

การศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงแข็งจากกากตะกอนน้ำเสียในอุตสาหกรรมแป้งมัน  
สำปะหลังสำหรับเป็นเชื้อเพลิงเสริมในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2564

A STUDY ON SOLID FUEL PRODUCTION FROM SEWAGE  
SLUDGE OF WASTEWATER IN TAPIOCA STARCH INDUSTRY  
USING AS AN ASSISTED FEEDSTOCK IN GASIFICATION  
PROCESS



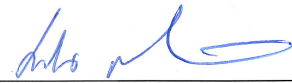
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the Degree of  
Master of Engineering Program in Mechanical and Process System Engineering  
Suranaree University of Technology

Academic Year 2021

การศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงแข็งจากกากตะกอนน้ำเสียในอุตสาหกรรมแป้งมัน  
สำหรับเป็นเชื้อเพลิงเสริมในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ผศ. ดร.เทวรัตน์ ตรีอำนรรค)

ประธานกรรมการ



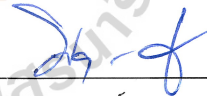
(ผศ. ดร.พรรษา ลิปลับ)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(ผศ. ดร.วีรชัย อางหาญ)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม)



(ผศ. ดร.พวงศักดิ์ จุลสุเสน)

กรรมการ



(ผศ. ดร.วันรัฐ อับดุลากาซิม)

กรรมการ



(รศ. ดร.ฉัตรชัย โชติษฐียงกูร)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ฐิติกร กิจจนศิริ : การศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงแข็งจากกากตะกอนน้ำเสียในอุตสาหกรรมแป้ง  
มันสำปะหลังสำหรับเป็นเชื้อเพลิงเสริมในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (A STUDY ON SOLID  
FUEL PRODUCTION FROM SEWAGE SLUDGE OF WASTEWATER IN TAPIOCA  
STARCH INDUSTRY USING AS AN ASSISTED FEEDSTOCK IN GASIFICATION  
PROCESS) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรรษา ลิบลับ, 140 หน้า

คำสำคัญ : ชีวมวลอัดเม็ด / คุณสมบัติของเชื้อเพลิง / แก๊สซิฟิเคชัน / กากตะกอนน้ำเสีย /  
อุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเตรียมเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากตะกอน และประเมิน  
ประสิทธิภาพการผลิตพลังงานจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยเริ่มต้นจากวิเคราะห์คุณสมบัติทาง  
กายภาพและทางเคมีของกากตะกอนซึ่ง พบว่า ยังมีคุณสมบัติการเป็นเชื้อเพลิงที่ต่ำ และยังไม่  
เหมาะสมในการนำมาเป็นเชื้อเพลิง ดังนั้นจึงได้มีการปรับปรุงคุณภาพโดยนำหญ้าเนเปียร์มาผสมเข้า  
กับกากตะกอนที่สัดส่วนต่าง ๆ ทำให้ได้เชื้อเพลิง 4 ประเภท คือ เชื้อเพลิงกากตะกอนอัดเม็ด,  
เชื้อเพลิงหญ้าเนเปียร์อัดเม็ด, เชื้อเพลิงอัดเม็ดกากตะกอน:หญ้าเนเปียร์ (50:50%wt) และเชื้อเพลิง  
อัดเม็ดกากตะกอน:หญ้าเนเปียร์ (70:30%wt) หลังจากนั้นทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพ  
และทางด้านการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงอัดเม็ด รวมทั้งนำมาทดสอบกับระบบแก๊สซิฟิเคชันชนิดไหลลง  
ที่มีกำลังการผลิต 100 kW และในส่วนสุดท้ายอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงที่ 140, 180 และ 220  
Nm<sup>3</sup>/hr ถูกนำมาหาสมรรถนะและประสิทธิภาพการผลิตพลังงานของระบบเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม  
ผลการศึกษาพบว่า เชื้อเพลิงอัดเม็ดโดยรวมสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตพลังงาน  
ได้ด้วยกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันได้ ยกเว้นเชื้อเพลิงกากตะกอนอัดเม็ดซึ่งมีความหนาแน่นสูงทำให้  
เกิดปฏิกิริยาได้ยาก โดยเมื่อเพิ่มส่วนผสมของหญ้าเนเปียร์ในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดพบว่าทำให้  
ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสูงขึ้นเช่นเดียวกับการทดลองที่เพิ่มอัตราการไหล โดยที่เชื้อเพลิง  
อัดเม็ดกากตะกอน:หญ้าเนเปียร์ (50:50%wt) มีความสามารถและมีประสิทธิภาพการผลิตแก๊ส  
เชื้อเพลิงที่เหมาะสมที่สุด ที่อัตราการไหลของแก๊สสูงสุด 220 Nm<sup>3</sup>/hr และสามารถผลิตแก๊สเชื้อเพลิง  
ที่มีค่าความร้อน 3.27 MJ/Nm<sup>3</sup> ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงานความร้อนโดยตรงได้ อีกทั้งยังมี  
ปริมาณทาร์และฝุ่นในแก๊สที่น้อย และมีประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง 62.72%

ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า กากตะกอนผสมกับหญ้าเนเปียร์สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิง  
สำหรับผลิตพลังงานด้วยเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันได้



สาขาวิชา วิศวกรรมเกษตร

ปีการศึกษา 2564

ลายมือชื่อนักศึกษา ชุตินันท์

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา อภิ

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม กน.

THITIKORN KIJJANASIRI : A STUDY ON SOLID FUEL PRODUCTION FROM SEWAGE SLUDGE OF WASTEWATER IN TAPIOCA STARCH INDUSTRY USING AS AN ASSISTED FEEDSTOCK IN GASIFICATION PROCESS. THESIS ADVISOR : ASST. PROF PANSA LIPLAP, Ph.D., 140 PP.

Keyword : BIOMASS PELLETT / FUEL PROPERTIES / GASIFICATION / SEWAGE SLUDGE / TAPIOCA STARCH INDUSTRY

The objectives of this research were to study pellet fuel preparation process of Sewage sludge and to evaluate the energy production efficiency of gasification process. Chemical properties of Sewage sludge were first analyzed and it was found that the Sewage sludge had the low potential for use as a fuel. Therefore, Sewage sludge was blended with Napier grass at four different ratios including Sewage sludge pellet fuel, Napier grass pellet fuel, Sewage sludge : Napier grass pellet fuel (50 : 50%wt) and Sewage sludge : Napier grass pellet fuel (70 : 30%wt). Subsequently, the physical and combustible properties of these pellet fuels were compared. Then, they were used to test with a 100-kW small-scale biomass power plant with downdraft gasification technology. Finally, different producer gas flow rates of 140, 180 and 220 Nm<sup>3</sup>/hr were tied with system performance and energy production efficiency to evaluate the optimal condition.

Result showed that, these pellet fuels can be used as fuels for energy production in the gasification process except Sewage sludge pellet fuels, which is probably due to its high bulk density causing it difficult to burn. When the ratio of Napier grass was increased, the energy production efficiency increased accordingly. This result was found with an increase in the producer gas flow rates. At the ratio of the Sewage sludge : Napier grass pellet fuel (50 : 50%wt), the result showed the most suitable for the gasification process. At the maximum gas flow rate of 220 Nm<sup>3</sup>/hr created producer gas with a calorific value of 3.27 MJ/Nm<sup>3</sup>. It is sufficient to be used as a direct heat source. Tar and dust contents in the producer gas were low. The cold gasification efficiency was found to be 62.72%.

Overall, Sewage sludge with Napier grass blending can be used as a feedstock for energy production using gasification process.



School of Agricultural Engineering  
Academic year 2021

Student's Signature \_\_\_\_\_  
Advisor's Signature \_\_\_\_\_  
Co-advisor's Signature \_\_\_\_\_

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี โดยได้รับความช่วยเหลือทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย อันประกอบด้วยบุคคลสำคัญดังนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรรษา ลิบลับ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่เมตตาให้โอกาสทางการศึกษา ให้ความรู้ คำแนะนำปรึกษาทางด้านวิชาการ ตลอดจนช่วยแก้ไข้ปัญหา และช่วยตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรชัย อาจหาญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้คำแนะนำทางด้านวิชาการและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ของการวิจัยมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เทวรัตน์ ตรีอำนาจ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พยุงค์ดี จุลยุเสน และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันรัฐ อับดุลลาคาซิม คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่กรุณาให้ข้อเสนอแนะต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ ดร.ทิพย์สุภินทร์ หินซุย ที่ให้คำแนะนำปรึกษาทางการดำเนินงานวิจัย ให้ความช่วยเหลือด้านเทคนิคการเก็บข้อมูลและการใช้เครื่องมือ อุปกรณ์ในการทดลอง ซึ่งมีที่ส่วนสำคัญให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณ นายธนธัช มุขพันธ์ ที่ให้คำปรึกษา คอยช่วยเหลือด้านเทคนิคการซ่อมบำรุงอุปกรณ์เบื้องต้น และช่วยในการแก้ไข้ปัญหาต่าง ๆ ตลอดระยะเวลาการทำวิจัย

ขอขอบคุณ ศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง ตลอดจนนักวิจัย บัณฑิตศึกษา และบุคลากร ศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวลและสาขาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ทุกท่านที่คอยให้กำลังใจ ให้แง่คิดเกี่ยวกับการใช้ชีวิตในรั้วมหาลัย และให้คำแนะนำปรึกษาโดยตลอด

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่สนับสนุนโครงการ การพัฒนาพลังงานทดแทนสำหรับเกษตรกรรมและอุตสาหกรรมมันสำปะหลังแบบครบวงจร ปีงบประมาณ พ.ศ. 2561 และโครงการ โปรแกรมพัฒนาการผลิตและการใช้พลังงานจากพืชพลังงานเป็นพลังงานหลัก ทดแทนการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศ ปีงบประมาณ พ.ศ. 2561 ในการทำวิจัยในครั้งนี้



## กิตติกรรมประกาศ (ต่อ)

ขอขอบคุณหน่วยบริหารและจัดการทุนด้านการเพิ่มความสามารถในการแข่งขันของประเทศ (บพข.) ที่สนับสนุนโครงการ วิจัยเพื่อสนับสนุนการพัฒนาตลาดกลางชีวมวลและศึกษาการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลร่วมเชื้อเพลิงขยะ (RDF) ในการผลิตพลังงาน ปีงบประมาณ พ.ศ. 2563 และ โครงการ วิจัยและพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพจากขยะชุมชนและพืชพลังงานแบบครบวงจร (ระดับโรงงานต้นแบบ) ปีงบประมาณ พ.ศ. 2563 ในการทำวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณ โรงงานอุตสาหกรรมผลิตแบริ่งมันสำปะหลัง บริษัทสงวนวงษ์ อุตสาหกรรม จำกัด ที่คอยช่วยเหลือและสนับสนุนในการทำวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวอันเป็นที่รักยิ่งที่ให้การอบรมดูแล ส่งเสริมให้ได้รับการศึกษาที่ดีตลอดมา

ฐิติกร กิจจนศิริ



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

# สารบัญ

หน้า

|  |          |
|--|----------|
| บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....  | ก        |
| บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....   | ค        |
| กิตติกรรมประกาศ.....   | จ        |
| สารบัญ.....  | ช        |
| สารบัญตาราง.....   | ท        |
| สารบัญรูป.....   | ฒ        |
| คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....                                       | ต        |
| <b>บทที่</b>   |          |
| <b>1 บทนำ.....</b>   | <b>1</b> |
| 1.1 ความสำคัญของงานวิจัย.....  | 1        |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....                                     | 3        |
| 1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....   | 4        |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....                                   | 5        |
| <b>2 ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>               | <b>6</b> |
| 2.1 บทนำ.....  | 6        |
| 2.2 กระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง.....                                | 6        |
| 2.3 ลักษณะทั่วไปของกากตะกอน.....                                     | 8        |
| 2.4 การบำบัดกากตะกอนน้ำเสีย.....                                     | 8        |
| 2.4.1 การทำชั้นตะกอน (Thickener).....                                | 8        |
| 2.4.2 การปรับเสถียร (Stabilization).....                             | 9        |
| 2.4.3 การปรับสภาพ (Conditioning).....                                | 9        |
| 2.4.4 การรีดน้ำ (Dewatering).....                                    | 9        |
| 2.5 กระบวนการกำจัดกากตะกอน.....                                      | 9        |
| 2.5.1 การขนส่งผ่านท่อหรือบรรทุกเรือทิ้งลงทะเล (Marine disposal)..... | 10       |

## สารบัญ (ต่อ)

|  | หน้า |
|--|------|
| 2.5.2 การนำไปฝังกลบ (Sanitary landfill).....   | 10   |
| 2.5.3 การนำไปปรับปรุงดิน (Land application).....   | 10   |
| 2.5.4 การทำปุ๋ยหมัก (Composting).....  | 10   |
| 2.5.5 การเผา (Incineration).....   | 11   |
| 2.5.6 การผลิตแก๊สเชื้อเพลิงโดยกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis)<br>และแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification)..... | 11   |
| 2.6 การประเมินคุณสมบัติกากตะกอนที่สามารถนำมาแปรรูปเป็นแท่งเชื้อเพลิง.....                            | 11   |
| 2.6.1 การวิเคราะห์สมบัติแบบประมาณ (Proximate analysis).....  | 12   |
| 2.6.2 ค่าความร้อน (Calorific value).....   | 12   |
| 2.6.3 การวิเคราะห์สมบัติแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis).....  | 13   |
| 2.7 การประเมินคุณสมบัติกากตะกอนที่มาจากอุตสาหกรรมประเภทต่าง ๆ.....                                   | 13   |
| 2.8 เชื้อเพลิงชีวมวล.....  | 15   |
| 2.9 เชื้อเพลิงอัดแท่ง.....   | 18   |
| 2.9.1 วัสดุที่ใช้ในการอัดแท่งเชื้อเพลิง.....   | 19   |
| 2.9.2 หลักการอัดแท่งเชื้อเพลิง.....  | 19   |
| 2.9.3 กรรมวิธีการอัดแท่งเชื้อเพลิง.....  | 20   |
| 2.9.4 ตัวประสาน (Binder).....  | 22   |
| 2.9.5 เครื่องอัดแท่ง.....  | 22   |
| 2.9.6 ขั้นตอนการอัดแท่ง.....   | 27   |
| 2.10 กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน.....   | 28   |
| 2.10.1 ปฏิกิริยาอุณหภูมิในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน.....  | 28   |
| 2.10.2 ชนิดของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Type of gasifier).....  | 31   |
| 2.10.3 แก๊สเชื้อเพลิงหรือโปรดิวเซอร์แก๊ส.....  | 34   |
| 2.10.4 การใช้ประโยชน์ของแก๊สเชื้อเพลิง.....  | 34   |
| 2.10.5 มลพิษและของเสียที่เกิดจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน.....  | 35   |
| 2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....  | 40   |

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

|         |  |    |
|---------|--|----|
| 3       | วิธีการดำเนินงานวิจัย.....                               | 48 |
| 3.1     | บทนำ.....  | 48 |
| 3.2     | ขั้นตอนการวิจัย.....                                     | 49 |
| 3.3     | การศึกษาคุณสมบัติของวัตถุดิบ.....                        | 53 |
| 3.3.1   | สมบัติทางกายภาพ (Physical properties).....               | 53 |
| 3.3.2   | การศึกษาสมบัติแบบประมาณ (Proximate analysis).....        | 53 |
| 3.3.3   | การศึกษาแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis).....              | 54 |
| 3.3.4   | การวิเคราะห์องค์ประกอบสารพิษ (Toxic elements).....       | 54 |
| 3.4     | ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ.....                            | 55 |
| 3.4.1   | การลดขนาดและความชื้น.....                                | 55 |
| 3.4.2   | การอัดเม็ดเชื้อเพลิง.....                                | 56 |
| 3.5     | ขั้นตอนการทดลอง.....                                     | 57 |
| 3.5.1   | การปรับความชื้นวัตถุดิบ.....                             | 57 |
| 3.5.2   | การประเมินลักษณะเบื้องต้นของเชื้อเพลิงอัดเม็ด.....       | 58 |
| 3.5.3   | วิเคราะห์คุณสมบัติเชื้อเพลิงอัดเม็ด.....                 | 58 |
| 3.5.3.1 | เปอร์เซ็นต์ผลผลิต.....                                   | 58 |
| 3.5.3.2 | ค่าความชื้น.....   | 58 |
| 3.5.3.3 | ค่าความหนาแน่นรวม.....                                   | 59 |
| 3.5.3.4 | ค่าความคงทน.....   | 59 |
| 3.5.3.5 | ค่าความต้านทานน้ำ.....                                   | 60 |
| 3.5.4   | วิเคราะห์คุณสมบัติทางการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงอัดเม็ด..... | 61 |
| 3.5.4.1 | การหาเวลาในการจุดติดไฟ.....                              | 61 |
| 3.5.4.2 | การหาระยะเวลาในการเผาไหม้.....                           | 61 |
| 3.5.5   | อัตราการใช้พลังงานในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด.....        | 61 |
| 3.6     | อุปกรณ์และเครื่องมือ.....                                | 62 |
| 3.6.1   | โรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็ก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.....  | 62 |

## สารบัญ (ต่อ)

|          | หน้า   |
|----------|--|
| 3.6.2    | ขั้นตอนการเดินระบบของโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็ก.....67                     |
| 3.6.3    | เครื่องมือวัด/เครื่องมือวิเคราะห์ และการติดตั้ง.....68                 |
| 3.7      | การทดสอบหาสภาวะ (Condition) ในการเดินระบบ และศึกษาความสามารถ           |
|          | ในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง.....72   |
| 3.7.1    | การกระจายตัวของอุณหภูมิในเตา (Temperature profile).....72              |
| 3.7.2    | อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง.....72                                    |
| 3.7.3    | การวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง (Gas composition).....72       |
| 3.7.4    | อัตราการใช้เชื้อเพลิง (Fuel consumption).....73                        |
| 3.7.5    | อัตราการเกิดเถ้า (Ash production).....73                               |
| 3.7.6    | ทาร์และฝุ่น (Tar and Dust).....73                                      |
| 3.7.7    | การศึกษาประสิทธิภาพการผลิตพลังงานของระบบ.....74                        |
| <b>4</b> | <b>ผลการดำเนินการวิจัยและการอภิปรายผล.....76</b>                       |
| 4.1      | ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของวัตถุดิบ.....76                              |
| 4.1.1    | ผลการศึกษาคูณสมบัติทางกายภาพของวัตถุดิบ.....76                         |
| 4.1.2    | ผลการศึกษาคูณสมบัติทางกายภาพของวัตถุดิบผสม.....79                      |
| 4.1.3    | ผลการศึกษาคูณสมบัติทางเคมีของวัตถุดิบ.....81                           |
| 4.2      | ผลการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด.....83                                      |
| 4.2.1    | การประเมินลักษณะเบื้องต้นของเชื้อเพลิงอัดเม็ด.....83                   |
| 4.2.1.1  | ผลการประเมินลักษณะเบื้องต้นของเชื้อเพลิง<br>กากตะกอนอัดเม็ด.....83     |
| 4.2.1.2  | ผลการประเมินลักษณะเบื้องต้นของเชื้อเพลิง<br>หญ้าเนเปียร์อัดเม็ด.....84 |
| 4.2.2    | การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงอัดเม็ด.....85              |
| 4.2.2.1  | เปอร์เซ็นต์ผลผลิตของเชื้อเพลิงกากตะกอนอัดเม็ด.....85                   |
| 4.2.2.2  | เปอร์เซ็นต์ผลผลิตของเชื้อเพลิงหญ้าเนเปียร์อัดเม็ด.....86               |
| 4.2.2.3  | ค่าความหนาแน่นรวมของเชื้อเพลิงกากตะกอนอัดเม็ด.....86                   |

## สารบัญ (ต่อ)

|  | หน้า |
|--|------|
| 4.2.2.4 ค่าความหนาแน่นรวมของเชื้อเพลิง<br>หลู๋าเนเปียร์อัดเม็ด.....              | 87   |
| 4.2.2.5 การทดสอบค่าความคงทนของเชื้อเพลิง<br>กากตะกอนอัดเม็ด.....                 | 88   |
| 4.2.2.6 การทดสอบค่าความคงทนของเชื้อเพลิง<br>หลู๋าเนเปียร์อัดเม็ด.....            | 89   |
| 4.2.2.7 การทดสอบค่าความต้านทานน้ำของเชื้อเพลิง<br>กากตะกอนอัดเม็ด.....           | 90   |
| 4.2.2.8 การทดสอบค่าความต้านทานน้ำของเชื้อเพลิง<br>หลู๋าเนเปียร์อัดเม็ด.....      | 91   |
| 4.2.2.9 อัตราการใช้พลังงานของการผลิตเชื้อเพลิง<br>กากตะกอนอัดเม็ด.....           | 92   |
| 4.2.2.10 อัตราการใช้พลังงานของการผลิตเชื้อเพลิง<br>หลู๋าเนเปียร์อัดเม็ด.....     | 93   |
| 4.2.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางการเผาไหม้ของ<br>เชื้อเพลิงอัดเม็ด.....            | 94   |
| 4.2.3.1 การหาเวลาในการจุดติดไฟของเชื้อเพลิง<br>กากตะกอนอัดเม็ด.....              | 94   |
| 4.2.3.2 การหาเวลาในการจุดติดไฟของเชื้อเพลิง<br>หลู๋าเนเปียร์อัดเม็ด.....         | 95   |
| 4.2.3.3 การหาระยะเวลาในการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง<br>กากตะกอนอัดเม็ด.....           | 96   |
| 4.2.3.4 การหาระยะเวลาในการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง<br>หลู๋าเนเปียร์อัดเม็ด.....      | 97   |
| 4.3 ผลการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดโดยการผสมวัตถุดิบ<br>(Blending raw materials)..... | 98   |

## สารบัญ (ต่อ)

|  | หน้า |
|--|------|
| 4.3.1 ผลการประเมินลักษณะเบื้องต้นของเชื้อเพลิงอัดเม็ด<br>จากวัตถุดิบผสม.....             | 99   |
| 4.3.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงอัดเม็ด<br>จากวัตถุดิบผสม.....          | 100  |
| 4.3.2.1 เปอร์เซนต์ผลผลิตของเชื้อเพลิงอัดเม็ด<br>จากวัตถุดิบผสม.....                      | 100  |
| 4.3.2.2 ค่าความหนาแน่นรวมของเชื้อเพลิงอัดเม็ด<br>จากวัตถุดิบผสม.....                     | 101  |
| 4.3.2.3 ค่าความคงทนของเชื้อเพลิงอัดเม็ด<br>จากวัตถุดิบผสม.....                           | 101  |
| 4.3.2.4 ค่าความต้านทานน้ำของเชื้อเพลิงอัดเม็ด<br>จากวัตถุดิบผสม.....                     | 102  |
| 4.3.2.5 อัตราการใช้พลังงานของการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด<br>จากวัตถุดิบผสม.....             | 103  |
| 4.3.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางด้าน การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงอัดเม็ด<br>จากวัตถุดิบผสม..... | 104  |
| 4.3.3.1 การหาเวลาในการจุดติดไฟของเชื้อเพลิงอัดเม็ด<br>จากวัตถุดิบผสม.....                | 104  |
| 4.3.3.2 การหาระยะเวลาในการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงอัดเม็ด<br>จากวัตถุดิบผสม.....             | 105  |
| 4.4 ผลการศึกษาการผลิตพลังงานด้วยเทคโนโลยีแก๊สซิพีเคชั่น.....                             | 106  |
| 4.4.1 การกระจายตัวของอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์.....   | 107  |
| 4.4.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง.....                                     | 110  |
| 4.4.3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณทาร์และฝุ่น.....   | 114  |
| 4.4.4 ประสิทธิภาพการผลิตพลังงานของระบบ.....  | 115  |
| 4.4.4.1 การประเมินประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง.....                                  | 115  |

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 4.4.4.2  | การเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบ เช่น การประเมิน<br>ค่าพลังงานสุทธิของระบบ (Net energy yield)..... | 117        |
| <b>5</b> | <b>สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....</b>  | <b>119</b> |
| 5.1      | สรุปผลการทดลอง.....  | 119        |
| 5.1.1    | สมบัติและองค์ประกอบของวัตถุดิบ.....  | 119        |
| 5.1.2    | ผลการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด.....  | 119        |
| 5.1.3    | ผลการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดโดยการผสมวัตถุดิบ.....   | 120        |
| 5.1.4    | ผลการศึกษาการผลิตพลังงานด้วยเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน.....  | 120        |
| 5.2      | ข้อเสนอแนะ.....  | 122        |
|          | รายการอ้างอิง.....   | 123        |
|          | ภาคผนวก  |            |
|          | ภาคผนวก ก. วิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ.....  | 128        |
|          | ประวัติผู้เขียน.....   | 139        |



## สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า  |     |
|----------|---|-----|
| 2.1      | องค์ประกอบของกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่ง .....                                | 14  |
| 2.2      | คุณลักษณะที่ต้องการของเชื้อเพลิงชีวมวลประเภทไม้ได้ทำจากไม้ทั้งหมด .....                   | 16  |
| 2.3      | ชนิดของมลสารและปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบผลิตแก๊สเชื้อเพลิง .....                             | 36  |
| 2.4      | ชนิดของมลสารและระบบทำความสะอาดแก๊สเชื้อเพลิง .....  | 37  |
| 2.5      | องค์ประกอบทางเคมีของสารในช่วงอุณหภูมิต่าง ๆ .....   | 39  |
| 3.1      | แสดงถึงพารามิเตอร์ เครื่องมือวัด ระบบการวัดและวิเคราะห์ .....                             | 68  |
| 4.1      | ผลการศึกษาศสมบัติทางกายภาพของกากตะกอน .....   | 77  |
| 4.2      | ผลการศึกษาศสมบัติทางกายภาพของหญ้าเนเปียร์ .....   | 78  |
| 4.3      | ผลการศึกษาศสมบัติทางกายภาพของวัตถุดิบผสม .....  | 80  |
| 4.4      | ผลการศึกษาศสมบัติด้านองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ .....                                   | 81  |
| 4.5      | ผลการประเมินลักษณะเบื้องต้นของเชื้อเพลิงกากตะกอนอัดเม็ด .....                             | 84  |
| 4.6      | ผลการประเมินลักษณะเบื้องต้นของเชื้อเพลิงหญ้าเนเปียร์อัดเม็ด .....                         | 84  |
| 4.7      | ผลการประเมินลักษณะเบื้องต้นของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัตถุดิบผสม .....                       | 99  |
| 4.8      | องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตจากเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้ง 3 ประเภท .....                 | 112 |
| 4.9      | ปริมาณสารและฝุ่นของแก๊สเชื้อเพลิง .....   | 115 |
| 4.10     | ผลการประเมินประสิทธิภาพการผลิตพลังงานของระบบแก๊สซิฟิเคชั่น .....                          | 116 |
| 4.11     | การเปรียบเทียบสมรรถนะการผลิตพลังงานของระบบ<br>ระหว่างเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้ง 3 ประเภท ..... | 117 |

## สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า   |
|--------|--|
| 2.1    | กระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง ..... 7   |
| 2.2    | เครื่องอัดแบบลูกสูบ (Piston press) ..... 23  |
| 2.3    | เครื่องอัดแบบลูกกลิ้ง (Roll press) ..... 24  |
| 2.4    | เครื่องอัดแบบเกลียวพร้อมด้วยขดลวดความร้อนที่กระบอกรัด (Screw press with a heat)..... 25  |
| 2.5    | เครื่องอัดแบบเกลียวรูปกรวย (Conical screw press) ..... 26  |
| 2.6    | เครื่องอัดเม็ดแบบแม่พิมพ์แผ่นกลม (Disk matrix press) ..... 27  |
| 2.7    | เครื่องอัดเม็ดแบบแม่พิมพ์วงแหวน (Ring matrix press) ..... 27   |
| 2.8    | ปฏิกิริยาอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันในเตาผลิตแก๊สชนิดไหลลง..... 29   |
| 2.9    | เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ ..... 32   |
| 2.10   | ภาพรวมของการใช้ประโยชน์แก๊สเชื้อเพลิง ..... 35   |
| 3.1    | ภาพรวมขั้นตอนการศึกษา ..... 50   |
| 3.2    | ขั้นตอนการศึกษาการเตรียมกากตะกอนและหญ้าเนเปียร์เพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ด และศึกษาลักษณะ รวมทั้งคุณสมบัติของเชื้อเพลิงอัดเม็ด ..... 51 |
| 3.3    | ขั้นตอนการหาสภาวะที่เหมาะสมและการศึกษาประสิทธิภาพการผลิตพลังงาน..... 52  |
| 3.4    | เครื่องมือหลักสำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบของวัตถุดิบ ..... 54  |
| 3.5    | เครื่องจักรที่ใช้ในการเตรียมหญ้าเนเปียร์..... 56   |
| 3.6    | เครื่องอัดเม็ดแบบแม่พิมพ์วงแหวน (Mill ring die pelletizer) ..... 57  |
| 3.7    | เครื่องทดสอบค่าความคงทน (Pellet durability tester) ..... 60  |
| 3.8    | แผนผังกระบวนการของโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี..... 64  |
| 3.9    | แผนผังกระบวนการทำงานของ Fixed bed downdraft gasification และตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือ/เก็บข้อมูล ..... 65                                |
| 3.10   | ส่วนประกอบของโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็ก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ..... 66   |
| 3.11   | การเริ่มต้นการทำงานของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง ..... 67   |
| 3.12   | แสดงอุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการวัด..... 69  |

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| 3.13 แสดงตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัดอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ ( $T_1 - T_5$ ) .....                         | 71   |
| 4.1 ลักษณะของกากตะกอน .....  | 78   |
| 4.2 ลักษณะของหญ้าเนเปียร์ .....  | 78   |
| 4.3 ลักษณะของเชื้อเพลิงผสม .....   | 80   |
| 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและเปอร์เซ็นต์ผลผลิตของ<br>เชื้อเพลิงกากตะกอนอัดเม็ด .....              | 85   |
| 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและเปอร์เซ็นต์ผลผลิตของ<br>เชื้อเพลิงหญ้าเนเปียร์อัดเม็ด .....          | 86   |
| 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและความหนาแน่นรวมของ<br>เชื้อเพลิงกากตะกอนอัดเม็ด .....                 | 87   |
| 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและความหนาแน่นรวมของ<br>เชื้อเพลิงหญ้าเนเปียร์อัดเม็ด .....             | 88   |
| 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและค่าความคงทนของ<br>เชื้อเพลิงกากตะกอนอัดเม็ด .....                    | 89   |
| 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและค่าความคงทนของ<br>เชื้อเพลิงหญ้าเนเปียร์อัดเม็ด .....                | 90   |
| 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและค่าความต้านทานน้ำของ<br>เชื้อเพลิงกากตะกอนอัดเม็ด .....             | 91   |
| 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและค่าความต้านทานน้ำของ<br>เชื้อเพลิงหญ้าเนเปียร์อัดเม็ด .....         | 92   |
| 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและอัตราการใช้พลังงานของ<br>การผลิตเชื้อเพลิงกากตะกอนอัดเม็ด .....     | 93   |
| 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและอัตราการใช้พลังงานของ<br>การผลิตเชื้อเพลิงหญ้าเนเปียร์อัดเม็ด ..... | 94   |
| 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและเวลาในการจุดติดไฟของ<br>เชื้อเพลิงกากตะกอนอัดเม็ด .....             | 95   |

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและเวลาในการจุดติดไฟของ<br>เชื้อเพลิงหญ้าเนเปียร์อัดเม็ด .....         | 96   |
| 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและระยะเวลาในการเผาไหม้ของ<br>เชื้อเพลิงกากตะกอนอัดเม็ด .....          | 97   |
| 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและระยะเวลาในการเผาไหม้ของ<br>เชื้อเพลิงหญ้าเนเปียร์อัดเม็ด .....      | 98   |
| 4.18 ผลการทดสอบหาเปอร์เซ็นต์ผลผลิตของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัตถุดิบผสม .....                                   | 100  |
| 4.19 ผลการทดสอบหาค่าความหนาแน่นรวมของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัตถุดิบผสม .....                                   | 101  |
| 4.20 ผลการทดสอบหาค่าความคงทนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัตถุดิบผสม .....   | 102  |
| 4.21 ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานน้ำของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัตถุดิบผสม .....                                   | 103  |
| 4.22 ผลการทดสอบอัตราการใช้พลังงานของการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัตถุดิบผสม .....                             | 104  |
| 4.23 ผลการทดสอบเวลาในการจุดติดไฟของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัตถุดิบผสม .....                                     | 105  |
| 4.24 ผลการทดสอบระยะเวลาการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัตถุดิบผสม .....                                    | 106  |
| 4.25 ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์ (Temperature profile) ของ<br>เชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้ง 3 ประเภท ..... | 109  |
| 4.26 องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของ<br>แก๊สเชื้อเพลิง 220 Nm <sup>3</sup> /hr .....     | 113  |
| 4.27 ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิง ที่อัตราการไหลของ<br>แก๊สเชื้อเพลิง 220 Nm <sup>3</sup> /hr .....          | 114  |

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

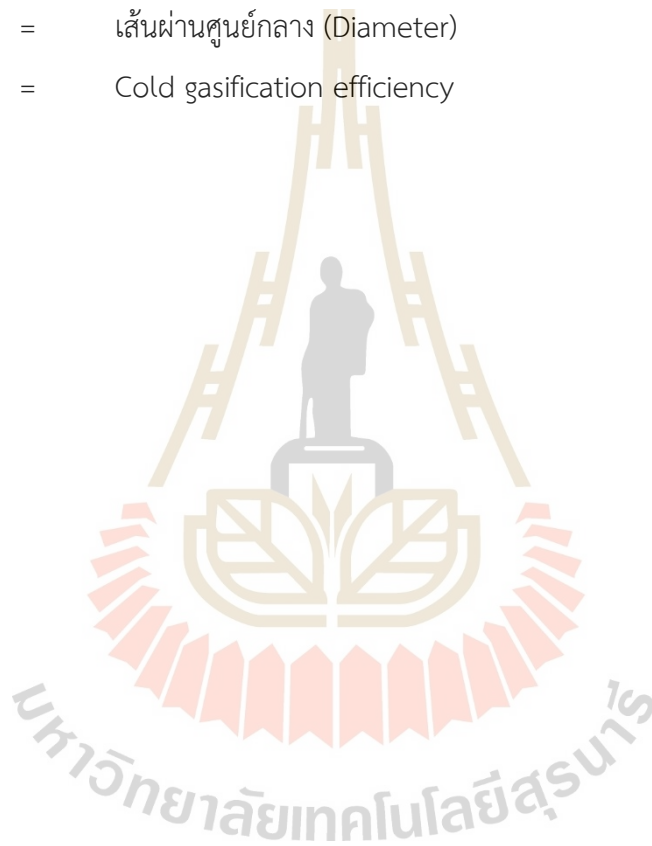
|                     |   |   |
|---------------------|---|---|
| ASTM                | = | American Society of Testing and Material        |
| C                   | = | ธาตุคาร์บอน (Carbon)                            |
| C-G                 | = | ระบบแก๊สซิฟิเคชัน (Conventional gasification)   |
| CH <sub>4</sub>     | = | แก๊สมีเทน                                       |
| Cl                  | = | ธาตุคลอรีน (Cholorine)                          |
| cm                  | = | เซนติเมตร (Centimeter)                          |
| CO                  | = | แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbonmonoxide)           |
| CO <sub>2</sub>     | = | แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide)           |
| Cu                  | = | ธาตุทองแดง (Copper)                             |
| °C                  | = | องศาเซลเซียส (degree Celsius)                   |
| Fe                  | = | ธาตุเหล็ก (Ferrous)                             |
| g                   | = | กรัม (gram)                                     |
| G <sub>c</sub>      | = | Gas composition (%V)                            |
| H                   | = | ธาตุไฮโดรเจน (Hydrogen)                         |
| H <sub>2</sub>      | = | แก๊สไฮโดรเจน                                    |
| HCl                 | = | กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochoric acid)               |
| HHV <sub>fuel</sub> | = | High heating value of fuel (MJ/kg)              |
| HHV <sub>g</sub>    | = | High heating value of gas (MJ/Nm <sup>3</sup> ) |
| hr                  | = | ชั่วโมง (hour)                                  |
| H <sub>2</sub> S    | = | ธาตุไฮโดรเจนซัลไฟด์                             |
| ISO                 | = | International Organization for standardization  |
| K                   | = | ธาตุโพแทสเซียม                                  |
| kg                  | = | กิโลกรัม (Kilogram)                             |
| kW                  | = | กิโลวัตต์ (Kilowatt)                            |
| L                   | = | ความยาว (Length)                                |
| LHV <sub>fuel</sub> | = | Low heating value of fuel (MJ/kg)               |
| LHV <sub>g</sub>    | = | Low heating value of gas (MJ/Nm <sup>3</sup> )  |

### คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

|                   |   |  |
|-------------------|---|--|
| $m_{\text{ash}}$  | = | Ash production (kg/hr)   |
| $m_{\text{fuel}}$ | = | Fuel consumption (kg/hr)   |
| mg                | = | มิลลิกรัม (milligram)  |
| min               | = | นาที (minute)  |
| MJ                | = | เมกะจูล (Mega Joule)   |
| mm                | = | มิลลิเมตร (millimeter)   |
| MPa               | = | เมกะปาสคาล (Mega Pascal)   |
| N                 | = | ธาตุไนโตรเจน (Nitrogen)  |
| Na                | = | ธาตุโซเดียม (Sodium)   |
| N/A               | = | Not Analysis   |
| ND                | = | ตรวจไม่พบ (Not detected)   |
| NG                | = | หญ้าเนเปียร์ (Napier Grass)  |
| $\text{Nm}^3$     | = | Normal Cubic meter   |
| $\text{NO}_x$     | = | ธาตุออกไซด์ของไนโตรเจน   |
| O                 | = | ธาตุออกซิเจน (Oxygen)  |
| $\text{O}_2$      | = | แก๊สออกซิเจน   |
| rpm               | = | รอบต่อนาที (Revolutions per minute)                                |
| S                 | = | ธาตุซัลเฟอร์ (Sulfur)  |
| $\text{SO}_2$     | = | แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Sulfur dioxide)                             |
| $\text{SO}_x$     | = | ธาตุออกไซด์ของซัลเฟอร์   |
| SS                | = | กากตะกอนน้ำเสีย (Sewage Sludge)                                    |
| SS/NG (50/50)     | = | กากตะกอนผสมกับหญ้าเนเปียร์ สัดส่วน 50:50 %wt                       |
| SS/NG (70/30)     | = | กากตะกอนผสมกับหญ้าเนเปียร์ สัดส่วน 70:30 %wt                       |
| $T_1 - T_5$       | = | Reactor Temperature (Inside 1 – Inside 5) ( $^{\circ}\text{C}$ )   |
| $\text{TD}_1$     | = | Impurities (Tar & Dust) After reactor ( $\text{mg}/\text{Nm}^3$ )  |
| $\text{TD}_2$     | = | Impurities (Tar & Dust) After scrubber ( $\text{mg}/\text{Nm}^3$ ) |
| $T_g$             | = | Producer gas temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )                    |

### คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

|             |   |  |
|-------------|---|--|
| $T_o$       | = | Producer gas temperature (Gas outlet) ( $^{\circ}\text{C}$ ) |
| $V_g$       | = | Gas flow rate ( $\text{Nm}^3/\text{hr}$ )                    |
| %wb         | = | ร้อยละมาตรฐานเปียก (% Wet basis)                             |
| %wt         | = | ร้อยละโดยน้ำหนัก (% By weight)                               |
| Zn          | = | ธาตุสังกะสี (Zinc)   |
| $\emptyset$ | = | เส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter)                                 |
| $\eta_{cg}$ | = | Cold gasification efficiency                                 |



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญของงานวิจัย

ปัจจุบันการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจและอุตสาหกรรมของประเทศไทยยังคงมีอัตราการขยายตัวเพิ่มขึ้นในหลายพื้นที่ ส่งผลให้การผลิตในภาคอุตสาหกรรมมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ในปี 2561 ปริมาณกากของเสียอุตสาหกรรมเข้าสู่ระบบการจัดการทั้งหมด 22.02 ล้านตัน แบ่งเป็นกากอุตสาหกรรมที่ไม่เป็นอันตราย 20.82 ล้านตัน และกากอุตสาหกรรมอันตรายมีปริมาณ 1.2 ล้านตัน (กรมควบคุมมลพิษ, 2562) จากปัญหาการเพิ่มขึ้นของกากของเสียอุตสาหกรรม ทำให้กรมโรงงานอุตสาหกรรมจึงดำเนินโครงการส่งเสริมการใช้ประโยชน์กากอุตสาหกรรมและลดปริมาณกากที่ต้องฝังกลบซึ่งเป็นไปตามนโยบายการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยศึกษาการใช้ประโยชน์กากอุตสาหกรรม เช่น กากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย กากตะกอนปูนขาว กากตะกอนเยื่อกระดาษ ถ่านหิน/เถ้าลอยจากการเผาไหม้ กากตะกอนจากการหลอมโลหะ เศษ/กากจากกระบวนการแปรรูปอาหารและการเกษตร ซึ่งจะมีการใช้ประโยชน์ในรูปแบบต่าง ๆ เช่น การนำกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียและเศษเหลือจากกระบวนการของโรงงานผลิตอาหารมาทำเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่งเพื่อใช้ในการผลิตพลังงาน

สอดคล้องกับงานวิจัยที่ได้เลือกศึกษากากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลัง บริษัท สงวนวงษ์อุตสาหกรรม จำกัด ตำบลหนองบัวศาลา อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา เนื่องจากเป็นจังหวัดที่มีโรงงานแปรรูปมันสำปะหลังมากที่สุดในประเทศ รวมทั้งสิ้น 39 โรงงานจากทั้งหมด 423 โรงงาน (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2563; กัญธรรมา ดิษฐ์แก้ว และ กิตติศักดิ์ เจริมประสิทธิ์ประเสริฐ, 2564) ซึ่งอุตสาหกรรมนี้เป็นอีกกลุ่มหนึ่งที่กระบวนการผลิตเกือบทุกขั้นตอนจะเกี่ยวข้องกับการใช้พลังงาน รวมทั้งมีอัตราการผลิตกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียในปริมาณที่สูง ซึ่งปัจจุบันกากตะกอนเหล่านี้ถูกนำไปกำจัดโดยวิธีฝังกลบและนำไปผลิตปุ๋ยทางการเกษตร ทั้งนี้แนวโน้มของพื้นที่ฝังกลบที่ลดน้อยลง และภาคอุตสาหกรรมจะต้องหาพื้นที่ในการฝังกลบเพิ่มมากขึ้นทำให้เกิดค่าใช้จ่ายที่เพิ่มสูงขึ้นในการจัดการกับกากตะกอน ดังนั้นการศึกษากำจัดกากตะกอนให้เกิดเป็นพลังงานจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ



ในแต่ละปีปริมาณผลผลิตชีวมวลที่จะนำไปใช้เพื่อผลิตพลังงาน มีแนวโน้มคงที่ แต่ในขณะเดียวกันการใช้พลังงานจากชีวมวลนั้นเพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ ตามความต้องการของประชากรในประเทศที่เพิ่มสูงขึ้น จึงทำให้หน่วยงานทั้งภาครัฐและภาคเอกชนให้ความสนใจที่จะหาแหล่งชีวมวลชนิดใหม่ที่มีศักยภาพและมีปริมาณมากเพียงพอในการผลิตเป็นพลังงานจากชีวมวล นั่นก็คือหญ้าเนเปียร์ ซึ่งเป็นหญ้าเขตร้อน มีลักษณะคล้ายกับอ้อย มีลำต้นใหญ่ ใบหนาและกว้าง มีหลากหลายสายพันธุ์ ซึ่งสายพันธุ์เดิมนิยมปลูกในประเทศไทยมีอยู่ 3 สายพันธุ์ คือ หญ้าเนเปียร์ธรรมดา หญ้าเนเปียร์แคระ (Mott Dwarf Elephant Grass) และหญ้าเนเปียร์ยักษ์ (King Grass) ต่อมาได้มีการพัฒนาสายพันธุ์ขึ้นเป็น หญ้าเนเปียร์พันธุ์ปากช่อง 1 เป็นสายพันธุ์ผสมที่เกิดจากการผสมข้ามสายพันธุ์ระหว่างหญ้าเนเปียร์ยักษ์และหญ้าไข่มุก มีลักษณะเด่นคือ เติบโตเร็ว แตกกอดี ใบและลำต้นอ่อนนุ่ม ขอบใบไม่คมไม่มีขน ให้ผลผลิตต่อไร่สูง มีปริมาณน้ำตาลในใบและลำต้นสูงสามารถเก็บเกี่ยวได้ปีละ 5 – 6 ครั้ง ซึ่งในปัจจุบันได้มีการศึกษาการนำหญ้าเนเปียร์มาผลิตพลังงานกันอย่างแพร่หลายมากขึ้น

โดยกระบวนการแปรรูปกากตะกอนและหญ้าเนเปียร์เพื่อผลิตพลังงานจะใช้วิธีทางเคมีความร้อน สามารถแบ่งออกเป็น 3 วิธีหลัก ๆ คือ กระบวนการเผาไหม้โดยตรง (Combustion) กระบวนการย่อยสลายด้วยความร้อน (Pyrolysis) และกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) ซึ่งในส่วนของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันถือเป็นวิธีการผลิตพลังงานที่เหมาะสมอีกวิธีหนึ่ง เนื่องจากระบบไม่มีความยุ่งยากและซับซ้อน โดยแก๊สซิฟิเคชันเป็นเทคโนโลยีที่อาศัยกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางอุณหเคมี (Thermo-chemical conversion process) โดยควบคุมเตาปฏิกรณ์ ให้เกิดการเผาไหม้แบบจำกัดปริมาณอากาศ (Partial oxidation) ที่อุณหภูมิประมาณ 800 - 1,000 °C ซึ่งความร้อนจะเปลี่ยนเชื้อเพลิงแข็งให้เป็นแก๊สเชื้อเพลิง (Producer gas) ที่สามารถนำไปเผาไหม้ได้ประกอบด้วยแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แก๊สไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>) และแก๊สมีเทน (CH<sub>4</sub>) (Oladejo et al., 2019) แก๊สเชื้อเพลิงเหล่านี้สามารถนำมาเป็นแหล่งพลังงานความร้อนในการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตร หรือนำมาผลิตไฟฟ้าโดยส่งผ่านเครื่องยนต์สันดาปภายใน แม้กระทั่งการนำแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้ไปใช้กับหม้อไอน้ำความดันในการผลิตไอน้ำและนำไปหมุนเครื่องกังหันไอน้ำเพื่อผลิตไฟฟ้า นอกจากนี้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันยังมีข้อดีในด้านการลดการปล่อยมลพิษ เช่น SO<sub>x</sub> NO<sub>x</sub> ออกไซด์ของโลหะหนักและสารประกอบไดออกซิน ซึ่งในส่วนของปริมาณโลหะหนักและเถ้าที่เกิดจากกระบวนการนี้สามารถนำไปกำจัดโดยการฝังกลบหรือใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตปูนซีเมนต์ได้ (Belgiorno et al., 2003; Pinto et al., 2008; Oladejo et al., 2019)

แต่เนื่องจากกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียมีความชื้นอยู่สูง มีลักษณะจับตัวกันเป็นก้อน และมีขนาดที่ไม่สม่ำเสมอ จึงยังไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้กับเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน (ทิพย์สุภินทร์, 2550) ซึ่งต้องผ่านกระบวนการเตรียมวัตถุดิบขั้นต้นเสียก่อน เช่น การลดขนาดและความชื้นให้เหมาะสมต่อการเตรียมวัตถุดิบในลำดับต่อไป โดยในส่วนของหญ้าเนเปียร์ก็เช่นเดียวกัน หลังจากผ่านกระบวนการเตรียมวัตถุดิบขั้นต้นแล้วต่อมานำวัตถุดิบทั้งสองชนิดมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ด ซึ่งเป็นอีกวิธีหนึ่งที่จะช่วยเพิ่มความหนาแน่นและทำให้ขนาดเชื้อเพลิงมีความสม่ำเสมอสำหรับใช้ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

ในการศึกษาครั้งนี้ มีแนวคิดที่จะนำกากตะกอนน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลังและหญ้าเนเปียร์ สายพันธุ์ปากช่อง 1 มาผสมกันในรูปแบบการผสมวัตถุดิบ (Blending raw materials) ตามสัดส่วนต่าง ๆ จะได้วัตถุดิบ 4 ประเภท คือ กากตะกอน (SS), หญ้าเนเปียร์ (NG), วัตถุดิบผสม SS/NG (50/50) และวัตถุดิบผสม SS/NG (70/30) หลังจากนั้นนำมาผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดและนำมาผลิตเป็นแก๊สเชื้อเพลิงโดยใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน ซึ่งเป็นทางเลือกหนึ่งในการใช้ประโยชน์จากกากตะกอนและหญ้าเนเปียร์มาผลิตเป็นพลังงาน โดยอาศัยโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็ก ขนาดกำลังการผลิต 100 kW ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งผลการศึกษาที่ได้จากงานวิจัยในครั้งนี้จะทำให้ทราบถึงคุณสมบัติทางกายภาพ และทางด้านการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้ง 4 ประเภท รวมทั้งความสามารถ และประสิทธิภาพการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงอัดเม็ดดังกล่าวในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ซึ่งจะเป็นทางเลือกที่ตืออย่างหนึ่งในการพัฒนาระบบกำจัดกากตะกอน ร่วมกับการใช้ประโยชน์จากหญ้าเนเปียร์ให้สามารถผลิตเป็นพลังงานทดแทนและช่วยลดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมในอนาคตได้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาคุณสมบัติและการเตรียมกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลังร่วมกับหญ้าเนเปียร์ในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด

1.2.2 เพื่อศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพและทางด้านการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากตะกอนและหญ้าเนเปียร์ในรูปแบบเชื้อเพลิงผสม

1.2.3 เพื่อประเมินความสามารถ และประสิทธิภาพการผลิตพลังงานของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากตะกอนและหญ้าเนเปียร์ในรูปแบบเชื้อเพลิงผสมโดยใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 กากตะกอนที่ใช้ศึกษาเป็นกากตะกอนของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตแบริ่งมันสำปะหลัง ซึ่งนำมาจาก บริษัท สงวนวงษ์อุตสาหกรรม จำกัด (จังหวัดนครราชสีมา)

1.3.2 ซีวมวลที่ใช้ในการผสมวัตถุดิบ (Blending raw materials) เพื่อผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดผสม คือ หญ้าเนเปียร์ สายพันธุ์ปากช่อง 1 ที่ได้จากแปลงปลูกหญ้าเนเปียร์ภายในฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.3.3 โรงงานที่ใช้ทดสอบคือ โรงไฟฟ้าซีวมวลขนาดเล็กของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันชนิดไหลลง (Fixed bed downdraft gasification) ขนาดกำลังการผลิต 100 kW

1.3.4 การศึกษาสมบัติของกากตะกอนและหญ้าเนเปียร์ ทั้งทางกายภาพและทางเคมีเพื่อนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ด เพื่อดูความเหมาะสมเบื้องต้นในการนำมาเป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน พารามิเตอร์ที่ศึกษามีดังนี้

- 1) สมบัติทางกายภาพ (Physical properties) ได้แก่ ขนาด ค่าความชื้นมาตรฐาน เปียก และค่าความหนาแน่นรวม
- 2) องค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate analysis) ได้แก่ ความชื้นมาตรฐาน แห้ง ปริมาณสารระเหย ปริมาณเถ้า ปริมาณคาร์บอนคงตัว และค่าความร้อน
- 3) องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ได้แก่ คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ออกซิเจน (O) ไนโตรเจน (N) ซัลเฟอร์ (S) และองค์ประกอบของสารพิษ ได้แก่ ทองแดง (Cu) สังกะสี (Zn) เหล็ก (Fe) และ คลอรีน (Cl)

1.3.5 การศึกษากระบวนการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจะใช้เครื่องอัดแบบแม่พิมพ์วงแหวน (Mill ring die pelletizer) โดยใช้วัตถุดิบ 4 ประเภท คือ (1) กากตะกอนน้ำเสีย (Sewage sludge) สัญลักษณ์ย่อ SS (2) หญ้าเนเปียร์ (Napier grass) สัญลักษณ์ย่อ NG (3) กากตะกอนผสมกับหญ้าเนเปียร์ สัดส่วน 50:50 %wt สัญลักษณ์ย่อ คือ SS/NG (50/50) และ (4) กากตะกอนผสมกับหญ้าเนเปียร์ สัดส่วน 70:30 %wt สัญลักษณ์ย่อ คือ SS/NG (70/30)

1.3.6 การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้ง 4 ประเภท ได้แก่ เเปอร์เซ็นต์ผลผลิต ค่าความหนาแน่นรวม ค่าความคงทน ค่าความต้านทานน้ำ และอัตราการใช้พลังงานของการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด

1.3.7 การศึกษาคุณสมบัติทางด้านการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้ง 4 ประเภท ได้แก่ เวลาในการจุดติดไฟ และระยะเวลาในการเผาไหม้

1.3.8 การศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะการทำงาน รวมทั้งประเมินความสามารถและประสิทธิภาพการผลิตพลังงานของเชื้อเพลิงอัดเม็ด 4 ประเภท ซึ่งทำการศึกษารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องได้แก่

- 1) ทดสอบสถานะที่เหมาะสมในการเดินระบบที่อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง 3 ระดับ คือ 140, 180 และ 220 Nm<sup>3</sup>/hr
- 2) ศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์ (Temperature profile), องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง (Gas composition), ปริมาณทาร์และฝุ่น (Tar and dust), อัตราการใช้เชื้อเพลิง (Fuel consumption rate) และอัตราการเกิดเถ้า (Ash production rate)
- 3) ประเมินความสามารถ และประสิทธิภาพการผลิตพลังงานของระบบ ได้แก่ ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Cold gasification efficiency)
- 4) เปรียบเทียบสมรรถนะของระบบ ได้แก่ การประเมินค่าพลังงานสุทธิของระบบ

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้ทราบถึงคุณสมบัติและขั้นตอนการเตรียมกากตะกอนร่วมกับหญ้าเนเปียร์ในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด

1.4.2 ได้ทราบถึงคุณสมบัติทางกายภาพและทางด้านการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากตะกอนและหญ้าเนเปียร์ในรูปแบบเชื้อเพลิงผสม

1.4.3 ได้ทราบถึงประสิทธิภาพการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากตะกอนและหญ้าเนเปียร์ในรูปแบบเชื้อเพลิงผสมโดยใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน ซึ่งจะเป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับประกอบการตัดสินใจในการเลือกใช้วิธีดังกล่าวนี้ในการกำจัดกากตะกอนร่วมกับใช้ประโยชน์จากหญ้าเนเปียร์ให้กับโรงงานอุตสาหกรรมได้

## บทที่ 2

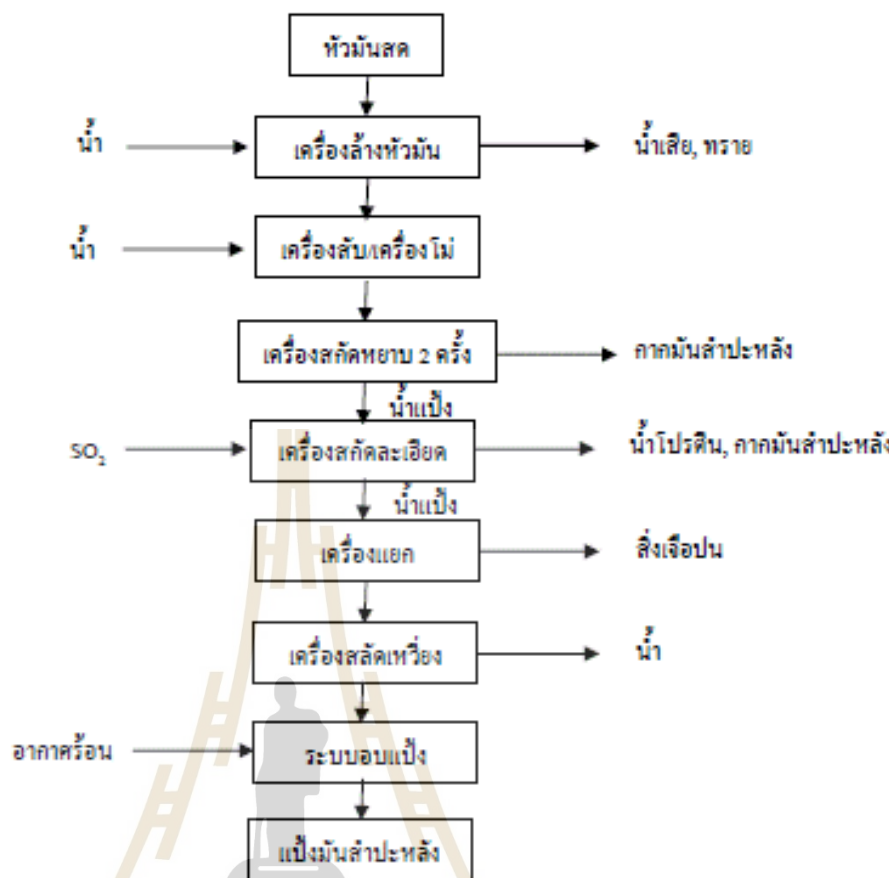
### ปรีทศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 บทนำ

บทนี้กล่าวถึงกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง ในรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับลักษณะทั่วไปของกากตะกอน วิธีการบำบัดและกำจัดกากตะกอนในปัจจุบัน รวมทั้งการประเมินคุณสมบัติการแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง และอธิบายเกี่ยวกับหลักการและวิธีการในการอัดแท่งเชื้อเพลิง การประเมินคุณภาพเชื้อเพลิงอัดแท่ง ทฤษฎีและกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันสำหรับกากของเสีย การใช้ประโยชน์จากแก๊สเชื้อเพลิง และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่มีส่วนคล้ายคลึงกับงานวิจัยที่กำลังศึกษา ดังรายละเอียดต่อไปนี้

#### 2.2 กระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง

กระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังในอุตสาหกรรมแป้ง ซึ่งโรงงานได้รับซื้อหัวมันสดทั้งจากเกษตรกรชาวไร่และจากลานมัน โดยหัวมันสดต้องมีปริมาณแป้งไม่ต่ำกว่า 20% เข้าสู่กระบวนการผลิต ซึ่งขั้นตอนการผลิตเริ่มจากการเตรียมหัวมันสำปะหลังและล้างทำความสะอาด เพื่อแยกดินและทรายออกจากหัวมันหลังจากนั้นก็เข้าสู่การบดหรือสับหัวมันสำปะหลังเพื่อให้หัวมันมีชิ้นเล็กและละเอียดขั้นตอนนี้จะถูกเติมน้ำผสมกับหัวมันบด/สับ ก่อนจะถูกนำเข้าสู่เครื่องสกัดแป้งเพื่อสลัดน้ำให้หลุดจากเนื้อแป้งก่อนเข้าเครื่องอัดกากมันและทำการบีบอัดเอาน้ำแป้งออกจากกากมันแล้วปล่อยกากมันสู่บ่อเก็บ ในขั้นตอนนี้โรงงานมีการเติมน้ำกำมะถัน เพื่อยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ ซึ่งจะเปลี่ยนโมเลกุลของแป้งเป็นกรดแลคติก หลังจากนั้นก็เข้าสู่ขั้นตอนการเพิ่มความเข้มข้นของน้ำแป้งโดยทำให้แป้งข้นขึ้นและขั้นตอนสุดท้ายใช้ความร้อนจากการเผาไหม้แกลบและมีการเก็บพลังงานความร้อนด้วยชุด Pre-heater อบแป้งด้วยความร้อนเพื่อลดความชื้นในเนื้อแป้งและทำการบรรจุผลิตภัณฑ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 กระบวนการผลิตแป้งมันสำหรับปะหลัง (ที่มา : สวลี และคณะ, 2555)

ในส่วนของกากตะกอนที่เกิดขึ้นในระบบบำบัดน้ำเสียจำเป็นต้องมีการนำกากตะกอนน้ำเสียนี้ ออกจากระบบเพื่อนำไปบำบัดและกำจัดต่อไป โดยค่าใช้จ่ายในการบำบัดกากตะกอนน้ำเสียให้มี สภาพคงตัวและการกำจัดโดยวิธีการฝังกลบนั้นพบว่าจะมีมูลค่าสูงถึง 50% ของค่าจัดการน้ำเสีย ทั้งหมด (Midilli et al., 2001) ทั้งนี้อัตราการเกิดกากตะกอนน้ำเสียนั้นก็ขึ้นอยู่กับกระบวนการบำบัด น้ำเสียที่เลือกใช้ ปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้น และองค์ประกอบต่าง ๆ ที่อยู่ในน้ำเสีย ดังนั้นต้องใช้ เทคโนโลยีที่สามารถบำบัดหรือกำจัดกากตะกอนที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและส่งผลกระทบต่อ สิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด รวมถึงต้องเป็นเทคโนโลยีที่มีต้นทุนต่ำเพื่อดึงดูดความสนใจของหน่วยงาน ภาครัฐและเอกชน ซึ่งเทคโนโลยีที่เลือกใช้จะขึ้นอยู่กับลักษณะและคุณสมบัติของกากตะกอน

## 2.3 ลักษณะทั่วไปของกากตะกอน

กากตะกอนน้ำเสีย (Sewage sludge) เป็นกากตะกอนที่เกิดขึ้นจากการบำบัดน้ำเสีย โดยกากตะกอนจะมีคุณสมบัติและลักษณะที่แตกต่างออกไปตามชนิดของของแข็ง ขั้นตอน วิธีการและชนิดของระบบบำบัดน้ำเสียนั้น ๆ ซึ่งกากตะกอนที่ได้มี 2 ลักษณะ คือ 1. กากตะกอนที่เป็นสารอินทรีย์ ได้แก่ กากตะกอนที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางชีววิทยา เช่น ในระบบตะกอนเร่ง (Activated sludge) และบ่อผันสภาพ (Oxidation pond) เป็นต้น และ 2. กากตะกอนที่เป็นสารอินทรีย์ ได้แก่ กากตะกอนที่เกิดจากการบำบัดน้ำทิ้งของโรงงานชุบโลหะ โรงงานอุตสาหกรรมเคมี เป็นต้น โดยประเภทของกากตะกอนจะแบ่งเป็น

- 1) กากตะกอนจากถังตกตะกอนชั้นแรก จะมีลักษณะเป็นเมือกสีเทา มีกลิ่นค่อนข้างเหม็น และสามารถย่อยสลายได้ง่าย
- 2) กากตะกอนจากการใช้สารเคมี มักจะมีสีดำหรือแดงหากมีเหล็กปนอยู่มาก จะลักษณะเป็นเมือกขุ่น มีกลิ่นเหม็น ถ้าหากปล่อยทิ้งไว้ก็จะย่อยสลายเองอย่างช้า ๆ และมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น
- 3) กากตะกอนจากถังเติมอากาศ มีลักษณะเป็นฟอย ๆ สีน้ำตาล ไม่มีกลิ่นเหม็น แต่หากหยุดเติมอากาศจะกลายเป็นสภาพอย่างรวดเร็วจนเปลี่ยนเป็นสีดำ และมีกลิ่นเหม็นจากการหมัก
- 4) กากตะกอนจากการย่อยสลายแบบไร้อากาศ จะมีสีน้ำตาลแก่ปนดำ หากย่อยสลายจนเต็มที่แล้วจะมีแก๊สมาก และมีกลิ่นจาง ๆ คล้ายกลิ่นยาง สามารถแตกตัวได้ง่าย

## 2.4 การบำบัดกากตะกอนน้ำเสีย

การบำบัดกากตะกอนน้ำเสีย เป็นการแยกเอาของแข็งและสารอินทรีย์ออกจากน้ำเสียแล้วปล่อยน้ำที่บำบัดแล้วทิ้งไป คงเหลือแต่กากตะกอนที่ต้องผ่านการบำบัด ซึ่งการบำบัดกากตะกอนน้ำเสีย โดยทั่วไปมีอยู่ 4 ขั้นตอนคือ การทำชั้นตะกอน (Thickener) การปรับเสถียร (Stabilization) การปรับสภาพ (Conditioning) และการรีดน้ำ (Dewatering)

### 2.4.1 การทำชั้นตะกอน (Thickener)

เป็นการทำให้ตะกอนน้ำเสียเข้มข้นขึ้นแบบตกตะกอน คือการแยกน้ำออกจากชั้นกากตะกอนจะทำให้กากตะกอนอัดตัวแน่นขึ้น โดยจะใช้วิธีทางกายภาพ คือ การให้ตกตะกอนตามแรงโน้มถ่วง และการทำให้ลอยด้วยระบบแรงลอยตัว (Flotation) ส่งผลให้กากตะกอนลอยตัวขึ้นข้างบน การลอยตัวของกากตะกอนเกิดขึ้นโดยอาศัยลมช่วยทำให้เกิดฟองอากาศพากากตะกอนลอยตัวขึ้นสู่ผิวน้ำ รวมทั้งการหมุนเหวี่ยง (Centrifugation) เพื่อแยกน้ำออกจากกากตะกอน ซึ่งกระบวนการเหล่านี้ล้วนทำหน้าที่ในการลดปริมาณกากตะกอนก่อนส่งไปบำบัดโดยวิธีการอื่นต่อไป

### 2.4.2 การปรับเสถียร (Stabilization)

มีจุดประสงค์เพื่อลดจำนวนเชื้อโรคและการเน่าเปื่อยของกากตะกอนซึ่งเป็นสาเหตุของปัญหาเรื่องกลิ่นเหม็น โดยทั่วไปจะมีอยู่ 2 แบบ คือ การย่อยสลายแบบใช้อากาศ และการย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศ ดังนี้

1) การย่อยสลายแบบใช้อากาศ ระบบนี้ต้องมีอุปกรณ์เติมอากาศเพื่อให้มีปริมาณอากาศที่เพียงพอต่อจุลินทรีย์ชนิดที่ใช้ ออกซิเจน

2) การย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศ เป็นการลดสารอินทรีย์ในกากตะกอน ทำให้กากตะกอนคงตัวและสามารถนำไปกำจัดได้โดยไม่ส่งกลิ่นเหม็นซึ่งจุลินทรีย์ที่ไม่ใช้อากาศจะเปลี่ยนสารอินทรีย์ต่าง ๆ ไปเป็นแก๊สมีเทน คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจนซัลไฟด์

### 2.4.3 การปรับสภาพ (Conditioning)

เพื่อให้กากตะกอนมีความเหมาะสมกับการนำไปใช้ประโยชน์ เช่น การใช้ปรับสภาพดินและทำปุ๋ยสำหรับใช้ทางการเกษตร และให้ง่ายต่อขั้นตอนการรีดน้ำ ซึ่งขั้นตอนการรีดน้ำมีทั้งวิธีที่ใช้สารเคมี และความร้อน ซึ่งวิธีที่นิยมมากที่สุดคือวิธีใช้สารเคมี ทั้งนี้สารเคมีที่ถูกเติมลงไปจะทำให้เกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของกากตะกอนให้มีสภาพที่เหมาะสมกับการรีดน้ำ

### 2.4.4 การรีดน้ำ (Dewatering)

เป็นกระบวนการหลักของการบำบัดกากตะกอน เพื่อลดปริมาณกากตะกอนและความชื้นก่อนจะนำไปกำจัดไม่ว่าจะเป็น การฝังกลบ การเผา การใช้ประโยชน์อย่างอื่น เช่น นำไปทำเป็นปุ๋ยทางการเกษตร ซึ่งจะทำให้สะดวกและประหยัดค่าใช้จ่ายในการขนส่ง โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการรีดน้ำ ได้แก่ เครื่องกรองแบบสุญญากาศ (Vacuum filter) เครื่องอัดกรอง (Filter press) เครื่องหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifuge) หรือเครื่องสายพานรีดตะกอน (Belt filter press) รวมถึงลานตากตะกอน (Sludge drying bed)

## 2.5 กระบวนการกำจัดกากตะกอน

การนำกากตะกอนไปกำจัดหรือใช้ประโยชน์ จะต้องมีการนำกากตะกอนนั้นไปบำบัดขั้นต้นก่อน ทั้งนี้เพื่อแยกองค์ประกอบของน้ำ ควบคุมการเกิดกลิ่นและควบคุมเชื้อโรค ซึ่งได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 2.4 และมีความจำเป็นที่ต้องทราบคุณสมบัติและองค์ประกอบในกากตะกอนก่อนเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการเลือกวิธีการจัดการกากตะกอนได้อย่างเหมาะสม โดยการนำกากตะกอนไปบริหารจัดการให้เกิดประโยชน์สามารถทำได้หลากหลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีมีข้อแตกต่างกัน ดังต่อไปนี้



### 2.5.1 การขนส่งผ่านท่อหรือบรรทุกเรือทิ้งลงทะเล (Marine disposal)

เป็นวิธีการที่ใช้กันในหลายประเทศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเมืองใหญ่ ๆ ที่ตั้งอยู่ติดทะเล ซึ่งเป็นวิธีที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำและระบบนิเวศของแหล่งน้ำ ทำให้การกำจัดกากตะกอนโดยวิธีดังกล่าวไม่เป็นที่นิยมในปัจจุบันเนื่องจากถูกต่อต้านจากหน่วยงานทั้งในและต่างประเทศ

### 2.5.2 การนำไปฝังกลบ (Sanitary landfill)

โดยตะกอนที่นำไปฝังกลบควรอยู่ในรูปตะกอนแห้ง (Sludge cake) ซึ่งมีของแข็งอยู่มากกว่า 30% ของกากตะกอนทั้งหมด โดยการกำจัดกากตะกอนควรเป็นการกำจัดแบบฝังกลบอย่างถูกหลักสุขาภิบาล (Sanitary landfill) ซึ่งเป็นวิธีที่ต้องใช้เนื้อที่จำนวนมากในการจัดการและจำเป็นต้องจัดหาพื้นที่สำหรับการกำจัดให้เหมาะสม คือ ต้องมีระยะไม่ห่างไกลจากโรงบำบัดน้ำเสียมากเกินไปและไม่อยู่ใกล้แหล่งชุมชนถ้าการฝังกลบไม่มีประสิทธิภาพอาจเกิดการรั่วซึมของสารพิษออกจากบริเวณที่ฝังกลบโดยซึมลงดินหรือแม่น้ำ ซึ่งจะเป็อันตรายและมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม จึงควรมีการศึกษาถึงผลกระทบที่อาจมีผลต่อคุณภาพน้ำใต้ดินและแหล่งน้ำผิวดินที่อยู่ใกล้เคียง

### 2.5.3 การนำไปปรับปรุงดิน (Land application)

เป็นวิธีหนึ่งที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในภาคเกษตรกรรม โดยทั่วไปกากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียจะมีองค์ประกอบของธาตุอาหารหลายอย่างที่เป็นประโยชน์ต่อพืช เช่น ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และธาตุอื่น ๆ ทั้งนี้กากตะกอนที่จะนำไปบริหารจัดการในแง่การกำจัดและการใช้ประโยชน์นั้นควรผ่านกระบวนการบำบัดและแยกน้ำออกจนมีสภาพเป็นตะกอนแห้ง เพื่อมิก่อให้เกิดกลิ่นเหม็นและปัญหามลพิษในพื้นที่ที่นำไปบริหารจัดการ แต่ปัญหาของการกำจัดตะกอนวิธีนี้คือ กากตะกอนอาจมีการปนเปื้อนของสารบางชนิดซึ่งก่อให้เกิดอันตรายทั้งในระยะสั้นและระยะยาวต่อพืชและสัตว์ที่กินพืชนั้นเป็นอาหารได้ จึงจำเป็นต้องทำการตรวจสอบและวิเคราะห์องค์ประกอบของกากตะกอนก่อนที่จะนำมาใช้ประโยชน์

### 2.5.4 การทำปุ๋ยหมัก (Composting)

เป็นวิธีการกำจัดกากตะกอนที่ดีวิธีหนึ่งสำหรับกากตะกอนที่เกิดจากการระบบบำบัดน้ำเสียที่มีปริมาณสารพิษปนอยู่น้อย ซึ่งการทำปุ๋ยหมักเป็นการอาศัยกระบวนการย่อยสลายกากตะกอนด้วยจุลินทรีย์ เพื่อให้จุลินทรีย์ย่อยสลายได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่คงตัวเหมาะสำหรับกากตะกอนที่มีความเข้มข้นสารอินทรีย์สูง ในการทำปุ๋ยหมักมีอยู่ 2 แบบคือ กระบวนการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์แบบใช้อากาศจะต้องมีการเติมอากาศให้เพียงพอ และจะใช้เวลาในการย่อยสลายประมาณ 5 – 15 วัน ในขณะที่กระบวนการโดยไมใช้อากาศไม่จำเป็นต้องเติมอากาศในกระบวนการ แต่ระยะเวลาในการย่อยสลายจะนานกว่าและก่อให้เกิดปัญหาเรื่องกลิ่นเหม็นได้ ซึ่งทั้งสองกระบวนการนี้จำเป็นต้องควบคุมกระบวนการย่อยสลายให้ดี เพื่อให้ปุ๋ยที่ได้มีคุณภาพสามารถใช้งานได้

### 2.5.5 การเผา (Incineration)

เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการลดปริมาตรตะกอนและขจัดกลิ่น การเผามีข้อดีที่สามารถกำจัดตะกอนได้อย่างสมบูรณ์ โดยมีต้องส่งไปกำจัดที่อื่นและได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีของเตาเผาให้มีประสิทธิภาพสูงและง่ายต่อการควบคุมการทำงาน โดยทั่วไปนิยมนำกากตะกอนที่มีค่าความชื้นต่ำกว่า 50% มาเผา เนื่องจากถ้าความชื้นสูงกว่านี้จะเสียค่าใช้จ่ายด้านพลังงานที่ใช้ในการลดความชื้นสูง การเผาต้องใช้อุณหภูมิ 700 – 760 °C ใช้อัตราส่วนอากาศผสมสูงประมาณ 50 - 100% มากกว่าอากาศที่ต้องการจริง และใช้แก๊สธรรมชาติหรือน้ำมันเชื้อเพลิงช่วยในการเผาไหม้เพื่อให้เกิดการสันดาปอย่างสมบูรณ์ ซึ่งสามารถนำพลังงานความร้อนส่วนเกินไปใช้ประโยชน์ต่อไปได้ แต่ข้อเสียคือ ค่าใช้จ่ายทางการก่อสร้างและค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานรวมทั้งค่าเครื่องมือมีราคาสูงเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่น ๆ และต้องป้องกันมลภาวะอากาศที่เกิดจากเถ้าด้วย

