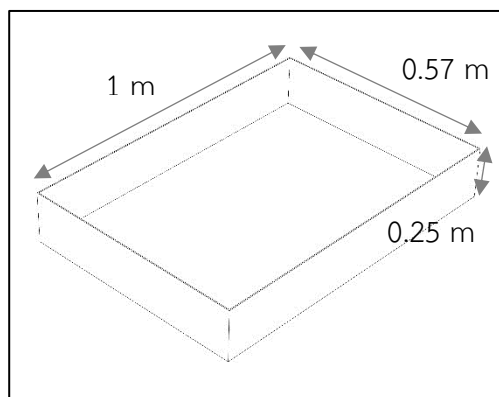


ง. ลักษณะช่องป้อนเชื้อเพลิงขยะ (สร้าง)

รูปที่ 4-13 ผลการออกแบบและสร้างระบบป้อนเชื้อเพลิง

4) ระบบถ่ายเถ้า จากปริมาณเถ้าของเชื้อเพลิงไม้พิน ดังตารางที่ 4-1 (~0.73 wt. % d.b.) และเชื้อเพลิงขยะ (RDF-3 8.87 wt. % d.b.) ตารางที่ 4-2 ปริมาณไม้และ RDF-3 ที่ใช้ต่อเตาต่อรอบการเผาอยู่ที่ประมาณ 3,000 kg และ 125 kg ตามลำดับ คำนวณน้ำหนักเถ้ารวมทางทฤษฎีได้ 26.08 kg d.b. จากการทดสอบได้ปริมาณเถ้าจริง 84.8 kg d.b. ความหนาแน่นเถ้ารวม  $779 \text{ kg/m}^3$  ปริมาตรเถ้าอยู่ที่  $0.109 \text{ m}^3$  หรือประมาณ 110 L รวมค่าเผื่อปริมาตรสำหรับเติมอากาศ 30% เท่ากับ  $0.142 \text{ m}^3$  จากปริมาตรห้องเผาไหม้ที่ได้จากการออกแบบ ที่ความกว้าง 0.57 m และความยาว 1 m จะได้ความสูงของห้องรองรับเถ้าประมาณ 0.249 m หรือประมาณ 25 cm ดังแสดงในรูปที่ 4-14





รูปที่ 4- 14 ผลการออกแบบและสร้างระบบรองรับถ้ำ

5) ระบบควบคุมอากาศ ออกซิเจนเป็นส่วนประกอบสำคัญในการเผาไหม้ การที่เชื้อเพลิงจะเผาไหม้ได้สมบูรณ์ จำเป็นต้องมีออกซิเจนที่เพียงพอหรือเกินพอ ซึ่งสามารถหาปริมาณออกซิเจนที่ต้องใช้ในรูปของอากาศได้จากปริมาณสารสัมพันธ์ สมการที่ 3-5 -3-8 ผลการคำนวณแสดงดังตารางที่ 4-8 จะได้ปริมาณอากาศที่ต้องใช้ในการเผาไหม้  $539.49 \text{ m}^3 / 0.5 \text{ h}$  ที่มีปริมาณการป้อนไม้  $58 \text{ kg} / 0.5 \text{ h}$  เชื้อเพลิงขยะ  $12.2 \text{ .kg} / 0.5 \text{ h}$  โดยมีปริมาณอากาศที่เกิดจากการพาความร้อนโดยธรรมชาติที่  $531 \text{ m}^3 / \text{h}$  ดังนั้นต้องเติมอากาศเพิ่มขึ้นต่ำ จากปริมาณการป้อนสูงสุด อยู่ที่  $547.97 \text{ m}^3 / \text{h}$  ซึ่งมีปริมาณเยอะพอสมควร เนื่องจากคิดที่การป้อนเชื้อเพลิงสูงสุด เมื่อเทียบกับ อัตราการป้อนเฉลี่ยของไม้พิน  $27.1 \text{ kg} / 0.5 \text{ h}$  เชื้อเพลิงขยะ  $5.95 \text{ .kg} / 0.5 \text{ h}$  จะได้ปริมาณอากาศที่ต้องใช้ในการเผาไหม้เท่ากับ  $510 \text{ m}^3 / \text{h}$  และไม่ต้องเติมอากาศ เนื่องจากการไหลของอากาศโดยธรรมชาติ ถือว่าเพียงพอแล้ว ซึ่งเมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ยแล้วปริมาณอากาศที่ต้องเติมเพิ่มต่างกันถึง  $569 \text{ m}^3 / \text{h}$  ซึ่งต่างกันมากพอสมควร เนื่องจากการป้อนเชื้อเพลิงจำนวนมาก เกิดแคในบางช่วงเท่านั้น ดังนั้นการคิดที่ปริมาณการป้อนสูงสุดอาจจะทำให้ต้องใช้ Blower ขนาดใหญ่ในการเติมอากาศ แต่ก็สามารถเติมออกซิเจนให้การเผาไหม้ได้เพียงพอทุก ๆ อัตราการป้อน และการคิดที่ค่าเฉลี่ยก็ทำให้ใช้ Blower ขนาดเล็กลงได้ แต่จะไม่สามารถเติมอากาศได้เพียงพอในบางช่วงที่มีการป้อนเยอะได้

ตารางที่ 4- 8 ผลการศึกษาปริมาณอากาศที่ต้องการในการเผาไหม้

Parameter	Proximate analysis (wt. % d.b.)					Total
	C	H	N	S	O	
Wood, max (wt. % d.b.)	40.705	5.332	0.261	0.123	37.093	83.51
RDF-3, max (wt. % d.b.)	11.295	1.789	0.0730	0.0180	3.330	16.50
Total ultimate (wt. % d.b.)	52.000	7.121	0.334	0.141	40.423	100.02
Element weight (kg, d.b.)	33.174	4.543	0.213	0.090	25.788	63.81
Molecular weight (g/mol)	12.011	1.008	14.007	32.06	15.999	N/A
Mol, n of element (kg-mol)	2.762	4.507	0.015	0.003	1.612	N/A
Mol, n of O <sub>2</sub> required (kg-mol)	2.762	2.253	N/A	0.003	N/A	5.02



ตารางที่ 4- 9 ผลการศึกษาปริมาณอากาศที่ต้องการในการเผาไหม้ (ต่อ)

Parameter	Proximate analysis (wt. % d.b.)					Total
	C	H	N	S	O	
Mol, n of O <sub>2</sub> from fuel (kg-mol)	N/A	N/A	N/A	N/A	0.806	0.806
Mol, n of O <sub>2</sub> from Air (kg-mol)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	4.212
Mol, n of air (kg-mol air)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	20.06.
Amount of air (m <sup>3</sup> / 0.5 h)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	449.57
Amount of air 20% excess air (m <sup>3</sup> /0.5 h)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	539.49
Amount of air 20% excess air (m <sup>3</sup> / h)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	1,079
Air from tested, natural flow (m <sup>3</sup> /h)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	531
Air to be added (m <sup>3</sup> / h)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	547.97

N/A: ไม่มีข้อมูล

6) ระบบตรวจวัดอุณหภูมิ ในระบบห้องเผาไหม้ จะมีอยู่ 2 ส่วนที่จะติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ คือ ห้องเผาไหม้และทางเดินลมร้อนออก ซึ่งเป็นลมร้อนที่จะนำไปเผาเซรามิก โดยจะใช้ Thermal couple type k ที่สามารถใช้กับอุณหภูมิสูงถึง 1,800 °C

7) วัสดุที่ใช้ มีข้อมูลจำเพาะและปริมาณการใช้ดังตารางที่ 4-9 รายการวัสดุ อุปกรณ์และข้อมูลจำเพาะในการก่อสร้างเตาเผาไหม้ โดยเป็นไปตามโครงสร้างพื้นฐานขององค์ประกอบเตาเผาไหม้ ดังแสดงในตารางที่ 4-9

ตารางที่ 4- 10 ผลการศึกษาวัสดุและข้อมูลจำเพาะที่ใช้ในการทำเตาเผาไหม้

ลำดับ	พารามิเตอร์	ข้อมูลจำเพาะ	ปริมาณ	หน่วย
1	อิฐทนไฟ (Straight: ST) 230 x 115 x 76 mm	ST 76	270	ก้อน
2	เซรามิกไฟเบอร์บอร์ด 25 x 600 x 900 mm	1,260 C/300 kg/M	8	แผ่น
3	ปูนทนไฟ 25 kg	SK-30 HM	3	กระสอบ
4	คอนกรีตทนไฟ 25 kg	Cast - 16	5	กระสอบ
5	เหล็กแผ่นรอบตัวเตา 1,219 x 2,438 x 6 mm	Grade SS400	4	แผ่น
6	เหล็กแผ่นรอบตัวเตา 1,219 x 2,438 x 4 mm	Grade SS400	1	แผ่น
7	เหล็กแผ่นรอบตัวเตา 1,219 x 2,438 x 3 mm	Grade SS400	1	แผ่น
8	เหล็กรางน้ำ 4 inch 100 x 50 x 7.5 mm	Grade SS400	1	ท่อน
9	เหล็กรางน้ำ 3 inch 75 x 40 x 7 mm	Grade SS400	1	ท่อน
10	ลูกกลิ้งล้อเลื่อน ขนาด 3 inch	SUS 304 STL 4	4	ชิ้น
11	ลูกกลิ้งล้อเลื่อน ขนาด 1 inch	SUS 304 STL 4	2	ชิ้น
12	กระบอกกลมขนาด 3 inch	1,000 mm * 3 inches	1	ท่อน

### 4.3.3 การทดสอบสมรรถนะระบบเผาไหม้

ในการทดสอบแบ่งเป็น 2 ช่วง ได้แก่ การทดสอบเสถียรภาพการผลิตพลังงานความร้อน เพื่อเป็นข้อมูลในการเลือกใช้สัดส่วนที่เหมาะสม สำหรับการทดสอบสมรรถนะร่วมกับเตาเผาเซรามิก พารามิเตอร์ที่ศึกษามีดังต่อไปนี้

#### 4.3.3.1 การทดสอบเสถียรภาพการผลิตพลังงานความร้อน

1) อุณหภูมิภายในและภายนอกเตาเผาไหม้ จากรูปที่ 4-15 พบว่า การควบคุมอุณหภูมิ ( $T_o$ ) ของแต่ละสัดส่วนค่อนข้างแตกต่างกัน ที่สัดส่วน 80:20 มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยกว่าสัดส่วนอื่น ๆ ที่สัดส่วน 90: 10 และ 70:30 อุณหภูมิค่อนข้างกว้าง และควบคุมได้ยาก S.D. 50 และ 48 ตามลำดับ เนื่องจาก 90: 10 มีสัดส่วนของค่าความร้อนต่ำสุด ความชื้นสูง จึงทำให้ช่วงแรกของการป้อนอุณหภูมิลดลง ส่วน 70:30 มีค่าความร้อนสูงสุด แต่มี Fixed carbon ต่ำ จึงถูกเผาไหม้ได้ไวกว่าสัดส่วนอื่น ในส่วนการเร่งอุณหภูมิของไม้สับลั่นในช่วงแรกทำได้ยาก เนื่องจากความชื้นสูงและค่าความร้อนต่ำ แต่ในช่วงหลังสามารถควบคุมอุณหภูมิได้นิ่งขึ้นได้ แต่ต้องเติมอากาศช่วยถึงจะเร่งอุณหภูมิให้เพิ่มขึ้นได้ ซึ่งจากการทดสอบกับเตาเผาเซรามิกตาม นนทกร ภาคภูมิ และคณะ (2565) พบว่าอัตราส่วนที่ใช้ในการเผาสอคดลองและใกล้เคียงกับสัดส่วนที่ 80:20 ซึ่งควบคุมอุณหภูมิได้ดีกว่า

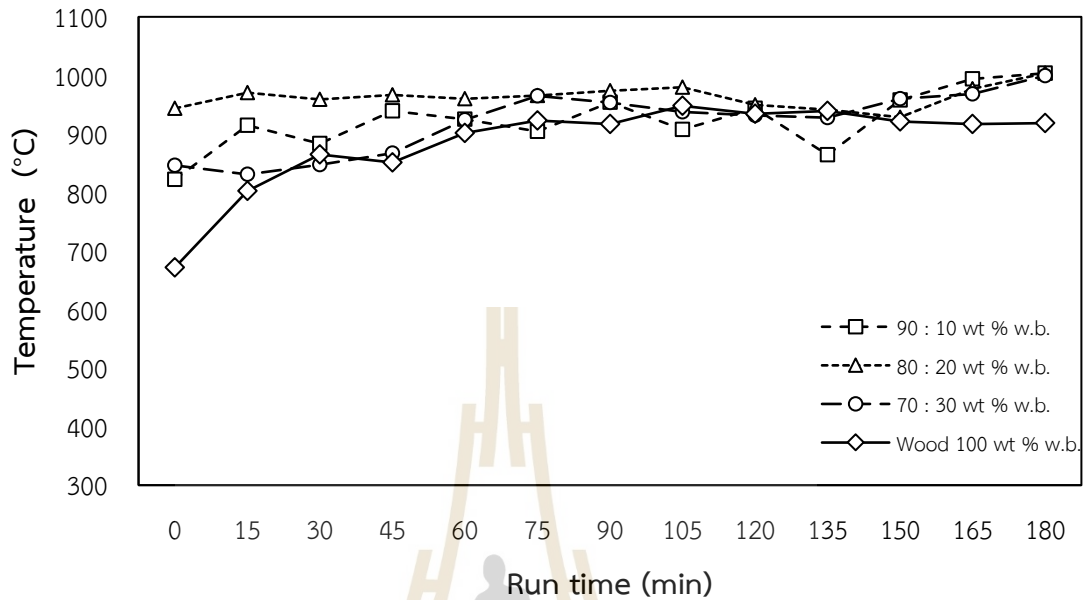
ตารางที่ 4- 11 แสดงผลการตรวจวัดอุณหภูมิภายในและช่องทางออกของเตาเผาไหม้

ลำดับ	WC: RDF-3 (wt. % w.b.)	อุณหภูมิด้านในและปล่องทางออกเตาเผาไหม้	
		$T_i$ (°C)	$T_o$ (°C)
1	100: 00	682 ± 36	885 ± 43
2	90: 10	740 ± 50	924 ± 48
3	80: 20	823 ± 52	963 ± 55
4	70: 30	745 ± 64	920 ± 73

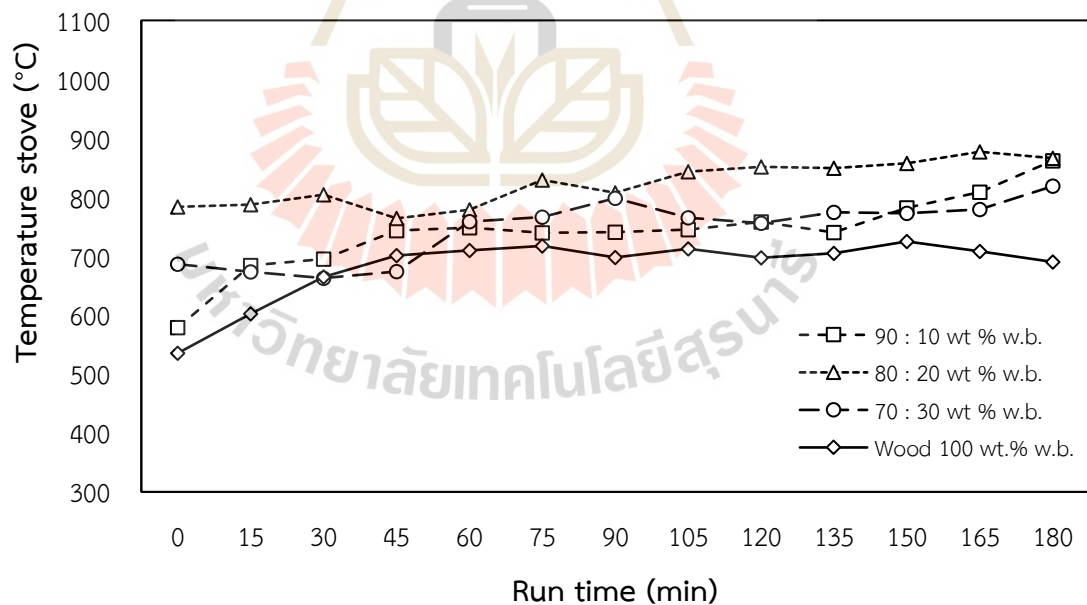
Mean ± S.D.

แต่อย่างไรก็ตาม ยังมีผลกระทบจากการป้อนเชื้อเพลิงแต่ละครั้ง เนื่องจากไม่ได้เป็นระบบป้อนแบบต่อเนื่อง เชื้อเพลิงที่ถูกป้อนเข้าใหม่จะทำให้อุณหภูมิตรอปลงได้ เมื่อมีสัดส่วนไม้สับเยอะขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากค่าความร้อนและสารระเหยต่ำกว่า การจุดติดไฟช่วงแรกจะต่ำ ต่างกับสัดส่วนที่มี RDF-3 มากกว่า ซึ่งมีค่าความร้อนและสารระเหยที่สูงกว่า การจุดติดไฟในช่วงแรกจะทำได้ดีกว่า (Aich et al., 2019) แต่ RDF-3 มี Fixed carbon ต่ำ ค่า Volatile จะถูกเผาไหม้ได้ไวกว่าไม้ ทำให้ไม่สามารถคงอุณหภูมิได้นาน ในทางกลับกันชีวมวลจะมีคาร์บอนคงตัวสูงกว่า RDF จะรักษาเสถียรภาพของอุณหภูมิจะทำได้ดีกว่า ส่วนอุณหภูมิภายในเตาเผา ( $T_i$ ) มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ค่อนข้างใกล้เคียงกัน แต่ในสัดส่วน 80:20 ยังถือว่ามีเสถียรและอุณหภูมิมากกว่า ในขณะที่การใช้ไม้สับลั่นมีอุณหภูมิภายในเตาค่อนข้างต่ำ การป้อนแต่ละครั้งยังทำให้อุณหภูมิตรอปลง เช่นเดียวกับการป้อน RDF-3 70:30 เชื้อเพลิงมีความชื้นสูงกว่าสัดส่วนอื่น ถึงแม้จะมีค่าสารระเหย

ที่สูงขึ้น แต่การจุดติดไฟในช่วงแรกของการป้อนยังทำได้ไม่ดี จึงทำให้อุณหภูมิภายในเตาตกลงทุก ๆ การป้อนเชื้อเพลิงรอบใหม่เช่นกัน



ก. อุณหภูมิภายในเตาเผาไหม้ ( $T_i$ )

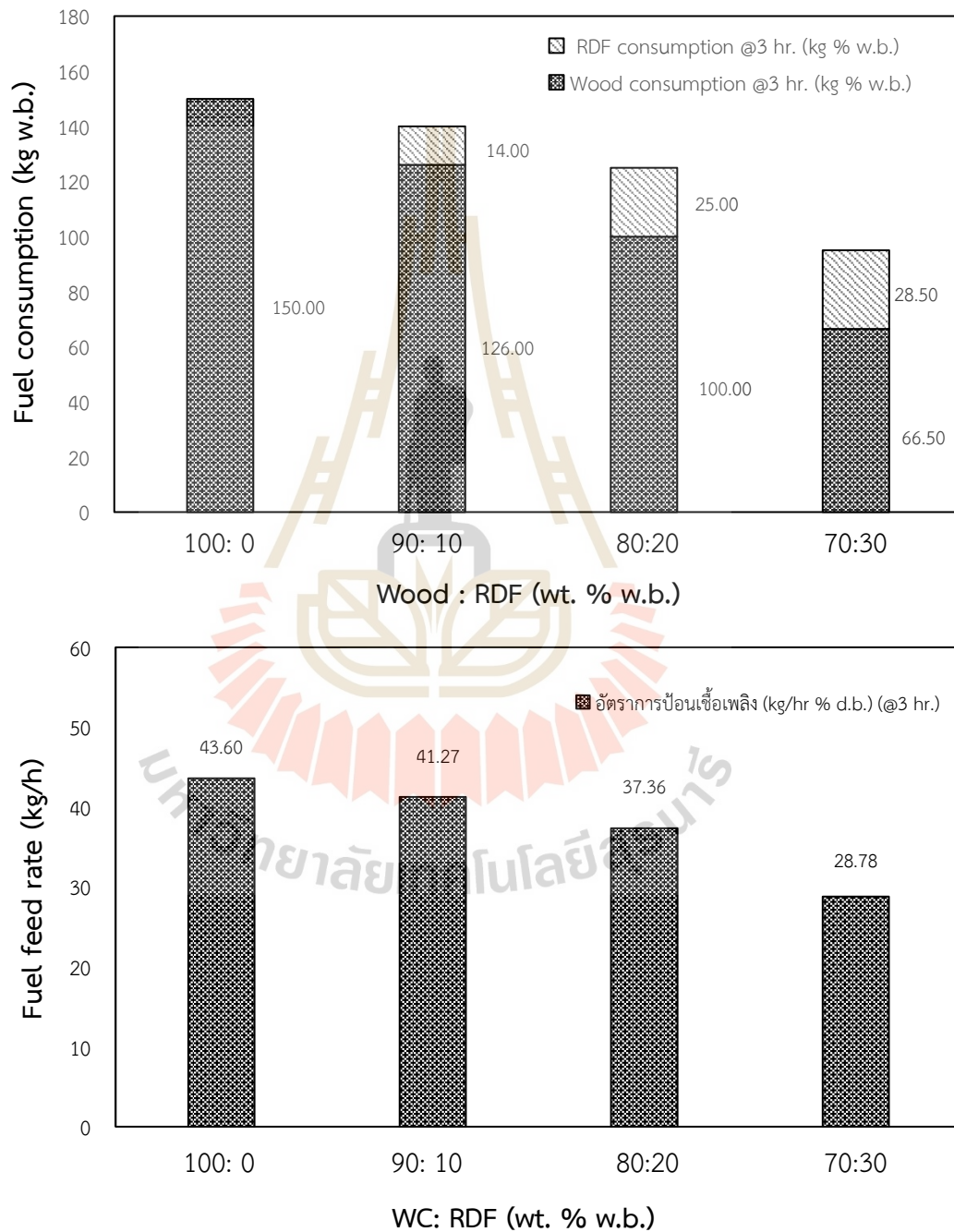


ข. อุณหภูมิที่ช่องทางออก (Flue gas,  $T_o$ )