### 2.5.6 การผลิตแก๊สเชื้อเพลิงโดยกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) และแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification)

เป็นวิธีการนำเอากากตะกอนซึ่งเป็นสารอินทรีย์มาเพิ่มความร้อนที่อุณหภูมิสูงในสภาวะที่ปราศจากออกซิเจนหรือจำกัดออกซิเจน ทำให้สารอินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบในกากตะกอนสลายตัวเป็นกลุ่มแก๊สเชื้อเพลิง ซึ่งวิธีการกำจัดกากตะกอนโดยวิธีนี้สามารถนำแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้มาใช้ประโยชน์เพื่อเป็นพลังงานได้ (ทิพย์สุภินทร์ หินชุย, 2550)

โดยรวมแล้วกากตะกอนมีความสามารถในการนำไปใช้ปรับปรุงดิน การทำปุ๋ยหมัก รวมทั้งสามารถนำมาผ่านกระบวนการเผาเพื่อเอาพลังงานความร้อนไปใช้ประโยชน์และการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงโดยกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันเพื่อนำแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้มาเป็นพลังงาน แต่เนื่องจากกากตะกอนที่จะนำมาใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ นั้นควรที่จะมีสภาพเป็นกากตะกอนแห้ง ซึ่งลักษณะของกากตะกอนแห้งจะเป็นผงละเอียดคล้ายดินคละกับก้อนขนาดเล็ก จึงจำเป็นต้องผ่านการเตรียมกากตะกอนให้มีขนาดและรูปร่างที่สม่ำเสมอเพื่อให้ง่ายต่อการขนส่งและสะดวกในการใช้งานโดยการอัดเป็นแท่งเชื้อเพลิง

## 2.6 การประเมินคุณสมบัติกากตะกอนที่สามารถนำมาแปรรูปเป็นแท่งเชื้อเพลิง

ในปัจจุบันวัสดุชีวมวลหรือกากของเสียที่มีการนำมาแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง จำแนกออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ ชีวมวลหรือกากของเสียที่มีองค์ประกอบเป็นเส้นใย ชีวมวลหรือกากของเสียที่มีองค์ประกอบเป็นแป้งและน้ำตาล รวมทั้งชีวมวลหรือกากของเสียที่มีองค์ประกอบเป็นน้ำมัน (อังศุมน สังขพันธ์, 2560) ทั้งนี้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติการเป็นเชื้อเพลิงของกากตะกอน มีดังนี้

### 2.6.1 การวิเคราะห์สมบัติแบบประมาณ (Proximate analysis)

เป็นการวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานในเชื้อเพลิงต่าง ๆ เช่น ปริมาณความชื้น (Moisture content) ปริมาณสารที่ระเหยได้ (Volatile matter) ปริมาณเถ้า (Ash) และปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) โดยใช้การวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM (American Society for Testing and Materials) ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ใช้ประกอบการพิจารณาว่ากากตะกอนสามารถเป็นเชื้อเพลิงได้หรือไม่ มีรายละเอียด ดังนี้

1) ปริมาณความชื้น (Moisture content) คือ ปริมาณน้ำที่คงเหลืออยู่หลังจากที่ตากแห้งกากตะกอน ซึ่งความชื้นมีผลต่อค่าความร้อนโดยตรงหากมีความชื้นมากจะทำให้มีการสูญเสียพลังงานความร้อนไปกับการระเหยความชื้นในระหว่างการเผาไหม้จำนวนมากทำให้ค่าความร้อนที่ได้ลดต่ำลง แม้ว่าการตากแดดหรืออบแห้งสามารถลดความชื้นในกากตะกอนได้ แต่ก็จะเป็นการเพิ่มขึ้นต้นทุนและความยุ่งยากในการดำเนินงาน รวมทั้งเพิ่มต้นทุนการผลิตหากต้องใช้วิธีลดความชื้นด้วยการอบแห้ง

2) ปริมาณเถ้า (Ash) คือ สารอนินทรีย์ที่เหลือจากการเผาไหม้ ซึ่งประกอบด้วย ซิลิกา แคลเซียมออกไซด์ แมกนีเซียมออกไซด์ หรือเป็นส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้ หากกากตะกอนมีปริมาณเถ้าสูง จะเป็นปัญหาในกระบวนการเผาไหม้และเพิ่มความยุ่งยากในการกำจัดเถ้าที่เกิดขึ้น

3) ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) คือ ปริมาณสารประกอบคาร์บอนระเหยยาก โดยจะคงเหลืออยู่ในกากตะกอนหลังจากที่เผาไหม้สารระเหยออกไป ซึ่งกากตะกอนที่มีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงจะมีช่วงเวลาในการลุกไหม้นานขึ้น

4) ปริมาณสารที่ระเหยได้ (Volatile matters) คือ องค์ประกอบในกากของเสียที่สามารถระเหยได้เมื่อได้รับความร้อน โดยกากตะกอนที่มีปริมาณสารระเหยสูง จะมีแนวโน้มที่มีค่าความร้อนสูงขึ้นด้วย

### 2.6.2 ค่าความร้อน (Calorific value)

เป็นปริมาณความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ ของเชื้อเพลิงแต่ละชนิด โดยทั่วไปค่าความร้อนจะแสดงในรูปของปริมาณความร้อนต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักหรือหนึ่งหน่วยปริมาตร จะมีหน่วยเป็น MJ/kg สำหรับของแข็ง, MJ/CM สำหรับของเหลว และ MJ/N.CM สำหรับก๊าซ (อ้างอิงที่ อุณหภูมิ 0 °C และความดัน 1.01325 Bar) ซึ่งเชื้อเพลิงที่มีความร้อนสูงจะปลดปล่อยพลังงานออกมาสูง จะแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ 1) ค่าความร้อนสูง (High Heating Value, HHV) คือ ค่าความร้อนทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง โดยปกติแล้วในเชื้อเพลิงจะมีน้ำปนอยู่ด้วย เมื่อเผาไหม้น้ำส่วนนี้จะรวมกับน้ำที่เกิดจากการเผาไหม้ของไฮโดรเจน ซึ่งจะมีปริมาณความร้อนส่วนหนึ่งถูกนำไปใช้ในรูปความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ และ 2) ค่าความร้อนต่ำ (Low Heating Value, LHV) คือ ปริมาณความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่ไม่รวมค่าความร้อนแฝง

### 2.6.3 การวิเคราะห์สมบัติแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis)

เป็นการวิเคราะห์สมบัติที่แสดงถึงธาตุองค์ประกอบของเชื้อเพลิงต่าง ๆ ประกอบไปด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ รวมทั้งธาตุอื่น ๆ ที่ก่อให้เกิดมลพิษ เช่น คลอรีน โลหะหนัก โดยปริมาณของคาร์บอน ไฮโดรเจนจะมีประโยชน์ในการคำนวณหาปริมาณก๊าซออกซิเจนที่ต้องการใช้ในกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิง เพื่อนำไปประเมินค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ สำหรับปริมาณไนโตรเจนจะใช้ในการประเมินปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ที่จะเกิดขึ้นจากการเผาเชื้อเพลิง ในส่วนซัลเฟอร์ที่มีการปลดปล่อยออกมาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง หากมีปริมาณที่สูงจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งองค์ประกอบของธาตุต่าง ๆ จะมีความแตกต่างกันโดยขึ้นอยู่กับชนิดของเชื้อเพลิงนั้น ๆ (Midilli et al., 2001)

### 2.7 การประเมินคุณสมบัติกากตะกอนที่มาจากอุตสาหกรรมประเภทต่าง ๆ

ในส่วนนี้จะขอยกตัวอย่างการศึกษาสมบัติของกากตะกอนที่มาจากอุตสาหกรรมประเภทต่าง ๆ เช่น กากตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียเทศบาล (Ayol et al., 2019; Kim et al., 2016) และกากตะกอนจากโรงงานทอผ้า (Avelar et al., 2016) รวมทั้งกากตะกอนน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม 2 แห่ง เช่น โรงงานกลุ่มฟอกย้อมในสวนอุตสาหกรรมศรีสทพัฒน์กบินทร์บุรี และโรงงานฟอกย้อม บริษัทไทยกุลแชน จำกัด (อำเภอกบินทร์บุรี จังหวัดปราจีนบุรี) (ทิพย์สุภินทร์ หินชุย, 2550) ที่ทำการศึกษารวมองค์ประกอบต่าง ๆ ในกากตะกอนเพื่อพิจารณาถึงการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตพลังงาน

เมื่อพิจารณาภาพรวมองค์ประกอบแบบประมาณของกากตะกอนที่มาจากแหล่งต่าง ๆ จากข้อมูลในตารางที่ 2.1 พบว่า กากตะกอนโรงงานทอผ้า (Avalar et al., 2016) และกากตะกอนผสมโรงงานฟอกย้อม (ทิพย์สุภินทร์ หินชุย, 2550) มีปริมาณสารระเหย และค่าความร้อนที่สูง และมีปริมาณเถ้าค่อนข้างต่ำ จึงมีความเหมาะสมที่นำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงได้อย่างดี ในส่วนของกากตะกอนโรงบำบัดน้ำเสียเทศบาล (Ayol et al., 2019; Kim et al., 2016) มีศักยภาพในการนำไปเป็นเชื้อเพลิง แต่มีปริมาณเถ้าที่ค่อนข้างสูง กรณีนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงจะมีความยุ่งยากในการนำเถ้าออกจากระบบเผาไหม้ที่มากกว่าปกติ

ถ้าหากพิจารณากากตะกอนที่ได้กล่าวถึงก่อนหน้านี้นี้ ในส่วนการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุและโลหะหนัก ซึ่งจะมีส่วนสำคัญในการทราบถึงแนวโน้มมลพิษที่เกิดขึ้นและเป็นแนวทางในการเลือกใช้เทคโนโลยี สำหรับการจัดการกากตะกอนที่เหมาะสม พบว่า มีปริมาณธาตุคาร์บอนและไฮโดรเจนค่อนข้างสูง ซึ่งในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันธาตุทั้งสองนี้จะเป็นธาตุหลักที่จะถูกเปลี่ยนไปเป็นแก๊สเชื้อเพลิงโดยปฏิกิริยาอุณหภูมิ ในส่วนของปริมาณธาตุซัลเฟอร์จะเป็นตัวบ่งชี้ได้ถึงปริมาณแก๊สมลพิษที่อาจเกิดขึ้นในรูปไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $H_2S$ ) และออกไซด์ของซัลเฟอร์ ( $SO_x$ ) นอกจากนี้

โลหะหนักของกากตะกอนโดยภาพรวมมีการปนเปื้อนที่ค่อนข้างสูง ซึ่งจะเป็นอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม จึงจำเป็นต้องเลือกใช้เทคโนโลยีในการจัดการกากตะกอนที่เหมาะสม

การศึกษาในครั้งนี้จะใช้ข้อมูลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบปริมาณ องค์ประกอบแบบแยกธาตุและโลหะหนักของกากตะกอนในอุตสาหกรรมประเภทต่าง ๆ เป็นแหล่งข้อมูลอ้างอิงแทนกากตะกอนจากอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลัง เนื่องจากการศึกษาที่ยังไม่แพร่หลายในปัจจุบัน

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบของกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่ง

| องค์ประกอบของกากตะกอน | แหล่งที่มาของกากตะกอน |                       |                        |                               |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|-------------------------------|
|                       | โรงบำบัดน้ำเสียเทศบาล | โรงบำบัดน้ำเสียเทศบาล | โรงงานทอผ้า            | กากตะกอนผสมโรงงานฟอกย้อม      |
| องค์ประกอบแบบปริมาณ   |                       |                       |                        |                               |
| % ความชื้น            | 6.84                  | 5.73                  | 8.7                    | 5.44                          |
| % สารระเหย            | 37.94                 | 50.76                 | 81.00                  | 56.00                         |
| % คาร์บอนคงตัว        | 12.04                 | 7.24                  | 7.21                   | 8.11                          |
| % เถ้า                | 50.03                 | 36.27                 | 11.8                   | 13.55                         |
| องค์ประกอบแบบแยกธาตุ  |                       |                       |                        |                               |
| % คาร์บอน             | 29.67                 | 51.00                 | 46.7                   | 36.38                         |
| % ไฮโดรเจน            | 4.31                  | 7.37                  | 6.5                    | 5.86                          |
| % ไนโตรเจน            | 4.62                  | 6.59                  | 6.2                    | 5.22                          |
| % ซัลเฟอร์            | 1.43                  | 1.88                  | 1.3                    | 0.98                          |
| % ออกซิเจน            | 59.95                 | 33.16                 | 27.5                   | 47.93                         |
| โลหะหนัก (mg/kg)      |                       |                       |                        |                               |
| ทองแดง                | 387.24                | 417                   | 1,027                  | 7,400                         |
| เหล็ก                 | -                     | 15,500                | 823                    | 23,600                        |
| สังกะสี               | 1,636.88              | 933                   | 113.5                  | 3,310                         |
| แคดเมียม              | 2.68                  | <0.10                 | -                      | 10                            |
| ตะกั่ว                | 156.69                | 57.7                  | -                      | 260                           |
| ค่าความร้อน (MJ/kg)   | 11.73                 | 14.28                 | 21.8                   | 13.55                         |
| อ้างอิงข้อมูลจาก      | Ayol et al.,<br>2019  | Kim et al.,<br>2016   | Avelar et al.,<br>2016 | ทิพย์สุภินทร์<br>หิณชุย, 2550 |

## 2.8 เชื้อเพลิงชีวมวล

เชื้อเพลิงชีวมวล คือ สารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติและสามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้ เช่น กากของเสียจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมการเกษตร เศษไม้ ขยะ และวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เป็นต้น ชีวมวลสามารถเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานได้เพราะในขั้นตอนของการเจริญเติบโตนั้น พืชใช้คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำเพื่อเปลี่ยนพลังงานจากแสงอาทิตย์ โดยผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสงได้ออกมาเป็นแป้งและน้ำตาล แล้วกักเก็บไว้ตามส่วนต่าง ๆ ของพืช ซึ่งพลังงานที่สะสมไว้ในพืชสามารถเปลี่ยนรูปไปเป็นพลังงานรูปแบบต่าง ๆ ได้ เช่น การเผาไหม้โดยตรง (Combustion) การผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Gasification) การหมัก (Fermentation) และการผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากพืช จะแบ่งออกเป็น กระบวนการทางชีวภาพ กระบวนการทางฟิสิกส์และเคมี รวมทั้งกระบวนการใช้ความร้อนสูง เป็นต้น

การประเมินศักยภาพชีวมวลจากเศษวัสดุทางการเกษตร ได้แบ่งออกเป็น ชีวมวลที่เกิดขึ้นในอุตสาหกรรมแปรรูปผลผลิตทางการเกษตร และชีวมวลที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นที่เพาะปลูก ดังนี้

- 1) ชีวมวลที่เกิดขึ้นที่อุตสาหกรรมแปรรูปผลผลิตทางการเกษตร เช่น แกลบจากโรงสีข้าว กากอ้อยจากอุตสาหกรรมน้ำตาล ใบปาล์มและทะลายปาล์มที่ได้จากอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มดิบ เป็นต้น ชีวมวลเหล่านี้ส่วนใหญ่จะถูกนำไปใช้เพื่อผลิตพลังงาน
- 2) ชีวมวลที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นที่เพาะปลูก จะเกิดจากชีวมวลส่วนที่เหลือทิ้ง ภายหลังจากการเก็บเกี่ยวผลผลิตของเกษตรกร เช่น ฟางข้าว ยอดและใบอ้อย ตอและรากไม้ยางพารา รวมทั้งเหง้ามันสำปะหลัง เป็นต้น ชีวมวลเหล่านี้ไม่นิยมนำมาผลิตพลังงานเนื่องจากมีต้นทุนในการรวบรวมและขนส่งที่สูง ส่วนใหญ่จะถูกทิ้งไว้ในพื้นที่เพาะปลูก เพื่อให้ย่อยสลายกลายเป็นสารปรับปรุงดิน หรือถูกเผาทำลายในพื้นที่เพาะปลูก

ในแต่ละปีปริมาณผลผลิตชีวมวลที่จะนำไปใช้เพื่อผลิตพลังงาน มีแนวโน้มคงที่ แต่ในขณะเดียวกันการใช้พลังงานจากชีวมวลนั้นเพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ ตามความต้องการของประชากรในประเทศที่เพิ่มสูงขึ้น จึงทำให้หน่วยงานทั้งภาครัฐและภาคเอกชนให้ความสนใจที่จะหาแหล่งชีวมวลชนิดใหม่ที่มีศักยภาพและมีปริมาณมากเพียงพอในการผลิตเป็นพลังงานจากชีวมวล นั่นก็คือ หญ้าเนเปียร์

หญ้าเนเปียร์ เป็นหญ้าเขตร้อน มีลักษณะคล้ายกับอ้อย มีลำต้นใหญ่ ใบหนาและกว้าง มีหลากหลายสายพันธุ์ ซึ่งสายพันธุ์เดิมนิยมปลูกในประเทศไทยมีอยู่ 3 สายพันธุ์ คือ หญ้าเนเปียร์ธรรมดา หญ้าเนเปียร์แคระ (Mott Dwarf Elephant Grass) และหญ้าเนเปียร์ยักษ์ (King Grass) เป็นหญ้าที่ดอกไม่ติดเมล็ด จึงไม่เป็นปัญหาการเป็นวัชพืช เกษตรกรปลูกไว้สำหรับเลี้ยงสัตว์เคี้ยวเอื้อง มีคุณค่าทางอาหารสูง เป็นพืชชอบแสงแดด มีน้ำเพียงพอแต่ไม่ท่วมขัง และมีสภาพดินที่ดี การเตรียมดินและการปลูกเหมือนการปลูกอ้อย ปลูกครั้งเดียวสามารถเก็บเกี่ยวได้นานถึง 6 – 7 ปี ต่อมาต้องมี

การพัฒนาสายพันธุ์ขึ้นเป็น หญ้าเนเปียร์พันธุ์ปากช่อง 1 เป็นสายพันธุ์ผสมที่เกิดจากการผสมข้ามสายพันธุ์ระหว่างหญ้าเนเปียร์ยักษ์และหญ้าไข่มุก มีลักษณะเด่นคือ เติบโตเร็ว แตกกอดี ใบและลำต้นอ่อนนุ่ม ขอบใบไม่คมไม่มีขน ให้ผลผลิตต่อไร่สูง มีปริมาณน้ำตาลในใบและลำต้นสูงสามารถเก็บเกี่ยวได้ปีละ 5 - 6 ครั้ง

ในปัจจุบันได้มีการศึกษาการนำหญ้าเนเปียร์มาผลิตเป็นเชื้อเพลิงในรูปแบบเชื้อเพลิงอัดแท่งขนาดเล็ก (Pellets) เพื่อนำไปใช้ในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (รีไซม์ และคณะ, 2560; ศุภชัย ธรรมศิริ ทรัพย์ และภูมิพัฒน์ ภาชนะ, 2558) ซึ่งจะต้องนำหญ้าเนเปียร์มาผ่านการเตรียมวัตถุดิบเสียก่อน โดยเริ่มจากการการลดขนาดด้วยเครื่องตัดบดแบบหยาบและละเอียด และลดความชื้นด้วยวิธีการตากแดดหรือผ่านตู้อบแห้ง เพื่อให้มีขนาดและความชื้นที่เหมาะสมสำหรับผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งขนาดเล็ก (Pellets) ทั้งนี้สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมได้กำหนดเกี่ยวกับมาตรฐานเชื้อเพลิงชีวมวลแข็งอัดแท่ง (Pellets) ซึ่งมีเกณฑ์ในการประเมินดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 คุณลักษณะที่ต้องการของเชื้อเพลิงชีวมวลประเภทไม้ได้ทำจากไม้ทั้งหมด

| คุณลักษณะที่ต้องการ                            | ชั้นคุณภาพ 1  | ชั้นคุณภาพ 2  | วิธีทดสอบ      |
|--|---|---|----------------|
| ความหนาแน่นรวม                                 | ไม่น้อยกว่า 600 kg/m <sup>3</sup>                       | ไม่น้อยกว่า 600 kg/m <sup>3</sup>                       | ASTM E873      |
| เส้นผ่านศูนย์กลาง (D)                          | ตั้งแต่ 6 mm ถึง 25 mm (ค่าความคลาดเคลื่อน $\pm 1$ mm ) | ตั้งแต่ 6 mm ถึง 25 mm (ค่าความคลาดเคลื่อน $\pm 1$ mm ) | ได้จากการคำนวณ |
| ความคงทน                                       | ไม่น้อยกว่า 96.0 % w/w                                  | ไม่น้อยกว่า 96.0 % w/w                                  | ได้จากการคำนวณ |
| ปริมาณผงฝุ่น                                   | ไม่เกิน 3.0 % w/w                                       | ไม่เกิน 6 % w/w   | ได้จากการคำนวณ |
| ความยาวต่ำสุด                                  | ไม่น้อยกว่า 3.15 mm                                     | ไม่น้อยกว่า 3.15 mm                                     | ได้จากการคำนวณ |
| ความยาวสูงสุด (เฉพาะ D ตั้งแต่ 6 mm ถึง 10 mm) | ไม่เกิน 45.0 mm   | ไม่เกิน 45.0 mm   | ได้จากการคำนวณ |
| ความยาวที่ เกินกว่า 40 mm                      | ไม่เกิน 1 % w/w   | ไม่เกิน 1 % w/w   | ได้จากการคำนวณ |

| คุณลักษณะที่ต้องการ        | ชั้นคุณภาพ 1  | ชั้นคุณภาพ 2              | วิธีทดสอบ        |
|----------------------------|---|---------------------------|------------------|
| ความยาวเฉลี่ย              | ตั้งแต่ 3.15 mm ถึง 40 mm สำหรับ D<br>ตั้งแต่ 6 mm ถึง 10 mm  | ตั้งแต่ 3.15 mm ถึง 40 mm | ได้จากการคำนวณ   |
|                            | ตั้งแต่ 3.15 mm ถึง 50 mm สำหรับ D<br>ตั้งแต่ 12 mm ถึง 25 mm |                           |                  |
| ความชื้น                   | ไม่เกิน 15 % w/w  | ไม่เกิน 15 % w/w          | ASTM E871        |
| ค่าความร้อน                | ไม่น้อยกว่า 14.5 MJ/kg  | ไม่น้อยกว่า 14.5 MJ/kg    | ASTM E711        |
| เถ้า                       | ไม่เกิน 10 % w/w  | ไม่เกิน 18 % w/w          | ASTM D1102       |
| สารเติมแต่ง                | ไม่เกิน 5 % w/w   | ไม่กำหนด                  | ผู้ทำต้องพิสูจน์ |
| ส่วนประกอบของคลอรีน (Cl)   | ไม่เกิน 0.30 % w/w  | ไม่เกิน 0.30 % w/w        | ISO 16994        |
| ส่วนประกอบของกำมะถัน (S)   | ไม่เกิน 0.30 % w/w  | ไม่เกิน 0.30 % w/w        | ISO 16994        |
| ส่วนประกอบของไนโตรเจน (N)  | ไม่เกิน 2.0 % w/w   | ไม่เกิน 2.0 % w/w         | ISO 16948        |
| ส่วนประกอบของสารหนู (As)   | ไม่เกิน 1 mg/kg   | ไม่กำหนด                  | ISO 16968        |
| ส่วนประกอบของแคดเมียม (Cd) | ไม่เกิน 0.5 mg/kg   | ไม่กำหนด                  | ISO 16968        |
| ส่วนประกอบของโครเมียม (Cr) | ไม่เกิน 50 mg/kg  | ไม่กำหนด                  | ISO 16968        |
| ส่วนประกอบของทองแดง (Cu)   | ไม่เกิน 20 mg/kg  | ไม่กำหนด                  | ISO 16968        |
| ส่วนประกอบของตะกั่ว (Pb)   | ไม่เกิน 10 mg/kg  | ไม่กำหนด                  | ISO 16968        |



| คุณลักษณะที่ต้องการ       | ชั้นคุณภาพ 1      | ชั้นคุณภาพ 2 | วิธีทดสอบ |
|---------------------------|-------------------|--------------|-----------|
| ส่วนประกอบของปรอท (Hg)    | ไม่เกิน 0.1 mg/kg | ไม่กำหนด     | ISO 16968 |
| ส่วนประกอบของนิกเกิล (Ni) | ไม่เกิน 10 mg/kg  | ไม่กำหนด     | ISO 16968 |
| ส่วนประกอบของสังกะสี (Zn) | ไม่เกิน 100 mg/kg | ไม่กำหนด     | ISO 16968 |

หมายเหตุ : เชื้อเพลิงชีวมวลประเภทไม้ได้ทำจากไม้ทั้งหมด เช่น วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น ฟางข้าว แกลบ กะลาปาล์ม และพืชพลังงานต่าง ๆ เช่น หญ้าเนเปียร์ รวมทั้งกากของเสียจากภาคอุตสาหกรรม เป็นต้น (ที่มา : สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2560)

## 2.9 เชื้อเพลิงอัดแท่ง

กระบวนการอัดแท่ง เป็นกระบวนการที่เพิ่มความหนาแน่นของวัสดุให้สูงขึ้น และช่วยลดความชื้นในวัสดุ รวมทั้งยังสามารถเปลี่ยนขนาดและรูปร่างของวัสดุให้ง่ายต่อการจัดเก็บ ขนส่งและแปลงเป็นพลังงาน โดยการแปรรูปวัสดุให้เป็นเชื้อเพลิงสามารถทำได้หลากหลายรูปแบบ เช่น อัดเป็นเม็ดหรือแท่งเล็ก ๆ (Pelleting) อัดเป็นก้อนลูกบาศก์ (Cubing) อัดเป็นแท่งพิน (Extruded log) และอัดเป็นฟอน (Baling) ส่วนใหญ่การนำเชื้อเพลิงไปใช้ในการผลิตเป็นพลังงาน จะอัดเป็นแท่ง (Briquette) และเป็นแท่งเล็ก ๆ (Pellets) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ และลักษณะการนำไปใช้ประโยชน์ ซึ่งประเภทของแท่งเชื้อเพลิงที่มีการผลิตขึ้นในปัจจุบันมี 2 ประเภท คือ 1. ถ่านอัดแท่งเป็นการนำชีวมวลหรือของเสียที่เผาจนเป็นถ่านแล้วมาอัดเป็นแท่ง หรืออาจนำแท่งเชื้อเพลิงที่อัดเป็นแท่งแล้วมาเผาให้เป็นแท่งถ่านก็ได้ และ 2. แท่งเชื้อเพลิงเขียว เป็นการนำชีวมวลหรือของเสียมาอัดแท่งแล้วนำไปใช้งานได้โดยตรง ไม่ต้องมีขั้นตอนการเผาเหมือนเช่นถ่านอัดแท่ง ซึ่งข้อดีของเชื้อเพลิงอัดแท่ง มีดังนี้คือ 1) การขนส่งสะดวก และลดต้นทุนการขนส่ง, 2) เพื่อ Dehydrate เอาน้ำออกจากชีวมวลเพื่อลดการเข้าทำลายของเชื้อรา ผลที่ตามมาคือสามารถเก็บเชื้อเพลิงได้นานขึ้น, 3) ค่าความร้อนต่อหน่วยน้ำหนักสูง เนื่องจากเชื้อเพลิงอัดเม็ดมีความหนาแน่นโดยมวลมากกว่าชีวมวลดิบ, 4) ให้ความร้อนสม่ำเสมอ และ 5) ใช้พื้นที่ในการเก็บเชื้อเพลิงน้อยกว่าชีวมวลดิบ

### 2.9.1 วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการอัดแท่งเชื้อเพลิง

วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการอัดแท่งเชื้อเพลิงไม่ว่าจะเป็น ของเหลือใช้หรือเหลือทิ้งทางการเกษตรหลังเก็บเกี่ยวหลายชนิด ประกอบกับภาคอุตสาหกรรมของประเทศส่วนใหญ่เป็น อุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการเกษตร เช่น อุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาล อุตสาหกรรมยาสูบ อุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลัง เป็นต้น ซึ่งวัสดุเหลือใช้ดังกล่าวนี้มีศักยภาพในการนำมาใช้ผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่งได้ทั้งสิ้น ตัวอย่างของแหล่งวัสดุที่มีศักยภาพในการนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง ได้แก่

1) เศษพืชหรือเศษวัสดุเหลือใช้จากภาคการเกษตรที่สามารถนำมาทำเป็นเชื้อเพลิงได้ เช่น ชี้เลื้อย กากอ้อย แกลบ ชังข้าวโพด ยอดและใบต้นอ้อย รวมทั้งลำต้นและเหง้ามันสำปะหลัง ซึ่งวัสดุเหล่านี้มีความหนาแน่นน้อย และยากต่อการจัดเก็บรวบรวมไม่คุ้มค่าต่อการขนส่ง ดังนั้นการนำเศษวัสดุฯ มาผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่งจะทำให้เชื้อเพลิงมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น สะดวกต่อการขนส่งและเป็นการเพิ่มมูลค่าของทรัพยากรธรรมชาติ

2) วัชพืช ซึ่งมีอยู่กระจายทั่วไปในพื้นที่เพาะปลูกหรือในพื้นที่ว่างเปล่าในทุกสภาพดินและยังเป็นพืชที่ไม่เป็นที่ต้องการ แต่วัชพืชดังกล่าวก็มีความสามารถที่จะนำมาทำเป็นเชื้อเพลิงได้เช่นกัน

3) เศษวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม เช่น แป้งบูดเน่าจากโรงงานแป้ง กากสำเล้าจากโรงงานสุรา กากตะกอนน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมและสิ่งทอ รวมทั้งกากตะกอนจากโรงงานบำบัดน้ำเสีย เป็นต้น

4) ขยะมูลฝอย ซึ่งหากสามารถนำมาแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงได้ก็จะสามารถลดความรุนแรงของปัญหาปริมาณขยะมูลฝอยที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและนับเป็นปัญหาสำคัญอย่างหนึ่งของทุก ๆ ประเทศทั่วโลก รวมทั้งยังเป็นแนวทางหนึ่งในการอนุรักษ์พลังงานควบคู่กับการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม

### 2.9.2 หลักการอัดแท่งเชื้อเพลิง

หลักการอัดแท่งเชื้อเพลิง เป็นการให้แรงกดดันแก่มวลของอนุภาคเล็ก ๆ ทำให้เกิดการอัดแน่นที่พอเหมาะที่จะรวมตัวกันเป็นก้อนโดยอาศัยหลักการคือ สสารทั้งหมดถูกล้อมรอบด้วยสนามของแรงดึงดูด (Attractive force) ความแข็งแรง (Strength) เป็นสัดส่วนกับกำลังสองของระยะห่างระหว่างอนุภาคสนามของแรงนี้ล้อมรอบด้วยอะตอม โมเลกุล และสารแขวนลอยเป็นการเชื่อมต่อกันที่สำคัญเป็นพิเศษกับการเชื่อมติดกันแน่นของอนุภาคที่ถูกกดอัดเข้าด้วยกัน อาจมีตัวประสาน หรือไม่มีตัวประสาน เพื่อให้มวลสารรวมตัวกันและเกาะกันได้ดี โดยแบ่งตามแรงดันออกเป็น 3 แบบ ได้แก่ (ชมธิตา ชื่นนิยม, 2553)

1) การอัดแท่งแบบที่ใช้แรงดันสูงเกิดจากการเพิ่มขึ้นของแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลบริเวณพื้นที่ผิวสัมผัสของวัสดุที่เป็นของเหลว (Liquid) และของแข็ง (Solid) เรียกว่า แรงแอดฮีชัน (Adhesion Forces) และการเกิดพันธะอินเตอร์ลอคกิง (Interlocking bond) ระหว่างวัสดุ

2) การอัดแท่งแบบที่ใช้แรงดันปานกลางโดยอาศัยความร้อนช่วยในการอัดตัวของวัสดุ ซึ่งความร้อนทำให้วัสดุที่มีสารพอลิกลิน และเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบ อ่อนตัวยึดเกาะกันได้

3) การอัดแท่งแบบที่ใช้แรงดันต่ำโดยอาศัยตัวประสานช่วยในการอัดตัวของวัสดุ สำหรับกลไกการอัดแท่งแบบใช้ตัวประสานขึ้นอยู่กับชนิดของตัวประสาน โดยตัวประสานที่ดี จะต้องมียางเหนียวที่ทำหน้าที่ยึดเกาะกับวัสดุได้ดี เช่น ทาร์ และสารอินทรีย์ที่มียางเหนียวเป็นองค์ประกอบ นอกจากนี้ กลไกการยึดติดของตัวประสานขึ้นอยู่กับแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของของแข็งกับของเหลว (Adhesion Forces) แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของวัสดุชนิดเดียวกัน (Cohesion forces) และพันธะอินเตอร์ลอคกิงระหว่างวัสดุ

### 2.9.3 กรรมวิธีการอัดแท่งเชื้อเพลิง

จำแนกตามกระบวนการขึ้นรูปได้เป็น 3 ลักษณะ คือ กระบวนการอัดแบบร้อน กระบวนการอัดแบบเย็นและกระบวนการอัดแท่งด้วยมือ ดังนี้

1) การอัดแบบร้อนและใช้แรงอัดสูง (Hot and high – pressure densification) เป็นการอัดวัสดุโดยให้ความร้อนตลอดเวลาที่ทำการอัด ซึ่งเหมาะสมกับวัสดุที่เมื่อได้รับความร้อนจะเกิดสารเคมีอินทรีย์ที่ช่วยยึดวัสดุเข้าหากัน จึงทำให้สามารถยึดเกาะขึ้นรูปเป็นแท่งได้โดยไม่ต้องใช้ตัวประสาน ในส่วนของปัจจัยที่มีผลของการทำเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง ได้แก่

1.1 ขนาดของวัตถุดิบ (Particle size) เนื่องจากวัสดุแต่ละชนิดมีลักษณะและขนาดที่แตกต่างกัน จึงจำเป็นการผ่านการเตรียมวัตถุดิบโดยการบดหรือย่อยเสียก่อนเพื่อให้มีขนาดที่ใกล้เคียงกันและเหมาะสมกับการป้อนเข้าเครื่องอัด (รัศมี และคณะ, 2560) พบว่า ขนาดของหญ้าเนเปียร์ ที่สามารถขึ้นรูปแท่งเชื้อเพลิงได้ อยู่ในช่วง 2 – 20 mm และ (ณัฐกิตต์ และคณะ, 2560) พบว่า ขนาดของเปลือกถั่วแระและต้นถั่วแระที่เป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่ได้จากโรงงานอุตสาหกรรม ที่นำมาศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง มีขนาดอยู่ในช่วง 1 - 5 mm

1.2 ความชื้น (Moisture content) เป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญในด้านการนำวัสดุมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง ซึ่งปริมาณความชื้นที่เหมาะสมสำหรับนำมาอัดเป็นแท่งเชื้อเพลิงควรอยู่ระหว่าง 7 – 12% เพื่อให้วัตถุดิบมีการเกาะตัวกันเป็นแท่งได้ง่าย มีรอยแตกร้าว น้อย และมีความแข็งแรงเพียงพอสำหรับการขนส่ง เนื่องจากวัสดุที่มีความชื้นต่ำจะทำให้จับตัวเป็นก้อนและอัดแท่งได้ยาก ส่งผลให้มีรอยแตกบนผิวของแท่งเชื้อเพลิงได้ ในส่วนวัสดุที่มีความชื้นที่สูงเกินไป จะทำให้ความร้อนที่เกิดขึ้นถูกกระจายไป ส่งผลทำให้น้ำกลายเป็นไอและเกิดการระเหิดออกมาจากกระบอกอัดและเกิดความเสียหายได้

1.3 แรงดัน (Pressure) ในการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง แรงดันที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงอัดแท่งเพิ่มขึ้นด้วย โดยทั่วไปจะใช้แรงอัดสูงประมาณ 5 – 117 MPa ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระยะเวลาในการอัด และอุณหภูมิที่ใช้ จากงานวิจัยของ (Avelar et al., 2016) ได้ศึกษาการอัดแท่งเชื้อเพลิง (briquettes) จากกากตะกอนชีวภาพจากโรงงานสิ่งทอผสมกับเศษผ้าฝ้ายอุตสาหกรรมสิ่งทอในอัตราส่วน (0:100, 25:75, 50:50, 75:25, 100:0) โดยใช้เครื่องอัดในห้องปฏิบัติการที่แรงดัน 6.2, 8.2 และ 10.3 MPa พบว่า ที่แรงดัน 6.2 MPa มีความเหมาะสมสำหรับกระบวนการอัดแท่งในระดับปฏิบัติการ เนื่องจากเชื้อเพลิงอัดแท่งมีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนคงตัว มีค่าความร้อน และความทนแรงอัดที่สูงกว่า รวมทั้งมีปริมาณเถ้าต่ำที่สุด

1.4 อุณหภูมิ (Temperature) ในการขึ้นรูปแท่งเชื้อเพลิง (Pellets) จะทำการอุ่นเครื่องก่อนอัดที่อุณหภูมิประมาณ 90 °C และอัดเชื้อเพลิงในช่วงอุณหภูมิ 75 – 85 °C เพราะเป็นช่วงที่ลิกนินของชีวมวลเริ่มละลายและไหลออกจากเส้นใยผนังเซลล์มาผสมกับอนุภาคอื่น ๆ ของชีวมวลขณะทำการอัดแท่งเชื้อเพลิง ซึ่งจะทำให้ชีวมวลอัดเม็ดรวมกันออกมาเป็นแท่งได้ เมื่ออุณหภูมิในการอัดแท่งเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ปริมาณพลังงานของการอัดแท่งเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (ณัฐกิตต์ และคณะ, 2560) ได้ศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการอัดแท่ง (Pellets) เชื้อเพลิงจากเปลือกและต้นถั่วแระมีค่าอยู่ในช่วง 75 - 85 °C ซึ่งการเพิ่มอุณหภูมิและการลดความชื้นลง ส่งผลให้โครงสร้างภายในชีวมวล ได้แก่ แป้ง โปรตีน เส้นใย ไขมัน ลิกนิน และสารอื่น ๆ ของอนุภาคเกิดการแตกตัวทำให้ชีวมวลยึดประสานกันได้ดียิ่งขึ้น ส่งผลต่อความแข็งแรงและความต้านทานการแตกร่วนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดด้วย นอกจากนี้การศึกษาของ (ทองทิพย์ พูลเกษม, 2542) พบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการอัดแท่ง (Briquettes) เชื้อเพลิงควรอยู่ระหว่าง 200 – 300 °C

สามารถแบ่งข้อดีและข้อเสียของการอัดแบบร้อนดังนี้ ในส่วนของข้อดีของการอัดแบบร้อนคือ สามารถใช้กับวัสดุทั่วไปได้อย่างกว้างขวาง ให้เชื้อเพลิงที่มีประสิทธิภาพสูง และไม่จำเป็นต้องใช้ตัวประสาน ในส่วนข้อเสีย คือ เครื่องอัดแท่งมีราคาแพงและดูแลรักษายาก อุณหภูมิที่ใช้ในการอัดสูง สิ้นเปลืองพลังงานมากกว่าการอัดเย็น

## 2) การอัดแบบเย็นและใช้แรงดันต่ำ (Cold and low pressure densification)

เป็นการอัดที่สามารถทำได้กับชีวมวลสดหรือแห้งก็ได้ กรณีการอัดชีวมวลสดเรียกว่าการอัดด้วยเทคนิคเชื้อเพลิงเขียวหรือการอัดเปียก โดยเครื่องอัดประกอบด้วย เกลียว กระบอกลีลาว และกระบอกลาย แตกต่างจากการอัดร้อนความดันสูงตรงที่ไม่มีระบบให้ความร้อนและระบายความร้อน ทั้งนี้วัสดุที่อัดแท่งเชื้อเพลิงจะผ่านการตัดให้เป็นชิ้นเล็ก ๆ โดยไม่จำเป็นต้องลดความชื้น ซึ่งสามารถแบ่งเป็นการอัดแบบใช้ตัวประสาน และแบบไม่ใช้ตัวประสาน (ชมธิตา ชื่นนิยม, 2553; ทองทิพย์ พูลเกษม, 2542) โดยตัวประสานทำหน้าที่ยึดเกาะวัสดุของแท่งเชื้อเพลิงที่อัดด้วยแรงอัดปานกลางให้มีการอัดออกมาได้ตามลักษณะที่ต้องการ ในส่วนการอัดแบบไม่ใช้ตัวประสานจะใช้อุณหภูมิ

และแรงอัดต่ำ สามารถทำได้กับวัสดุชีวมวลที่เน่าเปื่อยหรือผ่านการหมักมาแล้วเท่านั้น เนื่องจากการหมักชีวมวลทำให้เส้นใยหรือเนื้อเยื่ออ่อนตัว และสร้างสารที่เป็นยางเหนียว ทำให้ใช้พลังงานในการอัดลดลง ในส่วนของข้อดีและข้อเสียของการอัดแบบเย็นสามารถแบ่งได้ดังนี้ คือ ในส่วนข้อดีคือ มีขั้นตอนวิธีการเตรียมวัตถุดิบไม่ยุ่งยาก อุณหภูมิที่ใช้ในการอัดต่ำ สิ้นเปลืองพลังงานน้อยกว่าการอัดแบบร้อน ค่าความร้อนที่ได้แตกต่างจากการอัดแบบร้อนเพียงเล็กน้อย และเครื่องอัดแท่งมีราคาถูกและดูแลรักษาง่าย ส่วนข้อเสียของการอัดแบบเย็นคือ ต้องใช้ตัวประสาน หรือถ้าไม่ใช้ตัวประสานจะต้องใช้วัสดุชีวมวลที่มีคุณสมบัติเป็นตัวประสาน เช่น วัสดุชีวมวลที่ผ่านการหมักหรือเน่าเปื่อยซึ่งจะมีลักษณะเป็นยางเหนียว

### 3) การทำถ่านอัดแท่งด้วยมือ

คือการนำเศษชีวมวล เช่น ชังข้าวโพด กะลามะพร้าว และวัสดุชีวมวลอื่น ๆ มาเผาและบดละเอียดผสมกับถ่านป่น โดยมีแป้งมัน และกากน้ำตาลเป็นตัวประสาน เพื่อให้ถ่านจับตัวได้ดี แล้วนำไปใส่ลงในกระบอบอกแม่แบบ ซึ่งอาจจะทำมาจากกระบอบอกท่อเหล็กหรือท่อ PVC เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3-4 cm โดยใช้เหล็กกระทุ้งซึ่งเป็นเหล็กกลมปลายทู่ยาวกว่ากระบอบอกแม่แบบนั้นหรือกระแทกพื้น จากนั้นก็คว่ำแม่แบบดินถ่านออกมาแล้วนำไปทำให้แห้ง โดยการนำไปตากแดด หรือใช้ความร้อนเป็นเชื้อเพลิงในการทำให้แห้ง

#### 2.9.4 ตัวประสาน (Binder)

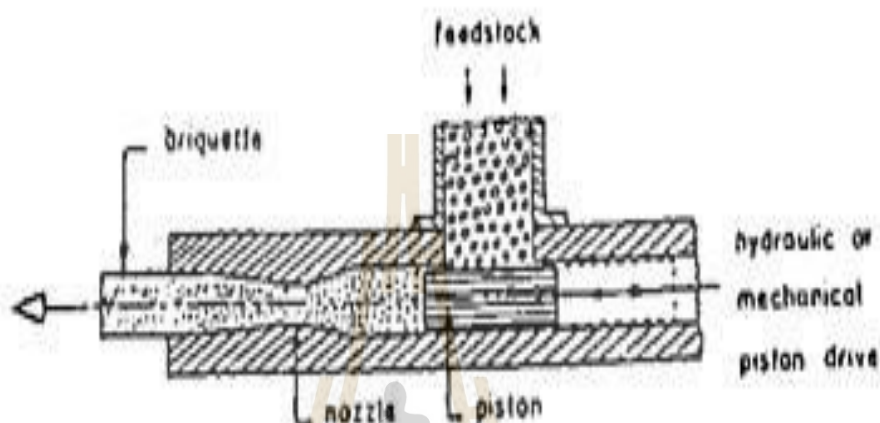
ตัวประสานทำหน้าที่เพิ่มสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงอัดแท่ง เช่น ความต้านทานต่อแรงกระแทก การต้านทานแรงกดอัด รวมถึงสมบัติการต้านทานน้ำและความชื้น ซึ่งลักษณะของตัวประสานที่ดีนั้นควรมีคุณสมบัติดังนี้คือ มีแรงยึดเกาะที่ดี ไม่สีกกร่อนง่าย ไม่ก่อให้เกิดสารมลพิษและกลิ่นเหม็นขณะเผาไหม้และเถ้าของตัวประสานเมื่อผ่านการเผาแล้วควรมีชี้ถ่านน้อยที่สุด มิฉะนั้นค่าความร้อนของเชื้อเพลิงอัดแท่งก็จะลดลงไปด้วย ซึ่งชนิดของตัวประสานสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท (ชมธิตา ชื่นนิยม, 2553) คือ ตัวประสานที่สามารถเผาไหม้ได้ (Combustible binder) ได้แก่ ทาร์ (Tar), แป้ง (Starch), สาหร่าย (Algae), มูลสัตว์ (Dung), เรซินตามธรรมชาติ (Natural resins) และเรซินสังเคราะห์ (Synthetic resins) รวมทั้งตัวประสานที่เผาไหม้ไม่ได้ (Incombustible binder) ได้แก่ ดินเหนียว (Clay), โคลน (Mud), และซีเมนต์ (Cement) เป็นต้น

#### 2.9.5 เครื่องอัดแท่ง

เครื่องอัดแท่งสามารถแบ่งออกเป็น 4 กลุ่มใหญ่ คือ

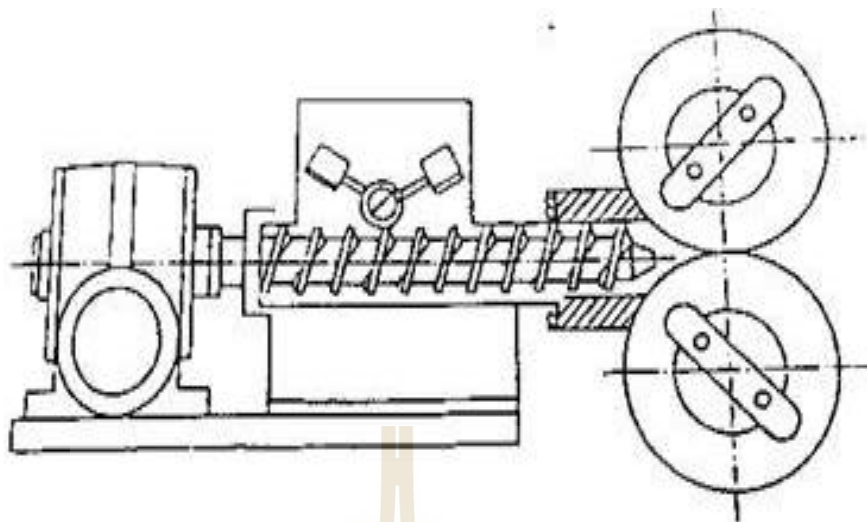
1) เครื่องอัดแบบลูกสูบ (Piston press) ประกอบด้วยลูกสูบชัก (Reciprocation piston) เพื่อดันวัตถุดิบเข้าไปในกระบอบรูปเรียว (Tapered) หลักการทำงานคือ ลูกสูบอัดวัสดุเข้าไปในกระบอบอัด ซึ่งมีลักษณะเป็นตัววีรูปกรวย (Conical choke) หรือเป็นรูปเรียวทำหน้าที่ด้านการ

เคลื่อนที่ของวัสดุ ผลจากการต้านและการขัดสีของวัสดุกับผนังท่อนี้ ทำให้เกิดความร้อนที่อุณหภูมิในช่วง 150-300 °C ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นรูปทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 50-100 mm เครื่องอัดแบบนี้มีความสามารถในการผลิตได้ 40 - 1,000 kg/hr และมีปัญหาที่พบโดยทั่วไปของเครื่องอัดแบบลูกสูบนี้คือ การขัดสีของกระบอกอัด และการแตกของลูกสูบ แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 เครื่องอัดแบบลูกสูบ (Piston press) (ที่มา : ชมธิดา ชื่นนิยม, 2553)

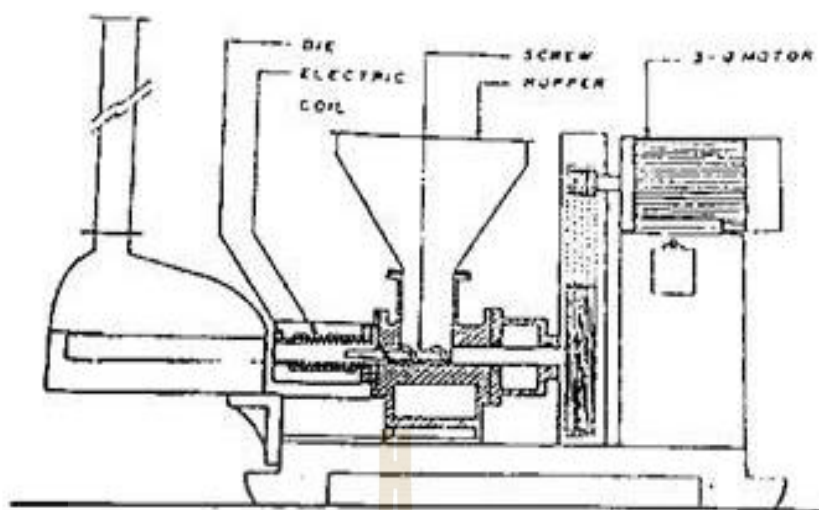
2) เครื่องอัดแบบลูกกลิ้ง (Roll press) มีหลักการทำงาน คือ กระบวนการอัดวัตถุดิบที่ตกลงมาในระหว่างลูกกลิ้งทั้งสองที่หมุนทิศทางการหมุนตรงกันข้าม ทำให้วัตถุดิบถูกอัดแน่นเข้าไปในซอตรงรับแทนอัด (Pillow-shaped briquetted) การอัดแท่งแบบนี้ต้องการวัสดุที่มีขนาดเล็กกว่าการอัดแบบอื่น และแท่งอัดที่ได้มีความหนาแน่นน้อยกว่าแท่งอัดที่ได้จากการอัดแบบอื่นเนื่องจากช่วงเวลาในการอัดสั้น ทำให้ยากต่อการสร้างสถานะของอุณหภูมิแรงอัดในการหลอมละลายลิกนินได้อย่างเต็มที่ ดังนั้นการอัดแท่งด้วยวิธีนี้จำเป็นต้องใช้ตัวประสานเข้าช่วยเพื่อให้วัสดุเกาะติดกันได้ดีขึ้น และส่งผลให้แท่งเชื้อเพลิงมีความหนาแน่นแข็งแรงมากขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 เครื่องอัดแบบลูกกลิ้ง (Roll press) (ที่มา : ชมธิดา ชื่นนิยม, 2553)

3) เครื่องอัดแบบเกลียว (Screw press) เป็นเครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิงที่นิยมใช้อยู่ในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นแท่งเชื้อเพลิงที่นิยมใช้ในเชิงอุตสาหกรรม ซึ่งเชื้อเพลิงที่ได้สะดวกต่อการเก็บรักษาและการขนส่ง โดยในเครื่องอัดแบบเกลียววัตถุดิบที่ใช้อัดจากช่องป้อน (Feed hopper) จะถูกส่งผ่านและอัดด้วยเกลียว แบ่งเครื่องอัดออกเป็น 3 ประเภท คือ

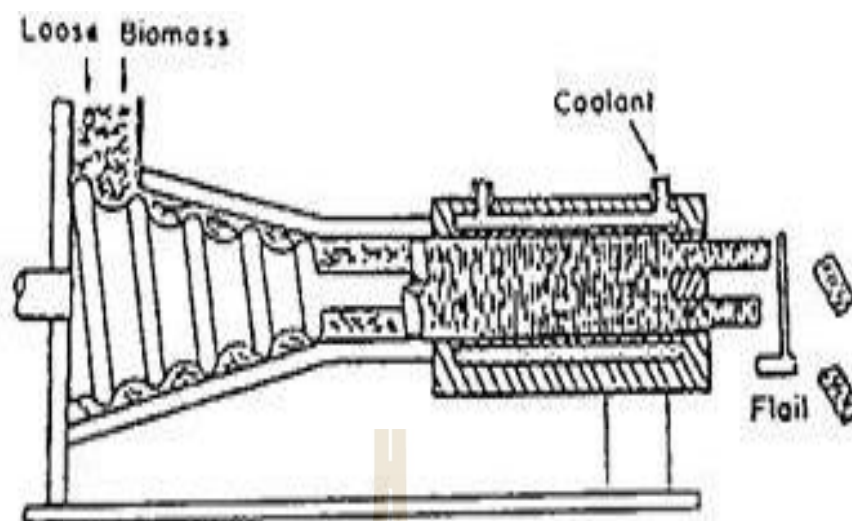
3.1 เครื่องอัดแบบเกลียวพร้อมด้วยชุดลดความร้อนที่กระบอกอัด (Screw press with a heated die) มีหลักการทำงานคือวัสดุถูกดันโดยเกลียวที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอกหรือรูปกรวยเล็กน้อย ผ่านเข้าไปในท่อ (Barrel) หรือกระบอกอัดที่มีอุณหภูมิจากชุดลดความร้อนระหว่าง 200 - 350 °C ความร้อนนี้ทำให้วัสดุที่สัมผัสกับท่อเกิดการเผาไหม้และได้ผลิตภัณฑ์ที่ถูกยึดตัวกันดี ลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกหกเหลี่ยมขนาดประมาณ 50 mm โดยเฉพาะการออกแบบของหัวเกลียวทำให้ได้เชื้อเพลิงอัดแท่งที่มีรูกลวงตรงกลางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 20 mm เพื่อเป็นช่องให้ก๊าซหรือควันที่เกิดในระหว่างการอัดถ่ายเทออกมา ซึ่งกำลังในการผลิตของเครื่องอัดแบบนี้ อยู่ในช่วง 50 - 500 kg/hr วัสดุที่ใช้มีลักษณะเม็ดละเอียดและมีปริมาณความชื้นในช่วง 8 - 12% ปัญหาใหญ่ของเครื่องอัดแบบนี้คือ การขัดสีของเกลียวและกระบอกอัด แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 เครื่องอัดแบบเกลียวพร้อมด้วยขดลวดความร้อนที่กระบอกอัด  
(Screw press with a heat) (ที่มา : ชมธิดา ชื่นนิยม, 2553)

3.2 เครื่องอัดแบบเกลียวรูปกรวย (Conical Screw Press) มีหลักการทำงานคือ เกลียวรูปกรวยจะดันให้วัสดุเคลื่อนตัวไปข้างหน้า เมื่อพื้นเกลียวไปวัสดุถูกดันผ่านกระบอกอัดขนาด 25 mm การไหลผ่านของวัสดุเข้าไปในกระบอกอัดเพิ่มขึ้นพร้อมกับแรงเสียดทานที่มากขึ้น ทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นระหว่าง 100-200 °C ส่งผลให้ลิกนินหลอมละลายทำหน้าที่เป็นตัวประสาน หลังจากระบายความร้อนจะได้แท่งเชื้อเพลิง กำลังในการผลิตของเครื่องอัดแท่งแบบนี้อยู่ในช่วง 500 - 1,000 kg/hr อัตรากำลังของมอเตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนอัดอยู่ระหว่าง 35-75 kW วัสดุที่ใช้ทำการอัดควรมีลักษณะเป็นเม็ดละเอียดและมีความชื้น 8 - 10% แสดงดังรูปที่ 2.5

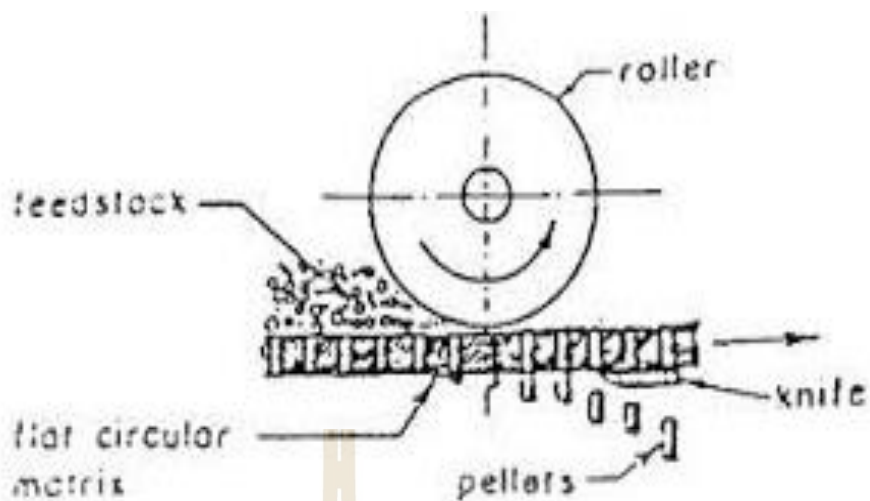




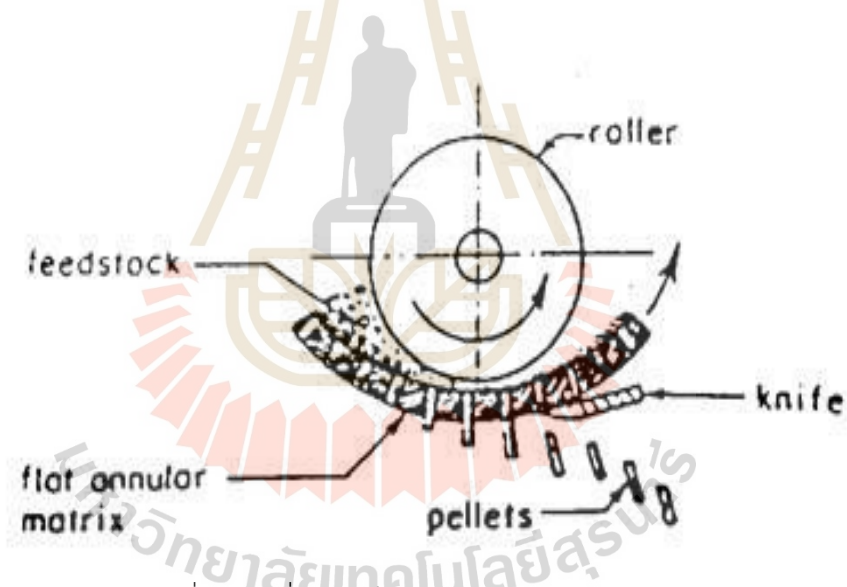
รูปที่ 2.5 เครื่องอัดแบบเกลียวรูปกรวย (Conical screw press) (ที่มา : ชมธิดา ชื่นนิยม, 2553)

3.3 เครื่องอัดแบบเกลียวคู่ (Twin-screw press) ประกอบด้วยเกลียวอัด 2 อัน ต่อกับเพลลาที่สวมเข้ากับชิ้นส่วนของเกลียวที่เปลี่ยนความเร็วในการหมุนได้ เนื่องจากแรงอัดและแรงเสียดสีสูงทำให้อุณหภูมิของวัตถุดิบสูงถึง  $250\text{ }^{\circ}\text{C}$  จึงต้องมีส่วนหล่อเย็นที่ระบอบอัด ซึ่งวัตถุดิบที่ใช้ควรมีปริมาณความชื้น 25% ขึ้นไป สามารถทำการอัดได้โดยไม่ต้องทำให้แห้งก่อน ในส่วนกำลังการผลิตของเครื่องอัดนี้อยู่ในช่วง 2,800 - 3,600 kg/hr ขึ้นอยู่กับส่วนผสมของวัตถุดิบที่ใช้

4) เครื่องอัดเม็ดหรืออัดเป็นแท่งเล็ก ๆ (Pelletizing press) ประกอบด้วยแม่พิมพ์ โดยที่แรงอัดระหว่างลูกกลิ้ง (Roller) และแม่พิมพ์ (Matrix) ทำให้เกิดความร้อนจากแรงเสียดสีและทำการอัดวัตถุดิบผ่านแผ่นแม่พิมพ์ที่เจาะเป็นรู มี 2 แบบ คือ เครื่องอัดแบบแม่พิมพ์แผ่นกลม (Disk matrix press) ดังรูปที่ 2.6 และเครื่องอัดแบบแม่พิมพ์วงแหวน (Ring matrix press) แสดงดังรูปที่ 2.7 แท่งอัดเม็ดที่ถูกอัดออกมาจะถูกตัดด้วยใบมีดตามขนาดความยาวที่กำหนดไว้ ซึ่งปกติจะมีความยาวน้อยกว่า 30 mm และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 - 15 mm ถ้าแท่งอัดมีขนาดใหญ่กว่านี้จะใช้การอัดแบบเป็นลูกบาศก์ (Cubing) แทนการอัดเป็นเม็ด (Pelleting)



รูปที่ 2.6 เครื่องอัดเม็ดแบบแม่พิมพ์แผ่นกลม (Disk matrix press)  
(ที่มา : ชมธิดา ชื่นนิยม, 2553)



รูปที่ 2.7 เครื่องอัดเม็ดแบบแม่พิมพ์วงแหวน (Ring matrix press)  
(ที่มา : ชมธิดา ชื่นนิยม, 2553)

### 2.9.6 ขั้นตอนการอัดแท่ง

วัตถุดิบที่นำมาอัดแท่ง ทั้งที่ต้องใช้ตัวประสานและไม่ใช้ตัวประสาน โดยทั่วไปจะประกอบด้วยขั้นตอนในการอัดแท่งเชื้อเพลิง ดังต่อไปนี้

1) การบดย่อย (Grinding) เป็นการลดขนาดวัตถุดิบโดยใช้เครื่องสับหยาบ/สับละเอียด และเครื่องบดลดขนาดวัตถุดิบ เพื่อให้มีความเหมาะสมต่อการคลุกเคล้าและการขึ้นรูป

2) การผสม (Mixing) เป็นการผสมวัตถุดิบกับตัวประสานเข้าด้วยกัน เพื่อให้อัดเชื้อเพลิงเป็นแท่งได้ ในขั้นนี้อาจมีการผสมน้ำถ้าความชื้นของส่วนผสมน้อยเกินไปและระยะเวลาในการผสมจะต้องมากพอที่จะผสมสารต่าง ๆ เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งโดยทั่วไปชีวมวลต่าง ๆ มีคุณสมบัติที่สามารถเป็นตัวประสานได้

3) การอัดขึ้นรูป (Pressing) ส่วนผสมจะถูกใส่เข้าไปในเครื่องอัดแท่ง ทำให้ได้เชื้อเพลิงอัดแท่งที่มีลักษณะตามประเภทและกระบวนการในการอัด ซึ่งคุณภาพของเชื้อเพลิงที่ได้จะขึ้นกับแรงอัดและระยะเวลาที่อัดด้วย

4) การทำให้แห้ง (Drying) เนื่องจากแท่งเชื้อเพลิงเมื่อผ่านการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดจะมีความร้อนสะสมภายในตัวแท่งเชื้อเพลิง ต้องทำการผึ่งแดดประมาณ 3-4 วัน หรือนำเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นระยะเวลา 24 hr เพื่อให้เชื้อเพลิงอัดแท่งมีความชื้นที่เหมาะสมต่อการใช้ประโยชน์

5) การคัดขนาดและบรรจุ (Sizing and packing) เมื่อได้แท่งเชื้อเพลิงออกมาแล้วต้องผ่านการคัดกรองขนาดของเชื้อเพลิง โดยเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพต่ำจะถูกคัดออกในกระบวนการนี้ และถูกนำไปเข้าเครื่องอัดใหม่ จากนั้นทำให้เชื้อเพลิงเย็นลงก่อนการบรรจุใส่ถุง

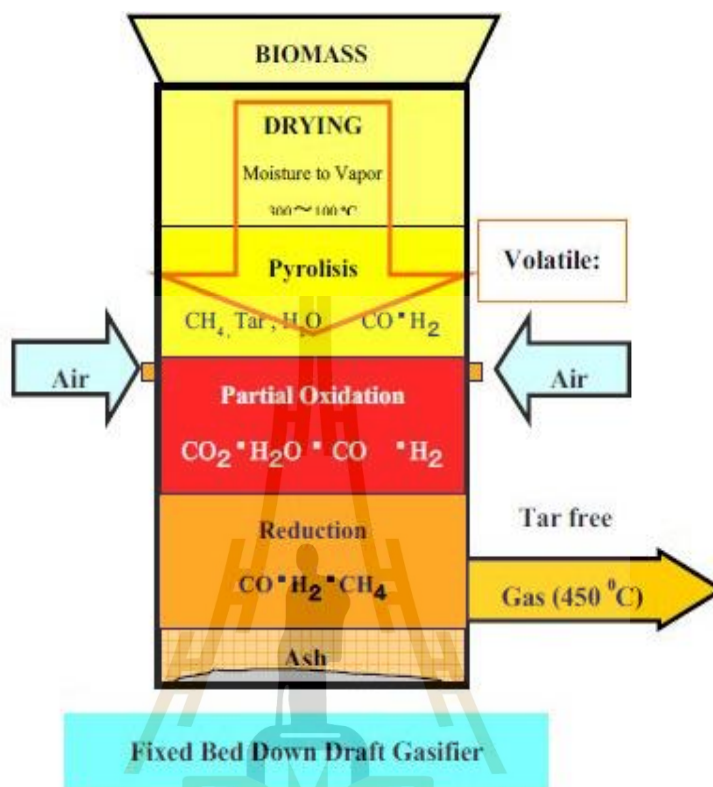
## 2.10 กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

แก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) หรือกระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง เป็นกระบวนการแปรสภาพเชื้อเพลิงชีวมวลซึ่งเป็นเชื้อเพลิงแข็งที่มีสารประกอบไฮโดรคาร์บอนด้วยความร้อนภายใต้สภาวะจำกัดอากาศ (Partial oxidation) ให้อยู่ในรูปแก๊สเชื้อเพลิง (Producer gas) ซึ่งองค์ประกอบแก๊สประกอบด้วย แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แก๊สไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>) และ แก๊สมีเทน (CH<sub>4</sub>) กระบวนการดังกล่าวเป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางอุณหเคมี (Thermochemical conversion process) ได้จากปฏิกิริยาคาร์บอน ออกซิเจน และไอน้ำที่อุณหภูมิสูง ความดันตั้งแต่ 1 บรรยากาศขึ้นไป ปฏิกิริยาเกิดขึ้นหลายขั้นตอน มีทั้งปฏิกิริยาดูดความร้อนและคายความร้อน ซึ่งเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันได้รับการยอมรับกันทั่วโลกว่าเป็นเทคโนโลยีที่มีความปลอดภัย มีเสถียรภาพ ไม่ซับซ้อนเหมาะสมสำหรับชุมชน (วีรชัย และคณะ, 2551)

### 2.10.1 ปฏิกิริยาอุณหเคมีในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

ปฏิกิริยาอุณหเคมีที่เกิดขึ้นในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน เป็นส่วนที่ทำการเปลี่ยนเชื้อเพลิงในรูปของแข็งที่มีองค์ประกอบไฮโดรคาร์บอนให้เป็นแก๊สที่เผาไหม้ได้ สามารถประยุกต์ใช้กับเชื้อเพลิงได้กว้างขวาง เช่น เชื้อเพลิงชีวมวล กากตะกอนน้ำเสีย และขยะมูลฝอย ปฏิกิริยาอุณหเคมี

ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันจะแบ่งเป็น 4 โซน ตามชั้นของอุณหภูมิ ดังแสดงในรูป 2.8

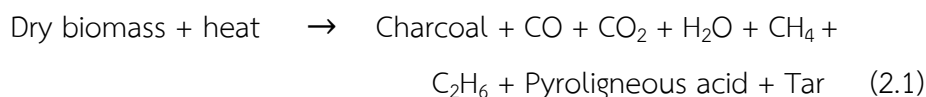


รูปที่ 2.8 ปฏิกิริยาอุณหเคมีที่เกิดขึ้นในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันในเตาผลิตแก๊สชนิดไหลลง (ที่มา : วีรชัย และคณะ, 2551)

วีรชัย และคณะ (2551) ได้อธิบายว่า ในกระบวนการเกิดแก๊สเชื้อเพลิงสามารถแบ่งโซนการเกิดปฏิกิริยาทางอุณหเคมี (Thermochemical reaction) ตามความแตกต่างของอุณหภูมิ 4 โซน ดังนี้

1) Drying zone คือช่วงที่ไอน้ำหรือความชื้นที่แทรกตัวอยู่ในเชื้อเพลิงโดนกำจัดด้วยความร้อนที่มาจากโซนเผาไหม้อุณหภูมิ ประมาณ 100 – 200 °C แต่อุณหภูมิที่เกิดขึ้นยังไม่สูงพอที่จะทำให้เกิดการสลายตัวของ Volatile matter ในเชื้อเพลิงได้

2) Pyrolysis หรือ Distillation zone ปฏิกิริยาอุณหเคมีที่เกิดขึ้นในโซนนี้จะอาศัยความร้อนจากโซน Combustion ทำให้ Volatile matter ที่อยู่ในเชื้อเพลิงเกิดการสลายตัว เกิดเป็นเมทานอล กรดน้ำส้ม และทาร์ (Tars) โดยอุณหภูมิในโซนนี้จะมีค่าประมาณ 200 – 500 °C ของแข็งที่เหลืออยู่ภายหลังจากการผ่านกระบวนการนี้ก็คือ คาร์บอนในรูปถ่าน ซึ่งจะทำการปฏิกิริยาต่อในโซน Reduction และ Combustion ปฏิกิริยาที่ได้ในโซนนี้แสดงไว้ในสมการที่ 2.1

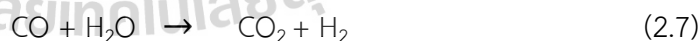


3) Combustion หรือ Oxidation zone เป็นบริเวณที่มีการป้อนอากาศเมื่อถูกกระตุ้นด้วยความร้อนเชื้อเพลิงจะลุกไหม้เกิดปฏิกิริยาอุณหภูมิระหว่างแก๊สออกซิเจนในอากาศกับคาร์บอนและไฮโดรเจนซึ่งอยู่ในเชื้อเพลิง ผลของปฏิกิริยาดังกล่าวก่อให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ดังสมการที่ 2.2 และ 2.3



ปฏิกิริยาในสมการที่ 2.2 และ 2.3 เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนและความร้อนที่เกิดขึ้นนี้จะถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยาคูดความร้อนในโซน Reduction และโซน Pyrolysis อุณหภูมิในโซน Combustion จะมีค่าระหว่าง 1,100 – 1,500 °C

4) Reduction Zone แก๊สร้อนที่ผ่านมาจาก Combustion zone จะทำให้เกิดปฏิกิริยา Reduction โดยจะมีอุณหภูมิระหว่าง 500 – 900 °C ซึ่งคาร์บอนที่กำลังลุกไหม้อยู่ จะทำปฏิกิริยากับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ก่อให้เกิดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน และมีเทน ดังสมการที่ 2.4 - 2.8



โดยปฏิกิริยาในสมการที่ 2.4 เรียกว่า Boundouard reduction และปฏิกิริยาในสมการที่ 2.5 เรียกว่า Water gas reduction เป็นปฏิกิริยาคูดความร้อนเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 900 °C แก๊สที่ได้จากสมการทั้งสองเป็นแก๊สที่เผาไหม้ได้ และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นแก๊สหลักที่ต้องการ ปริมาณของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในแก๊สเชื้อเพลิงนี้จะขึ้นอยู่กับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ว่าจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนที่ร้อนได้มากน้อยเพียงใด

ในขณะที่แก๊สร้อนจากโซนเผาไหม้ไหลเคลื่อนเข้าสู่โซนรีดักชัน จะทำให้อุณหภูมิของแก๊สลดลง เนื่องจากเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน ดังนั้นไอน้ำกับคาร์บอนจะทำปฏิกิริยากันเพื่อก่อให้เกิดแก๊สไฮโดรเจน และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ดังสมการที่ 2.6 ซึ่งจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำประมาณ 500 - 600 °C ปฏิกิริยานี้ มีความสำคัญเพราะจะทำให้ส่วนผสมของแก๊สไฮโดรเจนในแก๊สชีววมวลมีค่ามากขึ้น ซึ่งมีผลทำให้แก๊สมีค่าพลังงานความร้อนสูงขึ้น (แก๊สไฮโดรเจนมีผลต่อการจุดระเบิดของเครื่องยนต์สันดาปภายใน) แต่ถ้าในกระบวนการที่มีไอน้ำมากเกินไป ไอน้ำอาจทำปฏิกิริยากับแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ทำให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน ดังสมการที่ 2.7 ปฏิกิริยานี้เรียกว่า Water - shift reduction ทำให้ค่าความร้อนของแก๊สชีววมวลที่ได้มีค่าลดลง ดังนั้นเชื้อเพลิงชีววมวลที่ใช้จะต้องมีความชื้นไม่สูงจนเกินไป นอกจากนี้ในกระบวนการรีดักชัน แก๊สไฮโดรเจนบางส่วนจะทำปฏิกิริยากับแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ทำให้เกิดแก๊สมีเทนขึ้นได้ ดังสมการที่ 2.8 ปฏิกิริยานี้เรียกว่า Methanation production