รูปที่ 4- 15 อุณหภูมิ (ก.) ภายในเตา และ (ข.) ที่ช่องทางออก

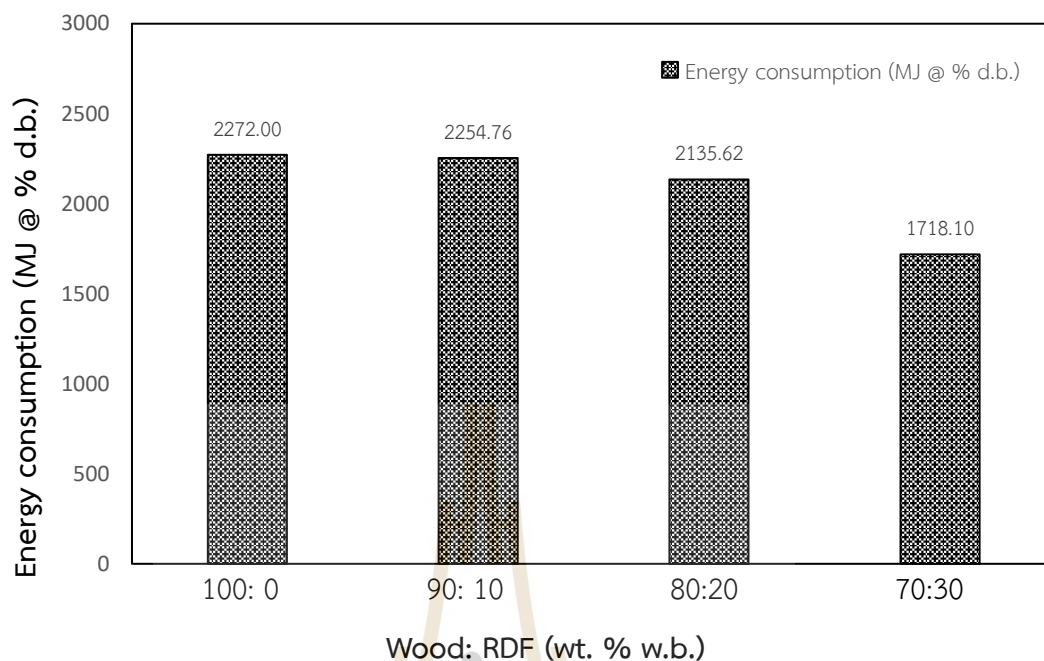
2) ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงและพลังงาน จากรูปที่ 4-16 และ 4-17 พบว่า เมื่อป้อน RDF ในสัดส่วนที่มากขึ้น มีการใช้เชื้อเพลิงและพลังงานลดลง โดยเฉพาะที่สัดส่วน 70: 30 มี

สัดส่วนการใช้เชื้อเพลิงลดลงมากที่สุด เมื่อเทียบกับการใช้ไม้ล้วนถึง 34% เนื่องจาก RDF-3 มีค่าความร้อนหรือสมบัติทางพลังงานมากกว่าไม้ การเผาไหม้เพื่อให้ได้อุณหภูมิใกล้เคียงกัน จึงทำให้การใช้ RDF ร่วมด้วย มีการใช้เชื้อเพลิงและพลังงานที่น้อยกว่าการใช้ไม้เพียงอย่างเดียว ซึ่งผลการทดสอบสอดคล้องกับงานวิจัยของ J. Hongrapipat et al. (2022) ที่ใช้ RDF ร่วมกับไม้สับในการผลิตพลังงานความร้อนโดยใช้กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน



รูปที่ 4- 16 ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงที่ (@ 3 h stable)





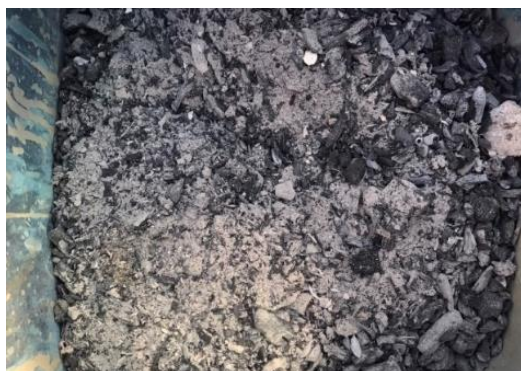
รูปที่ 4- 17 ปริมาณการใช้พลังงาน (@ 3 h stable)

3) องค์ประกอบแบบประมาณและอัตราการเกิดเถ้า (Unburn carbon) จากตารางที่ 4-11 พบว่า เมื่อป้อน RDF-3 ในการเผาไหม้ร่วมกับไม้สับ มีการเผาไหม้ที่ดีขึ้น เนื่องจากมีค่าสารระเหยในเถ้าลดลงในช่วง 3.2-1.4 wt. % db. มีปริมาณเถ้าที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากสมบัติทางกายภาพของ RDF-3 มีปริมาณเถ้ามากกว่าไม้ และมีค่าคาร์บอนคงตัวที่ลดลง สอดคล้องกับข้อมูลสมบัติของเชื้อเพลิงและ นนทกร ภาคภูมิ (2565). ซึ่งลักษณะของเถ้าในแต่ละสัดส่วนแสดงดังรูปที่ 4-18

ตารางที่ 4- 12 องค์ประกอบแบบประมาณของเถ้า (Ash and Unburned carbon)

Proximate Analysis (wt. % d.b.)	สัดส่วน WC: RDF-3 (wt. % w.b.)			
	100: 00	90: 10	80: 20	70: 30
Ash (A)	88.20 ± 2.24	92.65 ± 2.57	93.96 ± 1.02	93.92 ± 1.49
Volatile Matter (VM)	3.05 ± 0.12	1.96 ± 0.44	1.54 ± 0.30	1.40 ± 0.39
Fixed Carbon (FC)	8.75 ± 2.03	5.39 ± 2.49	4.50 ± 0.85	4.68 ± 1.14

Mean ± S.D.



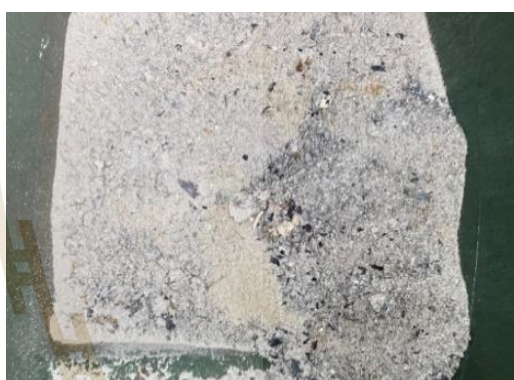
ก. 0% RDF-3



ข. 10% RDF-3



ค. 20% RDF-3



ง. 30% RDF-3

รูปที่ 4- 18 แสดงลักษณะเก่าของเชื้อเพลิงผสมทั้ง 4 สัดส่วน

4) ประสิทธิภาพการเผาไหม้ การเผาไหม้โดยใช้ไม้สับล้วนมีประสิทธิภาพอยู่ที่ 99.75% ส่วนการเผาไหม้โดยใช้เชื้อเพลิงผสม ไม้: RDF-3 ที่สัดส่วน 90: 10, 80: 20 และ 70:30 มีประสิทธิภาพการเผาไหม้อยู่ที่ 99.80%, 99.78% และ 99.71% ตามลำดับ ตามตารางที่ 4-12 ซึ่งจะเห็นได้ว่า สัดส่วนที่เป็นไม้สับล้วนและ RDF-3 มาก จะมีประสิทธิภาพการเผาไหม้น้อยกว่า เนื่องด้วยในไม้สับล้วนมีคาร์บอนคงตัวมากที่สุด ส่วนใน RDF-3 มีสัดส่วนเก่าในเชื้อเพลิงมาก จึงทำให้มีประสิทธิภาพการเผาไหม้น้อยกว่า แต่อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพการเผาไหม้โดยรวมทั้ง 4 สัดส่วนถือว่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ มีประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่ดีมาก

ตารางที่ 4- 13 แสดงผลการคำนวณประสิทธิภาพการเผาไหม้แต่ละสัดส่วน

Wood : RDF-3 (wt.% : wt.%)	Yield of char (wt.% d.b.)	Combustion efficiency (%)
100 : 0	4.25	99.75
90 : 10	4.31	99.80
80 : 20	4.99	99.78
70 : 30	5.43	99.71

5) องค์ประกอบก๊าซเผาไหม้ จากตารางที่ 4-13 พบว่า การเพิ่มสัดส่วนการป้อน RDF-3 มีผลทำให้ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์เพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ย (Akdağ *et al*, 2016). แต่ยงถือว่ามิต้าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่ามาตรฐาน ซึ่งทุกสัดส่วนมีปริมาณออกซิเจนที่เหลือจากการเผาไหม้ค่อนข้างสูง ในส่วนปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์และไนโตรเจนไดออกไซด์มีปริมาณที่น้อย สอดคล้องกับสมบัติทางเคมีของเชื้อเพลิงและ Chen *et al*. (2019) ซึ่งพบว่าเมื่อปริมาณออกซิเจนคงเหลือในระดับ 20.98-21.15% ปริมาณของ CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> as NO<sub>2</sub> จะค่อนข้างน้อย ซึ่งโดยรวมแล้วในทุกสัดส่วนมีการเผาไหม้ที่ค่อนข้างสมบูรณ์

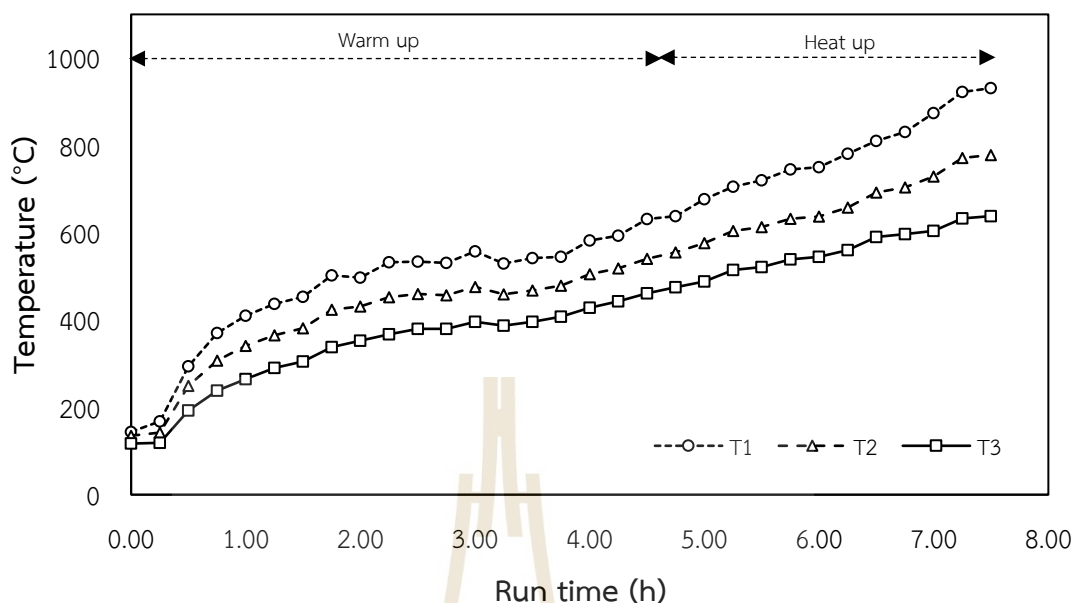
ตารางที่ 4- 14 แสดงผลการตรวจวัดองค์ประกอบก๊าซเผาไหม้

องค์ประกอบก๊าซ เผาไหม้	สัดส่วน WC: RDF-3 (wt. % w.b.)				STD.
	100: 00	90: 10	80: 20	70: 30	
O <sub>2</sub> (% vol.)	21.12 ± 0.07	21.05 ± 0.16	20.98 ± 0.12	21.15 ± 0.11	N/A
CO (ppm)	1.06 ± 1.33	1.11 ± 1.73	0.84 ± 1.06	3.80 ± 2.42	690 <sup>a</sup>
NO <sub>x</sub> as NO <sub>2</sub> (ppm)	0.00 ± 0.00	0.01 ± 0.01	0.24 ± 0.10	0.17 ± 0.49	200 <sup>a</sup>
CO <sub>2</sub> IR (% vol.)	0.09 ± 0.06	0.14 ± 0.14	0.17 ± 0.10	0.18 ± 0.24	N/A
SO <sub>2</sub> (ppm)	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.05 ± 0.09	0.00 ± 0.00	60 <sup>a</sup>

Mean ± S.D, STD: Stand Dard: <sup>a</sup>กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (2549).

#### 4.3.3.2 การทดสอบเตาเผาไหม้ร่วมกับเตาเผาเซรามิก

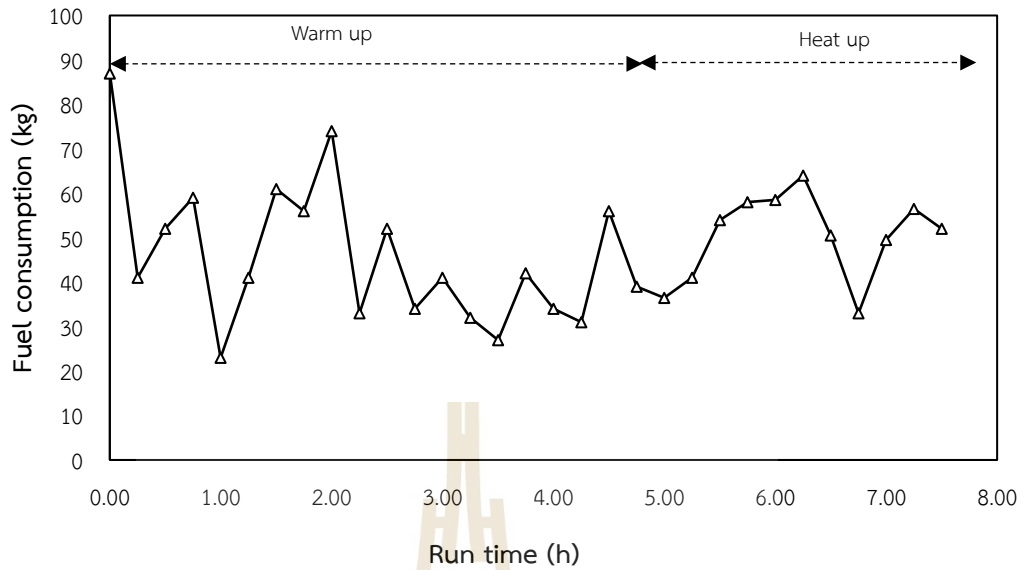
1) อุณหภูมิภายในและภายนอกเตาเผาไหม้ การทดสอบเผาไหม้ร่วมกับเตาเผาเซรามิก จากรูปที่ 4-19 พบว่า การใช้ระบบเตาเผาไหม้ร่วมกับเตาเผาเซรามิก สามารถผลิตความร้อนได้เทียบเท่ากับเตาเผาเซรามิกแบบดั้งเดิม โดยใช้อุณหภูมิในช่วง 930-970 °C ของตำแหน่งที่ 1 ในเตาเซรามิกเป็นตัวกำหนด โดยอุณหภูมิของเตาเผาไหม้จะไม่สอดคล้องกับเตาเผาเซรามิก เนื่องจากเมื่อเผาไหม้ได้ระยะหนึ่งแล้วจะดันเข้าด้านในเตาเผาเซรามิก เพื่อให้สามารถรักษาอุณหภูมิและไม่ให้อุณหภูมิภายในเตาแกว่งเกินไป จึงทำให้อุณหภูมิช่วงท้าย ๆ ของเตาเผาไหม้จะลดลง ซึ่งโดยภาพรวม การใช้ RDF-3 ร่วมกับชีวมวล ในสัดส่วน 80: 20 มีความสามารถในการเผาไหม้ให้ได้อุณหภูมิที่กำหนด



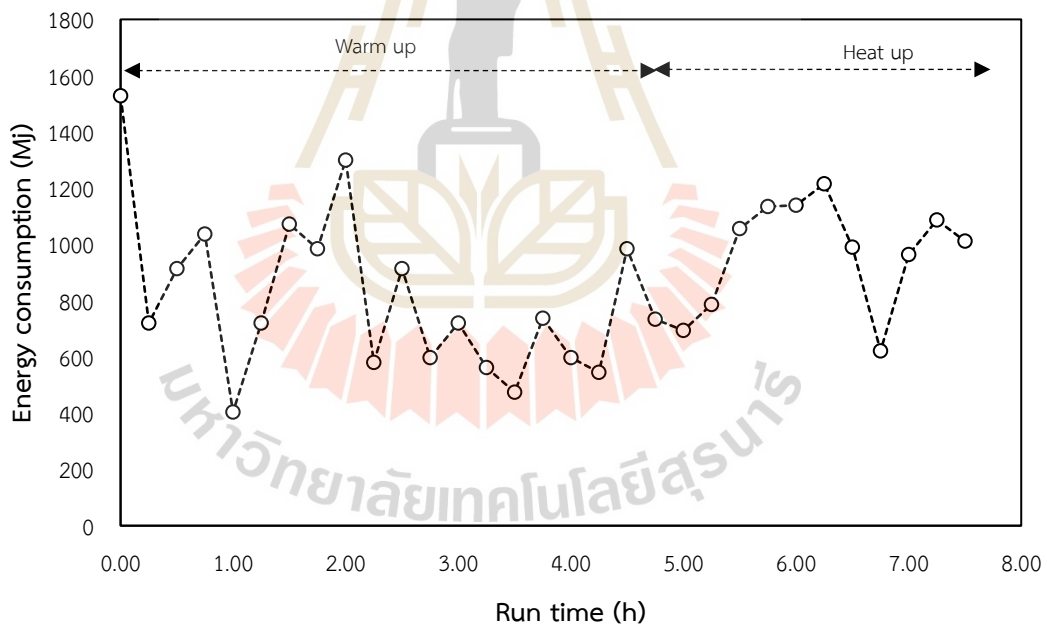
รูปที่ 4-19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแต่ละตำแหน่งกับเวลาในเตาเผา  
ภาชนะเครื่องปั้นดินเผา

2) ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงและพลังงาน จากรูปที่ 4-19 และ 4-20 จะเห็นได้ว่า ในช่วงการอุ่นเตา ใช้เชื้อเพลิงเฉลี่ยน้อยกว่าช่วง Heat up แต่บางช่วงจะมีการใช้เยอะกว่า เพราะอุณหภูมิยังไม่สม่ำเสมอ หลังจากนั้นการใช้เชื้อเพลิงและพลังงานเฉลี่ยจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากในช่วง Heat up มีการใช้เชื้อเพลิงขยะร่วมด้วย ซึ่งมีค่าความร้อนสูงกว่าไม้ ดังนั้นจึงทำให้มีการใช้พลังงานเพิ่มขึ้น โดยในช่วงอุ่นเตาใช้พลังงานเฉลี่ย 3,240 MJ/h เทียบกับช่วง Heat up ที่มีการป้อน RDF-3 ร่วมด้วย ใช้พลังงานเฉลี่ย 3,811 MJ/h ลดลงร้อยละ 17.60 ซึ่งในการทดสอบนี้ ทดสอบกับเตาเปล่า ไม่มีผลิตภัณฑ์อยู่ด้านใน และเมื่อเทียบกับช่วง Heat up ของการเผาเครื่องปั้นดินเผา ที่ใช้ไม้ล้วน จะใช้พลังงานเฉลี่ยเพียงแค่ 1,200 MJ/h ส่วนการทดสอบใช้ RDF-3 โดยตรงกับเตาเผาเซรามิกใช้พลังงานอยู่ที่ 1,259 MJ/h แต่ทั้งสองการทดสอบ มีผลิตภัณฑ์อยู่ด้านในเตาเผาด้วย ซึ่งมีข้อแตกต่างที่ทำให้รักษาความร้อนได้ดีกว่าการเผาในเตาเปล่า ดังนั้น ระบบเผาไหม้ที่ใช้ร่วมกับเตาเผาเซรามิก จึงใช้พลังงานมากกว่า





รูปที่ 4- 20 แสดงความสัมพันธ์ของการใช้เชื้อเพลิงเทียบกับเวลาในการเดินระบบ



รูปที่ 4- 21 แสดงความสัมพันธ์ของการใช้พลังงานเทียบกับเวลาในการเดินระบบ

3) องค์ประกอบแบบประมาณและอัตราการเกิดเถ้าถ่าน (Ash and Unburned carbon) จากตารางที่ 4-13 พบว่า อัตราการเกิดเถ้า อยู่ที่ร้อยละ 6.38 มีปริมาณเถ้าในองค์ประกอบแบบประมาณอยู่ที่ร้อยละ 93.78 สารระเหยร้อยละ 1.66 และคาร์บอนคงตัวร้อยละ 4.56 ซึ่งถือได้ว่าการเผาไหม้ที่ดีมาก และมีผลใกล้เคียงกับการทดสอบโดยตรงและทดสอบหาความเสถียรภาพ

ตารางที่ 4- 15 องค์ประกอบแบบประมาณของเถ้าถ่าน (Ash and Unburned carbon)

Proximate Analysis (wt. % d.b.)	WC: RDF-3
	(80:20 wt. % w.b.)
Ash (A) (wt. % d.b.)	93.78 ± 0.12
Volatile Matter (VM) (wt. % d.b.)	1.66 ± 0.03
Fixed Carbon (FC) (wt. % d.b.)	4.56 ± 0.11

Mean ± S.D.