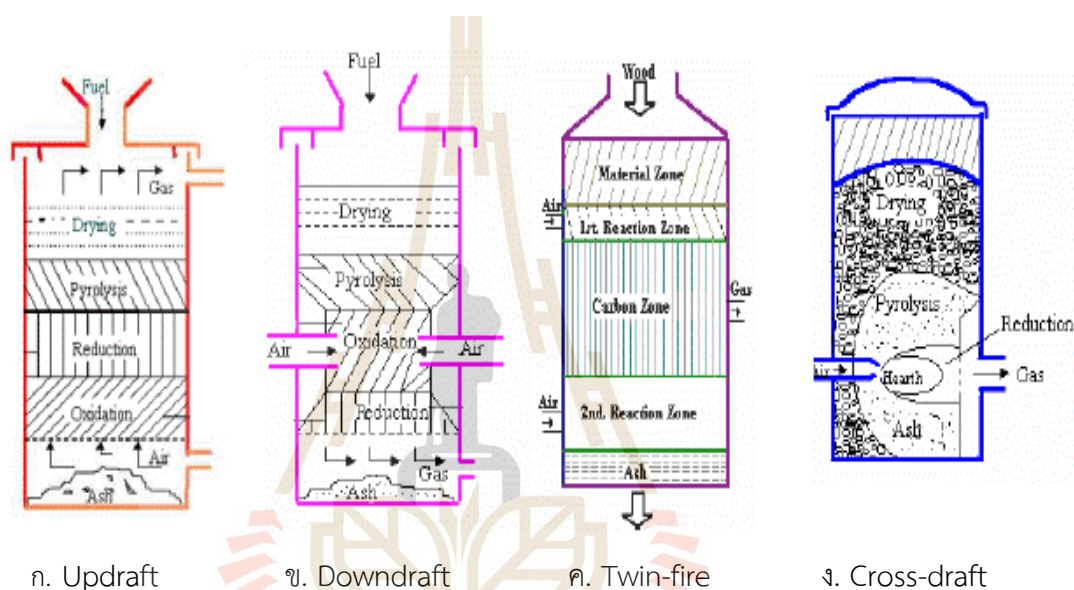
ประสิทธิภาพของเตาปฏิกรณ์จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิของ Reduction zone กล่าวคือ ถ้าอุณหภูมิในโซนนี้ สูงกว่า 1,100 °C องค์ประกอบแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมดจะถูกเปลี่ยนเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ซึ่งเป็นแก๊สที่สามารถจุดติดไฟได้ ถ้าแก๊สดังกล่าวนี้มีค่าเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงและเตาปฏิกรณ์ก็จะเพิ่มขึ้นเช่นกัน นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่น ๆ อีก เช่น อุณหภูมิ พื้นที่ผิวสัมผัสของเชื้อเพลิงชีววมวล เช่น ขนาดและปริมาณของเชื้อเพลิงที่ใช้ และอัตราการไหลของแก๊สที่สัมผัสกับเชื้อเพลิงชีววมวล หากเชื้อเพลิงชีววมวลมีขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูงจะทำให้สูญเสียความดันภายในเตาปฏิกรณ์มากซึ่งต้องใช้พัดลมดูด-ส่งอากาศ (Blower) ขนาดใหญ่ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานมากยิ่งขึ้นและทำให้แก๊สเชื้อเพลิงที่ได้มีฝุ่นปนเปื้อนมากขึ้น ในทางกลับกันหากใช้เชื้อเพลิงชีววมวลขนาดใหญ่มีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรต่ำจะมีช่องว่างระหว่างเชื้อเพลิงมากทำให้ยากต่อการจุดติดไฟในโซนเผาไหม้ภายในเตาปฏิกรณ์และส่งผลให้ออกซิเจนไหลเข้าไปในระบบได้มาก ปฏิกิริยาอุณหภูมิที่เกิดขึ้นก็จะน้อยตามไปด้วย (ทิพย์สุภินทร์ หินชูย, 2550) ในหัวข้อต่อจากนี้ จะขออธิบายถึงชนิด/ประเภทของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Gasifier) ที่ถูกออกแบบสำหรับใช้ในงานที่แตกต่างกัน ดังนี้

### 2.10.2 ชนิดของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Type of Gasifier)

สำหรับชนิดของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Gasifier) แบ่งตามลักษณะการป้อนเชื้อเพลิงได้เป็น 2 แบบคือ แบบคอลัมน์ (Fixed bed gasifier) เหมาะสมกับเชื้อเพลิงที่มีขนาดใหญ่รูปร่างคงตัว สามารถใช้กับเชื้อเพลิงที่มีความชื้นสูงได้ และแบบฟลูอิดไรซ์เบด (Fluidized bed gasifier) เหมาะสำหรับเชื้อเพลิงที่มีขนาดเล็กมาก และต้องใช้ความเร็วของอากาศทำให้เชื้อเพลิงลอยตัวมีลักษณะคล้ายของไหล ซึ่งเรียกว่า สภาวะของ Fluidization โดยจะมีสารเฉื่อย (Inert

material) เช่น ทวาย หินปูน เป็นระบบที่ใช้ความดันสูง จึงทำให้การเดินระบบมีความยุ่งยากกว่า โดยทั่วไปจะใช้กับอุตสาหกรรมขนาดใหญ่

ในส่วนของเตาผลิตเชื้อเพลิงแบบคอลัมน์ (Fixed bed gasifier) สามารถจำแนกตามทิศทางการป้อนอากาศในเตา คือ ถ้าอากาศถูกป้อนจากด้านล่างขึ้นข้างบนของเตาเรียกว่า Updraft gasifier และถ้าอากาศถูกป้อนเข้าสู่โซนเผาไหม้แล้วไหลลงด้านล่างของเตาเรียกว่า Downdraft gasifier ส่วนการป้อนอากาศเข้า 2 ทางเรียกว่า Twin-fire และถ้าอากาศเข้าในแนวขวางเรียกว่า Cross-draft gasifier (วีรชัย และคณะ, 2551) ดังแสดงในรูป 2.9 และรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 2.9 เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ ( ที่มา : วีรชัย และคณะ, 2551)

#### 1) เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบไหลขึ้น (Updraft gasifier)

อากาศจะเข้าทางด้านล่างและลอยขึ้นด้านบนของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง ซึ่งโปรดิวเซอร์แก๊ส (Producer gas) ที่ถูกผลิตออกจากระบบนี้จะลอยขึ้นและไหลออกจากเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงทางด้านบนทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างความร้อนของโปรดิวเซอร์แก๊สกับเชื้อเพลิงในชั้นบนซึ่งเป็นการอุ่นเชื้อเพลิงก่อน เป็นผลให้เตาผลิตแก๊สชนิดนี้จะผลิตโปรดิวเซอร์แก๊สที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุด และเหมาะสำหรับการผลิตไฟฟ้ากำลังสูง (500 kW ขึ้นไป) หรือนำโปรดิวเซอร์แก๊สไปใช้กับหม้อไอน้ำความดันในการผลิตไอน้ำด้วยเครื่องกังหันไอน้ำเพื่อผลิตไฟฟ้า แต่ระบบนี้จะมีปัญหาทางด้านปริมาณทาร์ (Tars) ที่ปะปนอยู่สูงมาก

## 2) เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบไหลลง (Downdraft gasifier)

เป็นระบบที่ให้อากาศผ่านโซนเผาไหม้ โปรดิวเซอร์แก๊ส (Producer gas) ที่ผลิตได้จะไหลออกทางด้านล่างของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง ซึ่งเป็นระบบที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดทาร์ (Tars) สูง เนื่องจากทาร์ที่ถูกผลิตขึ้นใน Pyrolysis zone จะไหลลงมาด้านล่างของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงและจะถูกกำจัดที่อุณหภูมิสูงในโซนเผาไหม้ Combustion zone หรือ Oxidation zone และจึงผ่านเข้า Reduction zone แล้วได้โปรดิวเซอร์แก๊ส ออกทางด้านล่างของระบบ ทำให้เตาผลิตแก๊สชนิดนี้เกิดทาร์ (Tars) น้อยกว่า Updraft gasifier โดยทั่วไปจะมีค่าประมาณ 50 – 500 mg/Nm<sup>3</sup> และเป็นเตาผลิตแก๊สที่เหมาะสมกับการผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก (ไม่เกิน 500 kW) ข้อจำกัดของระบบนี้คือ ขนาดของเชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้ต้องมีขนาดคงตัวประมาณ 20 - 60 mm เพื่อช่วยในการถ่ายเทความร้อนและไม่ให้เกิดการขัดขวางการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ รวมทั้งความชื้นของเชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้กับเตาผลิตแก๊สชนิดนี้ไม่ควรมีค่าเกิน 25%wb (ทิพย์สุภินทร์ หินซุย, 2550)

## 3) เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบเผาสองโซน (Twin-fire gasifier)

เป็นการรวมกันของ Co-current กับ Counter-current twin-fire gasifier ประกอบด้วย 2 โซนหลักในการทำปฏิกิริยา คือ โซนบน จะเป็นปฏิกิริยาอุณหภูมิของเชื้อเพลิงมีอุณหภูมิต่ำ และแก๊สบางส่วนเกิดจากการแตกตัวที่โซนด้านบน ขณะเดียวกันที่โซนล่าง จะเป็นปฏิกิริยาอุณหภูมิของถ่านคาร์บอนที่ร้อน อุณหภูมิของแก๊สที่เกิดขึ้นในระบบมีค่าระหว่าง 460 – 500 °C กระบวนการทั้งหมดเกิดขึ้นภายใต้ความดัน 30 mbar ดังนั้นเตาผลิตแก๊สนี้ จึงเป็นระบบที่ผลิตแก๊สเชื้อเพลิงค่อนข้างสะอาด แต่ต้องควบคุมปริมาณอากาศให้เหมาะสมให้อยู่ในสภาวะการเผาไหม้ที่มีการจำกัดอากาศ

## 4) เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบไหลขวาง (Cross-draft gasifier)

เป็นเตาที่พัฒนาจาก Updraft gasifier และ Downdraft gasifier เป็นระบบที่สามารถเร่งปฏิกิริยาอุณหภูมิได้ดีมาก เนื่องจากมีโซนการเผาไหม้บริเวณแคบ อุณหภูมิจึงสามารถขึ้นถึง 2,000 °C ช่วงเวลา Start up ระบบเร็วกว่าเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงทั้งสองแบบก่อนหน้านี้ คือใช้เวลาเพียง 5-10 min ซึ่งระบบนี้มีข้อดีคืออุณหภูมิของโปรดิวเซอร์แก๊สสูง ช่วงการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงสั้นต้องใช้ความเร็วสูง ทำให้โอกาสที่แก๊สจะครบช่วงปฏิกิริยาน้อยลง ดังนั้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) เพียงบางส่วนจะถูกเปลี่ยนเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ใน Reduction zone ซึ่งเปลวไฟและโซนขี้เถ้าของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบไหลขวางนั้นไม่ได้แยกออกจากกันด้วยตะแกรง ดังนั้นต้องใช้เชื้อเพลิงที่มีปริมาณเถ้าต่ำเท่านั้น



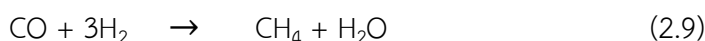
### 2.10.3 แก๊สเชื้อเพลิงหรือโปรตีนเซอร์แก๊ส

ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน แก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ สามารถแบ่งตามความร้อนได้ 3 ประเภท คือ (อาภาณี เหลืองนฤมิตชัย, 2538)

1) การผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่มีความร้อนต่ำ (Low heating value gas or low btu gas) แก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จะมีค่าความร้อนประมาณ  $3.3 - 5.6 \text{ MJ/Nm}^3$  ( $90 - 150 \text{ Btu/SCF}$ ) เกิดจากการเผาไหม้บางส่วนของถ่านกับอากาศส่วนมากมักจะมีไอน้ำอยู่ด้วย โดยองค์ประกอบของแก๊สที่จุดติดไฟได้ (Combustible gas) คือ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และแก๊สไฮโดรเจน ( $\text{H}_2$ ) เป็นแก๊สหลัก และแก๊สมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) มีเล็กน้อย ซึ่งเจือจางในแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) ไนโตรเจน ( $\text{N}_2$ ) และออกซิเจน ( $\text{O}_2$ ) อุณหภูมิของเปลวไฟที่ได้จะต่ำ ในปัจจุบันได้มีการนำมาใช้อย่างกว้างขวางในการผลิตไฟฟ้าสำหรับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก

2) การผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนปานกลาง (Medium heating value gas or medium btu gas) แก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จะมีค่าความร้อนประมาณ  $9.6 - 20.5 \text{ MJ/Nm}^3$  ( $250 - 550 \text{ Btu/SCF}$ ) กระบวนการนี้จะใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ที่ได้จากการแยกออกจากอากาศ เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วน (Partial oxidation) ในสภาวะที่ไม่มีแก๊สไนโตรเจน ทำให้ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้มีค่าสูงขึ้น

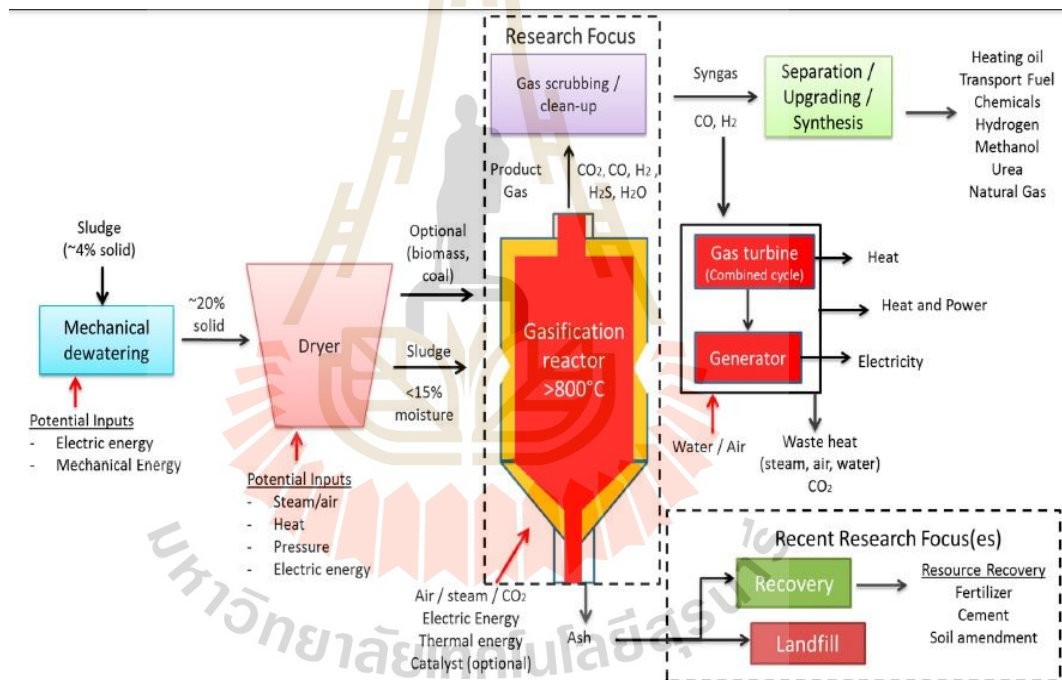
3) การผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนสูง (High heating value gas or high btu gas) ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้เทียบเท่ากับ Synthesis gas (SNG) หรือมีความร้อนสูงกว่า  $20.5 \text{ MJ/Nm}^3$  ส่วนประกอบของแก๊สนี้มักเป็นแก๊สมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) บริสุทธิ์ ซึ่งโดยทั่วไปจะนำการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนปานกลาง (Medium heating value gas) มาเปลี่ยนเป็นการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนสูง (High heating value gas) ซึ่งกระบวนการเมทาเนชัน (Methanation) หรือกระบวนการสังเคราะห์มีเทนที่อุณหภูมิต่ำเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สไฮโดรเจน เกิดเป็นแก๊สมีเทนและน้ำ โดยใช้ Catalytic เมื่อผ่านการทำให้แห้งก็จะได้แก๊สที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับแก๊สบริสุทธิ์ ดังสมการที่ 2.9



### 2.10.4 การใช้ประโยชน์ของแก๊สเชื้อเพลิง

แก๊สเชื้อเพลิงหรือโปรตีนเซอร์แก๊สที่ผลิตได้สามารถนำไปใช้งานได้โดยตรง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้งานดังรูปที่ 2.10 ซึ่งจะต้องนำแก๊สเชื้อเพลิงที่ไปผ่านระบบทำความสะอาดแก๊สเสียก่อนเพื่อป้องกันปัญหาเรื่องฝุ่นและทาร์ (Tar and Dust) โดยแบ่งแนวทางการใช้ประโยชน์หลัก ๆ ได้ 3 ประเภท คือ

- 1) นำแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้ มาใช้เป็นแหล่งพลังงานความร้อนโดยตรง และนำแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้ไปใช้กับหม้อไอน้ำความดันในการผลิตไอน้ำและนำไปหมุนเครื่องกังหันไอน้ำเพื่อผลิตไฟฟ้า
- 2) ใช้ผลิตไฟฟ้าในเครื่องยนต์สันดาปภายใน โดยนำแก๊สเชื้อเพลิงส่งเข้าเครื่องยนต์สันดาปภายใน เช่น เครื่องยนต์ดีเซล เครื่องยนต์แก๊ส เพื่อผลิตไฟฟ้า แต่แก๊สเชื้อเพลิงต้องมีปริมาณทาร์และฝุ่นปนเปื้อนไม่เกิน  $25 \text{ mg/Nm}^3$  (เกียร์ติโกร และคณะ, 2549) เพื่อไม่ให้เกิดผลกระทบต่อการใช้งานในเครื่องยนต์
- 3) สามารถนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมเคมี เช่น สารตั้งต้นในการผลิตเมทานอล โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมเป็นตัวสังเคราะห์ภายใต้อุณหภูมิและความดันสูง รวมทั้งเซลล์เชื้อเพลิงคาร์บอนเนตเหลว (Molten carbonate fuel cells)



รูปที่ 2.10 ภาพรวมของการใช้ประโยชน์แก๊สเชื้อเพลิง (ที่มา : Oladejo et al., 2019)

### 2.10.5 มลพิษและของเสียที่เกิดจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

ทาร์ (Tars) และฝุ่นขนาดเล็ก (Dust) ถือเป็นส่วนประกอบอันตรายที่ปนเปื้อนมากับแก๊สเชื้อเพลิง (Producer gas) ซึ่งจะก่อให้เกิดความเสียหายภายในระบบ และเครื่องยนต์สันดาปภายในได้ จึงจำเป็นต้องนำแก๊สเชื้อเพลิงดังกล่าวมาผ่านกระบวนการทำความสะอาดแก๊ส (Pre-treatment gas) เสียก่อน เพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้น และสามารถหลีกเลี่ยงมลพิษที่เกิดขึ้นต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งระบบทำความสะอาดแก๊สที่นำมาใช้จะขึ้นกับวัตถุประสงค์ของการใช้

ประโยชน์แก๊สในรูปแบบต่าง ๆ ทั้งทางตรงและทางอ้อม ในตารางที่ 2.3 แสดงชนิดของมลสารและปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบผลิตแก๊สเชื้อเพลิง

ตารางที่ 2.3 ชนิดของมลสารและปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบผลิตแก๊สเชื้อเพลิง

| ชนิดมลสาร                                | ลักษณะที่ปรากฏ   | ปัญหา  |
|--|--|--|
| มลสารหรืออนุภาค                          | ฝุ่น (Dust) เถ้า (Ash) เถ้าลอย (Fly ash) ผงถ่าน (Char) องค์กรประกอบที่ควบแน่น (Condensed compound)                       | ทำให้เกิดการกัดกร่อนของชิ้นส่วนที่เป็นโลหะในระบบและมลภาวะทางสิ่งแวดล้อม  |
| องค์กรประกอบอัลคาไลน์โลหะ (Alkali metal) | องค์กรประกอบของโซเดียม (Na) และโพแทสเซียม (K) ที่เกิดในสภาวะการกลายเป็นเถ้าหลอมกลายเป็นสแลก (Slag) หรือมีสภาวะกลายเป็นไอ | ทำให้เกิดการกัดกร่อนชิ้นส่วนของโลหะที่อุณหภูมิสูง เกิดการหลุดลอกของชั้นผิวเคลือบโลหะ                           |
| ออกไซด์ของไนโตรเจน                       | เกิดปัญหาหมอกภาวะอากาศ โดยเกิด $\text{NO}_x$ ระหว่างกระบวนการเผาไหม้   | เกิดมลภาวะของ $\text{NO}_x$  |
| ซัลเฟอร์และคลอรีน                        | บางส่วนคงเหลือในเถ้าหนัก (Bottom ash) บางส่วนเกิดสภาวะการกลายเป็นไอหรือแก๊ส  | ทำให้เกิดมลภาวะที่เป็นอันตรายและเกิดการกัดกร่อนโลหะ เช่น $\text{H}_2\text{S}$ , $\text{HCl}$ และ $\text{SO}_x$ |
| ทาร์ (Tars)                              | ของเหลวที่มีความหนืดสูง ส่วนใหญ่เป็นสารไฮโดรคาร์บอน  | ทำให้วาล์วและระบบกรองอุดตันและกัดกร่อนชิ้นส่วนโลหะ   |

ที่มา : Belgiorno et al., 2003

ชนิดของมลสารที่เกิดขึ้นนอกจากจะเป็นปัญหาต่อระบบยังเป็นมลพิษที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้วย ดังนั้นการมีระบบทำความสะอาดแก๊สจึงเป็นเรื่องสำคัญซึ่งระบบทำความสะอาดแก๊สเชื้อเพลิงที่นิยมใช้โดยทั่วไปเพื่อลดปัญหาดังกล่าว แสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ชนิดของมลสารและระบบทำความสะอาดแก๊สเชื้อเพลิง

| ชนิดมลสาร                              | ระดับมลพิษ<br>(g/Nm <sup>3</sup> ) | ระบบทำความสะอาด   |
|--|------------------------------------|---|
| มลสารหรืออนุภาค                        | 3 - 70                             | ไซโคลน<br>ระบบกรอง (Filtration)<br>ระบบสครับเบอร์ (Scrubber)  |
| องค์ประกอบอัลคาไลน์โลหะ (Alkali metal) | -                                  | ระบบการควบแน่น (Condensation)<br>ระบบกรอง (Filtration)  |
| ออกไซด์ของไนโตรเจน                     | 1.5 - 3.0                          | ระบบสครับเบอร์ (Scrubber)<br>Selective Catalytic Reduction (SCR)  |
| ซัลเฟอร์และคลอรีน                      | 2.5 - 3.5                          | ระบบสครับเบอร์โดยใช้โซเดียมคาร์บอเนตหรือปูนขาว (Sodium bicarbonate หรือ Lime scrubbing)   |
| ทาร์ (Tars)                            | 10 - 100                           | การแตกตัวโดยใช้ความร้อน (Thermal cracking)<br>การแตกตัวโดยใช้สารเร่ง (Catalytic cracking)<br>ระบบการควบแน่น (Condensation)<br>ระบบสครับเบอร์ (Scrubber) |

ที่มา : Belgiorno et al., 2003

นอกจากปัญหามลสารที่เกิดขึ้นในระบบผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแล้ว ยังมีของเสียและมลพิษสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากระบบทำความสะอาดแก๊สจำเป็นต้องมีการจัดการของเสียเหล่านี้ต่อไป ซึ่งโดยสรุปแล้วมลพิษและของเสียที่เกิดจากระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Belgiorno et al., 2003) ประกอบด้วย

1) มลพิษอากาศ (Air pollution) กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันจะมีการปลดปล่อยมลพิษทางอากาศ เช่น ออกไซด์ของไนโตรเจน (NO<sub>x</sub>) ออกไซด์ของซัลเฟอร์ (SO<sub>x</sub>) และองค์ประกอบของไดออกซิน (PCDD/F) ที่ต่ำกว่าการเผาไหม้เชื้อเพลิงโดยตรง แต่อย่างไรก็ตามในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันก็จำเป็นต้องมีระบบทำความสะอาดแก๊สเพื่อกำจัดองค์ประกอบต่าง ๆ ที่อาจก่อให้เกิดมลภาวะได้

2) ของเสียในรูปของแข็ง (Solid waste) ที่เกิดจากระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ได้แก่ ถ่าน และซีเ็ก้า ซึ่งจะเกิดขึ้นประมาณ 3 – 20% ของเชื้อเพลิงที่ป้อนสู่เตาขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของเชื้อเพลิงแต่ละชนิด (Kirubakaran et al., 2009) กรณีใช้เชื้อเพลิงกากตะกอนจำเป็นต้องนำไปกำจัดต่อโดยการฝังกลบ เนื่องจากมีโลหะหนักคงเหลืออยู่ หรืออาจนำไปใช้ในกระบวนการอุตสาหกรรม เช่น ผงซีเมนต์ (Oladejo et al., 2019) ในส่วนการใช้เชื้อเพลิงชีวมวล เช่น แกลบ ไม้ กระถินยักษ์ และไม้ยูคาลิปตัส โดยวัสดุเหล่านี้จะถูกนำไปใช้เป็นถ่านกัมมันต์ หรือถ่านหุงต้มได้ เนื่องจากถ่านที่ได้มีค่าความร้อน และค่าการดูดซับไอโอดีนสูง รวมทั้งมีปริมาณสารระเหยต่ำซึ่งเป็นผลให้ถ่านที่เกิดขึ้นมีสภาพไร้ควัน (ทิพย์สุภินทร์ และคณะ, 2551)

3) น้ำเสีย (Wastewater) ที่เกิดจากระบบทำความสะอาดแก๊ส เช่น น้ำที่เกิดจากระบบสครับเบอร์ (Scrubber และ Condense scrubber) ซึ่งน้ำเสียที่เกิดขึ้น มีทั้งมลสารที่อยู่ในรูปที่ละลายน้ำ เช่น Acetic acid, Sulphur, Phenol, Oxygenated organic compounds และไม่ละลายน้ำส่วนใหญ่คือองค์ประกอบของทาร์ (Tars) และของแข็งแขวนลอย (Suspended solid) ดังนั้นน้ำเสียที่เกิดขึ้นจะต้องถูกนำไปบำบัดอย่างถูกวิธี (Belgiorno et al., 2003)

คำจำกัดความของทาร์ (Definition of tar) หรือน้ำมันดิน หมายถึงผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากระบวนการแก๊สซิฟิเคชันหรือการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ มีลักษณะเป็นของเหลวที่มีความหนืดสูง (High viscous) และฤทธิ์กัดกร่อน (Corrosive) โดยทั่วไปมีสีน้ำตาลเข้มถึงดำประกอบไปด้วยสารไฮโดรคาร์บอนจำนวนมาก ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีของทาร์ พบว่า เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ กระบวนการให้สูงขึ้นปริมาณออกซิเจนจะลดลงและสัดส่วนของไฮโดรคาร์บอนอะตอมก็ลดลงเช่นกัน (อาภาณี เหลืองนฤมิตชัย, 2538) ดังแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 องค์ประกอบทางเคมีของทาร์ ในช่วงอุณหภูมิต่าง ๆ

| อุณหภูมิปกติ<br>400 – 500 °C<br>(Conventional Flash<br>Pyrolysis) | อุณหภูมิสูง<br>600 – 650 °C<br>(Hi-Temperature<br>Flash Pyrolysis) | อุณหภูมิสูง<br>700 – 800 °C<br>(Conventional<br>Gasification) | อุณหภูมิสูง<br>900 – 1,000 °C<br>(Hi-Temperature<br>Gasification) |
|---|--|---|---|
| Acid  | Benzenes   | Naphthalenes  | Naphthalene   |
| Aldehydes   | Phenols  | Acenaphthalenes   | Acenaphthalene  |
| Ketone  | Catechols  | Fluorenes   | Phenanthrene  |
| Furan   | Naphthalene  | Phenanthrenes   | Fluoranthrene   |
| Alcohols  | Biphenyls  | Benzaldehydes   | Pyrene  |
| Complex-Oxygenated  | Phenanthrenes  | Phenols   | Acephenanthrylene   |
| Phenols   | Benzofurans  | Naphtofurans  | Benzanthracenes   |
| Guaiacols   | Benzaldehydes  | Benzanthracenes   | Benzopyrenes  |
| Syringols   |  |   |   |
| Complex-Phenolics   |  |   |   |

## 2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำชีวมวล วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร และของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม มาผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง สรุปได้ดังต่อไปนี้

(สุรียา ชัยเดชทยากุล, 2544) ศึกษาการนำวัสดุเหลือทิ้งจากขบวนการผลิตของโรงงานผลิตเยื่อกระดาษมาใช้ประโยชน์ในรูปของเชื้อเพลิงอัดแท่ง โดยการนำกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย มาผสมกับเศษชิ้นไม้สับจากการสับไม้ก่อนเข้าขบวนการผลิตเยื่อกระดาษ จำนวน 11 อัตราส่วนผสม ดังนี้ 100:0, 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50, 40:60, 30:70, 20:80, 10:90 และ 0:100 โดยน้ำหนัก แล้วอัดเป็นแท่ง จากนั้นเผาให้เป็นถ่านเชื้อเพลิงและทำการศึกษาคูณสมบัติด้านเชื้อเพลิงตามมาตรฐาน ASTM จากผลการทดลองพบว่า ตั้งแต่ 100:0 ถึง 40:60 โดยน้ำหนัก มีความสามารถอัดขึ้นรูปเป็นแท่งได้โดยส่วนผสมที่มีเศษชิ้นไม้เพิ่มขึ้นจะอัดขึ้นรูปได้ยากขึ้น และใช้เวลาในการอัดมากขึ้น รวมทั้งมีความไม่สม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกัน เมื่อนำไปเผาเป็นถ่านแล้วนำไปทดสอบคุณสมบัติหลักทางด้านเชื้อเพลิงตามมาตรฐาน ASTM รวม 6 ด้าน คือปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหย คาร์บอนคงตัว กำมะถันรวมและค่าความร้อน รวมทั้งหาส่วนผสมที่ดีที่สุดโดยวิธีการหาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของตัวแปรในรูปคะแนนดิบตามวิธีของเพียร์สัน พบว่า ซึ่งอัตราส่วนผสม 70:30 มีคุณสมบัติที่ดีที่สุด เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงชนิดอื่นมีค่าใกล้เคียงกับฟืนแกลบ

(ทองทิพย์ พูลเกษม, 2542) ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเอาเปลือกทุเรียนที่เหลือทิ้งมาผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง โดยวิธีการอัดแท่งแบบร้อนและเย็นเพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติทางด้านเชื้อเพลิง และการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอัด จากผลการทดลองพบว่า เมื่อนำเปลือกทุเรียนที่มีความชื้น 75 – 80% มาสับให้เป็นชิ้นเล็ก ๆ ด้วยเครื่องสับแล้วตากแดดจนมีความชื้นเฉลี่ย 45% ไปอัดแท่งแบบเย็นโดยไม่ใช้ตัวประสานและใช้ตัวประสานแล้วนำไปตากแดดให้แห้ง ซึ่งเปลือกทุเรียนอัดแท่งดังกล่าวจะให้ค่าความร้อนใกล้เคียงกัน โดยให้ค่าความร้อน 3,671 3,699 3,625 kcal/kg<sub>dry sample</sub> สำหรับการอัดแท่งแบบที่ไม่ใช้ตัวประสาน และแบบที่ใช้แป้งเปียกรวมทั้งแบบที่ใช้โมลาสเป็นตัวประสาน ตามลำดับ สำหรับการอัดแท่งแบบร้อนจะนำเปลือกทุเรียนที่มีความชื้น 45% นี้ไปตากแดดให้เหลือความชื้น 10% เสียก่อนแล้วจึงนำมาอัดร้อน พบว่า เปลือกทุเรียนที่อัดแท่งด้วยวิธีนี้ จะให้ความร้อนเฉลี่ยสูงกว่าการอัดแบบเย็น โดยมีค่าความร้อน 3,841.5 kcal/kg<sub>dry sample</sub> ซึ่งใกล้เคียงกันกับค่าความร้อนที่ได้จากฟืนไม้ยูคาลิปตัส

(ชมธิตา ชื่นนิยม, 2553) ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเศษซังข้าวโพดซึ่งได้มาจากโรงงานผลิตเมล็ดพันธุ์พืชมาทำเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง โดยนำซังข้าวโพดมาผสมกับตัวประสาน 4 ชนิด ได้แก่ แป้งมันสำปะหลัง กากน้ำตาล กากของเสียจากโรงงานกระดาษ และน้ำมันเครื่องใช้แล้ว ในสัดส่วน 10, 20, 30, 40 และ 50% แล้วจึงนำไปอัดแท่ง รวมทั้งนำเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ได้มาทดสอบคุณสมบัติทางเคมี กายภาพ และการเผาไหม้ ได้แก่ ค่าความร้อน, ค่าความหนาแน่น, ค่าความทนแรงอัด, ค่าดัชนีการแตกร่วน, ค่าความต้านทานน้ำ, เวลาในการจุดติดไฟ, ความคงตัวของเถ้า และระยะเวลาการเผาไหม้ จากผลการทดลองพบว่าการอัดแท่งเศษซังข้าวโพดที่สัดส่วน 50% แป้งมันสำปะหลังมีความเหมาะสมที่สุดเนื่องจากอัดง่าย มีความแข็งแรงสูง และใช้เวลาในการจุดติดไฟต่ำ ในขณะที่เกี่ยวกับการใช้น้ำมันเครื่องใช้แล้วไม่เหมาะสมกับการนำมาใช้เป็นตัวประสานในการอัดแท่งเศษซังข้าวโพด ทั้งนี้เมื่อใช้กากน้ำตาลเป็นตัวประสานจะได้เชื้อเพลิงอัดแท่งที่มีค่าความคงตัวของเถ้าและระยะเวลาการเผาไหม้สูงสุด ในขณะที่เมื่อใช้กากของเสียจากโรงงานกระดาษเป็นตัวประสานจะได้เชื้อเพลิงอัดแท่งที่มีค่าความร้อน ค่าดัชนีการแตกร่วน และค่าความต้านทานน้ำสูงสุด

(กิตติกร และคณะ, 2558) ศึกษาการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรได้แก่ซังข้าวโพดและเปลือกข้าวโพดมาผ่านกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปเป็นแท่งเชื้อเพลิง โดยใช้ตัวประสานแป้งมันผสมปูนขาวในอัตราส่วน 2:1, 1:1 และ 1:2 ที่อัตราส่วนผสมวัสดุเหลือทิ้ง 20, 30 และ 40% โดยน้ำหนัก อีกทั้งแปรเปลี่ยนอัตราส่วนผสมซังต่อเปลือกข้าวโพด 20:80, 50:50 และ 80:20 โดยน้ำหนัก ผลการศึกษาพบว่าแท่งเชื้อเพลิงที่เหมาะสมคืออัตราส่วนผสมวัสดุเหลือทิ้ง 20:80 ตัวประสานเชื้อเพลิง 1:2 อัตราส่วนผสม 20% โดยน้ำหนัก ซึ่งวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรให้ค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิง 12.77 MJ/kg และความหนาแน่นของแท่งเชื้อเพลิง 940 kg/m<sup>3</sup> มีประสิทธิภาพความร้อนเตาชีวมวล 16.31% จะเห็นได้ว่าวัสดุเหลือทิ้งจากข้าวโพดมีศักยภาพสูงในการนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง

(ณัฐกิตติ์ และคณะ, 2560) ศึกษากระบวนการผลิตและการวิเคราะห์คุณสมบัติของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากถั่วแระ ซึ่งเป็นส่วนของเปลือกและลำต้นจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยกระบวนการผลิตเริ่มจากกระบวนการย่อยหยาบ หีบรีดน้ำ ตากแดด สับย่อยละเอียด คัดแยกขนาด และการอัดเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่ทดสอบจะถูกย่อยเป็น 3 ขนาด ได้แก่ <math>< 1\text{ mm}</math>, 1-3 mm, 3-5 mm และนำมาอัดด้วยเครื่องอัดเม็ดเชื้อเพลิงแบบแม่พิมพ์แผ่นกลม ขนาดกำลังการผลิต 150 kg/hr โดยเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ได้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเชื้อเพลิง 6 mm และถูกนำไปวิเคราะห์ ความชื้น ความหนาแน่น ความต้านทานแรงกดอัด การแตกร่วนและค่าความร้อนของเม็ดเชื้อเพลิง ผลการศึกษาพบว่าอุณหภูมิและความชื้นที่เหมาะสมสำหรับการอัดเม็ดเชื้อเพลิงจากเปลือกและต้นถั่วแระมีค่าอยู่ในช่วง 75-80 °C และ 15-20% ตามลำดับ ในส่วนคุณสมบัติของเชื้อเพลิงอัดเม็ดได้แก่ ความหนาแน่น ความต้านทานแรงกด ดัชนีการแตกร่วน ความต้านทานน้ำและค่าความร้อนมีค่าใกล้เคียง



กันและมีค่าสูงกว่ามาตรฐานเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั่วไป ซึ่งสรุปได้ว่าเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากถั่วแระมีศักยภาพในการนำมาส่งเสริมการใช้ทดแทนเชื้อเพลิงในหม้อต้มน้ำในโรงงานอุตสาหกรรมได้

(วัชรภรณ์ ยุกเขต และदारिवรรณ เศรษฐีธรรม, 2560) ศึกษาคุณสมบัติเชื้อเพลิงอัดแท่งจากขยะเศษใบไม้โดยใช้แป้งมันสำปะหลังและน้ำยางพาราเป็นตัวประสาน ซึ่งอัดก้อนเชื้อเพลิงด้วยการอัดด้วยเครื่องและอัดด้วยมือ รวมทั้งศึกษาคุณสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงตามมาตรฐาน ASTM เปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนถ่านอัดแท่ง (มผช.238/2547) และถ่านไม้หุงต้ม (มผช.657/2547) รวมทั้งประเมินความเหมาะสมต่อการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนในชุมชน โดยทำการศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของเศษใบไม้และตัวประสาน 5 อัตราส่วน ที่ 1 : 1, 1 : 1.1, 1 : 1.2, 1 : 1.3 และ 1 : 1.4 (kg/L) ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของเชื้อเพลิง พบว่าเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ได้จากการอัดด้วยมือมีคุณลักษณะทางกายภาพที่แข็งแรง ไม่เปราะและไม่แตกหักง่าย เมื่อเปรียบเทียบกับคุณสมบัติด้านเชื้อเพลิงตามมาตรฐานเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ใช้ น้ำยางพาราเป็นตัวประสานผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ส่วนเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นตัวประสานจะมีค่าความร้อนต่ำกว่ามาตรฐาน เมื่อศึกษาความเหมาะสมต่อการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนฟืนไม้ในชุมชน พบว่าเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นตัวประสานจากการอัดด้วยมือมีความเหมาะสมที่สุดที่อัตราส่วนใบไม้ 1 kg ต่อตัวประสาน 1.4 L มีค่าความร้อน 3,975.47 cal/g ค่าความชื้น 4.24% ปริมาณสารระเหย 3.31% ปริมาณเถ้า 7.47% และทดสอบความเหมาะสมจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงมีระยะเวลาการติดไฟนานถึง 27.48 min