4) ประสิทธิภาพการเผาไหม้ การเผาไหม้โดยใช้เชื้อเพลิงผสม 80: 20 มีประสิทธิภาพการเผาไหม้อยู่ที่ร้อยละ 99.84 พบว่ามีความใกล้เคียงกับการทดสอบหาความเสถียรภาพ

5) องค์ประกอบก๊าซเผาไหม้ จากตารางที่ 4-15 พบว่า ก๊าซเผาไหม้ทุกค่ามีการเผาไหม้ที่ค่อนข้างสมบูรณ์ ผ่านเกณฑ์มาตรฐานทุกตัว ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างช่วงอุ่นเตา และช่วงเร่งอุณหภูมิ จะมีปริมาณก๊าซออกซิเจนคงเหลือจากการเผาไหม้ลดลงเล็กน้อย เมื่อมีการป้อน RDF-3 ร่วมกับไม้พินในช่วง Heat up จะเกิดการคาร์บอนนอกไซด์มากในบางช่วง ซึ่งมีปริมาณต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากช่วงที่การป้อนเชื้อเพลิงในปริมาณมาก จะทำให้ช่องว่างสำหรับอากาศน้อยลง ในส่วนปริมาณ  $\text{NO}_x$ ,  $\text{NO}_2$  และ  $\text{SO}_2$  มีปริมาณน้อยมากของทั้งสองช่วง เนื่องจากในเชื้อเพลิงมีปริมาณไนโตรเจนและซัลเฟอร์ค่อนข้างน้อย

ตารางที่ 4- 16 แสดงผลการตรวจวัดองค์ประกอบก๊าซเผาไหม้

Flue Gas Composition	Wood: RDF3 (~80:20) Wt. % w.b.		STD.
	Warm up	Heat up	
O <sub>2</sub> (% vol.)	21.15 ± 0.25	21.04 ± 0.07	N/A
CO (ppm)	0.18 ± 0.58	68 ± 103.16	690 <sup>a</sup>
NO <sub>x as</sub> NO <sub>2</sub> (ppm)	0.00 ± 0.00	0.04 ± 0.08	200 <sup>a</sup>
CO <sub>2</sub> IR (% vol.)	0.139 ± 0.04	0.148 ± 0.03	N/A
SO <sub>2</sub> (ppm)	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	60 <sup>a</sup>

Mean ± S.D, STD is Stand Dard: <sup>a</sup> กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (2549)

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการศึกษาความเป็นไปได้เชิงเทคนิคของการนำเชื้อเพลิงขยะไปใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิก ซึ่งประกอบด้วยการศึกษาสมบัติของเชื้อเพลิง การออกแบบและสร้างเตาเผาไหม้ การทดสอบเตาเผาไหม้ สรุปผลการทดลองตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ดังนี้

##### 5.1.1 การศึกษาสมบัติและการแปรรูปเชื้อเพลิงขยะ

การศึกษาสมบัติเชื้อเพลิงขยะประเภทที่ 3 จากกระบวนการบำบัดขยะทางกลและชีวภาพ (SUT-MBT) สรุปได้ว่า RDF-2 ที่ได้จากกระบวนการ ไม่เหมาะในการนำไปเป็นเชื้อเพลิงโดยตรง จำเป็นต้องแปรรูปเป็น RDF-3 ซึ่งมีองค์ประกอบของพลาสติกกว่าร้อยละ 90 มีปริมาณ 70 wt. % d.b. ของ RDF-2 นอกจากนี้ยังมีค่าความร้อนสูง 25.79 MJ/kg มากกว่าไม้ฟืน 1.5 เท่า แต่เชื้อเพลิงขยะมีปริมาณคาร์บอนคงตัวต่ำ มีสารระเหย และเถ้าสูง การใช้เป็นเชื้อเพลิงหลักอาจจะยังไม่เหมาะสม ดังนั้นควรใช้เป็นเชื้อเพลิงเสริมในการเผาไหม้

##### 5.1.2 การศึกษาเทคโนโลยีเตาเผาภาชนะเครื่องปั้นดินเผา

เตาเผาภาชนะเครื่องปั้นดินเผา อ.ด่านเกวียน จ.นครราชสีมา เป็นเตาเผาแบบทางเดินลมร้อนไหลลง อุณหภูมิที่ใช้ 950-970 °C ระยะเวลาการเผาไหม้ 10 วัน โดยในทุกกระบวนการใช้คนในการทำงาน เชื้อเพลิงเป็นไม้ฟืนแห้งทั้งหมด โดยมีปริมาตรเตารวมอยู่ที่ 47 m<sup>3</sup> ห้องเผาไหม้ 9 m<sup>3</sup> ช่องป้อนเชื้อเพลิงและดึงเถ้าเป็นช่องเดียวกัน มีพื้นที่ 0.3 m<sup>2</sup> สมบัติโดยภาพรวม เตาเผาภาชนะเครื่องปั้นดินเผาแห่งนี้มีสมบัติที่ผ่านเกณฑ์ตามข้อกำหนดของมาตรฐานเตาเผาขยะมูลฝอย ซึ่งในเชิงข้อกำหนดสามารถใช้เชื้อเพลิงขยะเป็นเชื้อเพลิงร่วมได้

##### 5.1.3 การทดสอบเชื้อเพลิงขยะประเภทที่ 3 ร่วมกับเตาเผาภาชนะเครื่องปั้นดินเผา

การทดสอบใช้ RDF-3 ร่วมกับเตาเผาภาชนะเครื่องปั้นดินเผา สรุปได้ว่า มีสมรรถนะการเผาไหม้ที่เทียบเท่าไม้ฟืนล้วน สามารถเผาได้อุณหภูมิตามที่ต้องการ 970°C การใช้เชื้อเพลิงและพลังงานเฉลี่ยในช่วงเดียวกันน้อยกว่าการใช้ไม้ฟืนล้วน แต่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งมีสัดส่วนไม้ฟืนและ RDF-3 อยู่ที่ 82 และ 18 wt. % w.b. ตามลำดับ ประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงร้อยละ 99.47 ก๊าซไอเสียทุกพารามิเตอร์ อยู่เกณฑ์ที่กำหนดของหน่วยงานภาครัฐ แต่ยังมีความเสี่ยงในการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์จากก๊าซออกซิเจนคงเหลือจากการเผาไหม้เพียง 2.51 %vol ซึ่งลดลงจากการใช้ไม้ฟืนล้วนถึงร้อยละ 82 และการป้อน RDF-3 โดยตรงยังไม่เหมาะกับการใช้งานจริง

##### 5.1.4 การออกแบบและสร้างเตาเผาไหม้

การออกแบบเตาเผาไหม้เพื่อให้สามารถเผาไหม้ได้สมบูรณ์ทุกช่วง ต้องมีปริมาณอากาศไม่ต่ำกว่า 1,079 m<sup>3</sup>/h และมีเวลาให้ Volatile อยู่ในห้องเผาไหม้ไม่ต่ำกว่า 2 s ซึ่งห้องเผา

ไหม้ของเตาเผาภาชนะเครื่องปั้นดินเผา นั้น มีปริมาณเพียงพอที่ทำให้การเผาไหม้เสร็จสิ้นถึง 30 s ดังนั้นห้องเผาไหม้ที่ออกแบบ-สร้างตามปริมาณการใช้เชื้อเพลิงและข้อจำกัดที่มี สามารถใช้เป็นพื้นที่ในการผสมเชื้อเพลิงและทำให้ Volatile ในเชื้อเพลิงแตกตัวและถูกเผาไหม้จนหมดที่ห้องเผาไหม้เตาเผาเซรามิกได้

### 5.1.5 การทดสอบสมรรถนะเตาเผาไหม้ที่สร้างขึ้น

จากการทดสอบสมรรถนะเตาเผาไหม้ที่สร้างขึ้น ที่สัดส่วนไม้สับ: RDF 100: 0, 90: 10, 80:20, และ 70:30 สรุปได้ว่าการใช้เชื้อเพลิงขยะร่วมด้วย มีผลทำให้การใช้เชื้อเพลิงและพลังงานลดลง ที่สัดส่วน 80: 20 มีความแปรปรวนของอุณหภูมิไอเสียน้อยสุด  $963 \pm 55$  °C ทุกสัดส่วนสามารถให้พลังงานความร้อนได้อุณหภูมิตามที่กำหนด ประสิทธิภาพการเผาไหม้ทุกสัดส่วนอยู่ในช่วง 99.71-99.80 ซึ่งมีประสิทธิภาพการเผาไหม้ดีเยี่ยม ในส่วนสมบัติก๊าซเผาไหม้ ทุกสัดส่วนมีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐาน โดยการทดสอบครั้งนี้ที่สัดส่วน 80: 20 ถือเป็นสัดส่วนที่มีความเป็นไปได้ในการใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมกับไม้พินในเตาเผาภาชนะเครื่องปั้นดินเผา โดยใช้เตาเผาไหม้ที่สร้างขึ้น

### 5.1.6 การทดสอบเตาเผาไหม้ร่วมกับเตาเผาภาชนะเครื่องปั้นดินเผา

การทดสอบเตาเผาไหม้ร่วมกับเตาเผาภาชนะเครื่องปั้นดินเผา สรุปได้ว่า การใช้เชื้อเพลิงขยะร่วมกับไม้พินในสัดส่วน RDF-3 20% สามารถเผาไหม้ให้พลังงานความร้อนได้ตามอุณหภูมิที่ตามช่วงที่กำหนด อุณหภูมิสูงสุด 931 °C มีประสิทธิภาพการเผาไหม้ดีเยี่ยมร้อยละ 99.84 ก๊าซไอเสียผ่านเกณฑ์มาตรฐานทุกพารามิเตอร์ ถึงแม้ช่วงป้อน RDF จะมีก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์เพิ่มมากขึ้น รวมถึงยังสามารถป้อน RDF-3 ได้ง่ายขึ้น

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

### 5.2.1 ระบบรางเลื่อนเตาเผาไหม้

การออกแบบเตาเผาไหม้ให้มีระบบรางเลื่อน สามารถเลื่อนเตาเผาไหม้เข้า-ออกจากปากเตาเผาเซรามิกได้ จะช่วยให้สามารถดึงถ้ำถ่านออกมาได้ง่าย และการเผาไหม้ในช่วงอุ่นเตาจะสามารถใช้ไม่ท่อนใหญ่ได้ ซึ่งการใช้เชื้อเพลิงขยะ ก็จะสามารถใช้ในระยะเวลาสั้น ๆ ช่วงเร่งอุณหภูมิประมาณ 10 h เท่านั้น ถ้าหากมีระบบรางเลื่อนก็จะทำให้สะดวกต่อการทำงานได้

### 5.2.2 ระบบเติมอากาศด้านในเตาเผาเซรามิก

ออกแบบให้มีระบบเติมอากาศเพิ่มเข้าไปในเตาเผาเซรามิก เนื่องจากปากทางเข้าเตาเผามีขนาดเล็ก การเผาไหม้ส่วนใหญ่อยู่ภายในห้องเผาไหม้ด้านใน การเติมอากาศด้านนอกจึงไม่เพียงพอในช่วงที่ป้อนเชื้อเพลิงมาก ๆ หรือเร่งอุณหภูมิ

### 5.2.3 เพิ่มขนาดช่องป้อนไม้พินเตาเผาไหม้

เนื่องจากเตาเติมขนาดช่องป้อนไม้พินมีพื้นที่เท่ากับช่องป้อนเชื้อเพลิงเดิมของเตาเผาเซรามิก ซึ่งมีขนาดเล็กและป้อนไม้พินยาก จึงขอเสนอให้เพิ่มขนาดช่องป้อนเชื้อเพลิงให้กว้างกว่าเดิม เพื่อให้สามารถป้อนไม้พินได้ปริมาณเยอะ ขนาดหลากหลาย และทำได้สะดวกกว่าเดิม

5.2.4 ปรับปรุงระบบป้อนเชื้อเพลิงอัตโนมัติ เพื่อป้องกันอากาศไม่เพียงพอในช่วงแรกของการป้อนเชื้อเพลิง จำเป็นต้องมีการป้อนเชื้อเพลิงให้ต่อเนื่อง และสอดคล้องกับปริมาณอากาศที่



เพียงพอต่อการเผาไหม้สมบูรณ์ (A/F) เนื่องจากระบบป้อนเชื้อเพลิงที่ออกแบบไว้เป็นแบบ Stocker ซึ่งจะมี Gap เวลาระหว่างการเลื่อนเข้าออก ทำให้ยากต่อการป้อนแบบต่อเนื่อง และส่งผลทำให้เกิดควันดำในช่วงแรก ซึ่งอากาศไม่เพียงพอ

#### 5.2.4 การศึกษาความเป็นไปได้ทางด้านเศรษฐศาสตร์

งานวิจัยนี้ยังขาดการศึกษาความเป็นไปได้ทางด้านเศรษฐศาสตร์ ความคุ้มทุนของการนำเชื้อเพลิงขยะมาใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิก เพื่อเป็นข้อมูลพิจารณาตัดสินใจลงทุนของผู้ประกอบการ และเป็นฐานข้อมูลด้านราคาของเชื้อเพลิงขยะซึ่งมีศักยภาพเป็นเชื้อเพลิงทดแทนหลักในอนาคตได้

#### 5.2.5 การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางด้านมลพิษและการปนเปื้อน

งานวิจัยนี้ยังขาดการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางด้านมลพิษและการปนเปื้อนของโลหะหนักในไอเสีย เถ้าหนัก และผลิตภัณฑ์ ซึ่งหากมีการศึกษาด้านนี้เพิ่มเติม จะสามารถยืนยันได้ว่าการใช้เชื้อเพลิงขยะประเภทที่ 3 ในการเผาไหม้ร่วมกับเตาเผาภาชนะเครื่องปั้นดินเผา โดยใช้เตาเผาไหม้ที่สร้างขึ้น สามารถนำมาใช้ได้หรือไม่ เพื่อเป็นข้อมูลแก่ชุมชนในระแวกใกล้เคียงให้ได้ทราบว่าเชื้อเพลิงที่นำมาใช้มีผลกระทบต่อวิถีชีวิตหรือไม่ อย่างไร

## รายการอ้างอิง

กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม กรมควบคุมมลพิษ. (2561). ประกาศกรมควบคุมมลพิษ เรื่อง คุณลักษณะที่เหมาะสมเบื้องต้นสำหรับเชื้อเพลิงขยะจากขยะมูลฝอยชุมชน (ประกาศฉบับลงวันที่ 26 กันยายน 2561). กรุงเทพมหานคร: ผู้แต่ง.

กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม กรมควบคุมมลพิษ. (2563). แนวทางพิจารณาความเหมาะสมของพื้นที่การออกแบบก่อสร้างและการจัดการสถานที่จัดการขยะมูลฝอยโดยการเผาในเตาเผา. สืบค้นจาก <https://www.pcd.go.th/publication/5067>

กรมควบคุมมลพิษ. (2566). รายงานสถานการณ์สถานที่กำจัดขยะมูลฝอยชุมชนของประเทศไทย ปี พ.ศ. 2565. สืบค้นจาก <https://www.pcd.go.th/publication/29509>

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2548). โครงการศึกษาวิจัยและสาธิตการผลิตพลังงานไฟฟ้าและความร้อนจากขยะชุมชน. สืบค้นจาก <https://golink.icu/CSexzdG>

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2551). โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาการผลิตขยะเชื้อเพลิง (RDF). สืบค้นจาก <https://webkc.dede.go.th/testmax/node/2469>

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2554). คู่มือพัฒนาและการลงทุนผลิตพลังงานทดแทน ชุดที่ 6 พลังงานขยะ. สืบค้นจาก <https://golink.icu/OV4BDuJ>

กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. (2549). ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการปล่อยทิ้งอากาศเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม (ประกาศฉบับลงวันที่ 18 พฤษภาคม 2549). กรุงเทพมหานคร: ผู้แต่ง.

กษมา ศิริสมบุญ, จุฑามาศ ชูพรเจริญ และสิตา ทศวา. (2560). การประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตของการผลิตไฟฟ้าด้วยเทคโนโลยีการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากเชื้อเพลิงขยะมูลฝอย. วารสารวิทยาศาสตร์ มช., 45(4): 827-843.

กัญญา บุญเกียรติ. (2544). เชื้อเพลิงและการเผาไหม้. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ทวี พรหมพฤษ. (2525). เตาเผาและการเผา. กรุงเทพมหานคร : หน่วยงานนิเทศกรรมการฝึกหัดครู.

นนทกร ภาคภูมิ, พรรษา ลิบลับ, ทิพย์สุภินทร์ หินชุย และวีรชัย อัจหาญ. (2565). ผลการใช้เชื้อเพลิงขยะ (RDF) ร่วมกับชีวมวลต่อสมรรถนะและการปลดปล่อยมลพิษของเตาเผาภาชนะเซรามิก. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย, 28(2), 33-41.

ปราณี แดงเขียว. (2559). ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของมูลฝอยชุมชนและแนวทางที่เหมาะสมในการจัดการมูลฝอยชุมชนของเทศบาลตำบลพระแท่น จังหวัดกาญจนบุรี (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต). สืบค้นจาก <https://golink.icu/HwOP8Mi>

พรรษา ลิบลับ, วีรชัย อาจหาญ, ธธา วาทกิจ, อาทิตย์ คุณศรีสุข และทิพย์สุภินทร์ หินชูย. (2565). รายงานวิจัย แนวทางการนำเชื้อเพลิงขยะ (RDF) จากมูลฝอยชุมชนมาใช้ประโยชน์ ในกลุ่มธุรกิจขนาดเล็ก (SME) หรืออุตสาหกรรมขนาดเล็ก. ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ ประจำปีงบประมาณ 2563

ธนากร วาสนาเพียรพงศ์. (2563). หนังสือ “เซรามิกส์: เตาเผาและเทคนิคการเผา”. กรุงเทพฯ: ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ร่วมกับ สมาคมเซรามิกส์ไทย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, บัณฑิตวิทยาลัยร่วมด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม (JGSEE). (มปป). โครงการการพัฒนาเครือข่ายวิจัยด้านการเผาไหม้และศึกษารูปแบบการจัดตั้งศูนย์ด้านการเผาไหม้. สืบค้นจาก <https://www.kmutt.ac.th/faculty/jgsee/>

สมศักดิ์ ขจรเฉลิมศักดิ์. (2560). แนวทางการพัฒนาการผลิตไฟฟ้าจากชีวมวล ทางเลือกของภาคเอกชนในการเสริมสร้าง ความมั่นคงด้านพลังงาน (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรและเทคโนโลยีมหาบัณฑิต). วิทยาลัยป้องกันราชอาณาจักร, กรุงเทพมหานคร.

กระทรวงพลังงาน สำนักพัฒนาทรัพยากรบุคคลด้านพลังงาน. (มปป). ตำราฝึกอบรมผู้รับผิดชอบด้านพลังงาน (ผชพ) ด้านความร้อน. ตอนที่ 2 บทที่ 3 เรื่อง ทฤษฎีการเผาไหม้. สืบค้นจาก [http://www2.dede.go.th/bhrd/old/file\\_handbook.html](http://www2.dede.go.th/bhrd/old/file_handbook.html)

สุขุมาล เล็กสวัสดิ์. (2548). เครื่องปั้นดินเผา พื้นฐานการออกแบบและปฏิบัติงาน. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อนุช ลีละเศรษฐกุล และสุธรรม ปทุมสวัสดิ์. (2016) การวิเคราะห์สมบัติขยะมูลฝอยเพื่อแนวทางการผลิตเชื้อเพลิงขยะของโรงกำจัดขยะมูลฝอยเชิงกลชีวภาพอ่อนนุช. วารสารพลังงานและเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม, 3(2): 50-59.

Akdağ, A.S., Atımtay, A., & Sanin, F.D. (2016). Comparison of fuel value and combustion characteristics of two different RDF samples. *Journal of Waste Manag.*, 47(Pt B), 217-224.

Aich, S., Behera, D., Nandi, B.K., and Bhattacharya, S. (2020). Relationship between proximate analysis parameters and combustion behavior of high ash Indian coal. *Int J Coal Sci Technol.* 7:766–777.

Chen, X., Xie, J., Me, S., He, F., & Yang, H (2019). RDF pyrolysis by TG-FTIR and Py-GC/MS and combustion in a double furnaces reactor., *Journal of Therm Anal. Calorim*, 136, 893–902.

Hemidat, S., Saidan, M, Al-Zu'bi, S., Irshidat, M, Nassour, A., and Nelles, M (2019). Potential Utilization of RDF as an Alternative Fuel to be Used in Cement Industry in Jordan. *Molecular Diversity Preservation International*. 11(20), 5819.

Hongrapipat, J., Rauch, R., Pang, S.; Liplap, P., Arjharn, W., Messner, M, Henrich, C., Koch, M, & Hofbauer, H (2022). Co-Gasification of Refuse Derived Fuel and Wood Chips in the Nong Bua Dual Fluidized Bed Gasification Power Plant in Thailand. *Journal of Energies*, 15(19), 7363.

Ikeda, M, Makino, H, Morinaga, H, Higashiyama, K., & Kozai, Y. (2003). Emission characteristics of NO<sub>x</sub> and unburned carbon in fly ash during combustion of blends of bituminous/sub-bituminous coals. *Journal of Fuel.*, 82, 1851–1857.

Kara, M (2012). Environmental and economic advantages associated with the use of RDF in cement kilns. *Journal of Resources Conservation and Recycling*, 68, 21-28.

Olsen, F.L. (2001). *The Kiln Book Materials, Specifications and Construction* (3rd ed.). Philadelphia: Chilton Book Company.

Peterson, B.E. (2012). What Kind of Kiln Is It? Kiln Types by Construction. [online] Available from: <http://pottery.about.com/od/potterykilns/tp/typkilncons.htm> [Accessed 18 August 2022].

Siritheerasas, P., Waiyanate, P., Sekiguchi, H, & Kodama, S. (2017). Torrefaction of Municipal Solid Waste (MSW) Pellets using Microwave Irradiation with the Assistance of the Char of Agricultural Residues. 2017 International Conference on Alternative Energy in Developing Countries and Emerging Economies AEDCEE, 25-26 May 2017, Bangkok, Thailand. *Science Direct, Energy Procedia* 138 668–673

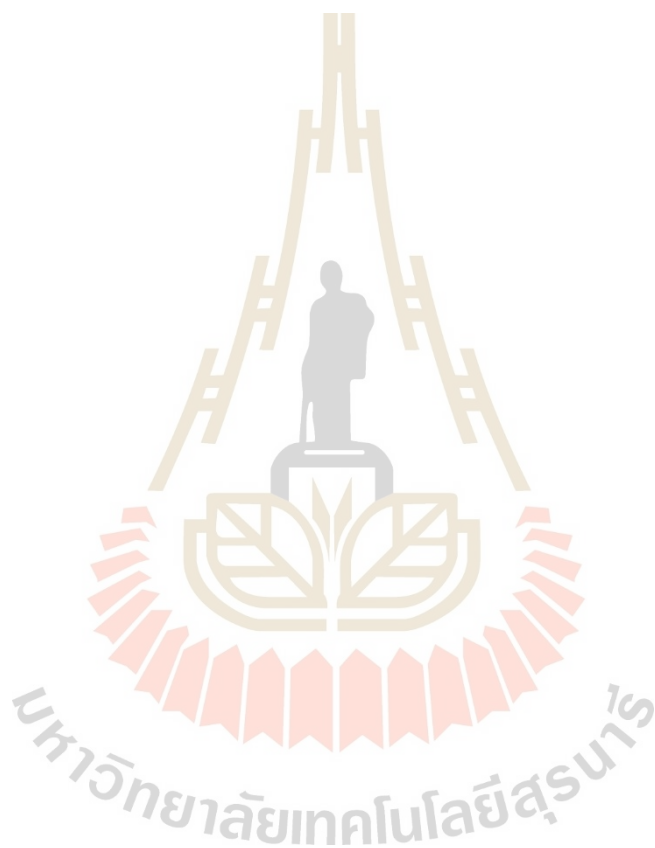
Suksankraisorn, k., Patumsawad, S., & Fungtammasan, B. (2010). Co-firing of Thai lignite and municipal solid waste (MSW) in a fluidised bed: Effect of MSW moisture content. *Applied Thermal Engineering, Science Direct*. 30 (2010) 2693-2697.

The Engineering ToolBox (2003). Combustion Efficiency and Excess Air. [online] Available from: [https://www.engineeringtoolbox.com/boiler-combustion-efficiency-d\\_271.html](https://www.engineeringtoolbox.com/boiler-combustion-efficiency-d_271.html) [Accessed 13 October 2023].

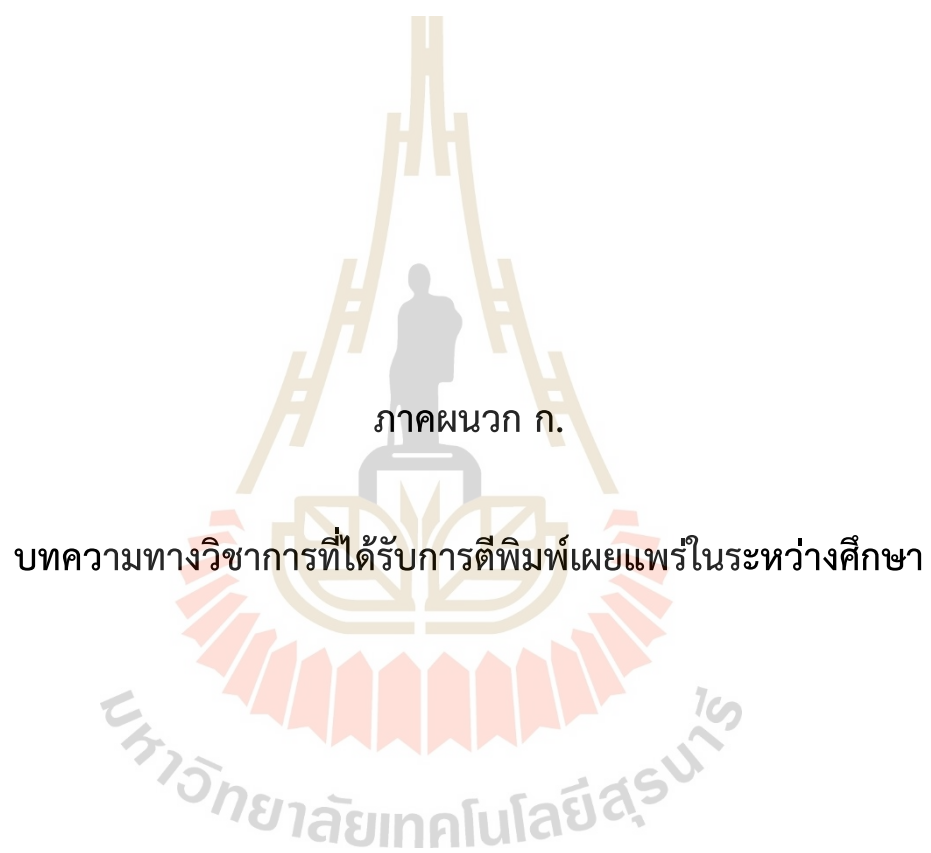
Tuprakay, S.R., Suksabye, P., Menchai, P., & Tuprakay, S. (2014). The physical and chemical properties of solid waste from water tourism Case study: Taling Chan Floating Market, Bangkok, Thailand. *Waste Management and the Environment VII*, 180, 103-111.

Valdés, C.F., Chejne, F., Marrugo, G., Macias, R.J., Gómez, C.A., Montoya, J.I., Londoño, C.A., Cruz, J.D.L., & Arenas, E. (2016). Co-gasification of sub-bituminous coal with palm kernel shell in fluidized bed coupled to a ceramic industry process. *Applied thermal engineering* 107 (2016) 1201–1209.

Wan, HP., Chang, Y.H, Chien, W.C., Lee, HT., & Huang, C.C. (2008). Emissions during co-firing of RDF-5 with bituminous coal, paper sludge and waste tires in a commercial circulating fluidized bed co-generation boiler. *Journal of FUEL*, 87, 761-767.







ภาคผนวก ก.

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

## รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการ

### บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับชาติ

- 1) Phakphoom, N., Liplap, P., Wannapeera, J., kijjanasiri, T., Sribunrueang, K., Hinsui, T., & Arjharn, W. (2023). Effect of refuse-derived fuel feed ratio on performance and stability of combustion temperature control. Suranaree J. Sci. Technol. 30(5):010252(1-7)
- 2) นนทกร ภาคภูมิ, พรรษา ลิปลับ, ทิพย์สุภินทร์ หินชุย, และ วีรชัย อาญาหาญ. (2565). ผลการใช้เชื้อเพลิงขยะ (RDF) ร่วมกับชีวมวลต่อสมรรถนะและการปลดปล่อยมลพิษของเตาเผาภาชนะเครื่องปั้นดินเผา. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย 28(2), 33-41.

### บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในงานประชุมวิชาการระดับชาติ

- 1) นนทกร ภาคภูมิ, พรรษา ลิปลับ, ทิพย์สุภินทร์ หินชุย, และ วีรชัย อาญาหาญ. (2565). ผลการใช้เชื้อเพลิงขยะ (RDF) ร่วมกับชีวมวลต่อสมรรถนะและการปลดปล่อยมลพิษของเตาเผาภาชนะเครื่องปั้นดินเผา. การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ระดับชาติ ครั้งที่ 23 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา (รูปแบบออนไลน์). ระหว่างวันที่ 18-19 สิงหาคม พ.ศ. 2565.
- 2) นนทกร ภาคภูมิ, ฐิติกร กิจจนศิริ, พงษ์ศิริ มีสิงห์, ศิว แม่นมีศรี, พงษ์พัฒน์ รongเมือง, พรรษา ลิปลับ, ทิพย์สุภินทร์ หินชุย และ วีรชัย อาญาหาญ. (2563). การทดสอบอบแห้งหญ้าเนเปียร์สำหรับแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงชีวมวล โดยใช้กระบวนการอบแห้งแบบพาหะลม. การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ระดับชาติ ครั้งที่ 21 ณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. ระหว่างวันที่ 30 เมษายน - 1 พฤษภาคม 2563.



Ref. No. 7421(3)/100

Suranaree Journal of Science and Technology  
111 University Avenue, Muang District  
Nakhon Ratchasima 30000, Thailand  
Tel. 66-44-224756 Fax. 66-44-224750  
E-mail: journal@gsut.ac.th

August 16, 2023

Dear Assistant Professor Dr. Pansa Liplap,

I am pleased to confirm that your paper “**Effect of Refuse-Derived Fuel Feeding Ratio on Performance and Stability of Combustion Temperature Control**” has been accepted for publication in Suranaree Journal of Science and Technology since **August 11, 2023**.

This acceptance is subject to the assumption that you meet all the conditions to publish in this journal. In particular, you have not submitted your manuscript to another journal. Please inform me immediately if you cannot meet these conditions.

The galley proof of your paper will be soon created. If we need any additional information to create the proof, we will let you know. If not, you will be contacted again with a request to approve the proof.

Thank you for submitting your paper to Suranaree Journal of Science and Technology.

Sincerely,

*Rattikorn Yimnirun*  
Rattikorn Yimnirun, Ph.D.  
Professor  
Editor-in-Chief

## EFFECT OF REFUSE-DERIVED FUEL FEEDING RATIO ON PERFORMANCE AND STABILITY OF COMBUSTION TEMPERATURE CONTROL

Nontakorn Phakphoom<sup>1,2</sup>, Pansa Liplap<sup>1,2,\*</sup>, Janewit Wannapeera<sup>2</sup>, Thipsuphin Hinsui<sup>2</sup>, Weerachai Arjharn<sup>2</sup>, Thitikorn kijjanasiri<sup>2</sup> and Kanchanaporn Sribunrueang<sup>2</sup>

Received: April 04, 2023; Revised: July 27, 2023; Accepted: August 11, 2023

### Abstract

In this study, the effect of Refuse-Derived Fuel type 3 (RDF-3) feeding ratio on a performance and a stability of combustion temperature control was examined. A new direct-combustion furnace was designed and constructed for co-combustion of RDF-3 and woodchip (WC) feedstock. In this work, four main ratios on wet basis of WC and RDF-3; 100 : 0, 90 : 10, 80 : 20, and 70 : 30 wt.% were tested at the combustion temperature of 970°C. The results showed that the complete combustion was achieved from all of feeding ratios. From an actual fuel feed rate, an increase in RDF mixing ratio could reduce the using of pure woodchip by 5.3 wt.%, 14.3 wt.% and 34.0 wt.% when mixing the RDF at 10 wt.%, 20 wt.% and 30 wt.%, respectively. At increasing of RDF mixing ratio, non-smoothly burning was also found to increase, however, a more rapid ignition behavior of was achieved

**Keywords:** Direct combustion, Refuse-Derived Fuel, Biomass, Pottery kiln

### Introduction

In 2021, Thailand had 24.98 million tons of municipal solid waste (MSW) which decreased by 1.5% from the previous year. From those values, as high as 32% of improper disposal method was observed. Moreover, more than 93% improper disposal places were observed (Pollution Control Department, 2021). The reasons behind these values were due to a limited waste buyers which mostly are waste power plant, cement plant, and incinerator plant. Moreover, the long distance of

these buyers caused a high transportation cost. Many areas therefore choose to dispose to landfill or open dump which affects environment inevitably. Therefore, it is necessary to find the appropriate way to utilize MSW to reduce these problems.

So far, Refuse-Derived Fuel (RDF) has been widely used as an alternative fuel in the co-combustion process. (Kara 2012; Hemidat *et al.*, 2019; Karpan *et al.*, 2021) examined the

<sup>1</sup> School of Agricultural Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhonratchasima, Thailand.  
E-mail: pansa@g.sut.ac.th

<sup>2</sup> Center of Excellence in Biomass, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhonratchasima, Thailand  
\* Corresponding author

DOI: <https://doi.org/10.55766/sujst-2023-05-e0936>

Suranaree J. Sci. Technol. 30(5):010252(1-7)

combustion of RDF with coal in cement kilns. It was found that using co-fuels can reduce around 112.8, 486, and 94 USD h<sup>-1</sup> for petroleum coke costs respectively. Moreover, carbon dioxide emissions were also found to be less than those of using pure coal. At present, using of the co-combustion with RDF is found to conduct in the large industries as well as the small-medium enterprise (SMEs). Recently, Liplap *et al.* (2022) examined the combustion behaviors of RDF-2, RDF-3 and RDF-5 mixed with woody biomass in a small biomass power plant. From the mixing ratio 10, 20, and 30% of RDF-5, it was found that the higher combustion temperature combustion compared to those of pure biomass was observed. A similar obtained gas quality to those of pure wood combustion which was lower than the emission limitation was observed. However, the combustion of mixing of wood mixed with RDF-2 and RDF-3 was found some limitations. This was due to the relatively large size of RDF-2 and RDF-3 which resulted in a feeding difficulty of a screw conveyor system.

The use of RDF in SMEs business such as the pottery industry, wood baking factories are also rising of interest. Recently, Liplap *et al.* (2022) examined a combustion test of a pottery kiln with a direct combustion and downdraft kiln. It was found that to reach a complete combustion at the temperature of 970°C, around 3-4 tons of firewood was required. These results also agree with the report of The Pollution Control Department (The Pollution Control Department, 2018) that the efficient incinerator temperature should range from 850 to 1,050°C. In addition, Chen *et al.* (2019) found that the optimum conditions for RDF combustion were 900°C at oxygen concentration (O<sub>2</sub>) of 14%.

Using RDF-2 and RDF-3 as co-fuels with firewood is, nowadays become one of the most interesting topics caused by the continuous rising of firewood price. However, there are several practical barriers for using these RDFs, such as the difficulty of RDF feeding system including the combustion performance of these mixed fuels. From the study of Phakphoom *et al.* (2022) it was found that the percentage of oxygen concentrations in flue gas was reduced by 82% compared to those of the pure wood when mixing RDF-3 with wood at a weight ratio of 17:83. A similar percentage of carbon monoxide emission as well as combustion performance was observed. However, the use of RDF-3 was found to maintain the combustion temperature much shorter time compared to the use of RDF-5. These results also agree with the work of Liplap *et al.* (2022) which conducted the combustion test in both the small biomass power

plant and pottery kiln. The cost of RDF-5, however, is generally higher than pure wood and RDF-3 by 61% and 59%, respectively. Then most businesses aim to use MSW, RDF-2 and RDF-3 as a fuel instead of RDF-5. Comparing RDF-2 and RDF-3, RDF-3 was found to be preferable than RDF-2 due to the relatively smaller size and lower moisture content. However, in practical terms, feeding the RDF-3 is quite difficult because of its physical characteristic. Practically, RDF-3 must be prepared in cylindrical shape before injecting into a fuel inlet chamber. From this feeding barrier, the air inlet clog could appear which results in the reduction of oxygen over 82% and the risk of incomplete combustion. From these problems, therefore, a new design of combustion furnace which is suitable for RDF-3 as well as RDF-3 mixed with biomass is necessary.

In this research the new design and construction of a separate combustion furnace for RDF mixed with wood was conducted. Combustion tests of the mixed RDF-3 and wood were examined in order to investigate the combustion performance of a proposed furnace.

## Materials and Methods

### Materials

RDF-3 was prepared through the treatment process of MSW using a Mechanical Biological Treatment waste treatment system of Suranaree University of Technology (SUT-MBT) Woodchips (WC) was obtained from Korat Biomass Company Limited, Nakhon Ratchasima, Thailand. The properties of RDF-3 and woodchip used in this work and their images are shown in Table 1 and Figure 1 respectively.

**Table 1. Chemical and physical properties of materials**

Parameter	Fuels	
	WC	RDF-3
Size (mm)	10-40	50-300
Moisture (% w.b.)	12.8	13.8
<b>Proximate Analysis [wt.% d.b.]</b>		
Volatile mater (VM)	82.0	87.3
Fixed carbon (FC)	15.8	2.3
Ash (A)	2.2	8.9
<b>Ultimate Analysis [wt.% d.b.]</b>		
Carbon (C)	46.8	68.5
Hydrogen (H)	6.5	10.9
Nitrogen (N)	0.4	0.4
Sulphur (S)	N.D.	0.1
Oxygen (O) + Other	46.3	20.1
HHV (MJ kg <sup>-1</sup> )	17.4	25.8

HHV is a high heating value



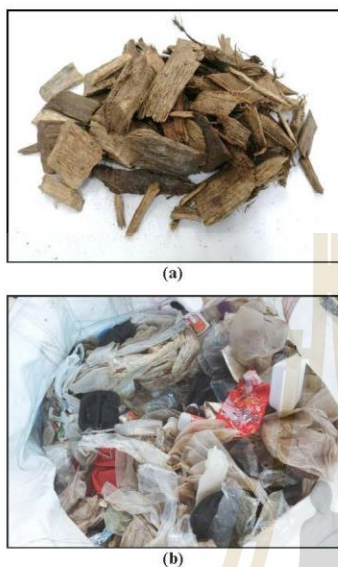


Figure 1. Images of (a) Woodchips (b) RDF-3

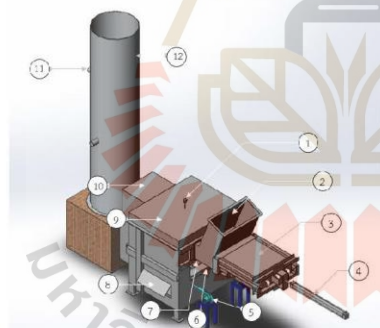


Figure 2. The new designed furnace for co-combustion with pottery kiln: 1) Thermocouples ( $T_i$  and  $T_o$ ) 2) Hopper feeder 3) Stoker (feed RDF and WC) 4) Air cylinder 5) Blower 6) Wood feeder 7) Grille 8) Ash removal chamber 9) Combustion chamber 10) Flue gas outlet 11) Gas sampling position 12) Stack

#### Equipment and tools

In this work, a direct combustion furnace with a downdraft hot air furnace was designed and constructed. Figure 2 shows the main components of a newly designed co-combustion furnace which consist of a combustion chamber, a hopper, a stoker for RDF, a woodchip feeder, an air blower, an ash removal chamber, and an exhaust gas outlet. To achieve a complete combustion for a fuel feed rate of about  $6.48 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ , the volume of the combustion chamber was designed to be about  $0.434 \text{ m}^3$ . The refractory bricks were used to construct a combustion chamber while the SS400 sheet steel was used to cover the outside of furnace. The ash chamber size is about  $0.142 \text{ m}^3$ . The exhaust measurement points which are referred to the standard of U.S. EPA Method 2 was also prepared.

#### Testing Procedure

The testing of RDF-3 and woodchip combustion was divided into 3 steps, first, preheating the furnace to a temperature of  $650\text{--}700 \text{ }^\circ\text{C}$  by using  $100 \text{ kg}$  of firewood. Second, the RDF-3 mixed with woodchip were fed for continue heating up the furnace to  $970^\circ\text{C}$  ( $T_o$ ) and then maintained at this temperature for 3 h. In this work the mixing ratios on weight basis of RDF-3 and woodchip (WC-3: RDF) of  $100 : 0$ ,  $90:10$ ,  $80:20$ , and  $70:30$  (wt.%, w.b.) were selected. During the combustion, an amount of fuel and energy consumption were collected continuously including the flue gas composition emitted. After reaching a complete combustion for each condition the furnace was then cooled down. The amount of ash was then carefully measured.

#### Temperature Measurement

The combustion temperature was measured at 2 locations, inside the furnace ( $T_i$ ) and the flue gas outlet ( $T_o$ ) by using a K-type thermocouple. In this work, the temperatures were recorded with a data logger at 15 min intervals.

#### Chemical Properties of Sample

The proximate analysis of sample and ash was conducted to evaluate the fuel conversion efficiency. The amount of ash (A), volatile matter (VM), and fixed carbon (FC) on dry basis was determined by following the standard testing methods, ASTM D1102-84, ASTM E872-82, and ASTM D1762-84, respectively. From the standard method the FC can be calculated by following Equation (1) as follows.

$$\%FC = 100 - (\%VM + \%A) \quad (1)$$

Where %FC, %VM, %A are the percentage of fixed carbon, volatile matter, and ash,

The higher heating value (HHV) was measured using a bomb calorimeter (IKA C2000, I.K.A., Germany). Approximately 1 g of dried biomass was pelletized, and benzoic acid was used as a reference standard.

#### Flue Gas Composition Measurement

The flue gas composition was carried out by using a portable flue gas analyzer (Testo 350 XL). The measured gas compositions consist of oxygen (O<sub>2</sub>), carbon monoxide (CO), carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), nitrogen oxide (NO<sub>x</sub> as NO<sub>2</sub>), and sulfur dioxide (SO<sub>2</sub>). This measurement has been calibrated from the 7% of excesses oxygen (O<sub>2</sub>) on a dry basis and the flue gas composition was recorded at 20 min intervals.

#### Fuel and Energy Consumption Measurement

The amount of fuel and energy consumption were recorded at a controlled constant temperature regime (970°C) for 3 h. In this work energy consumption refers to the calorific value of fuel used. The data was recorded at 15 min intervals.

#### Statistical Analysis

All data were analyzed in terms of statistical differences by using Analysis of Variance (ANOVA) method through Microsoft Excel. In the analyses, the statistical differences were carried out from 4 proportions. The statistically different was agreed with the p-value < 0.05 and there are no significant difference if the P-value > 0.05. The determination of data discrepancy was carried out using mean and standard deviation (S.D.).

## Results and Discussion

#### Chemical properties of Mixed Fuels

Table 1 shows properties of raw materials (RDF and WC). It was found that RDF contained a higher value of carbon and volatile matters resulting in a higher value of HHV. Proximate analyses and HHVs of woodchip mixed with RDF

are presented in Table 2. It was found that volatile matter and ash of the fuels increased with increasing RDF ratios. In contrast, fixed carbon was found to decrease with RDF mixing ratio. The HHV was also found to increase progressively with RDF ratio. This could be explained by the relatively high HHV of RDF when compared to woodchip at similar weight. As a result, the fuel consumption of less RDF ratios is expected to be higher than those of more RDF ratios.

#### Temperature Profile during Combustion

Table 3 and Figure 3 show the temperature changes during combustion of the mixed fuels at a target-controlled temperature of 970°C. It was found that the inside furnace temperature (T<sub>i</sub>) and the flue gas outlet temperature (T<sub>o</sub>) showed the difference among the several mixing ratios. The outlet temperatures were also found to be higher than the inside temperatures for all fuel mixing ratios. This is due to the direct measurement of flame temperatures located at around T<sub>o</sub> position in which the fuel was almost combusted. Meanwhile the temperature of T<sub>i</sub> is located inside the furnace where the fresh fuel was continuously fed.

**Table 3. Temperature inside the furnace (T<sub>i</sub>) and flue gas outlet temperature (T<sub>o</sub>) obtained from the combustion at several feed ratios**

WC: RDF-3 [wt.% w.b.]	Temperature [°C]	
	T <sub>i</sub>	T <sub>o</sub>
100:00	682 ± 36	885 ± 43
90:10	740 ± 50	924 ± 48
80:20	823 ± 52	963 ± 55
70:30	745 ± 64	920 ± 73

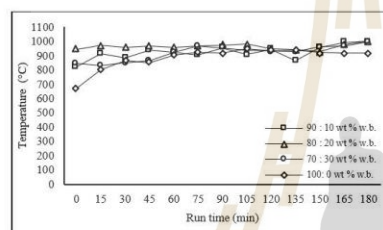
Mean ± S.D, T<sub>i</sub> inside the furnace, T<sub>o</sub> the flue gas outlet.

For pure woodchip combustion (WC: RDF-3 = 100:00), controlling temperature during the initial heat up was quite difficult. This result is in agreement with Li *et al.* (2015) who found that wood size larger than 10 mm took more than 60 seconds to heat up (~370°C). However, a more stable temperature was achieved later with additional air feeding. At increasing of RDF-3 mixture to 10% the heating step was faster than that using a pure woodchip. This could be

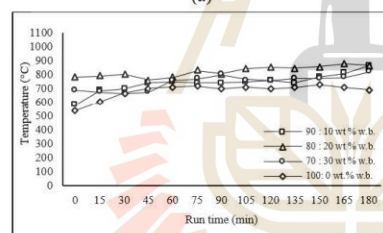
**Table 2. Proximate analysis of mixed fuels**

WC:RDF3	Parameters of Proximate [at dry basis]				
	VM [wt.%]	FC [wt.%]	A [wt.%]	FC VM <sup>1</sup>	HHV [MJ kg <sup>-1</sup> ]
100:00	79.15	18.07	2.52	0.26	17.40
90:10	79.92	16.35	3.49	0.24	18.20
80:20	80.66	14.80	4.34	0.20	19.10
70:30	81.40	13.16	5.27	0.18	19.90

explained by the increasing of volatile matter of the mixed fuels through the RDF portion. Moreover, variation of targeted combustion temperature was observed. From the continuous measurement, variation of temperature changes inside the furnace ( $T_i$ ) and outlet ( $T_o$ ) represented by the S.D. values, showed the larger values compared to those of pure woodchip combustion; S.D. = 50°C and 48°C for  $T_i$  and  $T_o$ , respectively. This could be due to the different combustion characteristics obtained from the mixed RDF which shows over 1.5 times larger calorific value compared with pure woodchip. The dropping of temperature was occasionally observed which could be explained by the rising of total moisture in the mixed fuel.



(a)



(b)

Figure 3. Temperature changes observed at (a) flue gas outlet (b) inside furnace during co-combustions.

At increasing of RDF-3 mixture to 20% and 30% a more temperature changes during combustion were obviously observed. From the test, it was found that around 52°C and 55°C was changed throughout the combustion test, for  $T_i$  and  $T_o$ , at 20% mixing respectively. At 30% RDF mixing ratio, it was found that more than 60°C of

fluctuate temperature was obtained. This could also be explained by the rising of volatile matter which was in the RDF as well as the decreasing of mixed fuel density causing the negative impact on the combustion characteristic. From the test, it was found that the rapid dropping of temperature and large amount of smoke was observed. The rapid increasing of temperature also then appeared. These results could be suggested by the inefficient air supply occurring during combustion. From Table 2, the ratios of fixed carbon to volatile matter were also found to decrease progressively with increasing RDF mixing ratio. This could support a non-smoothly burning behaviors obtained at increasing of RDF ratio. However, a more rapid ignition behavior of the mixed fuel was achieved (Liu *et al.*, 2015; Aich *et al.*, 2020).