(ศุภชัย ธรรมศิริทรัพย์ และภูมิพัฒน์ ภาชนะ, 2558) ศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากหญ้าเนเปียร์สายพันธุ์ปากช่อง 1 โดยนำมาผสมกับแป้งมันสำปะหลังซึ่งใช้เป็นตัวประสานให้ได้สัดส่วนหญ้าเนเปียร์ต่อแป้งมันสำปะหลังเท่ากับ 100 : 0, 95 : 5, 90 : 10, 85 : 15 และ 80 : 20% แล้วจึงนำไปอัดแท่ง จากนั้นนำมาวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ คือ ความหนาแน่น (Density) และค่าต้านทานแรงกด (Compressive strength) ผลการวิจัยพบว่า เชื้อเพลิงอัดแท่งที่มีสัดส่วนของหญ้าเนเปียร์ต่อแป้งมันสำปะหลังเท่ากับ 100 : 0 เมื่ออัดแท่งออกมาแล้วไม่สามารถคงรูปได้ เนื่องจากไม่มีแป้งมันสำปะหลังเป็นตัวประสาน สัดส่วนที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากหญ้าเนเปียร์คือ สัดส่วนหญ้าเนเปียร์ : แป้งมันสำปะหลังเท่ากับ 90 : 10% เนื่องจากมีค่าความร้อนที่สูงเท่ากับ 3,887.1 cal/g มีค่าต้านทานแรงกดที่สูง 24.727 kg/cm<sup>2</sup> ซึ่งแท่งเชื้อเพลิงที่ได้จะมีความแข็งแรง ง่ายต่อการขนส่งและการเก็บรักษาที่สะดวก มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 0.723 g/cm<sup>3</sup> และมีดัชนีการแตกกร่อนเท่ากับ 0.942

(รัศมี และคณะ, 2560) ศึกษาการผลิตและการประเมินศักยภาพของหญ้าเนเปียร์อัดเม็ดโดยใช้ น้ำหมักชีวภาพเป็นตัวประสานเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลสำหรับเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลง โดยใช้อัตราส่วนหญ้าเนเปียร์ต่อน้ำหมักชีวภาพ เท่ากับ 10 : 4 โดยน้ำหนัก และใช้เครื่องอัดเม็ดแบบ Flat die ทำให้ได้หญ้าเนเปียร์อัดเม็ดที่มีความหนาแน่นรวมเฉลี่ย  $657 \text{ kg/m}^3$  และมีค่าความร้อนสูงเฉลี่ย  $18.10 \text{ MJ/kg}$  นอกจากนี้หญ้าเนเปียร์อัดเม็ดที่ผลิตได้น้ำหนัก 12 kg จะถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลสำหรับเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลงรุ่นสุดพลัง ซึ่งจะได้ก๊าซเชื้อเพลิงที่มีองค์ประกอบของก๊าซ  $\text{H}_2$  10.96%v/v, ก๊าซ  $\text{CH}_4$  10.74%v/v และก๊าซ  $\text{CO}$  3.64%v/v ซึ่งจะมีการทดสอบศักยภาพของก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้เมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับเตาแก๊สหุงต้มเพื่อผลิตพลังงานความร้อน พลังงานความร้อนที่ผลิตได้ ( $10,699 \text{ KJ}$ ) สามารถต้มน้ำที่มีน้ำหนัก 30.0 kg ให้เดือดและกลายเป็นไอน้ำ นอกจากนี้ก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถที่จะผลิตไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความต่างศักย์ 220 V เป็นระยะเวลา 22 min โดยผลิตกระแสไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่องและสามารถดึงกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ไปจ่ายให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีกำลังไฟฟ้าตั้งแต่ 100 – 1,100 W ได้ พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้เท่ากับ 45.94 kW·h

(Jamradloedluk and Lertsatitthanakorn, 2017) ได้ศึกษาการเตรียมเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดจาก เปลือกไม้ยูคาลิปตัส เปลือกมะม่วง และเปลือกมะละกอ โดยใช้ตัวประสานที่แตกต่างกัน 3 ชนิด คือ ยางไม้สน (Dammar) ยางบง (*Persea kurzii kosterm power*) และสารสกัดจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (Cashew nut shell liquid) ซึ่งทำการผสมวัตถุดิบในสัดส่วน เปลือกไม้ยูคาลิปตัส:เปลือกมะม่วง:เปลือกมะละกอ (1:1:1, 2:1:1, 1:2:1 และ 1:1:2) กับตัวประสานแต่ละชนิด โดยเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่เตรียมไว้ยังใช้เป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการเผาไหม้อีกด้วย จากการศึกษาพบว่าตัวประสานสารสกัดจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (Cashew nut shell liquid) ลักษณะเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ได้มีขนาดค่อนข้างสั้นและมีความยาวไม่สม่ำเสมอ ในขณะที่ยางไม้สน (Dammar) มีรอยร้าวที่ผิวของเม็ดเชื้อเพลิงค่อนข้างมาก ในส่วนตัวประสานยางบง (*Persea kurzii kosterm power*) เม็ดเชื้อเพลิงที่ได้มีขนาดที่สม่ำเสมอ ผิวเรียบ และมีค่าความหนาแน่นมากกว่าตัวประสานตัวอื่น ทั้งนี้การเตรียมเชื้อเพลิงอัดเม็ดโดยใช้ตัวประสานยางไม้สน (dammar) ให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนโดยรวมที่สูงขึ้นของการเผาไหม้เมื่อเทียบกับตัวประสานอีก 2 ชนิด และประสิทธิภาพเชิงความร้อนโดยรวมของการเผาไหม้อยู่ในช่วง 24.8 – 38.5%

(Avelar et al., 2016) ได้ศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากตะกอนชีวภาพจากโรงงานสิ่งทอผสมกับเศษผ้าฝ้ายอุตสาหกรรมสิ่งทอในอัตราส่วน (0:100, 25:75, 50:50, 75:25 และ 100:0%) โดยใช้เครื่องอัดในห้องปฏิบัติการที่แรงดัน 6,205 8,274 และ 10,342 kPa และวิเคราะห์ค่าความร้อน องค์ประกอบทางเคมี ความหนาแน่น ความทนแรงอัด และสมมูลการดูดความชื้น (Hygroscopic

equilibrium moisture) พบว่า ที่แรงดัน 6,205 kPa มีความเหมาะสมสำหรับกระบวนการอัดแห้งในระดับปฏิบัติการ เนื่องจากเชื้อเพลิงอัดแห้งมีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนคงตัว มีค่าความร้อนสูง ความทนแรงอัดที่สูงกว่า และมีปริมาณเถ้าต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับแรงดันในระดับอื่น ทั้งนี้อัตราส่วนผสม 25:75% เป็นอัตราส่วนผสมที่ดีที่สุด เนื่องจากมีเปอร์เซ็นต์ของปริมาณสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัว และค่าความร้อนที่สูงกว่าอัตราส่วนผสมอื่น รวมทั้งมีความหนาแน่นและความทนแรงอัดสูง มีปริมาณเถ้าและสมดุลดการดูดความชื้นของเชื้อเพลิงอัดแห้งที่ต่ำ

(Oduntan et al., 2012) ได้ศึกษาการประเมินประสิทธิภาพเครื่องอัดเม็ดมันสำปะหลังขนาดย่อม ซึ่งการประเมิน จะอยู่ในรูปของ ความหนาแน่น ความคงทน ความต้านทานแรงอัด ที่ปริมาณความชื้นของมันสำปะหลังบด 18 , 20 และ 22%wb โดยมีขนาดหัวตายที่ใช้ 4, 6 และ 8 mm และความเร็วกวของสกรูอัดเม็ด (Auger) เท่ากับ 90, 100 และ 120 rpm ผลการทดสอบ พบว่า ค่าความหนาแน่น และค่าความคงทนของเม็ดเชื้อเพลิงมีค่าลดลงตามความชื้นที่เพิ่มขึ้น เชื้อเพลิงอัดเม็ดที่มีคุณภาพดีที่สุดคือ ความชื้น 18% โดยขนาดหัวตายที่ใช้ 4 mm และที่ความเร็วของสกรูอัดเม็ด 90 rpm ให้ผลผลิตสูงสุดที่ 54 kg/hr มีค่าความหนาแน่นรวม 635 kg/m<sup>3</sup> ในส่วนความชื้น 15% มีความต้านทานแรงอัด 34.24 MPa และมีค่าความคงทนสูงถึง 85.7%

ด้านการผลิตพลังงานโดยใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน พบว่าเทคโนโลยีนี้สามารถประยุกต์ใช้กับชีวมวลและกากตะกอนน้ำเสียได้ ซึ่งมีงานวิจัยที่สนับสนุนดังต่อไปนี้

(ทิพย์สุภินทร์ หินชุย, 2550) ศึกษาการนำกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียของกระบวนการฟอกย้อมมาผลิตพลังงานโดยใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันชนิดไหลลง (Downdraft fixed bed gasification) ที่มีกำลังการผลิต 100 kW โดยนำกากตะกอนมาลดความชื้นให้อยู่ในช่วง 15 – 18% และอัดเป็นแท่งเชื้อเพลิง (Briquettes) มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 45 mm ความยาว 40-50 mm มีความหนาแน่น 380 kg/m<sup>3</sup> ในช่วงการเดินระบบได้ปรับอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง 3 ระดับ 100, 150 และ 180 Nm<sup>3</sup>/hr ผลการศึกษา พบว่า องค์ประกอบของแก๊สที่จุดติดไฟ CO, H<sub>2</sub> และ CH<sub>4</sub> อยู่ในช่วง 13.19 - 15.11%, 14.89 - 18.20% และ 2.14 - 2.39% ตามลำดับ ในส่วนค่าความร้อนแก๊สเชื้อเพลิงอยู่ในช่วง 4.20 – 4.87 MJ/Nm<sup>3</sup> ทั้งนี้องค์ประกอบแก๊สที่จุดติดไฟและค่าความร้อนแก๊สจะแปรผกผันกับอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง ส่วนปริมาณน้ำมันดินและฝุ่นในระบบอยู่ในช่วง 4.06 – 10.98 mg/Nm<sup>3</sup>

(ณัฏวัฒน์ สุขทั้ง, 2558) ได้ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตพลังงานระหว่างระบบแก๊สซิฟิเคชัน (Conventional gasification, C-G) และระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน (Plasma gasification, P-G) โดยใช้ไม้กระถินยักษ์ที่ผ่านการสับ/ย่อย มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 25 -60 mm ความยาว 50 - 70 mm และปรับความชื้นเชื้อเพลิง 3 ระดับ คือ 16, 28 และ 34% ในส่วนการทดสอบด้วยระบบแก๊สซิฟิเคชันจะใช้ไม้กระถินยักษ์ที่ความชื้น 16% และเดินระบบด้วยอัตรา

การไหลของแก๊สเชื้อเพลิงในระบบ 3 ระดับ คือ 140, 180 และ 220 Nm<sup>3</sup>/hr ผลการศึกษาพบว่า ค่าความร้อนและประสิทธิภาพของแก๊สเชื้อเพลิงรวมทั้งปริมาณทาร์ (Tar) ในระบบ จะแปรผันไปตามอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน (P-G) ที่ใช้เชื้อเพลิงที่มีความชื้นสูง (28% และ 34%) จะมีประสิทธิภาพเทียบเท่ากับระบบแก๊สซิฟิเคชัน (C-G) โดยใช้เชื้อเพลิงความชื้นต่ำ (16%) หากพิจารณาพลังงานที่ใช้ในการลดความชื้นของเชื้อเพลิง พบว่าประสิทธิภาพของพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน (P-G) จะสูงกว่าระบบแก๊สซิฟิเคชัน (C-G) ถึง 15%

(Arjhan et al., 2012) ได้ศึกษาการประเมินการผลิตไฟฟ้าจากวัตถุดิบชีวมวลต่าง ๆ โดยใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันชนิดไหลลงในระดับนำร่อง (Pilot-Scale) โดยใช้ชีวมวล 10 ชนิด ได้แก่ เปลือกมันสำปะหลังอัดแท่ง และแกลบอัดแท่ง (Briquetted) เส้นผ่านศูนย์กลาง 45 mm ความยาว 50 - 60 mm ไม้ยูคาลิปตัสและไม้กระถินยักษ์ เส้นผ่านศูนย์กลาง 30 - 40 mm ความยาว 50 - 60 mm เปลือกปาล์มและเห้งน้ำมันสำปะหลัง ความยาว 50 - 60 mm รวมทั้งกะลามะพร้าว เปลือกยูคาลิปตัส ชังข้าวโพด และไม้ยางพาราตัด โดยทำการปรับความชื้นของวัตถุดิบชีวมวลประมาณ 15 % มีค่าความหนาแน่นของวัตถุดิบชีวมวลทั้งหมดอยู่ในช่วง 118 - 459 kg/m<sup>3</sup> อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงที่ใช้อยู่ในช่วง 104.6 - 211.1 m<sup>3</sup>/hr (ของชีวมวลทุกชนิด) ผลการศึกษา พบว่า การเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงมีผลต่อองค์ประกอบแก๊สเพียงเล็กน้อย ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงสูงสุดอยู่ในช่วง 4.2 - 5.6 MJ/Nm<sup>3</sup> และกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแต่ละวัตถุดิบชีวมวลที่ใช้ทดสอบที่อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงสูงสุดอยู่ระหว่าง 47 - 63 kW โดยมีอัตราการใช้ชีวมวลจำเพาะต่ำกว่า 2.0 kg/kW.hr ซึ่งประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงเกิน 70% นั้นได้มาจากยูคาลิปตัส ชังข้าวโพด และไม้กระถินยักษ์ ในส่วนประสิทธิภาพของชุดเครื่องยนต์กำเนิดไฟฟ้าและประสิทธิภาพทางไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 11.0 - 25.8% และ 6.3 - 18.6% ตามลำดับ โดยรวมแล้วเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันชนิดไหลลง มีศักยภาพสูงในการนำชีวมวลที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันมาผลิตกระแสไฟฟ้าได้

(Franco et al., 2003) ได้ศึกษาการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงใน Atmospheric fluidized bed โดยศึกษาชีวมวล 3 ประเภท คือ ไม้สนทะเล, ไม้โอ๊ค และ ไม้ยูคาลิปตัส ซึ่งช่วงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์เท่ากับ 700 - 900 °C โดยมีอัตราการไหลของชีวมวลอยู่ในช่วง 5.7 - 11.5 g/min และอัตราการไหลของ steam 4.6 g/min สัดส่วนระหว่าง Steam/biomass เท่ากับ 0.4 - 0.85 ความชื้นของไม้ที่ใช้ทดสอบอยู่ในช่วง 9.5 - 12% และมีขนาดของวัตถุดิบ 1,250 - 2,000 μm. ซึ่งขนาดของวัตถุดิบที่เลือกใช้นี้เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาจากการบ่อนวัตถุดิบและเพิ่มอัตราการไหลให้มีการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด ผลการทดลองพบว่าแก๊สที่ผลิตได้มีค่าความร้อนปานกลางอยู่ในช่วง

16 - 19 KJ/Nm<sup>3</sup> และอุณหภูมิมีผลกระทบต่อองค์ประกอบของแก๊ส คือ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจะเพิ่มปริมาณ H<sub>2</sub> ประมาณ 10 - 20% และลดปริมาณไฮโดรคาร์บอนหนักประมาณ 3 - 5% ขณะที่ปริมาณ CO ลดลงในช่วงอุณหภูมิ 730 - 850 °C

(Midilli et al., 2001) ได้ศึกษาการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากกากตะกอนน้ำเสียโดยใช้เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงชนิดไหลลง (Downdraft gasifier) ซึ่งมีการเตรียมกากตะกอนให้ได้ขนาด 350 x 10 x 5 mm และความชื้นเฉลี่ยเท่ากับ 11.75% ส่วนค่าความความร้อน (High heating value) ของกากตะกอนเท่ากับ 17.14 MJ/kg จากผลการทดลองสรุปได้ว่าปริมาณแก๊สที่ติดไฟได้ คือ H<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> และ C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> เท่ากับ 19 - 23% ของแก๊สที่ผลิตได้ทั้งหมด มีค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงอยู่ในช่วง 2.55 - 3.2 MJ/Nm<sup>3</sup> และมีปริมาณทาร์ที่เกิดจากการเผาไหม้ต่ำกว่า 0.1% ของจำนวนกากตะกอนที่ถูกป้อนเข้าไปในกระบวนการ

(Sheth and Babu, 2009) ได้ศึกษาการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากเศษไม้ประตูแตก (Dalbergia sissoo) ที่เหลือจากงานทำเฟอร์นิเจอร์ โดยใช้เตาปฏิกรณ์ชนิดไหลลง (Downdraft gasifier) ซึ่งเศษไม้ประตูแตกมีขนาด 25.4 x 25.4 x 25.4 mm<sup>3</sup> มีความชื้นเฉลี่ยประมาณ 4-12 % มีค่าความหนาแน่นรวม (Bulk density) เท่ากับ 605 kg/m<sup>3</sup> มีค่าความร้อน (High heating value) เท่ากับ 18.06 MJ/kg และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate analysis) มีค่าคาร์บอนคงตัว ปริมาณสารที่ระเหยได้ ปริมาณเถ้า เท่ากับ 15.70, 80.40 และ 3.90 % ตามลำดับ โดยองค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) มีธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน และไนโตรเจน เท่ากับ 48.6, 6.2, 44.87 และ 0.33% ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่า ปริมาณ CO และ H<sub>2</sub> เป็นองค์ประกอบหลักของแก๊สที่ผลิตได้ซึ่งจะส่งผลต่อค่าความร้อนที่เกิดขึ้น โดยที่ Equivalence ratio ที่เพิ่มขึ้นเท่ากับ 0.17 - 0.205 จะได้ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 4.5 - 6.34 MJ/Nm<sup>3</sup> ตามลำดับ และทำให้ปริมาณ CO และ H<sub>2</sub> มีค่าเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันปริมาณ CO<sub>2</sub> และ N<sub>2</sub> มีค่าลดลง

(Kim et al., 2016) ได้ศึกษากระบวนการ Partial oxidation ของเชื้อเพลิงอัดแท่งกากตะกอนในเตาปฏิกรณ์แบบ Updraft fixed bed โดยใช้กากตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียเทศบาลมาผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง โดยเชื้อเพลิงที่ได้มีลักษณะเป็นรูปทรงกลม ขนาด 20x20x10 mm มีความชื้นประมาณ 5.73 % มีค่าความร้อน (HHV) เท่ากับ 14.25 MJ/kg และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ (คาร์บอนคงตัว ปริมาณสารระเหย ปริมาณเถ้า) เท่ากับ 7.24, 50.76 และ 36.27% ตามลำดับ รวมทั้งวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์) เท่ากับ 51, 7.37, 33.16, 6.59 และ 1.88% ตามลำดับ ซึ่งได้เปรียบเทียบกับองค์ประกอบของแก๊สโดยรวมและอัตราส่วนของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ที่สมบูรณ์เทียบกับปริมาณแก๊ส

(Stoichiometric ratio) ระหว่างเชื้อเพลิงกากตะกอนอัดแท่งกับเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด พบว่าเชื้อเพลิงทั้งสองชนิดมีส่วนของแก๊สที่ติดไฟได้ ( $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ) ที่สูงเมื่อมีการเพิ่มอัตราการไหลของอากาศในระบบ แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นการกระจายความร้อนไปยังเชื้อเพลิงกากตะกอนอัดแท่งค่อนข้างช้าเนื่องจากมีขนาดและปริมาณเถ้าที่สูงกว่า รวมทั้งมีอัตราการสลายตัวต่ำเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด

(Xie et al., 2010) ได้ศึกษาผลของความชื้นในกากตะกอนน้ำเสียต่อการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงโดยใช้กากตะกอน 3 ชนิด คือ 1. กากตะกอนจากระบบ Activated sludge แบบย่อยสลายแล้ว 2. กากตะกอนจากระบบ Anaerobic-anoxic-oxic แบบย่อยสลายแล้ว และ 3. กากตะกอนจากระบบ Anaerobic-anoxic-oxic แบบยังไม่ย่อยสลาย ที่ระดับความชื้นจาก 0 - 52.9% มีขนาดของกากตะกอน 3-4 cm ก่อนเข้าระบบผลิตแก๊สเชื้อเพลิง ภายในระบบจะใช้ความเร็วลมและอุณหภูมิคงที่เท่ากับ  $0.05 \text{ m}^3/\text{hr}$  และ  $800 \text{ }^\circ\text{C}$  ตามลำดับ ผลการศึกษา พบว่า ปริมาณ  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  และ  $\text{H}_2$  และค่า Lower Heating Value (LHV) ของแก๊สมีค่าเพิ่มขึ้นตามความชื้นที่สูงขึ้น ในขณะที่ปริมาณ  $\text{CO}$  และปริมาณทาร์มีค่าลดลง ในส่วนคุณภาพแก๊สของกากตะกอนจากระบบ Anaerobic-anoxic-oxic ทั้งสองแบบมีคุณภาพที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับกากตะกอนจากระบบ Activated sludge เมื่อความชื้นของกากตะกอนเพิ่มขึ้น

(Ayol et al., 2019) ได้ศึกษาศักยภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากกากตะกอนแห้งโดยใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันชนิดไหลลงในระดับนำร่อง (Pilot-scale) โดยจะทำการเตรียมกากตะกอนด้วยการอัดเม็ดเชื้อเพลิง มีค่าความหนาแน่น  $500 \text{ kg/m}^3$  และความชื้น 6.84% ส่วนค่าความร้อน (HHV) เท่ากับ  $11.73 \text{ MJ/kg}$  ทั้งนี้ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ (คาร์บอนคงตัว ปริมาณสารระเหย และปริมาณเถ้า) เท่ากับ 12.04, 37.94 และ 50.03% ตามลำดับ รวมทั้งวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์) เท่ากับ 29.67, 4.31, 59.95, 4.62 และ 1.43% ตามลำดับ ผลการศึกษา พบว่า องค์ประกอบของแก๊สที่จุดติดไฟ  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$  อยู่ในช่วง 18.5, 23.3 และ 1.2% ตามลำดับ

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 บทนำ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงอัดเม็ดของกากตะกอนของระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลังและหญ้าเนเปียร์พันธุ์ปากช่อง 1 ที่ได้จากแปลงปลูกหญ้าเนเปียร์ภายในฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยนำวัตถุดิบทั้งสองมาผสมกันในรูปแบบการผสมวัตถุดิบ (Blending raw materials) ตามสัดส่วนต่าง ๆ จะได้วัตถุดิบ 4 ประเภท คือ กากตะกอน (SS), หญ้าเนเปียร์ (NG), วัตถุดิบผสม SS/NG (50/50) และวัตถุดิบผสม SS/NG (70/30) หลังจากนั้นนำมาผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด โดยในการศึกษาการผลิตพลังงานจะมุ่งเน้นการใช้เทคโนโลยีทางความร้อน คือ เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน (Conventional Gasification) สัญลักษณ์ย่อ คือ ระบบ C-G

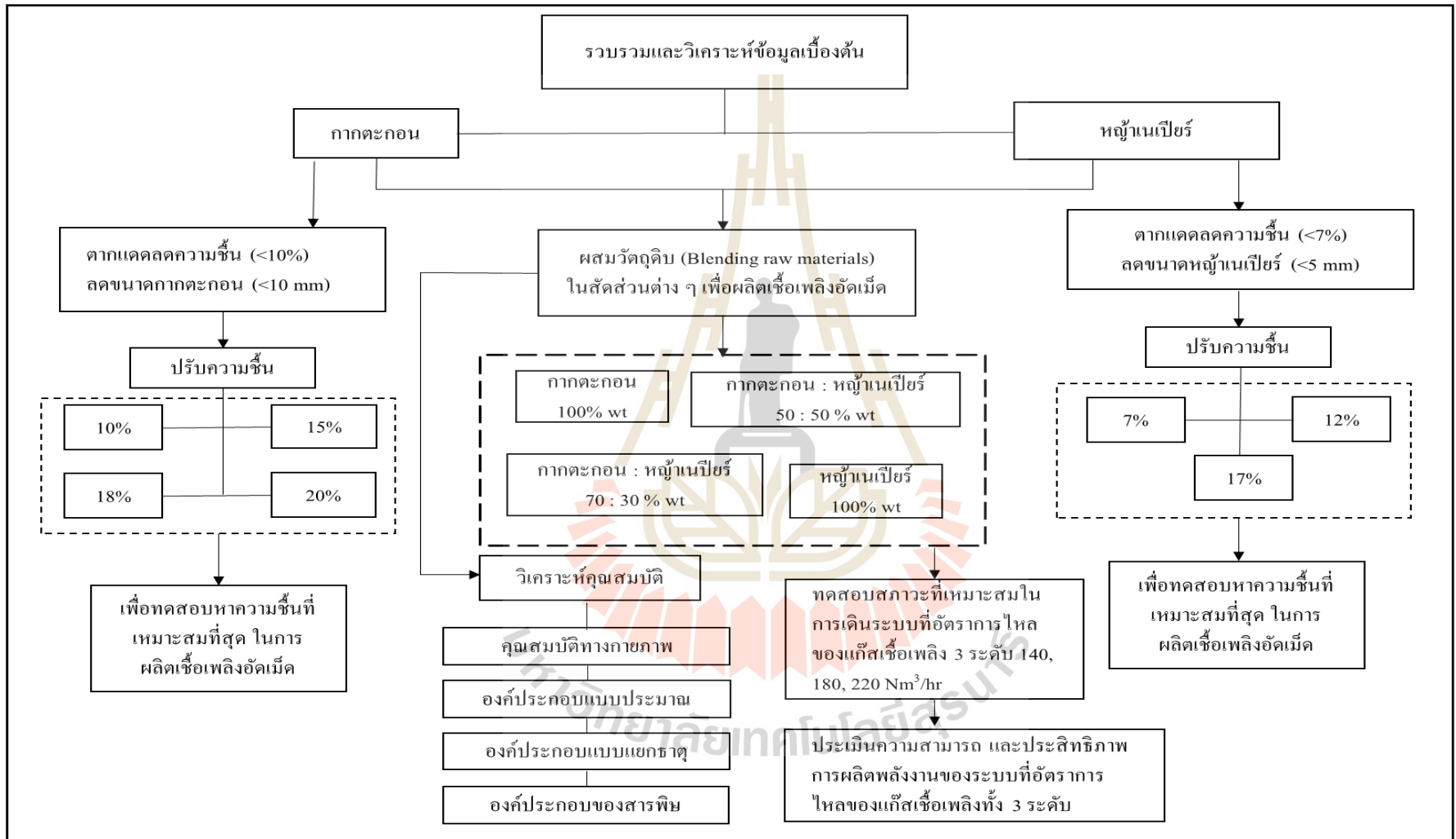
โดยทำการเตรียมเชื้อเพลิงด้วยวิธีการอัดแบบร้อน ด้วยเครื่องอัดแบบแม่พิมพ์วงแหวน (Mill ring die pelletizer) และทำการศึกษาความชื้นที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ 1) การผลิตเชื้อเพลิงกากตะกอนอัดเม็ด โดยนำกากตะกอนมาผ่านการลดความชื้นและลดขนาดด้วยการตากแดดบนพื้นซีเมนต์และใช้เครื่องบดหยาบ ตามลำดับ หลังจากนั้นทำการปรับความชื้น 4 ระดับ คือ 10, 15, 18 และ 20%wb และ 2) การนำหญ้าเนเปียร์ที่ผ่านการลดขนาดด้วยเครื่องบดหยาบและละเอียด รวมทั้งลดความชื้นด้วยการตากแดดแล้วนำมาผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดโดยทำการปรับความชื้น 3 ระดับ คือ 7, 12 และ 17%wb หลังจากนั้นทำการเปรียบเทียบลักษณะเบื้องต้น คุณสมบัติทางกายภาพและทางด้านการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัตถุดิบทั้งสองเพื่อเลือกความชื้นที่เหมาะสมที่สุดในการขึ้นรูปเชื้อเพลิงอัดเม็ดและนำมาใช้ในการผสมวัตถุดิบในลำดับต่อไป

### 3.2 ขั้นตอนการวิจัย

การศึกษาคุณสมบัติทางเคมี การเตรียมวัตถุดิบสำหรับผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดและการผลิตพลังงานจากกากตะกอนของระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลัง และหญ้าเนเปียร์พันธุ์ปากช่อง 1 ที่ได้จากแปลงปลูกหญ้าเนเปียร์ภายในฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ซึ่งในส่วนของการศึกษาการนำวัตถุดิบทั้งสองมาผสมกันในรูปแบบการผสมวัตถุดิบ (Blending raw materials) และผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด รวมทั้งคุณสมบัติเบื้องต้นของเม็ดเชื้อเพลิง คุณสมบัติทางกายภาพและทางด้านการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงอัดเม็ด แสดงในรูปที่ 3.2 ทั้งนี้ในขั้นตอนการหาสถานะที่เหมาะสมและการศึกษาประสิทธิภาพการผลิตพลังงานของเชื้อเพลิงอัดเม็ด จะแสดงในรูปที่ 3.3







รูปที่ 3.1 ภาพรวมขั้นตอนการศึกษา



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการศึกษาการเตรียมกากตะกอนและหญ้าเนเปียร์เพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ด  
และศึกษาลักษณะ รวมทั้งคุณสมบัติของเชื้อเพลิงอัดเม็ด



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการหาสภาวะที่เหมาะสมและการศึกษาประสิทธิภาพการผลิตพลังงาน

### 3.3 การศึกษาคุณสมบัติของวัตถุดิบ

#### 3.3.1 สมบัติทางกายภาพ (Physical properties)

1) ความชื้น คือเปอร์เซ็นต์ของน้ำต่อน้ำหนักวัตถุดิบ โดยวิธีการวิเคราะห์ความชื้นจะคิดเป็นเปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก หรือ Wet basis ซึ่งเชื้อเพลิงที่มีความชื้นต่ำจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้และแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้มีคุณภาพเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากความชื้นมีผลโดยตรงต่อปฏิกิริยาการเผาไหม้ (ภาคผนวก)

2) ความหนาแน่นรวม (Bulk density) คือ น้ำหนักต่อปริมาตรของชีวมวล โดยวิเคราะห์ความหนาแน่น 2 แบบ คือ 1. ความหนาแน่นรวมก่อนอัดแท่ง ทำโดยการวัดน้ำหนักของวัตถุดิบต่อหน่วยปริมาตรที่แน่นอน และ 2. ความหนาแน่นรวมหลังการอัดเม็ด ทำโดยการวัดน้ำหนักต่อปริมาตรของเม็ดเชื้อเพลิง ในการศึกษาจะใช้ความหนาแน่นเป็นแนวทางในการขนส่งและการเก็บรักษาเชื้อเพลิงรวมทั้งใช้ประเมินความสามารถในการเดินระบบ (ภาคผนวก)

#### 3.3.2 การศึกษาสมบัติแบบประมาณ (Proximate analysis)

1) ความชื้น (Moisture) คือเปอร์เซ็นต์ของน้ำต่อน้ำหนักกากตะกอนซึ่งเป็นการวัดความชื้นที่ผ่านการอบแห้งด้วยความร้อน โดยทั่วไปเรียกว่าเปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง หรือ Dry basis การวิเคราะห์โดยใช้มาตรฐาน ASTM D7582 / TGA 701 (ภาคผนวก)

2) เถ้า (Ash) คือปริมาณของแข็งอนินทรีย์ที่คงเหลืออยู่ ภายหลังจากการเผาไหม้ซึ่งปริมาณเถ้าในชีวมวลสามารถนำมาเป็นข้อมูลในการคาดคะเนคุณสมบัติของการเป็นเชื้อเพลิงได้ เช่น ถ้ามีปริมาณเถ้าสูง ก็มีแนวโน้มที่ชีวมวลจะมีค่าความร้อนต่ำ การวิเคราะห์ใช้มาตรฐาน ASTM D7582 / TGA 701 (ภาคผนวก)

3) ปริมาณสารระเหย (Volatile matter) คือปริมาณสารระเหยที่มีอยู่ในชีวมวลซึ่งปริมาณสารระเหยในชีวมวลสามารถนำมาเป็นข้อมูลในการคาดคะเนคุณสมบัติของการเป็นเชื้อเพลิงได้ เช่น ถ้ามีปริมาณสารระเหยสูง ก็มีแนวโน้มที่ชีวมวลจะมีค่าความร้อนสูงตามไปด้วย โดยวิธีการวิเคราะห์ใช้มาตรฐาน ASTM D7582 / TGA 701 (ภาคผนวก)

4) ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) คือ ปริมาณองค์ประกอบคาร์บอนคงตัวที่มีอยู่ในชีวมวล ซึ่งปริมาณคาร์บอนคงตัวในชีวมวลสามารถนำมาเป็นข้อมูลในการคาดคะเนคุณสมบัติของการเป็นเชื้อเพลิง เช่น ถ้ามีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูง ก็มีแนวโน้มที่จะได้ถ่านชาร์สูง โดยคำนวณจากร้อยละกับผลต่างระหว่าง ความชื้น เถ้า และปริมาณสารระเหย (By difference)

5) ค่าความร้อน (Heating value) เป็นปริมาณความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ด้วยอากาศของชีวมวลแต่ละชนิด โดยทั่วไปจะแสดงในรูปของปริมาณความร้อนต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักหรือหนึ่งหน่วยปริมาตร เช่น MJ/kg, MJ/CM และ MJ/N.CM สำหรับของแข็ง ของเหลว และก๊าซ (อ้างอิงที่อุณหภูมิ 0 °C และความดัน 1.01325 Bar) ตามลำดับ ซึ่งค่าความร้อนจะเป็นค่าที่บ่งบอก

ว่าชีวมวลนั้น ๆ มีความเหมาะสมที่จะนำมาแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงหรือไม่ โดยการวิเคราะห์จะใช้เครื่อง Automatic calorimeter IKA รุ่น 5000 PKG (ภาคผนวก)

### 3.3.3 การศึกษาแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis)

เพื่อหาปริมาณธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ และออกซิเจน โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ (CHN628, 628S Truspec Micro O) ณ ห้องปฏิบัติการของอาคารศูนย์เครื่องมือ (F11) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งเป็นเครื่องมือวิเคราะห์แบบอัตโนมัติสำหรับหาปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์ ส่วนธาตุออกซิเจนใช้วิธีการคำนวณโดยหาจากผลต่างของธาตุ (ภาคผนวก) เนื่องจากธาตุต่าง ๆ เหล่านี้จะเป็นตัวบ่งชี้ถึงผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ซึ่งธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน จะเป็นธาตุหลักที่จะถูกเปลี่ยนไปเป็นแก๊สเชื้อเพลิงโดยปฏิกิริยาอุณหภูมิในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน และปริมาณของธาตุซัลเฟอร์บ่งชี้ได้ถึงปริมาณแก๊สพิษที่จะเกิดขึ้นในรูป  $SO_2$  และ  $H_2S$

### 3.3.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบของสารพิษ (Toxic elements)

เพื่อการศึกษาองค์ประกอบของโลหะหนัก เช่น ทองแดง (Cu) เหล็ก (Fe) สังกะสี (Zn) และคลอรีน (Cl) ในตัวอย่าง เนื่องจากธาตุต่าง ๆ เหล่านี้จะถูกพิจารณาว่าเป็นแหล่งกำเนิดของมลพิษที่อาจเกิดขึ้นในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน การวิเคราะห์จะใช้เครื่อง X-ray fluorescence energy dispersive spectrometer model XGT-5200 ณ ห้องปฏิบัติการของอาคารศูนย์เครื่องมือ (F11) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

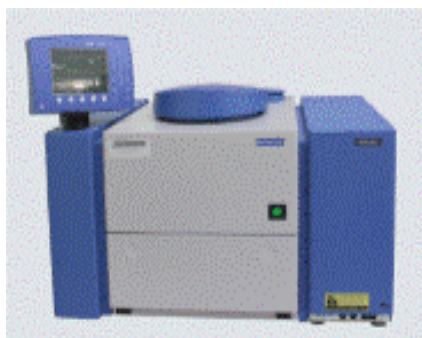
สำหรับเครื่องมือหลักที่ใช้วิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ องค์ประกอบแบบแยกธาตุ และองค์ประกอบของสารพิษ แสดงดังรูปที่ 3.4



ก. เตาอบ Drying oven  
วิเคราะห์ความชื้น



ข. เตาเผา Muffle furnace  
วิเคราะห์ปริมาณเถ้า และสารระเหย



ค. เครื่อง Bomb calorimeter  
วิเคราะห์ค่าความร้อน



ง. เครื่อง CHNS elemental analyzer  
วิเคราะห์ปริมาณธาตุ C H N S



จ. เครื่อง WDXRF  
วิเคราะห์ปริมาณธาตุ Cu Fe Zn Cl

รูปที่ 3.4 เครื่องมือหลักสำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบของวัตถุดิบ

### 3.4 ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ

#### 3.4.1 การลดขนาดและความชื้น

วัตถุดิบที่ใช้ในการทดสอบครั้งนี้ คือ กากตะกอนน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลัง บริษัท สงวนวงษ์ อุตสาหกรรม จำกัด และ หญ้าเนเปียร์ พันธุ์ปากช่อง 1 ที่ได้มาจากแปลงปลูกหญ้าเนเปียร์ภายในฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มีความชื้นเริ่มต้นสูงและมีขนาดที่ยังไม่เหมาะสมสำหรับผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด จึงจำเป็นต้องผ่านการเตรียมวัตถุดิบเสียก่อน ซึ่งในส่วนของกากตะกอนน้ำเสียจะทำการลดความชื้นโดยใช้วิธีการตากแดดบนพื้นซีเมนต์ (Sun drying) เพื่อให้ได้ความชื้นต่ำกว่า 10%wb และลดขนาดด้วยเครื่องบดหยาบให้ได้ขนาดที่ต่ำกว่า 10 mm หลังจากนั้นทำการปรับความชื้นของกากตะกอน 4 ระดับ คือ 10, 15, 18 และ 20%wb สำหรับหญ้าเนเปียร์ที่ได้จากแปลงปลูกจะใช้เครื่องตัดสับหญ้าเนเปียร์ (Single row maize chopper) แสดงดัง

รูปที่ 3.5 (ก) ในการลดขนาดเบื้องต้นก่อนจะนำมาตากแดดบนพื้นซีเมนต์ (Sun drying) ให้ได้ความชื้นที่ต่ำกว่า 7%wb และนำมาลดขนาดอีกครั้งโดยใช้เครื่องบดละเอียด (Hammer mill) แสดงดังรูป 3.5 (ข) เพื่อให้ได้ขนาดที่ต่ำกว่า 5 mm หลังจากนั้นทำการปรับความชื้นของหญ้าเนเปียร์บดละเอียด 3 ระดับ คือ 7, 12 และ 17%wb



ก. เครื่องตัดสับหญ้าเนเปียร์

(Single row maize chopper)

ข. เครื่องบดละเอียด (Hammer mill)

รูปที่ 3.5 เครื่องจักรที่ใช้ในการเตรียมหญ้าเนเปียร์

### 3.4.2 การอัดเม็ดเชื้อเพลิง

กากตะกอนและหญ้าเนเปียร์ที่ผ่านการเตรียมวัตถุดิบแล้ว จะมีลักษณะเป็นชิ้นละเอียดยังไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้งาน ต้องทำการอัดเม็ด (Pellets) ให้เป็นแท่งเชื้อเพลิงแข็งเสียก่อน โดยจะทำการอัดเม็ดกากตะกอนและหญ้าเนเปียร์ที่ผ่านการปรับความชื้นมาแล้ว เพื่อหาสถานะความชื้นที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดของวัตถุดิบทั้งสองชนิดนี้

ในการศึกษาในครั้งนี้จะใช้เครื่องอัดเม็ดแบบแม่พิมพ์วงแหวน (Mill ring die pelletizer) กำลังมอเตอร์ 200 kW ความเร็วรอบของมอเตอร์ 1,485 rpm แสดงในรูปที่ 3.6 ซึ่งผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm กำลังการผลิตของเครื่องเท่ากับ 800 – 1,000 kg/hr



รูปที่ 3.6 เครื่องอัดเม็ดแบบแม่พิมพ์วงแหวน (Mill ring die pelletizer)

### 3.5 ขั้นตอนการทดลอง

#### 3.5.1 การปรับความชื้นวัตถุดิบ

นำกากตะกอนและหญ้าเนเปียร์ที่ผ่านการเตรียมวัตถุดิบมาปรับความชื้นโดยการเติมน้ำให้ได้ตามความชื้นที่กำหนด ซึ่งปริมาณน้ำที่ใช้ถูกคำนวณได้จากน้ำหนักสุดท้ายลบด้วยน้ำหนักเริ่มต้นที่ได้จากสมการที่ (3.1) และสมการที่ (3.2) ตามลำดับ

$$W_f = \frac{W_i(1 - M_i)}{(1 - M_f)} \quad (3.1)$$

$$W_{wa} = W_f - W_i \quad (3.2)$$

|     |          |     |                            |
|-----|----------|-----|----------------------------|
| โดย | $W_{wa}$ | คือ | น้ำหนักน้ำที่ต้องเติม (kg) |
|     | $W_f$    | คือ | น้ำหนักสุดท้าย (kg)        |
|     | $W_i$    | คือ | น้ำหนักเริ่มต้น (kg)       |
|     | $M_i$    | คือ | ความชื้นเริ่มต้น, decimal  |
|     | $M_f$    | คือ | ความชื้นสุดท้าย, decimal   |



### 3.5.2 การประเมินลักษณะเบื้องต้นของเชื้อเพลิงอัดเม็ด

นำเชื้อเพลิงอัดเม็ดของกากตะกอนและหญ้าเนเปียร์ที่ได้จากการปรับความชื้นตามที่กำหนด มาประเมินลักษณะเบื้องต้นของเชื้อเพลิงอัดเม็ดโดยแบ่งการประเมินออกเป็น 5 รูปแบบ ดังนี้

1. รูปร่าง (ตรง/งอเล็กน้อย/โค้ง), 2. ลักษณะผิวที่ปรากฏ (เรียบ/ไม่เรียบ), 3. ความสามารถในการอัดเม็ด (วัตถุดิบออกมาง่ายอย่างสม่ำเสมอ จะถือว่าอยู่ในเกณฑ์ดี แต่หากเคลื่อนออกมายาก ไม่สม่ำเสมอจะถือว่าอยู่ในเกณฑ์ไม่ดี และหากวัตถุดิบไม่สามารถเคลื่อนออกมาจากกระบอกอัดได้ ถือว่าไม่สามารถอัดเม็ดได้), 4. ความสามารถในการขึ้นรูป (ภายหลังจากการอัดเม็ดวัตถุดิบแล้วยังคงรูปทรงกระบอกอยู่ได้ แสดงว่ามีความสามารถในการขึ้นรูปในเกณฑ์ดี แต่หากวัตถุดิบไม่สามารถคงรูปทรงกระบอกได้จะถือว่าอยู่ในเกณฑ์ไม่ดี และ 5. การเกิดรอยร้าว (น้อย/ปานกลาง/มาก)

### 3.5.3 วิเคราะห์คุณสมบัติเชื้อเพลิงอัดเม็ด

หลังจากประเมินลักษณะเบื้องต้นของเชื้อเพลิงอัดเม็ดแล้ว ต่อไปจะนำเชื้อเพลิงอัดเม็ดดังกล่าวมาวิเคราะห์คุณสมบัติของเชื้อเพลิงอัดเม็ด ได้แก่ เปอร์เซ็นต์ผลผลิต ค่าความหนาแน่นรวม ค่าความคงทน ค่าความต้านทานน้ำ และอัตราการใช้พลังงานของการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด เป็นต้น

3.5.3.1 เปอร์เซ็นต์ผลผลิต คือ เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักเชื้อเพลิงอัดเม็ดต่อน้ำหนักของวัตถุดิบที่ผสมกับน้ำ โดยหาได้จากสมการที่ (3.3) ซึ่งเปอร์เซ็นต์ผลผลิตนี้จะเป็นตัวบ่งชี้ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องอัดเม็ดและปริมาณของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ได้เทียบกับปริมาณวัตถุดิบที่ป้อนเข้าสู่ระบบ

$$\text{เปอร์เซ็นต์ผลผลิต} = \frac{\text{น้ำหนักเชื้อเพลิงอัดเม็ด}}{\text{น้ำหนักของวัตถุดิบที่ผสมกับน้ำ}} \times 100 \quad (3.3)$$

3.5.3.2 ค่าความชื้น (M) คือเปอร์เซ็นต์ของน้ำต่อน้ำหนักเชื้อเพลิงอัดเม็ด โดยหาได้จากสมการที่ (3.4) ซึ่งเป็นค่าความชื้นของวัตถุดิบที่ผ่านการอัดเม็ดเชื้อเพลิงแล้ว เพื่อเป็นการทดสอบการสูญเสียความชื้นในตัวเชื้อเพลิงว่ามีมากน้อยเพียงใด

$$M = \frac{W_1 - W_2}{W} \times 100 \quad (3.4)$$

|     |       |     |   |
|-----|-------|-----|---|
| โดย | M     | คือ | ร้อยละของความชื้นมาตรฐานเปียก   |
|     | $W_1$ | คือ | น้ำหนักของถาดอลูมิเนียมพร้อมฝารวมกับน้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองก่อนทำการอบ (g) |
|     | $W_2$ | คือ | น้ำหนักของถาดอลูมิเนียมพร้อมฝารวมกับน้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองหลังทำการอบ (g) |
|     | W     | คือ | น้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง (g)  |

3.5.3.3 ค่าความหนาแน่นรวม (Bulk density) เป็นการวิเคราะห์อัตราส่วนมวลต่อปริมาตรของเชื้อเพลิงอัดเม็ด มีหน่วยเป็น กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ( $\text{kg/m}^3$ ) โดยหาได้จากสมการที่ (3.5) ซึ่งเป็นการหาค่าความหนาแน่นรวมของเชื้อเพลิงอัดเม็ดว่ามีค่าใกล้เคียงกับมาตรฐานความหนาแน่นของเชื้อเพลิงชีวมวลหรือไม่

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (3.5)$$

|     |        |     |   |
|-----|--------|-----|---|
| โดย | $\rho$ | คือ | ค่าความหนาแน่นรวมของเชื้อเพลิงอัดเม็ด ( $\text{kg/m}^3$ ) |
|     | m      | คือ | มวลของเชื้อเพลิงอัดเม็ด (kg)                              |
|     | v      | คือ | ปริมาตรของเชื้อเพลิงอัดเม็ด ( $\text{m}^3$ )              |

3.5.3.4 ค่าความคงทน เป็นค่ามาตรฐานที่ใช้กำหนดความสามารถในการคงทนต่อการสึกหรอ และการสลายตัวของเชื้อเพลิงอัดเม็ดรวมทั้งสามารถคงรูปร่างเม็ดเชื้อเพลิงจากการขนส่งหรือการจับต้อง การทดสอบประกอบด้วยแผ่นเหล็กที่ม้วนเป็นทรงกระบอก ทำจากวัสดุที่แข็งมีพื้นผิวที่เรียบและแบน ด้านในของทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 615 mm ความยาว 600 mm ภายในทรงกระบอกมีใบกวนขนาดความยาว 600 mm ความกว้าง 200 mm ซึ่งใบกวนมีลักษณะโค้งมน ไม่แหลมคมเพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบต่อการตัดเม็ดเชื้อเพลิงขณะทดสอบ (Williams et al., 2018) แสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 เครื่องทดสอบค่าความคงทน (Pellet durability tester)

วิธีการทดสอบมีดังนี้ คือ การนำตัวอย่างไปร่อนด้วยตะแกรงจนหมดฝุ่น และทำการชั่งน้ำหนักตัวอย่างที่ร่อนแล้ว  $500 \pm 10$  g บรรจุลงในเครื่องทดสอบ หลังจากนั้นเริ่มหมุนกระบอกของเครื่องทดสอบด้วยความเร็ว  $50 \pm 2$  rpm จำนวน 500 rotations และนำตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบมาร่อนด้วยตะแกรงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.15 mm หลังจากร่อนด้วยตะแกรงแล้วทำการชั่งน้ำหนักตัวอย่างที่เหลืออยู่บนตะแกรง ซึ่งการทดสอบค่าความคงทนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดแสดงดังสมการที่ (3.6)

$$D_U = 100 \times \frac{WPW}{IW} \quad (3.6)$$

โดย  $D_U$  คือ ความคงทน (% w/w)  
 $WPW$  คือ มวลตัวอย่างที่ค้างบนตะแกรงหลังการทดสอบ (g)  
 $IW$  คือ มวลตัวอย่างที่ร่อนแล้วก่อนเริ่มการทดสอบ (g)

### 3.5.3.5 ค่าความต้านทานน้ำ

การทดสอบค่าความต้านทานน้ำเป็นการวิเคราะห์ความสามารถของเชื้อเพลิงอัดเม็ดในการทนต่อสภาพแวดล้อม เช่น น้ำและความชื้น ซึ่งสามารถใช้ประเมินประเภที่พื้นที่ในการเก็บรักษาเชื้อเพลิงอัดเม็ดได้ ดังแสดงในสมการที่ (3.7) และ (3.8) ตามลำดับ (ณัฐกิตต์ และคณะ, 2560)

$$W_w = \frac{W_A - W_B}{W_B} \times 100 \quad (3.7)$$

$$W_R = 100 - W_w \quad (3.8)$$

|     |       |     |   |
|-----|-------|-----|---|
| โดย | $W_w$ | คือ | ร้อยละน้ำหนักของน้ำในเชื้อเพลิงอัดเม็ด (%)        |
|     | $W_B$ | คือ | น้ำหนักเชื้อเพลิงอัดเม็ดก่อนแช่น้ำ (kg)           |
|     | $W_A$ | คือ | น้ำหนักเชื้อเพลิงอัดเม็ดหลังแช่น้ำ 30 วินาที (kg) |
|     | $W_R$ | คือ | ค่าความต้านทานน้ำของเชื้อเพลิงอัดเม็ด (%)         |

### 3.5.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงอัดเม็ด

หลังจากวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงอัดเม็ดแล้ว ต่อมาจะนำเชื้อเพลิงอัดเม็ดดังกล่าวมาวิเคราะห์คุณสมบัติทางการเผาไหม้ ได้แก่ การหาเวลาในการจุดติดไฟ และการหาระยะเวลาการเผาไหม้ ดังต่อไปนี้

#### 3.5.4.1 การหาเวลาในการจุดติดไฟ

นำเชื้อเพลิงอัดเม็ดเข้าเตาเผาอุณหภูมิสูง ยี่ห้อ Carbolite รุ่น CWF12-23 ที่อุณหภูมิ 800 °C เปิดดูเตาเผาตามเวลาที่เหมาะสม และบันทึกเวลาที่สังเกตเห็นว่าเชื้อเพลิงอัดเม็ดเริ่มติดไฟ (ชมธิตา ชื่นนิยม, 2553)

#### 3.5.4.2 การหาระยะเวลาในการเผาไหม้

นำเชื้อเพลิงอัดเม็ดไปจุดไฟในเตาอั้งโล่ โดยใช้แอลกอฮอล์ประมาณ 20 ml ต่อครั้งในการจุดไฟ และเปิดพัดลมเป่าเข้าที่ช่องหน้าต่างของเตาอั้งโล่ เพื่อให้เหมือนกับสภาวะการเผาไหม้จริง พร้อมทำการจับเวลาตั้งแต่เชื้อเพลิงอัดเม็ดเริ่มติดไฟจนกระทั่งเชื้อเพลิงอัดเม็ดเผาไหม้จนหมด (ชมธิตา ชื่นนิยม, 2553)

### 3.5.5 อัตราการใช้พลังงานในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด

โดยสามารถคำนวณอัตราการใช้กระแสไฟฟ้ามอเตอร์ 3 เฟสของเครื่องอัดเม็ดแบบแม่พิมพ์วงแหวน (Mill ring die pelletizer) ได้จากสมการที่ (3.9)

$$P = \sqrt{3} \times V \times I \times PF \times \text{eff.} \quad (3.9)$$

|     |     |     |                    |
|-----|-----|-----|--------------------|
| โดย | $P$ | คือ | กำลังไฟฟ้า (Watt)  |
|     | $V$ | คือ | แรงดันไฟฟ้า (Volt) |

|      |     |                             |
|------|-----|-----------------------------|
| I    | คือ | กระแสมอเตอร์ (Amp)          |
| PF   | คือ | ตัวประกอบกำลัง, decimal     |
| eff. | คือ | ประสิทธิภาพมอเตอร์, decimal |

### 3.6 อุปกรณ์และเครื่องมือ

#### 3.6.1 โรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ใช้เป็นโรงงานสำหรับการทดสอบ ซึ่งใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันชนิดไหลลง (Downdraft gasification) ขนาดกำลังการผลิต 100 kW ในส่วนโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มีส่วนประกอบหลัก 4 ส่วนคือ 1) ชุดเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง 2) ระบบทำความสะอาดแก๊ส 3) ระบบบำบัดน้ำเสีย และ 4) ระบบไฟฟ้าควบคุมเครื่องจักร โดยแผนผังกระบวนการของโรงไฟฟ้าชีวมวล แสดงไว้ในรูปที่ 3.8 และแสดงแผนผังกระบวนการทำงานของ Fixed bed downdraft gasification ดังรูปที่ 3.9 โดยส่วนประกอบที่สำคัญของต้นแบบโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็ก มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

##### 1) ชุดเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง

เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง เป็นเตาปฏิกรณ์ชนิด (Open-top) Fixed bed downdraft gasifier ภายในติดตั้งฉนวนกันความร้อนซึ่งทำจากวัสดุทนความร้อนทำหน้าที่เก็บรักษาอุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้และลดการสูญเสียความร้อน ส่วนภายนอกทำจากวัสดุโลหะม้วนกลม ด้านบนของเตาประกอบด้วย Hopper feeder เพื่อรองรับเชื้อเพลิง และมีฝาปิด รวมทั้งมีช่องไว้ให้น้ำทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้อากาศเข้า-ออกจากเตาขณะ Shut down ระบบ ด้านข้างของเตาจะมีทางเข้าของอากาศหลายส่วนเพื่อป้อนอากาศและควบคุมอากาศเข้าสู่เตาสำหรับใช้ในการเผาไหม้ โดยด้านล่างของเตามีชุดมอเตอร์เกียร์ขับเคลื่อนสกรูลำเลียงที่สามารถควบคุมการลำเลียงเชื้อเพลิงที่ได้จากการเผาไหม้ออกจากเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง แสดงไว้ในรูปที่ 3.10 (ก)

##### 2) ระบบทำความสะอาดแก๊ส (Gas treatment unit)

2.1 Cyclone collector เป็นอุปกรณ์แยกฝุ่นหรืออนุภาคขนาดเล็กออกจากแก๊สเชื้อเพลิงโดยใช้หลักการตกฝุ่นด้วยแรงหนีศูนย์กลางทำให้เกิดแก๊สหมุนวน (Vortex) จากนั้นฝุ่นหรืออนุภาคขนาดเล็กจะตกลงสู่ด้านล่างของ Cyclone collector ส่วนแก๊สจะหมุนวนอยู่ด้านบนแล้วไหลตามท่อไปสู่ระบบ Water scrubber และ Chiller scrubber ซึ่งเป็นส่วนประกอบลำดับถัดไป แสดงไว้ในรูปที่ 3.10 (ข)

2.2 Water scrubber และ Chiller scrubber เป็นอุปกรณ์ดักฝุ่นและอนุภาคขนาดเล็กออกจากแก๊สเชื้อเพลิงโดยใช้ละอองน้ำที่อุณหภูมิประมาณ 32 °C ส่วน Chiller scrubber

เป็นอุปกรณ์ดักฝุ่นและน้ำมันดิน (Tars) โดยใช้น้ำเย็นที่อุณหภูมิประมาณ 10 °C ซึ่งไอระเหยจากยางเหนียวของน้ำมันดินจะถูกควบแน่นลงมาพร้อมกับน้ำ ลักษณะของ Water scrubber และ Chiller scrubber แสดงไว้ในรูปที่ 3.10 (ค)

### 3) ถังพักน้ำระบบบำบัดน้ำเสีย (Wastewater treatment system)

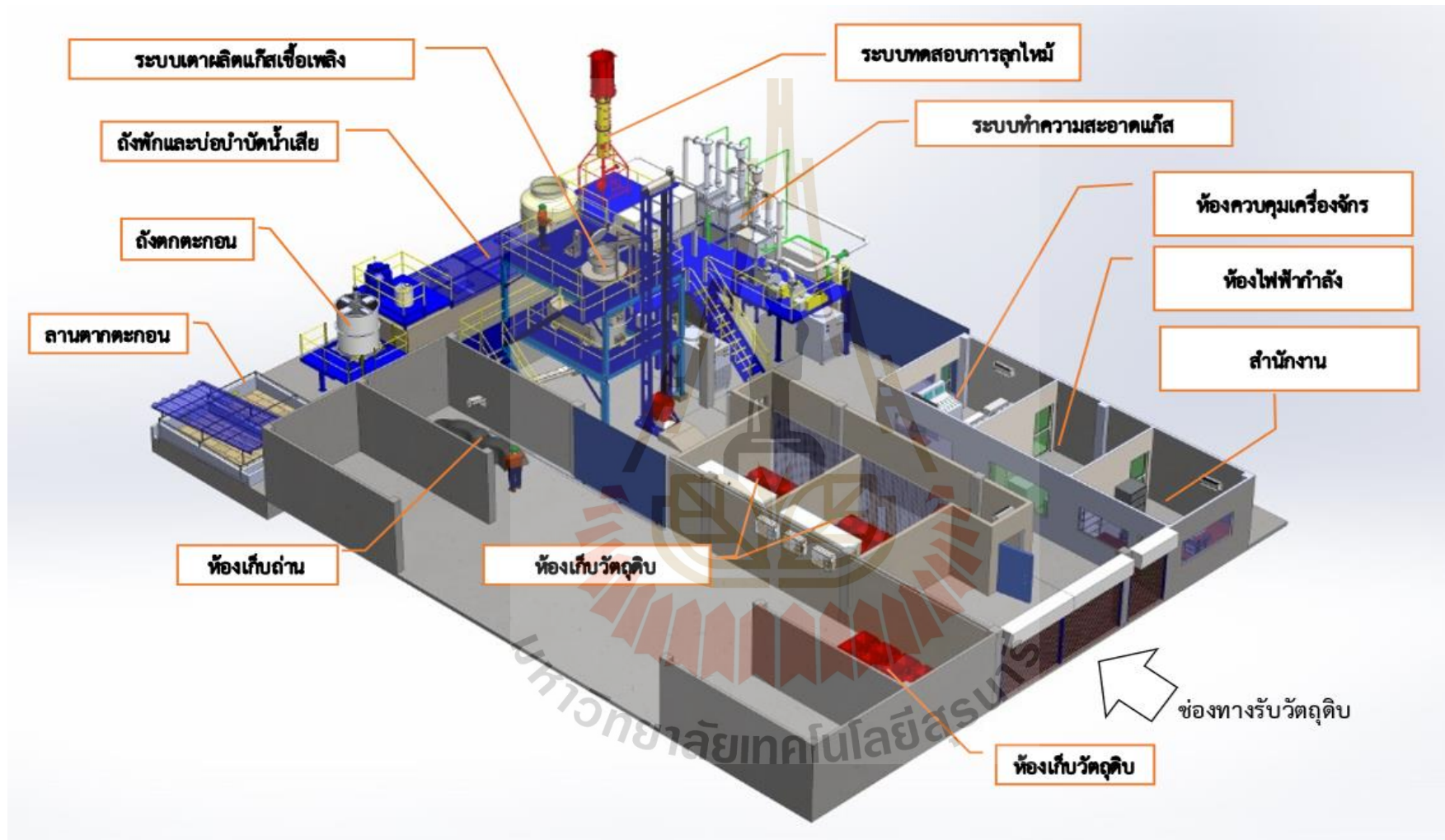
ระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้เป็นระบบปิด โดยมีถังพักน้ำ หรือ ระบบ Buffer tank ที่ถูกออกแบบสำหรับรองรับน้ำจากระบบทำความสะอาดแก๊สทั้ง Water scrubber และ Chiller scrubber ถ้าหากต้องการบำบัดน้ำเสียจะหมุนเวียนน้ำจาก Buffer tank แล้วไปบำบัดโดยใช้วิธีทางเคมี (Chemical treatment) ซึ่งใช้หลักการโคแอกกูเลชัน (Coagulation) ใน Flocculation tank แสดงส่วนประกอบและหน้าที่การทำงาน ดังนี้

3.1 Buffer tank ประกอบด้วยถัง 3 ใบ คือ 1) ถังรองรับน้ำที่ผ่านการบำบัดจาก Flocculation tank, 2) ถังรองรับน้ำที่ Overflow มาจากถังพักน้ำเสีย และ 3) ถังพักน้ำเสียซึ่งเป็นน้ำที่มาจาก Water scrubber และ Chiller scrubber แสดงไว้ในรูปที่ 3.10 (ง)

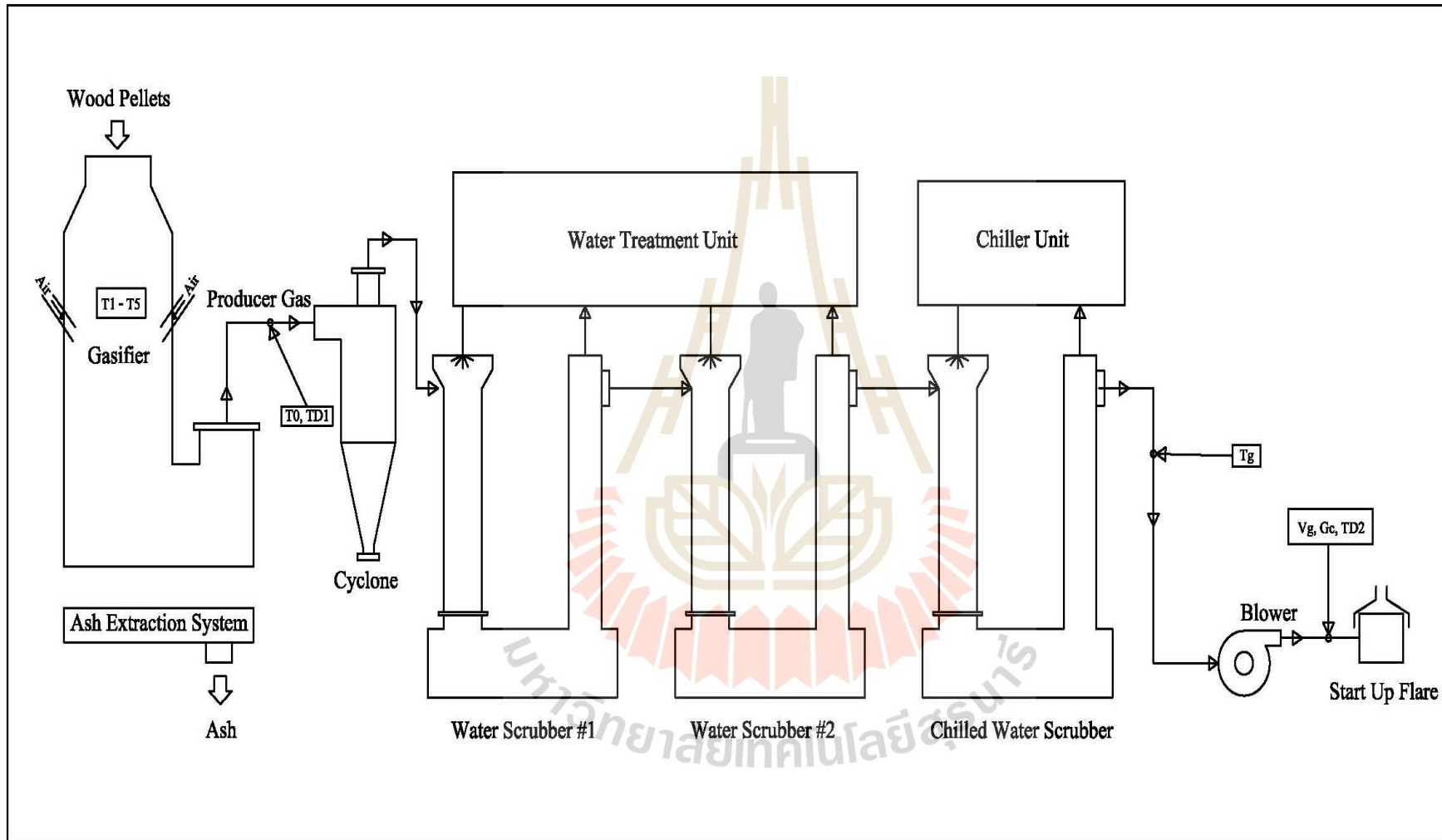
3.2 Flocculation tank ทำหน้าที่เป็นถังบำบัดน้ำเสีย โดยน้ำเสียจะถูกส่งมาจาก Buffer tank เพื่อทำการบำบัดโดยวิธีทางเคมี (Chemical treatment) ซึ่งน้ำที่ผ่านการบำบัดจะถูกหมุนเวียนกลับไปใช้ในระบบต่อไป แสดงไว้ในรูปที่ 3.10 (จ)

4) พัดลมดูด-ส่งแก๊ส (Gas blower) และระบบทดสอบการลุกไหม้ของแก๊สเชื้อเพลิง เป็นอุปกรณ์สำหรับดูดแก๊สเชื้อเพลิงที่ผ่านการทำความสะอาดมาแล้วจากระบบทำความสะอาดแก๊สเพื่อไปใช้ประโยชน์ต่อไป ในงานวิจัยนี้จะนำแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้นั้นผ่านเข้าไปยังระบบทดสอบการลุกไหม้ของแก๊สเชื้อเพลิง (Start-up flare) และทำการเผาขยะแก๊สทิ้ง แสดงไว้ในรูปที่ 3.10 (ฉ)

โดยหลักการทำงานของระบบเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสำหรับระบบแก๊สซิพีเคชั่น มีดังนี้คือ เชื้อเพลิงจะถูกลำเลียงสู่ถังพักเพื่อรอที่จะเข้าสู่เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง หลังจากนั้นเชื้อเพลิงจะถูกปล่อยลงสู่เตาและจะทำให้เกิดปฏิกิริยาขึ้น 4 โซนคือ 1. โซนอบแห้ง (Drying zone), 2. โซนไพโรไลซิส (Pyrolysis zone), 3. โซนการเผาไหม้ (Combustion zone) และ 4. โซนรีดักชัน (Reduction zone) สำหรับผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Producer gas) โดยแก๊สเชื้อเพลิงที่เกิดขึ้นจะไหลผ่านทางออกด้านล่างไปสู่ระบบทำความสะอาดแก๊ส (Gas cleaning unit) คือ ไซโคลนดักฝุ่น (Cyclone collector) ระบบสครับเบอร์ (Water scrubber) และ ระบบซิลเลอร์สครับเบอร์ (Chiller scrubber) จากนั้นแก๊สเชื้อเพลิงจะผ่านไปยังระบบทดสอบการเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิง (Start-up flare) ต่อไป



รูปที่ 3.8 แผนผังกระบวนการของโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 3.9 แผนผังกระบวนการทำงานของ Fixed bed downdraft gasification และตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัด/เก็บข้อมูล





ก. เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Downdraft gasifier)



ข. ไซโคลนดักฝุ่น (Cyclone collector)



ค. Water scrubber and Chiller scrubber Unit



ง. ถังรวบรวมน้ำเสีย (Buffer tank)



จ. ถังบำบัดน้ำเสีย (Flocculation tank)

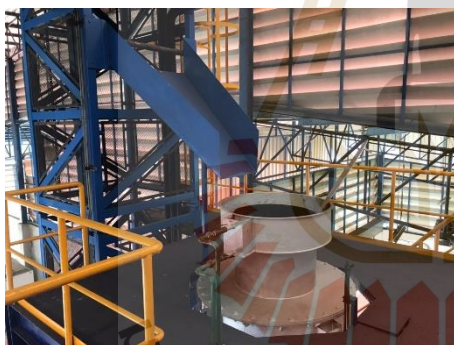


ฉ. ระบบทดสอบการลุกไหม้ (Start up flare)

รูปที่ 3.10 ส่วนประกอบของโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็ก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

### 3.6.2 ขั้นตอนการเดินระบบของโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็ก

- 1) ทำการเปิดฝาของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง และทำการปล่อยน้ำที่อยู่ด้านบนของเตาซึ่งทำหน้าที่ป้องกันการไหลเข้าออกของอากาศในช่วงที่ดับเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง และทำการเติมวัสดุดิบให้อยู่ในระดับที่กำหนด ดังแสดงในรูปที่ 3.11 (ก)
- 2) ทำการเปิดช่องทางเข้าของอากาศรอบตัวเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงเพื่อให้อากาศไหลเข้าสู่ภายในของตัวเตา ดังแสดงในรูป 3.11 (ข)
- 3) กดเปิดสวิตช์ควบคุมการทำงานของระบบ ดังแสดงในรูปที่ 3.11 (ค) และทำการจุดเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงในตำแหน่ง Ignition port ดังแสดงในรูปที่ 3.11 (ง)
- 4) ภายหลังจากจุดเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงประมาณ 2 ชั่วโมงทำการเปิด Flare valve เพื่อปล่อยแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ออกทางระบบทดสอบการลุกไหม้ของแก๊สเชื้อเพลิง (Start up flare) ดังแสดงในรูปที่ 3.11 (จ)
- 5) สำหรับการเดินระบบอย่างต่อเนื่อง ต้องทำการเติมเชื้อเพลิงพร้อมทั้งนำซีเถ้าออกจากเตาโดยการหมุนวาล์วนำซีเถ้าให้เปิดออกและเปิดสวิตช์ชุดสกรูลำเลียงเถ้า ดังรูปที่ 3.11 (ฉ)



ก. เปิดฝาด้านบนเพื่อเติมเชื้อเพลิง



ข. เปิดวาล์วทางเข้าออกของอากาศรอบตัวเตา



ค. สวิตช์ควบคุมระบบ



ง. การจุดเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง



จ. ทดสอบการลุกไหม้ของแก๊สเชื้อเพลิง



ฉ. เปิดวาล์วนำเชื้อแก๊สออกจากเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง

รูปที่ 3.11 การเริ่มต้นการทำงานของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง

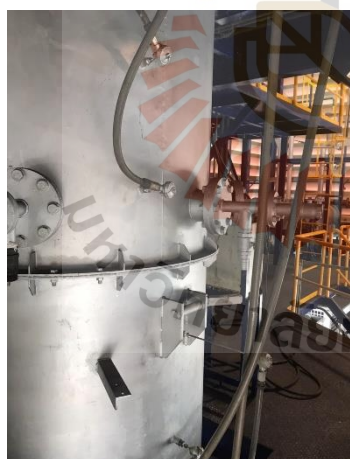
### 3.6.3 เครื่องมือวัด/เครื่องมือวิเคราะห์ และการติดตั้ง

ในการศึกษานี้ใช้เครื่องมือวัดและเครื่องมือวิเคราะห์หลากหลาย โดยชนิดของเครื่องมือวัด/เครื่องมือวิเคราะห์ พารามิเตอร์ที่วัด/วิเคราะห์ แสดงในรายละเอียดในตารางที่ 3.1 และแสดงในรูปที่ 3.12 ทั้งนี้ตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัดและตำแหน่งการเก็บข้อมูล แสดงไว้ในรูป 3.9 และรูปที่ 3.13

ตารางที่ 3.1 แสดงถึงพารามิเตอร์ เครื่องมือวัด ระบบการวัดและวิเคราะห์

| พารามิเตอร์   | สัญลักษณ์                         | เครื่องมือวัด  |
|---|-----------------------------------|--|
| 1. อุณหภูมิ (Temperature)<br>1.1 Reactor temperature<br>1.2 Producer gas temperature<br>- Gas outlet (°C)<br>- Cleaned gas (°C) | $T_1 - T_5$<br><br>$T_0$<br>$T_g$ | Thermocouple type K  |
| 2. อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง<br>(Gas flow rate, $\text{Nm}^3/\text{hr}$ )  | $V_g$                             | Gas flow meter<br>- Model ST51-3F31BA00<br>- Range 15-1,500 NCMH |

| พารามิเตอร์   | สัญลักษณ์        | เครื่องมือวัด  |
|---|------------------|--|
| 3. องค์ประกอบของแก๊ส<br>(Gas composition, %V)   | $G_c$            | Online portable gas analyzer (Gasboard-3100P Series) |
| 4. อัตราการใช้เชื้อเพลิง<br>(Fuel consumption, kg/hr)   | $m_{fuel}$       | ตาชั่งดิจิตอล 2 ตำแหน่ง                              |
| 5. อัตราการเกิดเถ้า<br>(Ash production, kg/hr)  | $m_{ash}$        | ตาชั่งดิจิตอล 2 ตำแหน่ง                              |
| 6. ปริมาณทาร์และฝุ่นในแก๊สเชื้อเพลิง<br>(Tar and Dust)<br>- After reactor ( $mg/Nm^3$ )<br>- After scrubber ( $mg/Nm^3$ ) | $TD_1$<br>$TD_2$ | ชุด Filter and Condenser                             |