#### Fuel and Energy Consumption

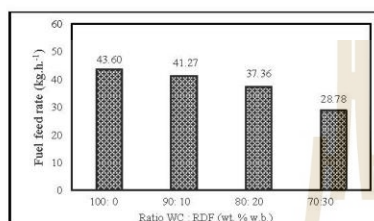
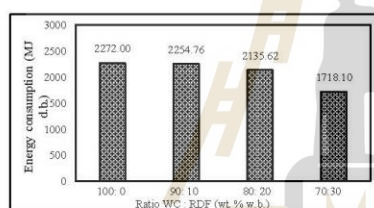
Figure 4 shows the fuel and energy consumption rates throughout the combustion test, respectively. It was found that the rate of fuel consumption depends on the mixing ratio. To reach the target combustion temperature faster, a higher portion of RDF was required. From Figure 4, the fuel feed rate reduced with the increasing of RDF ratio. The less fuel consumption was found from the mixing ratio of 70:30 which is less than the pure woodchip consumption of around 34.0 wt.%. In other words, to achieve a similar target combustion test comparing to the using of pure woodchips (100 wt.%), the total fuel (RDF + WC) could be reduced by 5.34%, 14.31% and 34.00% when mixing with RDF for 10%, 20% and 30%, respectively. This is expected because RDF contains higher energy, thus requiring less fuel consumption. This result was also observed by Liplap *et al.* (2022) who used RDF with wood chip for energy production using gasification system.

In terms of energy required, as shown in Figure 5 or the total calorific value of the mixed fuel, as shown in Tables 2, as low as 24.38% of energy could be reduced when compared to those of pure woodchip. This could be explained by a larger heat produced from RDF-3 portion which is over 1.4 times higher than those of woodchip. The different feed rate of mixed fuels was also observed. It was found that the fuel feed rate and energy consumption vary directly to the total calorific value of the mixed fuel (Garcia *et al.*, 2021). This could be due to the relatively high heat generation obtained from the combustion of RDF fraction (Chiemchaisri *et al.*, 2010).



**Table 4.** Shows the results of flue gas composition

Flue Gas Composition	Ratios of WC: RDF-3 (wt.%, w.b.)				STD.
	100:00	90:10	80:20	70:30	
O <sub>2</sub> (% vol.)	21.12 ± 0.07	21.05 ± 0.16	20.98 ± 0.12	21.15 ± 0.11	N/A
CO (ppm)	1.06 ± 1.33	1.11 ± 1.73	0.84 ± 1.06	3.80 ± 2.42	690 <sup>a</sup>
NO <sub>x</sub> , NO <sub>2</sub> (ppm)	0.00 ± 0.00	0.01 ± 0.01	0.24 ± 0.10	0.17 ± 0.49	200 <sup>a</sup>
CO <sub>2</sub> IR (% vol.)	0.09 ± 0.06	0.14 ± 0.14	0.17 ± 0.10	0.18 ± 0.24	N/A
SO <sub>2</sub> (ppm)	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.05 ± 0.09	0.00 ± 0.00	60 <sup>a</sup>

**Figure 4.** Fuel feed rate at several fuel mixing ratios**Figure 5.** Energy consumption at several mixing ratios

#### Flue Gas Composition

Table 4 shows flue gas compositions of mixed fuel combustions. It was found that the flue gas compositions of each mixing ratio did not show a significant difference. Oxygen residues was found in the range of 20.98-21.15 % in flue gas. Small quantities of CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> as NO<sub>2</sub> were detected, which were not over the standard (MNRE, 2006). The result obtained in this study is in accordance with Chen *et al.* (2019) who found that an increase in combustion temperature resulted in the decrease of emissions.

Comparing the CO emission observed among the several mixing ratios, it was found that the CO content in flue gas increased with increasing RDF ratio (Akdağ *et al.*, 2016). From the testing, CO increased from 1 ppm to 3.8 ppm after mixing RDF 30 wt.% but it is considered very small. This could

be explained by an insufficient air for volatile combustion which took place at the beginning of material feeding (Kara, 2012; Abu-Elyazeed *et al.*, 2021). This volatile content increased with the RDF ratios. However, all of those emission values remained within the standard specified.

#### Properties of Solid Residues and Combustion Efficiency of the Mixed Fuels

Table 6 shows the proximate analysis results of the solid residue obtained from the combustion test. It was found that 87-94 wt.% of ash content was observed. The fixed carbon content which referred to the unburned char was found to remain only around 4.7-8.7 wt.%. These could be suggested that the fuels were mostly converted into heat during combustion. The combustion efficiencies of the mixed fuels were also examined by following Equation (2) (Ikeda *et al.*, 2003).

$$\text{Eff.}(\%) = 100 - \left[ \left( \frac{U_n}{100 - U_n} \right) \left( \frac{A_0}{100 - A_0} \right) \right] \times 100 \quad (2)$$

Where  $U_n$  represents the amount of unburned carbon and  $A_0$  represent the amount of ash in the raw material

In this work, from the very small amount of char remaining from the combustion, the amount of unburned carbon was assumed as the amount of fixed carbon of these chars. Table 5 shows the results of combustion efficiencies for all mixing ratios. It was found that all fuels showed a high combustion efficiency of over 99%. These results could be implied that the mixing of RDF within 30 wt.% did not affect the combustion system which was developed.

**Table 5.** Combustion efficiency of mixed fuels

Wood : RDF [wt.% : wt.%]	Yield [wt.%]	Combustion efficiency [%]
100:0	4.25	99.75
90:10	4.31	99.80
80:0	4.99	99.78
70:30	5.43	99.71

Yield: represents the amount of unburned carbon

**Table 6. Proximate analysis of ash obtained from several fuel mixing ratios**

Proximate Analysis [wt.% d.b.]	Ratios of WC: RDF-3 [wt.% w.b.]			
	100:00	90:10	80:20	70:30
Moisture (M)	0.9 ± 0.3	0.8 ± 0.2	0.6 ± 0.2	0.3 ± 0.3
Fixed Carbon (FC)	8.7 ± 2.0	5.0 ± 2.5	4.5 ± 0.9	4.7 ± 1.1
Volatile Matter (VM)	3.0 ± 0.1	2.0 ± 0.4	1.5 ± 0.3	1.4 ± 0.4
Ash (A)	87.4 ± 2.2	92.2 ± 2.6	93.4 ± 1.0	93.6 ± 1.5

Mean ± S.D.

### Conclusions

In this work, the new co-combustion furnace for woodchip and RDF for pottery kiln was successfully developed. It was found that RDF can be fed smoothly together with woodchip which was an original fuel. The combustion efficiency of over 99% from the RDF-woodchip fuel was achieved for all mixing ratios. From the isothermal combustion test, it was found that an increase in RDF mixing ratio could reduce the using of total fuel (RDF + Woodchip) by 5.34 wt.%, 14.31 wt.% and 34.00 wt.% after mixing RDF at 10 wt.%, 20 wt.% and 30 wt.%, respectively. At increasing of RDF mixing ratio, non-smoothly burning was found to increase, however, a more rapid ignition behavior of was achieved.

### Acknowledgement

The authors would like to acknowledge the financial support from the National Research Office (NRCT) (Grant no. 12551) and Suranaree University of Technology (SUT). The support of tools and workplace from the Center of Excellence in Biomass, Suranaree University of Technology throughout this study were also appreciated.

### References

- Abu-Elyazeed, O.S.M., Nofal, M., Ibrahim, K., and Yang, J. (2021). Co-combustion of RDF and biomass mixture with bituminous coal: a case study of clinker production plant in Egypt. *WDSE*, 3:257-266.
- Aich, S., Behera, D., Nandi, B.K., and Bhattacharya, S. (2020). Relationship between proximate analysis parameters and combustion behaviour of high ash Indian coal. *Int J Coal Sci Technol.*, 7:766-777.
- Akdağ, A.S., Atımtay, A., and Sanin, F.D. (2016). Comparison of fuel value and combustion characteristics of two different RDF samples. *Waste Manag.*, 47(Pt B):217-224.
- Chen, X., Xie, J., Me, S., He, F., and Yang, H. (2019). RDF pyrolysis by TG-FTIR and Py-GC/MS and combustion in a double furnaces reactor. *J. Therm. Anal. Calorim.*, 136:893-902.
- Chiemchaisri, C., Charnnok, B., and Visvanathan, C. (2010). Recovery of plastic wastes from dumpsite as refuse-derived fuel and its utilization in small gasification system. *Bioresource Technology*, 101:1,522-1,527
- Garcia, R., Gonzalez-Vazquez, M.P., Rubiera, F., Pevida, C., and Gil, M.V. (2021). Co-pelletization of pine sawdust and refused derived fuel (RDF) to high-quality waste-derived pellets. *J. Clean. Prod.*, 328:129635.
- Hemidat, S., Saidan, M., Al-Zu'bi, S., Irshidat, M., Nassour, A., Nelles, M. (2019). Potential Utilization of RDF as an Alternative Fuel to be Used in Cement Industry in Jordan. *Sustainability*, 11(20):5,819.
- Ikeda, M., Makino, H., Morinaga, H., Higashiyama, K., and Kozai, Y. (2003). Emission characteristics of NOx and unburned carbon in fly ash during combustion of blends of bituminous/sub-bituminous coals. *Fuel.*, 82:1,851-1,857.
- Kara, M. (2012). Environmental and economic advantages associated with the use of RDF in cement kilns. *R.C.R.*, 68:21-28.
- Karpan, B., Raman, A.A.A., and Aroua, M.K.T. (2021). Waste-to-energy: Coal-like refuse derived fuel from hazardous waste and biomass mixture. *PSEP*, 149:655-664.
- Li, J., Paul, M.C., Younger, P.L., Watson, I., Hossain, M., and Welch, S. (2015). Characterization of biomass combustion at high temperatures based on an upgraded single particle model. *Appl. Energy.*, 156:749-755.
- Liblap, P., Arjham, W., Watakit, K., Koonsrisuk, A., and Hinsui, T. (2022). Beneficial Use of RDF (Refuse Derived Fuel) from Municipal Solid Waste in SMEs (Small-Medium Enterprises) or Small Industries. National Research Council of Thailand (NRCT).
- Liu, X., Chen, M.Q., and Wei, Y. (2015). Kinetics based on two-stage scheme for co-combustion of herbaceous biomass and bituminous coal. *Fuel.*, 143:577-585.
- MNRE. Ministry of Natural Resources and Environment. (2006). Notification: Determination of Emission Control Standards Air pollution. Available from: <https://www.pcd.go.th/laws/4010>. Accessed date: May 26, 2022.
- Phakphoom, N., Liplab, P., Hinsui, T., and Arjham, W. (2022). Effects of combined RDF and biomass on performance and emissions of a ceramic kiln. *TSAEJ*, 28(2):33-41.
- Pollution Control Department [PCD]. (2018). announcement of the Pollution Control Department: Guidelines for effective management of solid waste with incinerator. Available from: <https://shorturl.asia/jhc5d>. Accessed date: September 26, 2018.
- Pollution Control Department [PCD]. (2021). The state of solid waste in the country. Available from: <https://thaimsw.pcd.go.th/report1.php?year=2564>. Accessed date: May 19, 2022.





**ผลการใช้เชื้อเพลิงขยะ (RDF) ร่วมกับชีวมวลต่อสมรรถนะและการปลดปล่อยมลพิษของเตาเผาภาชนะเซรามิก**  
**Effects of combined RDF and biomass on performance and emissions of a ceramic kiln**

นันทกร ภาคภูมิ<sup>1,2\*</sup>, พรธษา ลิปลับ<sup>1,2</sup>, ทิพย์สุภินทร์ หินซุย<sup>2</sup>, วีรชัย อาจหาญ<sup>1,2</sup>

Nontakorn Phakphoom<sup>1,2\*</sup>, Pansa Liplap<sup>1,2</sup>, Thipsuphin Hinsui<sup>2</sup>, Weerachai Arjrharn<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา, 30000

<sup>2</sup>ศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา, 30000

<sup>1</sup>School of Agricultural Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000

<sup>2</sup>Center of Excellence in Biomass, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000

\*Corresponding author: Tel: +66 93-528-3425, Fax: +66-44-224-610 E-mail: [Nonthakorntopp@gmail.com](mailto:Nonthakorntopp@gmail.com)

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลการใช้เชื้อเพลิงขยะ (Refuse-derived Fuel; RDF) ร่วมกับชีวมวลต่อสมรรถนะการผลิตความร้อน การปลดปล่อยมลพิษทางอากาศ และการปนเปื้อนในเถ้า รวมถึงการปนเปื้อนในผลิตภัณฑ์ ทั้งเครื่องปั้นดินเผาและจาน-ชาม เชื้อเพลิง 3 ประเภท ได้แก่ ไม้ ล้วน ไม้ : RDF-3 และ ไม้ : RDF-5 ที่อัตราส่วน 80 : 20 wt. % w.b. ถูกใช้ในกรณีวิจัย โดยใช้เตาเผาภาชนะเซรามิกแบบทางเดินลมร้อนลง ในตำบลด่านเกวียน อำเภอโชคชัย จังหวัดนครราชสีมา พบว่าการใช้ RDF ทั้ง 2 ประเภท มีสมรรถนะการผลิตความร้อนได้ดีเทียบเท่าไม้ แต่การใช้ RDF-3 อุณหภูมิจะแกว่งกว่าเชื้อเพลิงอื่น ส่วนการปนเปื้อนในผลิตภัณฑ์และเถ้า เมื่อเทียบกับมาตรฐานและงานวิจัยอื่น พบว่ามีค่าใกล้เคียงและผ่านเกณฑ์มาตรฐานทุกตัว แต่ทั้ง 3 เชื้อเพลิงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ การปลดปล่อยมลพิษทางอากาศ พบว่าการใช้ ไม้ : RDF-3 มีการปลดปล่อยมลพิษมากกว่าการใช้ไม้ล้วนอย่างมีนัยสำคัญ ยกเว้นค่า NO<sub>x</sub> และ HF ที่มีค่าลดลง แต่ทั้งไม้ล้วนและ ไม้ : RDF-3 มีค่าฝุ่นละอองเกินค่ามาตรฐาน 400 และ 539 mg m<sup>-3</sup> ตามลำดับ ส่วนค่าอื่นมีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานทุกตัว โดยสรุป RDF-3 และ RDF-5 มีสมรรถนะในการผลิตความร้อนได้ดีเทียบเท่าไม้ โดยไม่ส่งผลกระทบต่อ การปลดปล่อยมลพิษทางอากาศ และการปนเปื้อนในเถ้าและผลิตภัณฑ์ ยกเว้นค่าฝุ่นละอองที่มีค่าเกินมาตรฐาน

คำสำคัญ: ชีวมวล, เตาเผาเซรามิก, เชื้อเพลิงขยะ, มลพิษอากาศ, การเผาไหม้โดยตรง, เครื่องปั้นดินเผา

**Abstract**

The objective of this research was to study effects of combined RDF and biomass on heat production performance, air emissions, and contaminations in ash, including product contamination in both earthenware and plate - bowls. 3 types of fuel were used including Wood, Wood: RDF-3 and Wood: RDF-5 with a ratio of 80: 20 wt. % w.b. Using a ceramic kiln with a path of hot air down, in Dan Kwian Sub-district, Chok Chai District, Nakhon Ratchasima Province, The results showed that burning of the combined RDF and biomass was not different from pure biomass, But the RDF-3 had temperature fluctuates more than in other fuels. Product and ash contamination compared to standards and research showed values close to all passes. But the three fuels had significantly different. For air emissions, it was found that wood: RDF-3 had significantly higher emissions than pure biomass, except for reduced NO<sub>x</sub> and HF values. But both fuels have dust values that exceed the standard values of 400

Received: August 03, 2022

Revised: August 26, 2022

Accepted: August 26, 2022

Available online: October 03, 2022

and 539 mg m<sup>-3</sup>, respectively. Summary, RDF-3, and RDF-5 It had the same good heat production performance. Without affecting air pollution emissions and contamination in ash and products, except for the dust value that is higher than the standard

Keywords: Biomass, Ceramic kiln, Refuse-derived fuel, Air pollution, Direct combustion, Earthenware

## 1 บทนำ

ปัจจุบันขยะมูลฝอยเกิดขึ้นต่อเนื่องทุกวัน ในปี พ.ศ. 2564 ประเทศไทยมีขยะมูลฝอยมากถึง 24.98 million tons แต่ลดลงจากปีก่อนหน้าร้อยละ 1.5 ถือเป็นเรื่องดีที่หลายปีที่ผ่านมา ปริมาณขยะมูลฝอยมีแนวโน้มลดลง แต่ยังมีขยะที่มีการกำจัดอย่างไม่ถูกต้องมากถึงร้อยละ 32 (กรมควบคุมมลพิษ, 2564) ซึ่งขยะเหล่านี้เกิดจากผู้รับซื้อน้อยราย และหน่วยงานในหลายพื้นที่อยู่ห่างไกลจากแหล่งรับซื้อขยะมูลฝอยเพื่อนำไปใช้ประโยชน์หรือกำจัด เช่น โรงงานผลิตไฟฟ้าจากขยะ โรงงานผลิตปูนซีเมนต์ เตาเผาขยะ เป็นต้น ซึ่งอยู่ในแถบภาคกลาง ทำให้มีค่าใช้จ่ายในการขนส่งสูง หลายพื้นที่จึงจำเป็นต้องนำไปฝังกลบอย่างไม่ถูกต้องหรือกองทิ้งกลางแจ้ง ทำให้ขยะล้นบ่อฝังกลบ ส่งผลกระทบต่อชุมชนในพื้นที่ใกล้เคียง จึงจำเป็นต้องหาแนวทางในการใช้ประโยชน์จากขยะมูลฝอยที่เหมาะสมกับพื้นที่ เพื่อลดปัญหาเหล่านี้ได้

ซึ่งที่ผ่านมาได้มีการนำเชื้อเพลิงขยะไปใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลาย Carlos et al. (2016). ได้ใช้เชื้อเพลิงขยะ (RDF) ร่วมกับถ่านหินและกะลาปาล์ม ในกระบวนการเผาอิฐ พบว่าสามารถลดการสูญเสียความร้อนได้ถึงร้อยละ 5 และยังลดการเกิดมลพิษเมื่อเทียบกับการใช้ถ่านหินอย่างเดียว เช่นเดียวกับ Safwat et al. (2019). และ Mustafa K. (2012) ได้นำ RDF ไปใช้ร่วมกับถ่านหินในเตาเผาปูนซีเมนต์ พบว่าสามารถลดต้นทุนและลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่อเทียบกับการใช้ถ่านหิน ซึ่งส่วนมากเป็นการใช้ร่วมกับอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ โดยอุตสาหกรรมขนาดเล็กหรือ Small-Medium Enterprise (SMEs) ก็ถือเป็นอุตสาหกรรมที่มีศักยภาพในการใช้ประโยชน์จากรDF ซึ่ง พรชยา ลิบลับ และคณะ. (2562). ได้ทดสอบ RDF-5 กับโรงไฟฟ้าชีวมวล พบว่าอุณหภูมิการเผาไหม้มีแนวโน้มสูงกว่าชีวมวล มีความเสถียรเทียบเท่าชีวมวล ไม่ส่งผลต่อคุณภาพก๊าซที่ได้ออกมาจนถึงไม่ก่อให้เกิดมลพิษที่เกินมาตรฐานอีกด้วย แต่การใช้ RDF-2-3 รวมยังมีข้อจำกัด เนื่องจากมีขนาดใหญ่และระบบลำเลียงเป็นแบบสกรู ทำให้มีการลำเลียงยาก นอกจากนี้ยังมีอุตสาหกรรมเครื่องปั้นดินเผา/เซรามิก โรงงานอบไม้

อุตสาหกรรมเครื่องปั้นดินเผา/เซรามิก ถือเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากมีการใช้พลังงานความร้อนจำนวนมากจากการทดสอบเตาเผาภาชนะดินเผาที่ด่านเกวียน แต่ละรอบจะใช้เวลาราว 9-11 d. อุณหภูมิสูงสุดประมาณ 970 °C และใช้ไม้ฟืนประมาณ 3-4 tons ต่อเตา และระบบการป้อนเชื้อเพลิงโดยตรง จะสามารถนำ RDF-2-3 มาใช้ร่วมได้ จากแนวทางการจัดการขยะมูลฝอยด้วยเตาอย่างมีประสิทธิภาพ กรมควบคุมมลพิษ. (2561) การเผาที่อุณหภูมิสูงเกิน 850 °C จะสามารถกำจัดมลพิษที่ปลดปล่อยสู่บรรยากาศและเกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ และหากอุณหภูมิไม่เกิน 1,100 °C จะไม่ก่อให้เกิด NO<sub>x</sub> ที่เพิ่มขึ้น และด้วยการเข้าสู่ยุคสังคมเมือง ไม้ฟืนเริ่มหายาก มีต้นทุนสูงขึ้น การนำ RDF มาใช้ร่วมกับไม้ฟืน จึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ ซึ่งในตำบลด่านเกวียน จังหวัดนครราชสีมา ก็ถือเป็นแหล่งผลิตเครื่องปั้นดินเผาที่จำหน่ายทั้งไทยและต่างประเทศ มีจำนวนมากถึง 13 แห่งด้วยกัน (ศูนย์วิจัยและพัฒนาวัสดุอุตสาหกรรมสร้างสรรค์, 2560) และอยู่ไม่ห่างจากแหล่งผลิตเชื้อเพลิงขยะ รัศมีไม่เกิน 30 km ได้แก่ เทศบาลนครนครราชสีมา เทศบาลเมืองเมืองปัก

อย่างไรก็ตาม การที่จะนำเชื้อเพลิงขยะมาใช้ประโยชน์ร่วมกับอุตสาหกรรมเซรามิกนั้น จำเป็นต้องคำนึงถึงสมรรถนะการผลิตความร้อนและการเกิดมลพิษ ทั้งมลพิษในอากาศและการปนเปื้อนในแก้วและผลิตภัณฑ์ ถึงแม้ว่า ทวีชัย ลิ้มปสันติเจริญ รัฐพล อันแจ้ง และมัลลิกา ปัญญาคะโป, (2561). ได้ให้ข้อมูลว่าการใช้ไม่ในการเผาเซรามิกไม่ก่อให้เกิดมลพิษที่เกินค่ามาตรฐาน แต่เนื่องจากเชื้อเพลิงขยะมีคุณสมบัติทางเคมีที่มากกว่าไม้ จึงมีการปลดปล่อยมลพิษมากกว่าไม้แน่นอน โดยอ้างอิงการตรวจวัดตามมาตรฐานควบคุมการปล่อยทิ้งอากาศเสียจากเตาเผาขยะมูลฝอย กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (2553). ประกอบด้วย ค่าฝุ่นละออง ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO<sub>2</sub>) ออกไซด์ของไนโตรเจนในรูปไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO<sub>x</sub> as NO<sub>2</sub>) ไฮโดรเจนคลอไรด์ (HCl) สารปรอท (Hg) แคดเมียม (Cd) ตะกั่ว (Pb) ในส่วนของผลิตภัณฑ์และแก้วต้องมีการวิเคราะห์การปนเปื้อนของโลหะหนัก 14 ชนิด ประกอบด้วย (แคดเมียม Cd) (ปรอท Hg) (แบเรียม Ba) ซีเลเนียม (Se) เงิน (Ag) พลวง (Sb) สารหนู (As) ตะกั่ว (Pb) โครเมียม (Cr) โคบอลต์ (Co) ทองแดง

วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ปีที่ 28 ฉบับที่ 2 (2565), 33-41

(Cu) แมงกานีส (Mn) นิกเกิล (Ni) และวานาเดียม (V) (กรมควบคุมมลพิษ, 2561) โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ที่ใช้กับอาหาร ต้องมีการตรวจวัดค่าตะกั่วและแคดเมียม ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2556) มอก. 32 นอกจากนี้ยังต้องมีการตรวจวัด ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และออกซิเจนที่เหลือจากการเผาไหม้ (O<sub>2</sub>) เพื่อประเมินการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาผลการใช้เชื้อเพลิงขยะ (RDF) ร่วมกับชีวมวลต่อสมรรถนะและการปลดปล่อยมลพิษของเตาเผาภาชนะเซรามิก ว่าแตกต่างจากการใช้เชื้อเพลิงดั้งเดิมอย่างไร

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลการใช้เชื้อเพลิงขยะ (RDF) ร่วมกับชีวมวล เพื่อวิเคราะห์สมรรถนะการผลิตความร้อน การปลดปล่อยมลพิษทางอากาศ และการปนเปื้อนในเถ้าและผลิตภัณฑ์ จากการใช้เชื้อเพลิงไม้ลัด ไม้: RDF-3 และไม้: RDF-5 ที่สัดส่วนการป้อน 80: 20 wt. % w.b. โดยใช้เตาเผาเครื่องปั้นดินเผาแบบทางเดินลมร้อนลง ในตำบลด่านเกวียน อำเภอโชคชัย จังหวัดนครราชสีมา

## 2 อุปกรณ์และวิธีการ

### 2.1 เชื้อเพลิง

เชื้อเพลิงขยะประเภทที่ 3 และ 5 (Refuse-Derived Fuel 3, 5: RDF-3, RDF-5) ลักษณะดัง Figure 1. ที่ผ่านการแปรรูปโดยระบบบำบัดขยะทางกลและชีวภาพของ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (Suranaree University of Technology, Mechanical and Biological Treatment: SUT MBT) คุณสมบัติดัง Table 1

เชื้อเพลิงไม้เป็นไม้พื้นทั่วไปในพื้นที่ มีลักษณะเป็นท่อนแห้งคละก้น ได้แก่ ไม้ยางนา ไม้กะลันยักษ์ ไม้ซี้เหล็ก ไม้ยางพารา และไม้จามจุรี คุณสมบัติดัง Table 1

Table 1. Shows the properties of Fuels.

Parameters	Fuels		
	Wood	RDF-3	RDF-5
<b>Physical properties</b>			
Size (mm.)	Ø15-L1	50-300	Ø8-L5
Bulk density (kg m <sup>-3</sup> )	350	25.28	584
Moisture (% w.b.)	8.14	13.79	6.50
Heating value (kJ kg <sup>-1</sup> )	17,633	25,790	
<b>Proximate Analysis (wt. % d.b.)</b>			
Ash	0.73	8.87	
Volatile Matter	84.79	87.34	
Fixed Carbon	14.48	2.32	
<b>Ultimate Analysis (% wt.)</b>			
Carbon (C)	48.74	68.51	
Hydrogen (H)	6.39	10.85	
Nitrogen (N)	0.31	0.44	
Sulphur (S)	0.15	0.11	
Oxygen (O)	44.41	9.75	
<b>Heavy metal (% wt.)</b>			
Antimony (Sb)	N.D.	0.00000	
Arsenic (AS)	0.00010	0.04100	
Barium (Ba)	0.00332	0.00000	
Cadmium (Cd)	0.00000	0.00000	
Chromium (Cr)	0.00088	0.01000	
Cobalt (Co)	N.D.	N.D.	
Copper (Cu)	0.00026	0.00000	
Lead (Pb)	0.00046	0.00000	
Nickel (Ni)	0.00033	0.00000	
Manganese (Mn)	0.03286	0.00000	
Mercury (Hg)	0.00000	0.00000	
Selenium (Se)	N.D.	0.00000	
Silver (Ag)	N.D.	0.00100	
Vanadium (V)	0.00011	0.06100	

N.D. Not detected





Figure 1. (a) RDF-3 and (b) RDF-5

### 2.2 ขั้นตอนการทดสอบ

งานวิจัยนี้แบ่งเป็น 3 การทดลอง 1) เเผาโดยใช้ไม้ลั่น 2) เเผาโดยใช้ไม้: RDF-3 3) เเผาโดยใช้ไม้: RDF-5 ใช้สัดส่วนการป้อนที่ได้จากการทดสอบที่ 80 : 20 wt. % w.b. เป็นการป้อนแยกกันตามสัดส่วนที่กำหนด กระบวนการเผาจะใช้เวลาในการอุ่นเตา 3-4 d. อุณหภูมิไม่เกิน 650 °C โดยใช้ไม้ป้อน จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิหน้าเตา (T1) ให้ได้ 970 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ต้องการและสูงที่สุดในการเผาไหม้ ใช้เวลา 10 h. ช่วงนี้จะเริ่มป้อนเชื้อเพลิงที่ใช้ทดสอบ ทั้ง 3 แบบ และเป็นช่วงที่มีการตรวจวัดมลพิษทางอากาศ จากนั้นจะหยุดป้อนเชื้อเพลิงด้านหน้า แล้วเร่งอุณหภูมิกลางเตาและท้ายเตา (T2 และ T3) โดยใช้ไม้ลั่น ใช้เวลา 6 h. จากนั้นหยุดป้อนเชื้อเพลิงและปิดเตาประมาณ 4 d. หรือจนกว่าอุณหภูมิจะเย็นตัวลงต่ำกว่า 70 °C เก็บตัวอย่างกระถางดินเผา จาน-ชาม และเก้าอี้เพื่อตรวจวิเคราะห์การปนเปื้อนรวมระยะเวลาในการเผาแต่ละรอบประมาณ 9-11 d.

### 2.3 การวัดสมรรถนะการผลิตความร้อน

การวัดอุณหภูมิภายในเตาจะใช้ Thermocouple type K วัด 3 ตำแหน่ง หน้าเตา (T1) กลางเตา (T2) และท้ายเตา (T3) แสดงผลทางหน้าจอผู้ควบคุมแบบ real time โดยตำแหน่ง A เป็นช่องป้อนเชื้อเพลิงหลัก ใช้ป้อนเชื้อเพลิงที่ใช้ทดสอบทั้ง 3 แบบ และเก็บตัวอย่างเก้าอี้ ตำแหน่ง B ปล่องไอเสีย เป็นจุดที่ใช้ตรวจวัดมลพิษทางอากาศ ตำแหน่ง C ใช้ในการนำชิ้นงาน เข้า-ออก และตำแหน่ง D เป็นช่องสำหรับป้อนไม้เพื่อเร่งอุณหภูมิกลางเตา (T2) และท้ายเตา (T3) ดังแสดงใน Figure 1. เปรียบเทียบปริมาณการใช้เชื้อเพลิงโดยบันทึกข้อมูลปริมาณการใช้ทุก 30 นาที

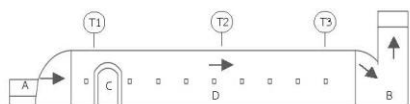


Figure 2. Sampling point

### 2.4 การวิเคราะห์การปนเปื้อนในผลิตภัณฑ์

กลุ่มตัวอย่างผลิตภัณฑ์กระถางดินเผาและจาน-ชาม นำมาบดให้ละเอียด แล้ววิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนัก (Heavy Metals) 14 ชนิด ได้แก่ Cd, Hg, Ba, Se, Ag, Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, และ V โดยใช้วิธีการ Inductively Couple plasma/mass Spectrometry Method (ICP-MS)

### 2.5 การวิเคราะห์การปนเปื้อนในเถ้า

เก็บตัวอย่างเถ้าจากเตาเผา มาวิเคราะห์สมบัติแบบประมาณ (Proximate Analysis) ประกอบด้วยปริมาณ เถ้า สารระเหย คาร์บอนคงตัว และความชื้น ตามมาตรฐาน ASTM D7582-10 โดยใช้ muffle furnace และ Infrared moisture analyzer ท้องค์ประกอบแบบแยกธาตุ ได้แก่ คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ไนโตรเจน (N) และ ซัลเฟอร์ (S) ตามมาตรฐาน ASTM D5373-08 โดยใช้เครื่องมือ LECO Method/ CHN628, 628S และโลหะหนัก 14 ชนิด ได้แก่ Cd, Hg, Ba, Se, Ag, Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, และ V โดยใช้วิธีการ X-ray Fluorescence Energy Dispersive Spectrometer Model XGT-5200

### 2.6 การวิเคราะห์มลพิษในอากาศ

กำหนดจุดซัดตัวอย่างตามมาตรฐานองค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งประเทศสหรัฐอเมริกา 1 (United States Environmental Protection Agency 1 : U.S. EPA 1) ขนาดปล่องควัน ๑ 0.35 m. จุดซัดตัวอย่างห่างจากปลายยอด 0.7 m. หากคุณสมบัติการเผาไหม้ ได้แก่ อัตราการไหลก๊าซไอเสียโดยใช้ Type S Pitot Tube ตามมาตรฐาน U.S. EPA Method 2 ส่วนก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้ CO<sub>2</sub> CO และ O<sub>2</sub> ตรวจวัดโดย Electro chemical method ตามมาตรฐาน U.S. EPA Method 3

วิเคราะห์สารเจือปนในอากาศ 8 ชนิด ได้แก่ 1) ฝุ่นละอองวัดด้วยวิธีการ Isokinetic (Gravimetric) 2) HG 3) Pb และ 4) Cd โดยใช้วิธี ICP AAS Method, AAS Method ตามมาตรฐาน U.S. EPA Method 5 29 29 และ 29 ตามลำดับ ส่วนอีก 4 ชนิด 5) HCL และ 6) ไฮโดรเจนฟลูออไรด์ (HF) ใช้เครื่อง Ion chromatography 7) SO<sub>2</sub> และ 8) NO<sub>x</sub> as NO<sub>2</sub> จะตรวจวัดด้วยหลักการ Electro chemical Method ตามมาตรฐาน U.S. EPA Method 10 26A 6C และ 7E ตามลำดับ

โดยการวัดมลพิษทางอากาศจะตรวจวัดเพียงการใช้เชื้อเพลิงไม้ลั่นเทียบกับ ไม้ : RDF-3 เนื่องจาก RDF-3 และ RDF-5 มีคุณสมบัติทางเคมีที่เหมือนกัน



3 ผลและวิจารณ์

3.1 สมรรถนะการผลิตความร้อน

จาก Figure 4. เชื้อเพลิงทั้ง 3 มีความสามารถในการผลิตความร้อนได้อุณหภูมิตามที่กำหนด โดยการใช้ไม้ส่วน อุณหภูมิจะมีความเสถียรมากที่สุด เนื่องจากมีคาร์บอนคงตัวเยอะกว่า เมื่อเปรียบเทียบ RDF-3 และ RDF-5 พบว่า RDF-5 มีความเสถียรในการควบคุมอุณหภูมิได้ดีกว่า RDF-3 เนื่องจากมีความหนาแน่นมากกว่า ส่วน RDF-3 อุณหภูมิจะค่อนข้างแกว่ง เนื่องจากมีความหนาแน่นและคาร์บอนคงตัวน้อย จึงทำให้เกิดการเผาไหม้เร็วเกินไปและ RDF-5 ส่วนปริมาณการใช้เชื้อเพลิงมีปริมาณลดลง เมื่อใช้ RDF ร่วมด้วย แต่ในทางพลังงานที่ใช้ RDF-3 มีการใช้พลังงานมากกว่าไม้และ RDF-5 เนื่องจากต้องใช้ในการควบคุมอุณหภูมิที่ค่อนข้างแกว่งจากการใช้ RDF-3 ร่วม แสดงดัง Table 2.

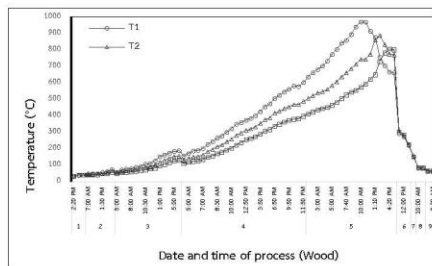
Table 2. Show the fuel and energy consumption.

Parameters	Fuels		
	Wood	W: RDF-3	W: RDF-5
Wood (kg.)	735	569.4	536.0
RDF (kg.)	0	124.9	121.4
Total fuel (kg.)	735	693.0	657.4
Total Energy (MJ)	12,960	13,261	12,582

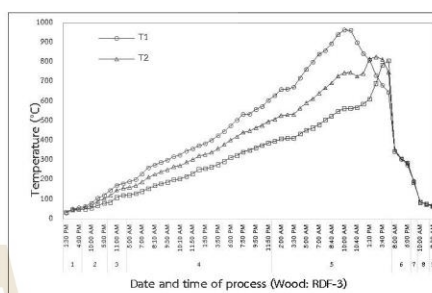
\*Fuel and energy at heat-up range (10 h.)



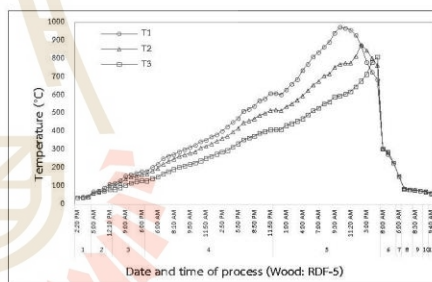
Figure 3. Testing the ceramic kiln



(a)



(b)



(c)

Figure 4. Temperature profile (a) wood (b) wood: RDF-3 (c) wood: RDF-5

3.2 การวิเคราะห์การปนเปื้อนในผลิตภัณฑ์

จาก Table 3. พบว่า การใช้ RDF-3 และ RDF-5 เปรียบเทียบกับไม้ มีการปนเปื้อนของโลหะหนักแตกต่างจากการใช้ไม้ล้วนอย่างมีนัยสำคัญ ของชิ้นงานทั้งสองประเภท เมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานการปนเปื้อนของโลหะหนักบนภาชนะเซรามิกที่ใช้กับอาหาร ประกอบด้วย ตะกั่ว (Pb) และแคดเมียม (Cd) ประเภทภาชนะแบบลิ้นขนาดเล็ก (ไม่เกิน 1.1 L) และขนาดใหญ่ (มากกว่า 1.1 L) อ้างอิงมาตรฐานตาม สำนักงานมาตรฐาน

Thai Society of Agricultural Engineering Journal Vol. 28 No. 2 (2022), 33-41

ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2556). มอก. 32 ซึ่งกำหนดให้ค่าตะกั่ว (Pb) ไม่เกิน 1 และ 2 mg L<sup>-1</sup> ตามลำดับ และแคดเมียม (Cd) ไม่เกิน 0.5 และ 0.25 mg L<sup>-1</sup> ตามลำดับ ผลพบว่าชิ้นงานทั้งสอง และ 3 ประเภทเชื้อเพลิง ตรวจไม่พบแคดเมียม แต่พบตะกั่วในทุกประเภทเชื้อเพลิง ซึ่งการเผาเชื้อเพลิงขยะร่วม มีค่าตะกั่วต่ำกว่าการเผาโดยไม่ล้วนของทั้งสองผลิตภัณฑ์ โดย Earthenware เมื่อใช้ RDF-3 และ RDF-5 เปรียบเทียบ พบว่ามีค่าตะกั่วลดลงร้อยละ 65 และ 47 ตามลำดับ ส่วน Plate-bowl พบว่ามีค่าตะกั่วลดลงเช่นกัน ร้อยละ 62 และ 78 ตามลำดับ ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานทุกตัว และเมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน Soluble Threshold Limit Concentration (STLC) กระทรวง

อุตสาหกรรม. (2548). และ Code of Federal Regulation. (2022). พบว่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานทุกตัวเช่นเดียวกัน เมื่อเทียบกับ Omolaoye J.A., Uzairu A., and Gimba C.E. (2010). ที่ได้ศึกษาโลหะหนักที่ปนเปื้อนในผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาที่นำเข้าจากจีน พบว่าปริมาณ Pb Cd Ni และ Cu ค่อนข้างใกล้เคียงกัน ส่วน Cr และ Co จากการทดสอบมีค่าน้อยกว่าเล็กน้อย โดยมีค่า Mn ค่าเดียวที่มีค่ามากกว่าอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเทียบกับ Supawan Vichaphund and Parjaree Thavorniti. (2010). ที่ตรวจวัดคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์เซรามิกที่ใช้แล้วจากการเผาขยะมูลฝอยเป็นส่วนผสม พบว่าโลหะหนัก Pb Cd Cr และ As จากการทดสอบมีค่าน้อยกว่าในทุกธาตุอย่างมีนัยสำคัญ

Table 3. Show heavy metals in products

Parameter	Earthenware (mg L <sup>-1</sup> )			Plate-bowl (mg L <sup>-1</sup> )			Standard. (STLC) mg L <sup>-1</sup>
	Wood	Wood: RDF-3	Wood: RDF-5	Wood	Wood: RDF-3	Wood: RDF-5	
Antimony (Sb)	0.000	0.000	0.000	0.013	0.017	0.004	-
Arsenic (AS)	0.002	0.002	0.003	0.012	0.011	0.005	≤5.00 <sup>a, b</sup>
Barium (Ba)	0.348	0.428	0.304	1.400	1.730	0.867	≤100 <sup>a, b</sup>
Cadmium (Cd)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	≤1.00 <sup>a, b</sup>
Chromium (Cr)	0.002	0.001	0.003	0.046	0.011	0.013	≤5.00 <sup>a, b</sup>
Cobalt (Co)	0.006	0.012	0.001	0.005	0.004	0.007	≤80.0 <sup>b</sup>
Copper (Cu)	0.060	0.044	0.033	0.161	0.086	0.097	≤25.0 <sup>b</sup>
Lead (Pb)	0.017	0.006	0.009	0.037	0.014	0.008	≤5.00 <sup>a</sup>
Nickel (Ni)	0.043	0.019	0.008	0.027	0.025	0.021	≤20.0 <sup>a</sup>
Manganese (Mn)	0.973	1.160	0.304	0.663	0.475	0.311	-
Mercury (Hg)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	≤0.20 <sup>a</sup>
Selenium (Se)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	≤1.00 <sup>a</sup>
Silver (Ag)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	≤5.00 <sup>a</sup>
Vanadium (V)	0.193	0.042	0.852	0.002	0.005	0.005	≤24.0 <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Code of Federal Regulation. (2022). Maximum Concentration of Contaminants for the Toxicity Characteristic.

<sup>b</sup> Ministry of Industry. (2005). Soluble Threshold Limit Concentration (STLC).

### 3.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติและการปนเปื้อนในแก้ว

Table 4. แสดงผลการวิเคราะห์คุณสมบัติและการปนเปื้อนในแก้วที่ได้จากเตาเผาภาชนะเซรามิก จากการใช้เชื้อเพลิงทั้ง 3 ประเภท พบว่า การใช้เชื้อเพลิงขยะร่วม มีการเผาไหม้ได้ดีเทียบเท่ากับการใช้ไม้ล้วน ส่วนผลการวิเคราะห์ของโลหะหนักทั้ง 14 ธาตุ ส่วนใหญ่ตรวจไม่พบ มีแค่ Cu และ Mn ที่ตรวจพบในการเผาทุกเชื้อเพลิง โดย Cu ของเชื้อเพลิง ไม้ : RDF-5 มีค่า

เพิ่มขึ้นจากการใช้ไม้ล้วนประมาณ 5 เท่า ส่วน ไม้ : RDF-3 มีค่าใกล้เคียงกับไม้ล้วน ด้าน Cr และ Pb พบเพียงการใช้ ไม้ : RDF-5 ที่ 430 และ 330 mg kg<sup>-1</sup> ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานองค์ประกอบสิ่งเจือปนในวัสดุที่ไม่ใช้แล้วหรือสิ่งปฏิภูล Total Threshold Limit Concentration (TTLC) กระทรวงอุตสาหกรรม. (2548). พบว่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานทุกตัว เมื่อเทียบกับ Jun Dong et al. (2018) ที่หาโลหะหนักในแก้วหนักของขยะมูลฝอยในกระบวนการ Pyrolysis, Gasification และ

วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ปีที่ 28 ฉบับที่ 2 (2565), 33-41

Incineration พบว่า ค่า Cd, Cu, Ni, และ Cr จากการทดสอบมี

ค่าน้อยกว่าอย่างมีนัยสำคัญ ส่วน Pb มีค่าใกล้เคียงกัน

Table 4. Properties and heavy metals of ash from ceramic kilns

Analysis	Parameters	Fuels			Standard <sup>c</sup> (TTLIC) mg kg <sup>-1</sup>
		Wood	Wood: RDF-3	Wood: RDF-5	
Proximate Analysis (% wt. db.)	Ash	85.665	87.866	92.593	-
	Volatile Matter	4.718	6.949	2.674	-
	Fixed Carbon	9.618	5.185	4.733	-
Ultimate Analysis (% wt.)	Moisture content	0.000	0.000	0.000	-
	Carbon (C)	5.119	3.064	3.084	-
	Hydrogen (H)	N.D.	1.810	0.093	-
	Nitrogen (N)	N.D.	N.D.	N.D.	-
Heavy Metals (mg kg <sup>-1</sup> )	Sulphur (S)	0.477	0.100	0.323	-
	Antimony (Sb)	0.000	0.000	0.000	≤500
	Arsenic (AS)	0.000	0.000	0.000	≤500
	Barium (Ba)	0.000	0.000	0.000	≤10,000
	Cadmium (Cd)	0.000	0.000	0.000	≤100
	Chromium (Cr)	0.000	0.000	430.0	≤2,500
	Cobalt (Co)	0.000	0.000	0.000	8,000
	Copper (Cu)	300.0	330.0	1,800	≤2,500
	Lead (Pb)	0.000	0.000	330.0	≤1,000
	Nickel (Ni)	0.000	0.000	0.000	≤2,000
	Manganese (Mn)	4,170	6,900	2,470	-
Mercury (Hg)	0.000	0.000	0.000	≤0.20	
Selenium (Se)	0.000	0.000	0.000	≤100	
Silver (Ag)	0.000	0.000	0.000	≤500	
Vanadium (V)	0.000	0.000	0.000	≤2,400	

<sup>c</sup> Ministry of Industry. (2005). Total Threshold Limit Concentration (TTLIC).

N.D. not detected

## 3.4 วิเคราะห์การปลดปล่อยมลพิษทางอากาศ

จาก Table 5. พบว่า การใช้ป้อน ไม้ : RDF-3 มีผลต่อการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าการใช้เชื้อเพลิงไม้ ร้อยละ 26 และมีออกซิเจนคงเหลือจากการเผาไหม้ลดลงร้อยละ 82 ซึ่งด้วยข้อจำกัดที่ปากเตามีขนาดเล็ก การป้อน RDF-3 ร่วมจะทำให้ช่องว่างลดลง อากาศไหลเข้าได้น้อย ทำให้มีออกซิเจนส่วนเหลือน้อยกว่าการใช้ไม้ล้วน เสี่ยงต่อการเกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ แต่ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ยังไม่เกินกว่ามาตรฐาน

กำหนด ที่ 690 ppm (Ministry of Industry, 2005). ซึ่งค่าที่ได้มีค่าน้อยกว่า 0.1 ppm

การปลดปล่อยมลพิษทางอากาศ จากการตรวจวัดอ้างอิงตามมาตรฐานข้างต้น ผลการตรวจวัดแสดงใน Table 6. เปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานการควบคุมการปล่อยทิ้งอากาศเสียจากเตาเผา มูลฝอย กระบวนการบำบัดธรรมชาติและสิ่งแฉดล้อม. (2553). พบว่าการเผาโดยใช้ไม้ล้วนและ ไม้ : RDF-3 มีค่าฝุ่นละอองเกินค่ามาตรฐานกำหนด มีค่า 400 และ 539 mg m<sup>-3</sup> ตามลำดับและการป้อน ไม้ : RDF-3 มีการปลดปล่อยมลพิษมากกว่าไม้ล้วนอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะค่า HCl และ Cd เพิ่มขึ้นร้อยละ 428

Thai Society of Agricultural Engineering Journal Vol. 28 No. 2 (2022), 33-41

และ 500 ตามลำดับ ยกเว้นค่า  $\text{NO}_x$  และ HF ที่มีค่าลดลงร้อยละ 42 และ 50 ตามลำดับ แต่ยังคงอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานกำหนด

ค่าโลหะหนักที่พบในการใช้เชื้อเพลิงไม้สอคล้องกับงานวิจัยของ ทวีชัย ลิ้มปสันติเจริญ รัฐพล อันแจ้ง และมัลลิกา ปัญญาคะโป, (2561). ที่ศึกษาโลหะหนักปนเปื้อนในอากาศจากการใช้เชื้อเพลิงไม้ พบว่ามีค่าโลหะหนักไม่เกินเกณฑ์มาตรฐานเช่นกัน แต่มีการปลดปล่อยฝุ่นละอองค่อนข้างน้อยกว่า ที่  $131 \text{ mg m}^{-3}$  เมื่อเทียบกับ Sánchez de la Campa et al. (2010) ซึ่งเป็นการใช้เชื้อเพลิงถ่านโค้กกับโรงงานเซรามิก พบว่าค่าที่ได้จากการทดสอบมีปริมาณแคดเมียมและตะกั่วที่น้อยกว่า

Table 5. Show the combustion gas composition

Parameter	Fuels	
	Wood	Wood: RDF-3
V ( $\text{m}^3 \text{ hr}^{-1}$ )	565	531
Temp. ( $^{\circ}\text{C}$ )	182	230
$\text{CO}_2$ (% vol.)	7.04	18
$\text{O}_2$ (% vol.)	13.88	2.51
CO (ppm)	< 0.1	< 0.1

Table 6. Show the Air emissions of ceramic kiln

Parameters	Wood	Wood + RDF-3	Standard <sup>e</sup>
	@ 7% $\text{O}_2$	@ 7% $\text{O}_2$	
Dust ( $\text{mg m}^{-3}$ )	400	539	< 320
Sulphur dioxide: $\text{SO}_2$ (ppm)	< 1	< 1	< 30
$\text{NO}_x$ as $\text{NO}_2$ (ppm)	59	34	< 250
Hydrogen chloride: HCl (ppm)	3.03	16.0	< 80
Hydrogen fluoride: HF ( $\text{mg m}^{-3}$ )	0.671	0.329	< 80
Mercury: Hg ( $\text{mg m}^{-3}$ )	0.004	0.009	< 0.05
Cadmium: Cd ( $\text{mg m}^{-3}$ )	<0.001	0.006	< 0.5
Lead: Pb ( $\text{mg m}^{-3}$ )	0.022	0.064	< 1.5

<sup>e</sup> Ministry of Natural Resources and Environment. (2010, 16 July). Set the standards to control waste air emissions from solid waste incinerators. No. 127. 874 A.D. 2010.

#### 4 สรุป

ผลการใช้เชื้อเพลิงขยะร่วมกับชีวมวลต่อสมรรถนะการผลิตความร้อน การปลดปล่อยมลพิษทางอากาศ และการปนเปื้อนในเถ้าและผลิตภัณฑ์ พบว่า RDF-3 และ RDF-5 มีสมรรถนะในการผลิตความร้อนได้เทียบเท่าไม้ โดยไม่ส่งผลกระทบต่อ การปลดปล่อยมลพิษทางอากาศ และการปนเปื้อนในเถ้าและผลิตภัณฑ์ ยกเว้นค่าฝุ่นละอองที่มีค่าเกินมาตรฐาน

#### 5 ข้อเสนอแนะ

การป้อน RDF-3 ทำได้ยาก เนื่องจากเชื้อเพลิงค่อนข้างฟู และจำเป็นต้องบรรจุลักษณะทรงกระบอกเพื่อให้ป้อนง่าย หากการทำงานจริงต้องมีระบบที่สามารถป้อน RDF ได้ง่ายขึ้น และในขั้นตอนการทดสอบที่มีการใช้ RDF ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลงค่อนข้างเยอะ เกิดจากช่องป้อนมีขนาดเล็ก ควรปรับระบบเติมอากาศเพื่อช่วยให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ขึ้น รวมถึงมีการ

ประเมินต้นทุนของเชื้อเพลิง RDF ถึงแม้การใช้เชื้อเพลิงลดลงเมื่อมีการใช้ RDF แต่ก็ต้นทุนการผลิต RDF เช่นกัน

#### 6 กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนอุดหนุนวิจัย และขอบคุณศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้สถานที่ และเครื่องมือในการทำวิจัยในครั้งนี้

#### 7 เอกสารอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ. (2564). สถานการณ์ขยะมูลฝอยของประเทศ แหล่งข้อมูล : <https://thaimsw.pcd.go.th/report1.php?year=2564>. เข้าถึงเมื่อ 19 พฤษภาคม 2565.  
กรมควบคุมมลพิษ. (2561, 26 กันยายน). ประกาศกรมควบคุมมลพิษ เรื่อง แนวทางในการจัดการขยะมูลฝอยด้วยเตาเผาอย่างมีประสิทธิภาพ พ.ศ. 2561



- วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ปีที่ 28 ฉบับที่ 2 (2565), 33-41
- กระทรวงอุตสาหกรรม. (2556, 23 พฤษภาคม). ประกาศ กระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว. ฉบับที่ 123 ตอนพิเศษ 11ง วันที่ 25 มกราคม พ.ศ. 2548
- ทวีชัย ลิ้มปลั่งดิเจริญ รัฐพล อันแดง และมลลิกา ปัญญาอะโป. (2561). การระบายและการแพร่กระจายของโลหะในฝุ่นจาก อุตสาหกรรมเครื่องปั้นดินเผา. วารสารวิชาการเทคโนโลยี อุตสาหกรรม ปี ที่ 14 ฉบับที่ 2 พฤษภาคม – สิงหาคม 2561
- พรชชา ลิ้มปลั่ง วีรชัย อาจหาญ คธา วาทกิจ อาทิตย์ คุณศรีสุข และทิพย์สุกินทร์ หินสุข. (2565). รายงานวิจัย แนวทางการ นำเชื้อเพลิงขยะ (RDF) จากมูลฝอยชุมชนมาใช้ประโยชน์ ใน กลุ่มธุรกิจขนาดเล็ก (SME) หรืออุตสาหกรรมขนาดเล็ก. ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ ประจำปีงบประมาณ 2563
- ศูนย์วิจัยและพัฒนาวัสดุอุตสาหกรรมสร้างสรรค์. (2560). รายชื่อ โรงงานเซรามิก ในจังหวัดนครราชสีมา (ด้านเกวียน). แหล่งข้อมูล: <https://cim.dip.go.th/category/2017-03-03-02-37-41/2017-03-03-02-47-12> เข้าถึงเมื่อ 22 สิงหาคม พ.ศ. 2565
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2556, 23 พฤษภาคม). ประกาศสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์ อุตสาหกรรม เรื่อง ยกเลิกและกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์ ชุมชน เครื่องปั้นดินเผาเออร์เทนแวร์ ฉบับที่ 1782 พ.ศ. 2556
- A.M. Sánchez de la Campa, J.D. Rosa, G.Y. Castanedo, F.R. Camacho, A. Alastuey, X. Querol and C. Pio. (2010). "High concentrations of heavy metals in PM from ceramic factories of Southern Spain", Atmospheric Research 96, 2010, pp. 633- 644.
- Code of Federal Regulation. (2022). Maximum Concentration of Contaminants for the Toxicity Characteristic. Available at: <https://www.ecfr.gov/current/title-40/chapter-I/subchapter-I/part-261/subpart-C/section-261.24>. Accessed on 28 July 2022.
- Carlos et al. (2016). Co-gasification of sub-bituminous coal with palm kernel shell in fluidized bed coupled to a ceramic industry process. Applied thermal engineering 107 (2016) 1201–1209
- Jun Dong et al. (2018). Partitioning of Heavy Metals in Municipal Solid Waste Pyrolysis, Gasification, and Incineration. Hal open science. Submitted on 2 May 2018.
- Ministry of Industry. (2005). Announcement of the Ministry of Industry. Regarding the disposal of waste or unused materials (Soluble Threshold Limit Concentration) 123/11ง 25 January 2005
- Ministry of Industry. (2005). Announcement of the Ministry of Industry. Regarding the disposal of waste or unused materials (Total Threshold Limit Concentration) 123/11ง 25 January 2005
- Ministry of Natural Resources and Environment. (2010, 16 July). Set the standards to control waste air emissions from solid waste incinerators. No. 127. 87 ง A.D. 2010.
- Omolaoye J.A., Uzairu A., and Gimba C.E. (2010). Heavy metal assessment of some ceramic products imported into Nigeria from China. Archives of Applied Science Research, 2010, 2 (5):120-125
- Peterson, Beth E. (2012). What Kind of Kiln Is It? Kiln Types by Construction. Retrieved August 8, 2012, from <http://pottery.about.com/od/potterykilns/tp/typkilncons.htm>
- Safwat et al. (2019). Potential Utilization of RDF as an Alternative Fuel to be Used in Cement Industry in Jordan. Molecular Diversity Preservation International [MDPI]. (2019)
- Supawan Vichaphund and Parjaree Thavorniti. (2010). Properties of Ceramic Produced from Clay and MSW Incineration Bottom Ash Mixtures. Thammasat Int. J. Sc. Tech., Vol. 15, Special Edition, September 2010



การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ระดับชาติ

ครั้งที่ 21 วันที่ 30 – 31 กรกฎาคม 2563

จัดประชุมโดย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา

**การทดสอบอบแห้งหญ้าเนเปียร์สำหรับแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงชีวมวล โดยใช้กระบวนการอบแห้งแบบพาหะลม**  
**A test of napier grass drying for biomass fuel processing using a flash dryer process**

นนทกร ภาคภูมิ<sup>1,2\*</sup>, อูติกกร กิจจนศิริ<sup>1,2</sup>, พงษ์ศิริ มีสิงห์<sup>1</sup>, ศิว แม่นมีศรี<sup>1</sup>, พงษ์พัฒน์ รongเมือง<sup>1</sup>, พรรษา ลิบลับ<sup>1,2</sup>,  
 ทิพย์สุภินทร์ หินซุย<sup>2</sup>, วีรัชย์ ออาจหาญ<sup>1,2</sup>,

Nontakorn Phakphoom<sup>1,2\*</sup>, Thitikorn Kijjanasiri<sup>1,2</sup>, Pongsiri Meesing<sup>1</sup>, Siwa Manmeesri<sup>1</sup>,  
 Pongpat Rongmueang<sup>1</sup>, Pansa Liplap<sup>1,2</sup>, Thipsuphin Hinsui<sup>2</sup>, Weerachai Arjharh<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา, 30000

<sup>2</sup>School of Agricultural Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000

<sup>3</sup>ศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา, 30000

<sup>2</sup>Center of Excellence in Biomass, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000

\*Corresponding author: Tel: +66 93-528-3425, Fax: +66-44-224-610 E-mail: Nonthakomtopp@gmail.com

**บทคัดย่อ**

หญ้าเนเปียร์เป็นพืชพลังงานที่ลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในกระบวนการผลิตพลังงาน เมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงฟอสซิล อีกทั้งยังสร้างความยั่งยืนด้านพลังงานทดแทนในประเทศ แต่หญ้าเนเปียร์ยังมีคุณสมบัติไม่เหมาะสมสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวล งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเตรียมชีวมวลหญ้าเนเปียร์ สำหรับแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงชีวมวล โดยศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและอัตราการป้อนวัตถุดิบ ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้น อัตราการอบแห้ง และการใช้พลังงานจำเพาะในการอบแห้ง เพื่อประเมินสมรรถนะและหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้ง รวมถึงประเมินต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ โดยเลือกใช้อุณหภูมิที่  $90 \pm 18^{\circ}\text{C}$  และ  $100 \pm 18^{\circ}\text{C}$  อัตราการป้อนวัตถุดิบ 300, 350 และ  $400 \text{ kg h}^{-1}$  ผลการศึกษาพบว่า ที่อุณหภูมิ  $90 \pm 18^{\circ}\text{C}$  อัตราการป้อนวัตถุดิบ  $300 \text{ kg h}^{-1}$  เป็นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการลดความชื้นชีวมวล โดยมีต้นทุนการผลิตเท่ากับ  $0.40 \text{ Baht Mcal}^{-1}$  ส่วนถ่านหินอยู่ที่  $0.43 \text{ Baht Mcal}^{-1}$  ถือว่ามีศักยภาพในการเป็นพลังงานทดแทนถ่านหินและลดการนำเข้าถ่านหินจากต่างประเทศ

คำสำคัญ: การอบแห้งแบบพาหะลม; การอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวล; พลังงานทดแทน; เชื้อเพลิงชีวมวล; หญ้าเนเปียร์

**Abstract**

Napier grass is an energy plant that reduces carbon dioxide emissions in energy production processes. Compared to fossil fuels and also creating sustainable energy in the country. However, Napier grass is not suitable for the production of biomass fuel or used as direct fuel. This research is the study of preparation of Napier grass biomass. for processing into biomass fuel. Studying the influence of temperature and feed rate That affects moisture changes, drying rate and the use of specific energy for drying. To evaluate the performance and find the suitable conditions for drying Including evaluating the cost of economics. using the temperature at  $90 \pm 18^{\circ}\text{C}$  and  $100 \pm 18^{\circ}\text{C}$ , the feed rate of 300, 350 and  $400 \text{ kg h}^{-1}$ , the results showed that at the temperature of  $90 \pm 18^{\circ}\text{C}$ , the feed rate of  $300 \text{ kg h}^{-1}$  is the suitable condition for dehumidifying biomass. The cost of production is equal to  $0.40 \text{ Baht Mcal}^{-1}$  and the coal cost is  $0.43 \text{ Baht Mcal}^{-1}$ . Which has the potential to be a renewable energy source for coal and reduce the import of coal.

Keywords: Flash drying; Drying of biomass fuels; Renewable energy; Biomass fuel; Napier grass

### บทนำ

ปัจจุบันสถานการณ์การเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศ (Climate change) หรือภาวะโลกร้อน กำลังเป็นประเด็นที่ประชากรโลกให้ความสนใจ และหลายประเทศต่างหาแนวทางในการแก้ปัญหา สาเหตุหลักของการเกิดภาวะโลกร้อนมาจากการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสู่ชั้นบรรยากาศ ซึ่งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถูกปล่อยสู่บรรยากาศมากที่สุด จากรายงานการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการใช้พลังงานปี 2562 สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (2562) ให้ข้อมูลว่า มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากถึง 250.4 Million tons CO<sub>2</sub> โดยส่วนมากมาจากการผลิตพลังงาน อุตสาหกรรม ยานพาหนะ และการเกษตร ซึ่งการผลิตพลังงานจากฟอสซิล มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากที่สุด จากปัญหาดังกล่าว คณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ (2554) ได้กำหนดแผนงาน โดยมีเป้าหมายในการใช้พลังงานทางเลือกแทนพลังงานฟอสซิลให้ได้ร้อยละ 25 ในระยะเวลา 10 ปี (พ.ศ. 2555 - 2564)

ชีวมวล ถือเป็นทางเลือกที่น่าสนใจในการผลิตพลังงานทดแทนในอนาคต เพราะเป็นวัสดุหมุนเวียนที่มีปริมาณมาก สามารถสร้างความมั่นคงทางพลังงานและเป็นพลังงานที่ลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก เมื่อเทียบกับการผลิตพลังงานจากฟอสซิล อีกทั้งประเทศไทยถือเป็นประเทศเกษตรกรรม หลังการเก็บเกี่ยวผลผลิตจะมีวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรจำนวนมาก เช่น ฟางข้าว ชังข้าวโพด ใบอ้อย เหง้ามันสำปะหลัง เป็นต้น การนำวัสดุชีวมวลเหล่านี้มาผลิตเป็นเชื้อเพลิงพลังงาน ถือเป็นทางเลือกที่คุ้มค่าจากทั้งการเผาทำลายและสร้างประโยชน์แก่เกษตรกร อย่างไรก็ตาม ในด้านการผลิตพลังงานที่ต้องการความต่อเนื่องของวัตถุดิบ ซึ่งวัสดุดังกล่าว ยังมีข้อจำกัดในเรื่องอายุการเก็บเกี่ยว ที่มีช่วงเวลาในการเก็บเกี่ยวที่นานเกินไป จึงจำเป็นต้องแสวงหาพืชพลังงานทดแทนใหม่ เพื่อป้อนเข้าสู่กระบวนการผลิตพลังงานได้อย่างต่อเนื่อง

หญ้าเนเปียร์ จึงถือได้ว่าเป็นพืชพลังงานที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในปัจจุบัน มีข้อดีในเรื่องการให้ผลผลิตต่อไร่สูง เฉลี่ยแล้วอยู่ที่ 40 - 80 ตันสดต่อไร่ต่อปี สามารถเก็บเกี่ยวได้ปีละ 5 - 6 ครั้ง อายุเก็บเกี่ยวนาน 6 - 7 ปี แต่การนำหญ้าเนเปียร์มาใช้ประโยชน์ในการผลิตพลังงานนั้นไม่ใช่เรื่องง่าย เพราะมีความชื้นสูง ขนาดที่หลากหลาย และเกิดการย่อยสลายทางธรรมชาติได้ง่าย ไม่เหมาะที่จะนำมาเป็นเชื้อเพลิงโดยตรงหรือนำไปแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงชีวมวล (วีรชัย และคณะ, 2554) ดังนั้น กระบวนการลดความชื้นจึงเป็นสิ่งสำคัญ และจำเป็นต้องคำนึงถึงคุณสมบัติทางกายภาพของชีวมวล เพื่อเลือกใช้เครื่องมือที่เหมาะสมในการลดความชื้น

กระบวนการอบแห้งแบบพาหะลมร้อน (Flash dryer) เป็นเทคโนโลยีที่ต้นทุนต่ำ เหมาะสำหรับวัสดุที่มีขนาดเล็กและไม่จำเป็นต้องมีขนาดเท่ากัน (Amos, W. A., 1998) ดังนั้น การอบแห้งแบบพาหะลมร้อน จึงเหมาะสำหรับการอบแห้งวัสดุชีวมวลหญ้าเนเปียร์ ซึ่งโดยทั่วไปอุณหภูมิการอบแห้งไม่ควรเกิน 150°C แต่สามารถใช้อุณหภูมิสูงถึง 200°C ได้ ในกรณีเป็นการอบแห้งที่ระยะเวลาสั้นแบบพาหะลม (ธนธัช และคณะ, 2559) ซึ่งอุณหภูมิที่สูงขึ้น อาจทำให้วัสดุสุกไหม้เองได้ และต้องคำนึงถึงความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงในการให้ความร้อนแก่ระบบด้วย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเตรียมชีวมวลหญ้าเนเปียร์ สำหรับแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงชีวมวล โดยใช้เครื่องอบแห้งแบบพาหะลมร่วมกับเครื่องบดย่อย เพื่อให้ชีวมวลมีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงชีวมวล โดยศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและอัตราการป้อนวัตถุดิบ ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้น อัตราการอบแห้ง และการใช้พลังงานเฉพาะในการอบแห้ง เพื่อประเมินสมรรถนะและหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้ง รวมถึงประเมินต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์การผลิต

### อุปกรณ์และวิธีการ

#### วัตถุดิบ

วัตถุดิบที่ใช้ในการทดสอบ เป็นหญ้าเนเปียร์พันธุ์ปากช่อง 1 ที่ปลูกในดินมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา โดยมีอายุเก็บเกี่ยว 2-3 month โดยใช้รถสับหญ้าทางการเกษตร จะได้วัตถุดิบที่มีลักษณะ ดังแสดงใน Figure 1



การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ระดับชาติ ครั้งที่ 21  
30 – 31 กรกฎาคม 2563 จัดประชุมโดย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จ.นครราชสีมา



Figure 1. Raw material.

#### อุปกรณ์และขั้นตอนการทำงาน

ในกระบวนการเตรียมวัสดุสำหรับงานวิจัยนี้ มีอุปกรณ์หลัก ๆ 6 ส่วน ดังนี้ (1) ระบบรับวัสดุ (Hopper feeder) และสายพานลำเลียง (2) เครื่องบดย่อย (Hammer mill) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูดะแกรง 14 mm กำลังผลิต  $400 \text{ kg h}^{-1}$  (3) ชุดถังอบแห้งพละความร้อนจำนวน 3 ถัง แต่ละถังมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 90 cm สูง 460 cm (4) Blower ขนาด 3-5 hp อัตราการไหลเชิงปริมาตร  $0.47 \pm 0.07 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  (5) ลังฟักวัตถุดิบ (6) ระบบให้ความร้อนโดยใช้ Oil burner เพื่อเพลิงใช้น้ำมันไพโรไลซิสหรือน้ำมันจากขยะพลาสติก ดังแสดงใน Figure 2

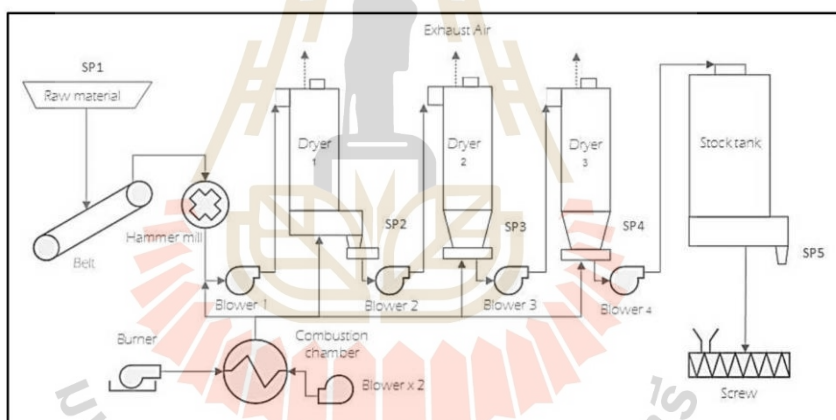


Figure 2. Process of biomass preparation.

การทำงานของระบบเริ่มจากการนำหญ้าเนเปียร์ที่ผ่านการสับย่อยโดยรถสับหญ้า ขึ้นสู่ถังรับวัตถุดิบ จากนั้นใช้สายพานส่งวัตถุดิบไปที่เครื่องบดย่อย (Hammer mill) เมื่อวัสดุถูกย่อยแล้ว จะถูกลำเลียงด้วยลมไปยังถังอบแห้งจากถังที่ 1-3 โดยใช้ความร้อนจาก Oil burner อุณหภูมิประมาณ  $380-450^{\circ}\text{C}$  จากนั้นวัสดุจะถูกลำเลียงไปเก็บไว้ในลังฟัก เพื่อใช้ในการแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลต่อไป



#### คุณสมบัติทางกายภาพของชีวมวล

ในกระบวนการอบแห้งชีวมวล คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุเป็นข้อมูลพื้นฐานที่จำเป็นในการวิเคราะห์กระบวนการซึ่งได้แก่ ขนาด ความชื้น และความหนาแน่นของวัสดุ โดยความชื้นและความหนาแน่น สามารถคำนวณได้ตามสมการ (1) และสมการ (2) ตามลำดับ

$$MC = \frac{m_w - m_d}{m_w} \quad (1)$$

โดยที่ MC คือ ความชื้นชีวมวลมาตรฐานเปียก (w.b.)

$m_d$  คือ มวลตัวอย่างหลังอบแห้ง (g)

$m_w$  คือ มวลตัวอย่างก่อนอบแห้ง (g)

$$\rho_b = \frac{m}{v} \quad (2)$$

โดยที่  $\rho_b$  คือ ความหนาแน่นรวม ( $\text{kg m}^{-3}$ )

$m$  คือ มวลชีวมวล (kg)

$v$  คือ ปริมาตรวัสดุ ( $\text{m}^3$ )

#### ขั้นตอนการทดลอง

ในส่วนของการหาความชื้นวัสดุ จะแบ่งตำแหน่งการเก็บข้อมูล (Sampling point: SP) ออกเป็น 5 ตำแหน่งด้วยกัน ดังนี้ (1) ความชื้นวัสดุเริ่มต้น (2) ความชื้นหลังผ่านถังอบแห้ง 1 (3) ความชื้นหลังผ่านถังอบแห้ง 2 (4) ความชื้นหลังผ่านถังอบแห้ง 3 (5) ความชื้นที่ถังเก็บวัสดุ ดังแสดงใน Figure 2 โดยจะเก็บตัวอย่างทุก ๆ 10 min ของแต่ละตำแหน่ง เป็นเวลา 30 min ที่อุณหภูมิ  $90 \pm 18^\circ\text{C}$  และ  $100 \pm 18^\circ\text{C}$  โดยวัดที่ตำแหน่งท่อทางเข้าถังอบแห้ง อัตราการป้อนวัสดุคือ 300, 350 และ  $400 \text{ kg h}^{-1}$  จากนั้นหาความชื้นโดยอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D3173 (American Society for Testing and materials, 1997b) ใช้เตาอบลมร้อน (Hot Air Oven) อบแห้งที่อุณหภูมิ  $103^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 24 h หรือจนกว่าน้ำหนักวัสดุแห้งที่ลดลงมีค่าคงที่ ซึ่งมวลด้วยตราชั่งดิจิทัล ความละเอียด 0.01 g วิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

#### การประเมินสมรรถนะการอบแห้ง

ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและอัตราการป้อนวัสดุต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้น โดยใช้อุณหภูมิ  $90 \pm 18^\circ\text{C}$  และ  $100 \pm 18^\circ\text{C}$  อัตราการป้อนวัสดุคือ 300, 350 และ  $400 \text{ kg h}^{-1}$  โดยมีตัวแปรควบคุม คือ อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันและความชื้นเริ่มต้น ซึ่งสมรรถนะการอบแห้งวัสดุ สามารถประเมินได้จากอัตราการอบแห้ง (Drying Rate: DR) ตามสมการ (3) และพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้ง (Specific Energy Consumption SEC) ตามสมการ (4) โดยพลังงานไฟฟ้าประเมินจากการใช้กระแสไฟและแรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์แต่ละตัว ปรับค่าโดยการคูณตัวประกอบกำลังและประสิทธิภาพของมอเตอร์ ส่วนพลังงานความร้อน ประเมินจากค่าความร้อนของน้ำมันไฟโรซิกับปริมาณน้ำมันที่ใช้

$$DR = \frac{MC_i - MC_f}{t} \quad (3)$$

โดยที่ DR คือ อัตราการอบแห้ง ( $\text{h}^{-1}$ )

$MC_i$  คือ ความชื้นวัสดุก่อนการอบแห้ง (d.b.)

$MC_f$  คือ ความชื้นวัสดุหลังการอบแห้ง (d.b.)

$t$  คือ เวลาทั้งหมดที่ใช้ในการอบแห้ง (h)

การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ระดับชาติ ครั้งที่ 21  
30 - 31 กรกฎาคม 2563 จัดประชุมโดย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จ.นครราชสีมา

$$SEC = \frac{E_{electric} + E_{heat}}{m_w} \quad (4)$$

โดยที่ SEC คือ พลังงานจำเพาะที่ใช้อบแห้ง ( $MJ \text{ kg}_{\text{water}}^{-1}$ )

$E_{electric}$  คือ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ (MJ)

$E_{heat}$  คือ พลังงานความร้อนที่ใช้ในระบบ (MJ)

$m_w$  คือ ปริมาณน้ำที่ระเหย (kg)

#### ผลและวิจารณ์

##### คุณสมบัติทางกายภาพของชีวมวล

จากการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานเปียร์ที่ผ่านกระบวนการเก็บเกี่ยวโดยรถตัดหญ้า พบว่ายังไม่เหมาะต่อการนำไปเป็นเชื้อเพลิงโดยตรงหรือแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงชีวมวล เนื่องจากมีความชื้นสูง ขนาดใหญ่ และเกิดการย่อยสลายทางธรรมชาติได้ง่าย โดยมีความชื้นอยู่ที่  $78.7 \pm 2.0\%$  w.b. มีลักษณะเป็นก้อนกลม แผ่นบาง และเป็นเส้นใย ซึ่งกระบวนการอบแห้งแบบพาหะลมจำเป็นต้องลดขนาดวัสดุลง เพื่อการขนถ่ายวัสดุที่มีประสิทธิภาพดีขึ้น โดยใช้เครื่องบดย่อย (Hammer mill) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูตะแกรง  $14 \text{ mm}$  กำลังผลิต  $400 \text{ kg h}^{-1}$

##### การเปลี่ยนแปลงความชื้น

อิทธิพลของอุณหภูมิและอัตราการป้อนวัสดุดิบ มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้น แสดงผลตามตำแหน่งต่าง ๆ ของระบบอบแห้งแบบพาหะลม ดังแสดงใน Figure 3 พบว่า ทั้งอุณหภูมิและอัตราการป้อน มีผลต่อการลดลงของความชื้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทุกตำแหน่งประมาณ  $10^\circ\text{C}$  ความชื้นลดลงเฉลี่ย  $20 \pm 9\%$  w.b. ของทุก ๆ อัตราการป้อน จะเห็นได้จากกราฟช่วงตำแหน่งที่ 3-4 อัตราการลดลงของความชื้นมีค่าน้อย เนื่องจากในช่วงนี้ไม่มีอุณหภูมिन้อย เมื่อเทียบกับช่วงแรกและช่วงสุดท้าย และความชื้นที่ลดลงอย่างรวดเร็ว อาจเป็นผลมาจากลักษณะทางกายภาพของหญ้าเนเปียร์ ซึ่งผ่านการสับเบื้องต้นจากการเก็บเกี่ยวและผ่านการสับย่อยอีกครั้งในกระบวนการอบแห้ง จึงทำให้มีลักษณะบาง เป็นเส้นใย และมีขนาดเล็ก ทำให้ถ่ายเทความร้อนได้ดี แต่อุณหภูมิต่ำ ความชื้นเปลี่ยนแปลงเชื้อเพลิงก็มากขึ้นเช่นกัน

ผลจากการเพิ่มอัตราการป้อนวัสดุ ทำให้ความชื้นของวัสดุลดลงช้า สัดส่วนความชื้นที่สูงขึ้น เมื่อเพิ่มอัตราการป้อน เฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ  $8.8 \pm 1.2\%$  w.b. ของทุก ๆ การเพิ่มอัตราการป้อนทั้ง 2 อุณหภูมิ โดยที่อุณหภูมิ  $100 \pm 18^\circ\text{C}$  อัตราการป้อน 300 และ  $350 \text{ kg h}^{-1}$  แทบจะไม่มีผลเนื่องจากการเปลี่ยนอัตราการป้อน อาจเป็นเพราะอุณหภูมิที่สูง ทำให้ผลจากการเปลี่ยนอัตราการป้อนไม่มาก แต่ที่อัตราการป้อน  $400 \text{ kg h}^{-1}$  มีค่าความชื้นที่แตกต่างจากค่าอื่น อาจเป็นผลมาจากอัตราการป้อนที่มากขึ้น ทำให้ความหนาแน่นของวัสดุในระบบมากขึ้น เกิดการถ่ายเทความร้อนน้อยลง ซึ่งค่าความชื้นที่เหมาะสมสำหรับการนำไปแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงอัดแห้ง ควรอยู่ในช่วง  $25\text{-}30\%$  w.b. (เรนจ์ และคณะ, 2559) ถ้าหากความชื้นต่ำไปจะอัดเม็ดได้ยาก แต่หากมีความชื้นที่สูงเกิน จะทำให้ชีวมวลอัดแห้งคลายตัวและเสียรูปได้ (Tumuluru et al., 2016)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ระดับชาติ ครั้งที่ 21  
30 - 31 กรกฎาคม 2563 จัดประชุมโดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จ.นครราชสีมา

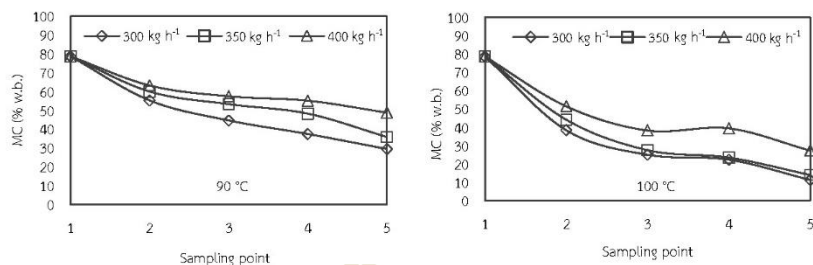


Figure 3. Effects of temperature and biomass feed rate on moisture reduction.

#### อัตราการอบแห้ง

อิทธิพลของความชื้นและอัตราการป้อนวัตถุดิบ มีผลต่ออัตราการอบแห้ง ดังแสดงใน Figure 4 ซึ่งวิเคราะห์จากผลต่างของความชื้นก่อนและหลังอบแห้ง เทียบกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ระยะเวลาที่พื้ฐานเป็ยร้ออยู่ในระบบเฉลี่ยแล้วอยู่ที่ 98 s ซึ่งพบว่า อัตราการป้อนวัตถุดิบส่งผลต่ออัตราการอบแห้ง ในสัดส่วนที่น้อยกว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ หรือในทำนองเดียวกัน ที่เวลาเท่ากัน การเพิ่มอุณหภูมิสามารถลดความชื้นได้มากกว่าการเปลี่ยนอัตราการป้อน แต่โดยภาพรวมสังเกตเห็นได้ว่า ที่อัตราการป้อน 300 kg h<sup>-1</sup> อุณหภูมิ 90±18°C มีอัตราการอบแห้งที่ใกล้เคียงกับการอบแห้งที่ 100±18°C ทุก ๆ อัตราการป้อน

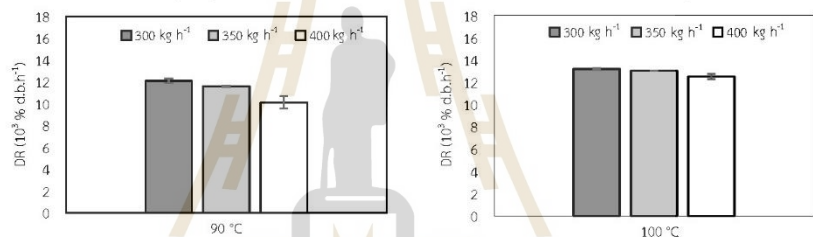


Figure 4. Effects of temperature and biomass feed rate on drying rate.

#### พลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้ง

อิทธิพลของความชื้นและอัตราการป้อนวัตถุดิบ มีผลต่อพลังงานจำเพาะในการอบแห้ง (SEC) ดังแสดงใน Figure 5 ซึ่งวิเคราะห์จาก พลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อนที่ใช้ในระบบ เทียบกับมวลของน้ำที่ระเหยออกไป ซึ่งพบว่า สัดส่วนการลดลงของพลังงานจำเพาะในการอบแห้ง มีผลเนื่องการเพิ่มขึ้นของอัตราการป้อน ทำให้ที่อุณหภูมิ 90±18°C ค่า SEC ลดลงเฉลี่ย 30-36% และที่อุณหภูมิ 100±18°C ค่า SEC ลดลงเฉลี่ย 31-55% ในแต่ละช่วงการเพิ่มอัตราการป้อน ในส่วนของการเพิ่มอุณหภูมิ จาก 90±18°C เป็น 100±18°C หรือเพิ่มอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจากประมาณ 17 L h<sup>-1</sup> เป็น 24 L h<sup>-1</sup> ส่งผลให้ค่า SEC เพิ่มขึ้น 180% โดยประมาณ ซึ่งการเพิ่มขึ้นของค่า SEC เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ เป็นผลมาจากการใช้พลังงานความร้อนมากขึ้น ประมาณ 77.2% ส่วนการลดลงของค่า SEC จากการเพิ่มอัตราการป้อน เกิดจากความหนาแน่นวัสดุในระบบเยอะขึ้น ส่งผลให้น้ำระเหยออกในสัดส่วนที่มากกว่าอัตราการป้อนที่น้อย

การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ระดับชาติ ครั้งที่ 21  
30 - 31 กรกฎาคม 2563 จัดประชุมโดย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จ.นครราชสีมา

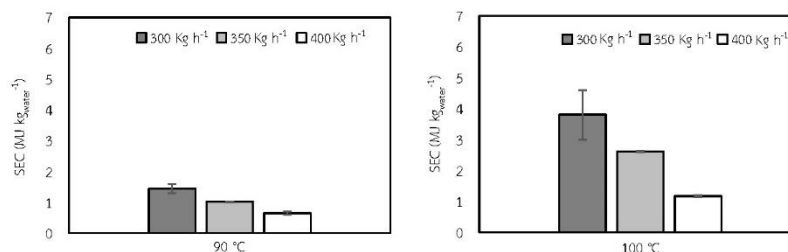


Figure 5. Effects of temperature and biomass feed rate on specific energy consumption (SEC).

#### ประเมินผลทางด้านเศรษฐศาสตร์

การประเมินผลทางด้านเศรษฐศาสตร์ เป็นการเทียบต้นทุนเชื้อเพลิงระหว่างเชื้อเพลิงถ่านหินกับเชื้อเพลิงชีวมวลจากหญ้าเนเปียร์ โดยเทียบกันในหน่วย Baht Mcal<sup>-1</sup> ซึ่งคิดเฉพาะต้นทุนในการผลิตเท่านั้น และหญ้าที่ใช้เป็นหญ้าที่ปลูกเองคิดต้นทุนในการบริหารจัดการต้นละ 100 Baht โดยคิดที่อัตราการป้อน 300 kg h<sup>-1</sup> อุณหภูมิการอบแห้ง 90±18°C ความชื้นสุดท้ายอยู่ที่ 29.44% w.b. ซึ่งน้ำหนักหญ้าจะลดเหลือ 71% โดยประมาณ จะมีค่าความร้อนจากการทดลองเท่ากับ 3.91 Mcal kg<sup>-1</sup> โดยใช้ระยะเวลาการเดินระบบ 0.5 h ดังแสดงใน Table 1

Table 1. Cost of Napier grass drying.

No.	Description	Cost (Baht kg <sup>-1</sup> dry)	Cost (Baht Mcal <sup>-1</sup> )
1	Napier grass (300 kg h <sup>-1</sup> × 0.5 h × 0.1-baht × 0.71 <sup>-1</sup> )	0.14	0.03
2	Pyrolysis oil (17 L h <sup>-1</sup> × 0.5 h × 18-baht × 0.71 <sup>-1</sup> )	1.44	0.26
3	Labor (2 people × 0.5 h × 40-baht × 0.71 <sup>-1</sup> )	0.38	0.07
4	Electricity (16.12 kWh × 0.5 h × 3.18-baht × 0.71 <sup>-1</sup> )	0.24	0.04
Total		2.20	0.40

Table 1 พบว่า การอบแห้งหญ้าเนเปียร์มีต้นทุนอยู่ที่ 2.20 Baht kg<sup>-1</sup> หรือประมาณ 0.4 Baht Mcal<sup>-1</sup> เมื่อเทียบกับราคาของถ่านหินอ่อนหลัง 2 ปี อ้างอิงจากเว็บไซต์ Index mundi. (2020). ซึ่งเป็นตลาดถ่านหินของประเทศออสเตรเลีย ที่ท่าเรือ Newcastle/Port Kembla มีค่าความร้อนเท่ากับ 6,300 kcal kg<sup>-1</sup> ราคาเฉลี่ยอยู่ที่ 86.9 US Dollars Tons<sup>-1</sup> หรือประมาณ 2.69 Baht kg<sup>-1</sup> โดยคิดที่อัตราแลกเปลี่ยน 1 US Dollars เท่ากับ 31 Baht จากนั้นเทียบกับค่าความร้อน จะได้ราคาอยู่ที่ประมาณ 0.43 Baht Mcal<sup>-1</sup> ซึ่งการอบแห้งหญ้าเนเปียร์ใช้ต้นทุนสูงไปกับเชื้อเพลิงในการสร้างความร้อน นั่นก็คือน้ำมันไฟโรโรซิส หากปรับเปลี่ยนไปใช้แหล่งความร้อนฟรี เช่น ความร้อนทิ้งจากระบบ จะยังสามารถลดต้นทุนตรงนี้ได้มาก

#### สรุป

ผลการศึกษารลดความชื้นหญ้าเนเปียร์ สำหรับแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงชีวมวล โดยศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและอัตราการป้อน แสดงให้เห็นว่า สภาวะการทดสอบที่อุณหภูมิ 90±18°C อัตราการป้อนวัตถุดิบ 300 kg h<sup>-1</sup> เป็นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการลดความชื้นชีวมวล ซึ่งมีความชื้นเท่ากับ 29.44% w.b. โดยมีต้นทุนการผลิตอยู่ที่ 0.40 Baht Mcal<sup>-1</sup> ส่วนถ่านหินอยู่ที่ 0.43 Baht Mcal<sup>-1</sup> ถือว่ามีศักยภาพในการเป็นพลังงานทดแทนถ่านหินและลดการนำเข้าถ่านหินจากต่างประเทศ ถ้าหากสามารถลดต้นทุนเชื้อเพลิงให้พลังงานความร้อนในการอบแห้งได้อีก ต้นทุนในการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลจะยิ่งต่ำลง



การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ระดับชาติ ครั้งที่ 21  
30 – 31 กรกฎาคม 2563 จัดประชุมโดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จ.นครราชสีมา

#### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่สนับสนุนทุนในการทำวิจัย

#### เอกสารอ้างอิง

- คณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ. (2554). มติคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ ครั้งที่ 6/2554 (ครั้งที่ 139). สืบค้นเมื่อวันที่ 6 กุมภาพันธ์ 2563 จากเว็บไซต์ <http://www.eppo.go.th/index.php/th/eppo-intranet/item/1266-nepc-yingluck139>
- ธนชัย มุขพันธ์, วีรชัย อาจหาญ และพรชชา ลิบลับ. (2559). การประเมินสมรรถนะของระบบอบแห้งแบบพาหะลม สำหรับการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวล. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย 22(2), 49-55
- วีรชัย อาจหาญ และคณะ. (2554). การเพิ่มศักยภาพการใช้ประโยชน์เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสสำหรับใช้เป็นพลังงานทดแทนในโรงงานอุตสาหกรรม. รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์. สนับสนุนงบประมาณวิจัยโดยสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน. (2562). รายงานการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) จากการใช้พลังงานปี 2562. สืบค้นเมื่อวันที่ 18 กุมภาพันธ์ 2563 จากเว็บไซต์ [http://www.eppo.go.th/index.php/th/energy-information/situation-co2/per-year?orders\[publishUp\]=publishUp&issearch=1](http://www.eppo.go.th/index.php/th/energy-information/situation-co2/per-year?orders[publishUp]=publishUp&issearch=1)
- American Society for Testing and materials. (1997b). Standard test method for moisture in the analysis sample of coal and coke: Annual Book of ASTM Standards, volume 05.05, section 5, D 3173-87 (Reapproved 1996), Philadelphia, p.294-295.
- Amos, W. A. (1998). Report on Biomass Drying Technology.
- Index mundi. (2020). Coal, Australian thermal coal Monthly Price -US Dollars per Metric Ton Retrieved May 13, 2020, from <https://www.indexmundi.com/commodities/?commodity=coal-australian&months=60>
- Tumuluru, J. S., Conner, C. C., Hoover, A. N. (2016). Method to produce durable pellets at lower energy consumption using high moisture corn stover and a corn starch binder in a flat die pellet mill. Journal of Visualized Experiments (112):54092 doi:10.3791/54092.



## ประวัติผู้เขียน

นายนทกร ภาคภูมิ เกิดเมื่อวันที่ 19 สิงหาคม พ.ศ. 2538 หมู่ที่ 3 บ้านสงเปือยเหนือ ตำบลดงมอน อำเภอมืองมุกดาหาร จังหวัดมุกดาหาร เป็นบุตรของ นายวินัย ภาคภูมิ และนางวิชิณ ภาคภูมิ สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษาจากโรงเรียนบ้านสงเปือยเหนือ ตำบลดงมอน อำเภอมืองมุกดาหาร จังหวัดมุกดาหาร ในปีการศึกษา 2551 ระดับมัธยมศึกษาตอนต้นและปลาย จากโรงเรียนดงมอนวิทยาคม ตำบลดงมอน อำเภอมืองมุกดาหาร จังหวัดมุกดาหาร ในปีการศึกษา 2557 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี จากสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร เอกวิศวกรรมเกษตร (เกียรตินิยมอันดับ 1) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 2560 หลังจากสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี ในปี พ.ศ. 2562 เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยได้รับทุนกิตติบัตินิติต ในระหว่างการศึกษาได้ทำงานที่ศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ควบคู่กันไปด้วยในตำแหน่งวิศวกรประจำศูนย์