ก. Thermocouple type K  
ใช้วัด  $T_1 - T_5, T_0, T_g$



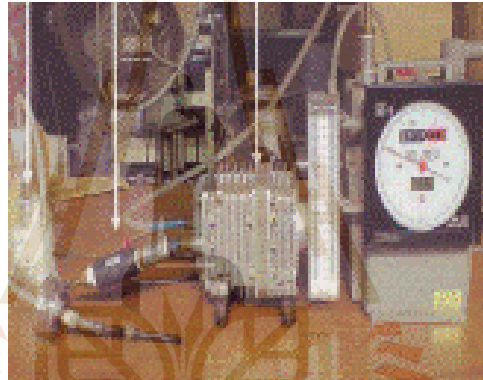
ข. Gas flow meter  
ใช้วัด  $V_g$



ค. Online portable gas analyzer  
ใช้วัดองค์ประกอบของแก๊ส



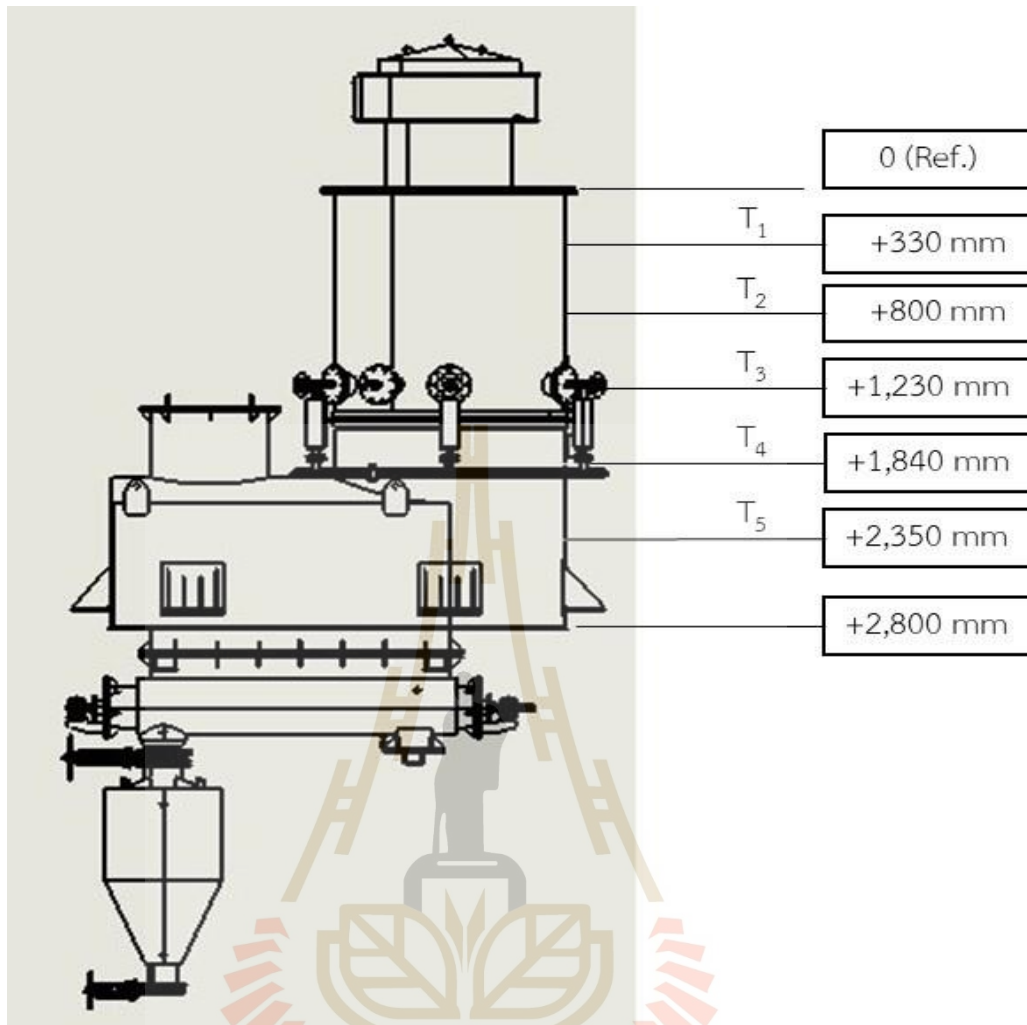
ง. ตาชั่งดิจิตอล  
ใช้วัด Fuel consumption  
และ Ash production



จ. ชุด Filter and Condenser

ใช้วัดปริมาณทาร์และฝุ่น (TD<sub>1</sub>, TD<sub>2</sub>)

รูปที่ 3.12 แสดงอุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการวัด



รูปที่ 3.13 แสดงตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัดอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ (T<sub>1</sub> – T<sub>5</sub>)

### 3.7 การทดสอบหาสภาวะ (Condition) ในการเดินระบบ และศึกษาความสามารถในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง

การหาสภาวะในการเดินระบบ มีจุดประสงค์เพื่อให้ทราบสภาวะต่าง ๆ ที่เหมาะสมในการเดินระบบและความสามารถในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงในระดับต่าง ๆ ซึ่งระบบต้องสามารถผลิตแก๊สเชื้อเพลิงในปริมาณสม่ำเสมอด้วย เพราะจำเป็นอย่างยิ่งหากมีการนำแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้ไปใช้ประโยชน์ต่อไป ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

#### 3.7.1 การกระจายตัวของอุณหภูมิในเตา (Temperature profile)

การหา Temperature profile ที่เกิดขึ้นในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง มีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการทราบผลของอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงต่ออุณหภูมิภายในเตาและศึกษาการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่จะนำไปใช้อธิบายความสม่ำเสมอของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง เนื่องจากอุณหภูมิมีผลต่อองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง โดยทำการวัดอุณหภูมิตรงตำแหน่งความสูงต่าง ๆ ของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง จำนวน 5 ตำแหน่ง ( $T_1-T_5$ ) ดังแสดงไว้ในรูป 3.12 ทั้งนี้ข้อมูลของอุณหภูมิในเตาจะแสดงผลทางระบบ Data logger ซึ่งสามารถเก็บบันทึกข้อมูลได้ตลอดเวลา (ในที่นี้จะเก็บทุก ๆ 30 วินาที) เครื่องมือวัดแสดงในรูป 3.12 (ก)

#### 3.7.2 อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง

การเก็บข้อมูลอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงในแต่ละสภาวะ จะใช้เครื่องมือวัดอัตราการไหล (Gas flow meter) ดังรูปที่ 3.12 (ข) โดยข้อมูลจะถูกบันทึกต่อเนื่องด้วยระบบ Online measuring system ซึ่งมีอัตราการเก็บข้อมูล 30 วินาที/ครั้ง ในส่วนอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงที่ใช้ในการศึกษานี้เลือกที่ 3 ระดับ คือ 140, 180 และ 220  $\text{Nm}^3/\text{hr}$  ทั้งนี้ในการควบคุมอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงจะใช้ Inverter ควบคุมความเร็วมอเตอร์ของพัดลมดูด-ส่งแก๊สเชื้อเพลิง (Gas blower) ในการทดสอบแต่ละอัตราการไหลจะทำการเดินระบบต่อเนื่อง 4 ชั่วโมงเพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพ (อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง คือ ปริมาณของแก๊สที่ผลิตได้ต่อชั่วโมงในหน่วยลูกบาศก์เมตร ซึ่งเป็นตัวแปรควบคุมสำหรับแต่ละการทดลอง)

#### 3.7.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง (Gas Composition)

ในการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินคุณภาพของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ในแต่ละสภาวะการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงในระบบ โดยงานวิจัยนี้จะทำการเก็บตัวอย่างแก๊สในตำแหน่งที่ผ่านระบบทำความสะอาดแล้ว ซึ่งใช้เครื่องวัดคุณภาพแก๊สเชื้อเพลิงแบบออนไลน์ (Online portable gas analyzer) ดังแสดงในรูป 3.12 (ค) โดยจะสามารถวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สต่าง ๆ คือ  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$  และ  $\text{O}_2$

ซึ่งจะใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาคำนวณหาค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิง (Calorific value of producer gas) โดยใช้ความสัมพันธ์ อ้างอิงตามงานวิจัยของ (Jain et al., 2002) ดังแสดงในสมการที่ (3.10)

$$CV_g = \sum X_i H_i \quad (3.10)$$

เมื่อ  $X_i$  คือ สัดส่วนโดยปริมาตรขององค์ประกอบแก๊สเชื้อเพลิง  
 $H_i$  คือ ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิง ( $CO$ ,  $H_2$  และ  $CH_4$ )  
 โดยที่ ( $CO = 13.1 \text{ MJ/Nm}^3$ ,  $H_2 = 13.1 \text{ MJ/Nm}^3$  และ  $CH_4 = 41.2 \text{ MJ/Nm}^3$ )

### 3.7.4 อัตราการใช้เชื้อเพลิง (Fuel consumption)

การหาอัตราการใช้เชื้อเพลิงเพื่อนำไปคำนวณหาประสิทธิภาพของระบบ ซึ่งการวัดจะทำโดยชั่งน้ำหนักของเชื้อเพลิงที่ถูกเติมใส่ลงไปในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงโดยใช้ตาชั่ง ดังแสดงในรูป 3.12 (ง) และทำการจดบันทึกค่าแล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยซึ่งจะได้อัตราการใช้เชื้อเพลิงในหน่วยกิโลกรัมต่อชั่วโมง (kg/hr)

### 3.7.5 อัตราการเกิดเถ้า (Ash production)

การหาอัตราการเกิดเถ้าเพื่อนำไปคำนวณหาประสิทธิภาพของระบบ ซึ่งการวัดจะทำโดยชั่งน้ำหนักของเถ้าที่ถูกนำออกจากเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงโดยใช้ตาชั่ง ดังแสดงในรูป 3.12 (ง) และทำการจดบันทึกค่าแล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยซึ่งจะได้อัตราการเกิดเถ้าในหน่วยกิโลกรัมต่อชั่วโมง (kg/hr) และอีกส่วนหนึ่งที่สำคัญคือ อัตราการดึงเถ้าออกจากเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Ash discharge rate) จะขึ้นอยู่กับสัดส่วนของเถ้า (Ash) ที่ได้จากการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate analysis) ของเชื้อเพลิง ทั้งนี้เพื่อไม่ให้เกิดการสะสมของเถ้าในเตา ซึ่งอาจทำให้เกิดปัญหาเถ้าหลอมและอุดตันภายในเตาได้

### 3.7.6 ทาร์และฝุ่น (Tar and Dust)

ทาร์ (Tar) และ ฝุ่นละออง (Dust) เป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ซึ่งทาร์ (Crude tar) หรือน้ำมันดินเกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่ไม่สมบูรณ์ เป็นลักษณะของเหลวที่มีความหนืดสูง (High viscous) และมีฤทธิ์กัดกร่อน (Corrosive) มีสีน้ำตาลเข้มถึงดำ ประกอบด้วยสารไฮโดรคาร์บอนจำนวนมาก ส่วนฝุ่นละอองขนาดเล็ก (Dust) เป็นอนุภาคของแข็งที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ ทั้งทาร์และฝุ่นละอองเป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการรวมทั้งยังเป็นอันตรายและเป็นปัญหาหลักในการนำแก๊สเชื้อเพลิงไปใช้ประโยชน์ในกรณีการผลิตไฟฟ้าโดยใช้เครื่องยนต์สันดาปภายใน สำหรับการวัดปริมาณทาร์และฝุ่นละอองจะทำการเก็บตัวอย่างในตำแหน่งเดียวกับที่เก็บตัวอย่างแก๊สเชื้อเพลิง เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพการกำจัดสิ่งปนเปื้อนของระบบทำ



ความสะอาดแก๊สโดยใช้ปั๊มลมดูดตัวอย่างในปริมาตรที่กำหนด ซึ่งทำการดักทาร์และฝุ่นละอองด้วย Condenser และ Filter ตามลำดับ แล้วนำไปซึ่งคำนวณหาน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป เครื่องมือวัด แสดงดังรูปที่ 3.12 (จ)

### 3.7.7 การศึกษาประสิทธิภาพการผลิตพลังงานของระบบ

การศึกษาประสิทธิภาพการผลิตพลังงานของระบบโดยใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน ได้แก่ 1. ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง และ 2. เปรียบเทียบสมรรถนะของระบบ ซึ่งจะใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาคำนวณโดยใช้สัมพันธ์อ้างอิงตามงานวิจัยของ (Arjham et al., 2012;2013) แสดงในสมการ (3.11) ดังต่อไปนี้

1) การประเมินประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง Cold gasification efficiency ( $\eta_{cg}$ )

Cold gasification efficiency ( $\eta_{cg}$ ) = [Rate of energy carried by producer gas] / [Rate of energy supplied to reactor]

$$\text{Cold gasification efficiency } (\eta_{cg}) = [V_g \times CV_g] / [m_{\text{fuel}} \times \text{LHV}_{\text{fuel}}] \quad (3.11)$$

เมื่อ  $V_g$  คือ Flow rate of producer gas ( $\text{Nm}^3/\text{hr}$ )

$CV_g$  คือ Calorific value of producer gas ( $\text{MJ}/\text{Nm}^3$ )

$m_{\text{fuel}}$  คือ Fuel consumption ( $\text{kg}/\text{hr}$ )

$\text{LHV}_{\text{fuel}}$  คือ Low heating value of fuel ( $\text{MJ}/\text{kg}$ )

2) เปรียบเทียบสมรรถนะของระบบ (Operation performance) ได้แก่ การประเมินค่าพลังงานสุทธิของระบบ (Net energy yield) และ พารามิเตอร์ อื่น ๆ แสดงในสมการ (3.12) ถึง (3.15) ดังต่อไปนี้

2.1 พลังงานจากเชื้อเพลิงเข้าระบบ ( $\text{MJ}/\text{hr}$ )

$$= [\text{LHV}_{\text{fuel}}] \cdot [m_{\text{fuel}}] \quad (3.12)$$

2.2 พลังงานของแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่ผลิตได้ที่สภาวะมาตรฐาน ( $\text{MJ}/\text{hr}$ )

$$= [CV_g] \cdot [V_g] \quad (3.13)$$

2.3 อัตราส่วนปริมาตรแก๊สเชื้อเพลิง/เชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าระบบ (Volume producer gas yield,  $\text{Nm}^3/\text{kg}$ )

$$= [V_g] / [m_{\text{fuel}}] \quad (3.14)$$

2.4 อัตราส่วนพลังงานแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์/เชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าระบบ  
(Energy yield, MJ/kg)

$$= [CV_g \cdot V_g]/[m_{fuel}] \quad (3.15)$$



## บทที่ 4

### ผลการดำเนินงานวิจัยและการอภิปรายผล

#### 4.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของวัตถุดิบ

การศึกษาลักษณะทางกายภาพ องค์ประกอบแบบประมาณ องค์ประกอบแบบแยกธาตุ และ องค์ประกอบของสารพิษในวัตถุดิบ เป็นสิ่งที่จะประเมินว่าวัตถุดิบมีความเป็นไปได้ในการผลิตพลังงาน โดยผ่านกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันมากน้อยเพียงใด และองค์ประกอบในวัตถุดิบนั้น สามารถอธิบาย ลักษณะมลพิษสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นได้ชัดเจนมากขึ้น

สำหรับงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการผลิตพลังงานโดยใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันจากกากตะกอน และหญ้าเนเปียร์ ในรูปแบบการผสมวัตถุดิบ (Blending raw material) และนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ด ซึ่งในส่วนของกากตะกอนได้มาจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบ Activated sludge ของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลัง บริษัท สงวนวงษ์อุตสาหกรรม จำกัด และหญ้าเนเปียร์พันธุ์ปากช่อง 1 ที่ได้จากแปลงปลูกหญ้าเนเปียร์ภายในฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งหญ้าเนเปียร์เป็นตัวอย่างของพืชที่เจริญเติบโตเร็วมีอายุหลายปีสามารถเก็บเกี่ยวได้ปีละ 5 - 6 ครั้ง และยังมี ความสามารถในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดได้อีกด้วย อีกทั้งยังให้ค่าความร้อน (Heating value) ที่สูง (รัศมี และคณะ, 2560)

##### 4.1.1 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของวัตถุดิบ

1) กากตะกอนที่ได้จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบ Activated sludge ภายหลังจากผ่านกระบวนการลดความชื้นด้วยการตากแดดบนพื้นซีเมนต์ และลดขนาดโดยใช้เครื่องบดหยาบ พบว่า กากตะกอนมีสีดำ ลักษณะเป็นผงละเอียดคล้ายดินคละกับก้อนขนาดเล็ก ขนาด 1 - 10 mm มีความชื้นประมาณ 8% และค่าความหนาแน่นเฉลี่ย  $262 \text{ kg/m}^3$  หลังจากนั้นทำการปรับความชื้น 4 ระดับที่ 10, 15, 18 และ 20%wb เพื่อศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด โดยใช้เครื่องอัดเม็ดแบบแม่พิมพ์วงแหวน (Mill ring die pelletizer) พบว่า เชื้อเพลิงอัดเม็ดมีลักษณะเป็นทรงกระบอกตันมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm ความยาว 10 - 40 mm ความหนาแน่นเฉลี่ย  $795 \text{ kg/m}^3$  และความชื้นอยู่ในช่วง 14 - 18% ซึ่งมีค่าลดลงจากเดิมเล็กน้อยหลังจากผ่านกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด โดยที่ความชื้น 10% ไม่สามารถผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดได้ เนื่องจากวัตถุดิบมีความชื้นไม่เพียงพอ และลักษณะของกากตะกอนมีการจับตัวกันเป็นแผ่นจึงไม่สามารถอัดขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิงได้

ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (ทิพย์สุภินทร์ หินซุย, 2550) ที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการเตรียมกากตะกอนโดยอัดเป็นแท่งเชื้อเพลิง (Briquettes) สำหรับใช้ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ซึ่งความชื้นเฉลี่ยของเชื้อเพลิงอัดแท่งอยู่ในช่วง 15 – 18% ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1

2) หล้าเนเปียร์ได้มาจากแปลงปลูกหล้าเนเปียร์ภายในฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ภายหลังจากผ่านการกระบวนการลดความชื้นด้วยการตากแดดบนพื้นซีเมนต์ และลดขนาดโดยใช้เครื่องตัดบดหยาบและเครื่องตัดบดแบบละเอียด พบว่า หล้าเนเปียร์ มีลักษณะเป็นเป็นชิ้นละเอียด ขนาด 1 - 5 mm มีความชื้นเฉลี่ยประมาณ 7% และมีค่าความหนาแน่น 40.24 kg/m<sup>3</sup> หลังจากนั้นทำการปรับความชื้น 3 ระดับที่ 7, 12 และ 17%wb เพื่อศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด พบว่า หลังจากผ่านกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด ความชื้นของหล้าเนเปียร์มีค่าลดลงกว่าเดิมเล็กน้อยอยู่ในช่วง 5.61 – 14.74% มีลักษณะเป็นทรงกระบอกตันมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ความยาว 10 – 40 mm และมีความหนาแน่นเฉลี่ย 531.21 kg/m<sup>3</sup> ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (รัศมี และคณะ, 2560) ที่ศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงหล้าเนเปียร์อัดเม็ดโดยใช้น้ำหมักชีวภาพเป็นตัวประสานโดยหล้าเนเปียร์เมื่อผ่านกระบวนการตากแห้งและการตัดบดจนละเอียดจะมีความชื้นเฉลี่ย 7.5% ก่อนนำไปอัดเม็ดเชื้อเพลิงและใช้กับเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลง รวมทั้งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (ศุภชัย ธรรมศิริทรัพย์ และ ภูมิพัฒน์ ภาชนะ, 2558) ที่ศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากหล้าเนเปียร์โดยทำการศึกษาเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ความชื้น 9 - 12% ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพของกากตะกอน

| พารามิเตอร์                        | ออกจากระบบบำบัดน้ำเสีย | ผ่านการเตรียมครั้งที่ 1 <sup>(1)</sup> | หลังเตรียม <sup>(1)</sup>      |
|------------------------------------|------------------------|--|--------------------------------|
| ความหนาแน่น (kg/m <sup>3</sup> )   | N/A                    | 262                                    | 795                            |
| ความชื้น (%)                       | 80                     | 8                                      | ปรับความชื้น 10, 15, 18 และ 20 |
| ขนาดเชื้อเพลิง โดยเฉลี่ย (mm x mm) | N/A                    | 1 – 10                                 | ∅ 10 mm ความยาว 10-40 mm       |

หมายเหตุ : <sup>(1)</sup> เตรียมที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



ก. กากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย



ข. เชื้อเพลิงกากตะกอนอัดเม็ด

รูปที่ 4.1 ลักษณะของกากตะกอน

ตารางที่ 4.2 ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพของหญ้าเนเปียร์

| พารามิเตอร์                           | ผ่านการเตรียม<br>ครั้งที่ 1 <sup>(1)</sup> | ผ่านการเตรียม<br>ครั้งที่ 2 <sup>(1)</sup> | หลังเตรียม <sup>(1)</sup>  |
|---------------------------------------|--|--|----------------------------|
| ความหนาแน่น (kg/m <sup>3</sup> )      | 116.38                                     | 40.24                                      | 531.21                     |
| ความชื้น (%)                          | 60 - 70                                    | 7  | ปรับความชื้น 7, 12 และ 17  |
| ขนาดเชื้อเพลิง โดยเฉลี่ย<br>(mm x mm) | 20 - 200                                   | 1 - 5                                      | Ø 10 mm ความยาว 10 - 40 mm |

หมายเหตุ : <sup>(1)</sup>เตรียมที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



ก) หญ้าเนเปียร์ หลังจากเตรียมครั้งที่ 1



ข) หญ้าเนเปียร์ หลังจากเตรียมครั้งที่ 2



ค) เชื้อเพลิงหญ้าเนเปียร์อัดเม็ด

รูปที่ 4.2 ลักษณะของหญ้าเนเปียร์

#### 4.1.2 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของวัตถุดิบผสม

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเพิ่มศักยภาพการใช้กากตะกอนโดยเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันในการผลิตพลังงาน โดยตั้งสมมติฐานว่าการนำหญ้าเนเปียร์มาผสมกับกากตะกอน ในรูปแบบการผสมวัตถุดิบ (Blending raw materials) ตามสัดส่วนต่าง ๆ จะได้วัตถุดิบ 4 ประเภท คือ กากตะกอน (SS), หญ้าเนเปียร์ (NG), วัตถุดิบผสม SS/NG (50/50) และ วัตถุดิบผสม SS/NG (70/30) และนำมาผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด จะทำให้สามารถเดินระบบแก๊สซิฟิเคชันได้อย่างเสถียรภาพมากยิ่งขึ้น เนื่องจากหญ้าเนเปียร์จะช่วยเพิ่มคุณสมบัติทางเคมีของกากตะกอน เช่น ค่าความร้อน ปริมาณสารระเหย รวมทั้งองค์ประกอบของธาตุคาร์บอนและไฮโดรเจน ซึ่งมีส่วนสำคัญในการเพิ่มศักยภาพในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงโดยปฏิกิริยาอุณหภูมิในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน อีกทั้งยังลดปริมาณเถ้าของกากตะกอนลง ซึ่งถือเป็นข้อจำกัดในการเดินระบบหากมีปริมาณที่สูง

ในส่วนของคุณสมบัติทางกายภาพของวัตถุดิบผสม คือ วัตถุดิบผสม SS/NG (50/50) และ วัตถุดิบผสม SS/NG (70/30) แสดงดังตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.3 พบว่า เชื้อเพลิงอัดเม็ดผสมที่มีสัดส่วนของกากตะกอนเพิ่มขึ้น จะทำให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน โดยเชื้อเพลิงผสมทั้งสองมีขนาดเชื้อเพลิงที่ใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4.3 ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพของวัตถุดิบผสม

| พารามิเตอร์                         | SS/NG (50/50)         |                                  | SS/NG (70/30)         |                                  |
|-------------------------------------|-----------------------|----------------------------------|-----------------------|----------------------------------|
|                                     | ผ่านการเตรียมตัวอย่าง | หลังเตรียม                       | ผ่านการเตรียมตัวอย่าง | หลังเตรียม                       |
| ความหนาแน่น<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | 150                   | 720                              | 195                   | 778                              |
| ความชื้น (%)                        | 13.5                  | 9.01                             | 14.1                  | 9.35                             |
| ขนาดเชื้อเพลิง โดยเฉลี่ย (mm x mm)  | -                     | Ø 10 mm<br>ความยาว<br>10 – 50 mm | -                     | Ø 10 mm<br>ความยาว<br>10 – 50 mm |



ก) SS/NG (50/50) ขณะเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบอัดเม็ดเชื้อเพลิง



ข) SS/NG (70/30) ขณะเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบอัดเม็ดเชื้อเพลิง



ค) SS/NG (50/50) หลังจากผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด



ง) SS/NG (70/30) หลังจากผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด

รูปที่ 4.3 ลักษณะของเชื้อเพลิงผสม

#### 4.1.3 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของวัตถุดิบ

การศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของกากตะกอน (SS), วัตถุดิบผสม SS/NG (50/50), วัตถุดิบผสม SS/NG (70/30) และหญ้าเนเปียร์ (NG) ประกอบไปด้วย องค์ประกอบแบบประมาณ ค่าความร้อน องค์ประกอบแบบแยกปริมาณธาตุ และองค์ประกอบของสารพิษ ดังแสดงใน ตารางที่ 4.4 และอธิบายผลการวิเคราะห์ที่ได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.4 ผลการศึกษาสมบัติด้านองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ

| รายการ                        | พารามิเตอร์         | ผลวิเคราะห์ |                  |                  |        |
|-------------------------------|---------------------|-------------|------------------|------------------|--------|
|                               |                     | SS          | SS/NG<br>(70/30) | SS/NG<br>(50/50) | NG     |
| องค์ประกอบแบบ<br>ประมาณ       | % ความชื้น          | 9.05        | 5.63             | 5.13             | 8.3    |
|                               | % สารระเหย          | 23.03       | 38.68            | 55.26            | 67.42  |
|                               | % คาร์บอนคงตัว      | 11.34       | 3.96             | 2.18             | 12.33  |
|                               | % เถ้า              | 56.58       | 51.73            | 37.43            | 11.95  |
|                               | ค่าความร้อน (MJ/kg) | 8.175       | 8.59             | 9.40             | 13.82  |
| องค์ประกอบแบบ<br>แยกธาตุ      | % คาร์บอน           | 18.147      | 21.539           | 23.51            | 36.618 |
|                               | % ไฮโดรเจน          | 3.536       | 3.698            | 4.044            | 5.417  |
|                               | % ไนโตรเจน          | 2.076       | 0.983            | 0.879            | 0.604  |
|                               | % ซัลเฟอร์          | 1.782       | 0.727            | 0.366            | ND     |
| โลหะหนักและ<br>คลอรีน (mg/kg) | ทองแดง              | ไม่พบ       | 700              | 830              | 500    |
|                               | เหล็ก               | 319,510     | 248,730          | 249,570          | 98,020 |
|                               | สังกะสี             | 598         | 2,070            | 2,200            | 1,130  |
|                               | คลอรีน              | 26,200      | 18,500           | 30,670           | 91,270 |

หมายเหตุ : ND (Not detected)

##### 1) องค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate value)

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณของกากตะกอนและหญ้าเนเปียร์ ตารางที่ 4.4 พบว่ากากตะกอนมีปริมาณสารระเหย และค่าความร้อนที่ค่อนข้างต่ำ คือ 23.03% และ 8.175 MJ/kg ตามลำดับ รวมทั้งมีปริมาณเถ้าที่ค่อนข้างสูง คือ 56.58% ในขณะที่หญ้าเนเปียร์มีค่าปริมาณสารระเหยและค่าความร้อนที่ค่อนข้างสูง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 67.42% และ 13.82 MJ/kg ตามลำดับ และมีปริมาณเถ้าที่ค่อนข้างต่ำ คือ 11.95% ทั้งนี้การผสมวัตถุดิบ (Blending raw



materials) จะมีส่วนช่วยเพิ่มปริมาณสารระเหยและค่าความร้อนขึ้น ซึ่งวัตถุดิบที่มีปริมาณสารระเหยสูงมีแนวโน้มที่จะปลดปล่อยพลังงานออกมาสูง และสามารถผลิตแก๊สเชื้อเพลิงได้ในปริมาณที่สูงขึ้น ในส่วนค่าความร้อนของเชื้อเพลิง แสดงให้เห็นว่าปริมาณความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ หรือพลังงานที่ปลดปล่อยออกมาขณะเผาไหม้ จะถูกนำไปใช้เป็นแหล่งความร้อนที่สำคัญในการเกิดปฏิกิริยาอุณหภูมิในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง และทำให้อุณหภูมิที่ประกอบที่เป็นสารระเหยได้รับความร้อนเปลี่ยนรูปไปเป็นแก๊สเชื้อเพลิง อีกทั้งยังช่วยลดปริมาณเถ้าลงได้ แต่ก็ถือว่ายังมีค่าที่ค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงชีวมวล ซึ่งเชื้อเพลิงที่มีปริมาณเถ้าสูงจะทำให้การเดินระบบค่อนข้างยุ่งยาก เนื่องจากต้องทำการดึงเถ้าออกอยู่บ่อยครั้ง เพราะหากนำเถ้าออกจากระบบไม่ทัน เถ้าที่สะสมในเตาปฏิกรณ์จะหลอมตัวเป็นก้อนกลายเป็นสแลก เมื่อหลอมตัวกันเป็นก้อนขนาดใหญ่จะปิดช่องทางการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง ทำให้ไม่สามารถเดินระบบต่อไปได้ (ทิพย์สุภินทร์ หินชูย, 2550)

## 2) องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate value)

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุของกากตะกอนด้วยเครื่อง CHN628, 628S Truspec Micro O ดังแสดงในตารางที่ 4.4 พบว่ากากตะกอนมีปริมาณธาตุคาร์บอนและธาตุไฮโดรเจนที่ค่อนข้างต่ำ คือ 18.147% และ 3.536% ตามลำดับ ในขณะที่หญ้าเนเปียร์มีค่าเท่ากับ 36.618% และ 5.417% ตามลำดับ ทั้งนี้การผสมวัตถุดิบ (Blending raw materials) โดยใช้หญ้าเนเปียร์ที่มีปริมาณธาตุคาร์บอน และไฮโดรเจนที่สูงจะช่วยเพิ่มศักยภาพในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงโดยปฏิกิริยาอุณหภูมิในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน และทำให้ปริมาณธาตุซัลเฟอร์ต่ำลง ซึ่งแสดงถึงแนวโน้มของการเกิดแก๊สพิษในรูป  $SO_2$  และ  $H_2S$  ที่ต่ำลงเช่นเดียวกัน

สำหรับผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักและคลอรีนในกากตะกอน ดังแสดงในตารางที่ 4.4 พบว่า กากตะกอนมีปริมาณโลหะหนักปนเปื้อนค่อนข้างสูง โดยเฉพาะปริมาณเหล็ก (Fe) เท่ากับ 319,510 mg/kg อาจเนื่องมาจากการใช้สารเคมีที่มีสารประกอบของเหล็กในกระบวนการบำบัดน้ำเสียของทางโรงงานนั้น ๆ ในส่วนของการผสมวัตถุดิบ (Blending raw materials) ทำให้ปริมาณเหล็ก (Fe) มีค่าลดลง แต่ก็ยังถือว่าค่อนข้างสูง ทั้งนี้ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันวัฏจักรของโลหะหนักส่วนใหญ่จะอยู่ในเถ้า (ทิพย์สุภินทร์ หินชูย, 2550)

ในส่วนคลอรีน (Cl) พบว่าการผสมวัตถุดิบ มีแนวโน้มทำให้ปริมาณคลอรีนสูงขึ้น ทั้งนี้ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน วัฏจักรของคลอรีนส่วนใหญ่จะถูกดักจับด้วยระบบสครับเบอร์ (Water scrubber และ Chiller scrubber) และน้ำเสียที่เกิดขึ้นจะผ่านการบำบัดโดยวิธีการทางเคมีโดยใช้หลักการโคแอกูเลชันและใช้สารเร่งการรวมตะกอน เช่น โซเดียมคาร์บอเนต หรือปูนขาว ที่จะช่วยให้อนุภาคของตะกอนมีขนาดใหญ่ขึ้นทำให้ง่ายต่อกระบวนการแยกตะกอนออกจากน้ำและส่งไปกำจัดในลำดับต่อไป (Belgiorno et al., 2003)

## 4.2 ผลการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด

การผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากตะกอน (SS), ภูเขาเเนเปียร์ (NG), วัตถุดิบผสม SS/NG (50/50) และ วัตถุดิบผสม SS/NG (70/30) จะใช้วิธีการอัดเม็ดแบบร้อน โดยใช้เครื่องอัดเม็ดแบบแม่พิมพ์วงแหวน (Mill ring die pelletizer) ของศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งจะทำการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากตะกอน (SS) และภูเขาเเนเปียร์ (NG) ที่ผ่านการปรับความชื้นมาแล้ว และประเมินลักษณะเบื้องต้น คุณสมบัติทางกาย รวมทั้งประเมินคุณสมบัติทางการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงอัดเม็ด เพื่อเลือกสัดส่วนความชื้นที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด และนำมาความชื้นที่ได้นี้มาปรับใช้กับกากตะกอนและภูเขาเเนเปียร์ในการผสมวัตถุดิบ (Blending raw materials) ตามสัดส่วนดังนี้ คือ วัตถุดิบผสม SS/NG (50/50) และ วัตถุดิบผสม SS/NG (70/30) และขึ้นรูปเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ด ในลำดับต่อไป

### 4.2.1 การประเมินลักษณะเบื้องต้นของเชื้อเพลิงอัดเม็ด

เป็นการประเมินลักษณะของเชื้อเพลิงอัดเม็ด ด้วยวิธีการสังเกตด้วยตาเปล่า (สุริยา ชัยเดชทยากุล, 2544) โดยมีข้อประเมิน ดังนี้

- 1) รูปร่างของเชื้อเพลิงอัดเม็ดหลังออกจากหัวอัดแล้ว จะทำการประเมินภาพรวมของเชื้อเพลิงอัดเม็ดว่ามีลักษณะรูปร่างเป็นอย่างไร (ตรง/งอเล็กน้อย/โค้ง)
- 2) ลักษณะผิวหลังจากผ่านเครื่องอัดเม็ดแล้ว หากมีผิวสม่ำเสมอทั้งหมดความยาวถือว่าเป็นผิวเรียบ หากไม่สม่ำเสมอมีความแตกต่างกัน ถือว่าเป็นผิวขรุขระ
- 3) ความสามารถในการอัดเม็ดหลังผ่านเครื่องอัดเม็ด หากส่วนผสมเคลื่อนออกมาง่าย อย่างสม่ำเสมอ จะถือว่าอยู่ในเกณฑ์ดี แต่หากเคลื่อนออกมายาก ไม่สม่ำเสมอจะถือว่าอยู่ในเกณฑ์ไม่ดี และหากไม่สามารถเคลื่อนออกมาจากหัวอัดได้ จะถือว่าไม่สามารถอัดเม็ดได้
- 4) ความสามารถในการขึ้นรูปของเชื้อเพลิงอัดเม็ด หลังออกจากเครื่อง หากเม็ดเชื้อเพลิงคงรูปทรงกระบอกอยู่ได้ แสดงว่ามีความสามารถในการขึ้นรูปในเกณฑ์ดี
- 5) รอยร้าวที่เกิดจากขั้นตอนการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด จะทำการสุ่มตัวอย่างจากเชื้อเพลิงอัดเม็ดเพื่อประเมินรอยร้าวที่เกิดขึ้นว่ามีมากน้อยเพียงใด

#### 4.2.1.1 ผลการประเมินลักษณะเบื้องต้นของเชื้อเพลิงกากตะกอนอัดเม็ด

ผลการประเมินลักษณะเบื้องต้นพบว่า สัดส่วนความชื้นของกากตะกอนที่ 15, 18 และ 20%wb มีลักษณะรูปร่างตรง และมีความสามารถในการอัดและสามารถขึ้นรูปได้ดี รวมทั้งมีลักษณะผิวที่เรียบสม่ำเสมอ แต่ที่ความชื้น 15%wb จะปรากฏรอยร้าวของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับความชื้น 18%wb และ 20%wb ในส่วนของความชื้น 10%wb ไม่สามารถอัดเม็ดและขึ้นรูปได้ เนื่องจากวัตถุดิบมีความชื้นไม่เพียงพอและลักษณะของกากตะกอนมีการจับตัวกันเป็นแผ่นขณะทำการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด แสดงในตาราง 4.5

ตารางที่ 4.5 ผลการประเมินลักษณะเบื้องต้นของเชื้อเพลิงกากตะกอนอัดเม็ด

| ลักษณะเบื้องต้น                             | ปริมาณความชื้น |       |         |         |
|---|----------------|-------|---------|---------|
|   | 10%            | 15%   | 18%     | 20%     |
| รูปร่าง (ตรง/งอเล็กน้อย/โค้งงอ)             | -              | ตรง   | ตรง     | ตรง     |
| ความสามารถในการอัดเม็ด<br>(ดี/ไม่ดี/ไม่ได้) | ไม่ได้         | ดี    | ดี      | ดี      |
| ความสามารถในการขึ้นรูป<br>(ดี/ไม่ดี/ไม่ได้) | ไม่ได้         | ดี    | ดี      | ดี      |
| ลักษณะผิว (เรียบ/ไม่เรียบ)                  | -              | เรียบ | เรียบ   | เรียบ   |
| รอยร้าว (น้อย/ปานกลาง/มาก)                  | -              | น้อย  | ปานกลาง | ปานกลาง |

## 4.2.1.2 ผลการประเมินลักษณะเบื้องต้นของเชื้อเพลิงหญ้าเนเปียร์อัดเม็ด

ผลการประเมินลักษณะเบื้องต้นจะเห็นว่า สัดส่วนความชื้นของหญ้าเนเปียร์ที่ 7%wb และ 12%wb มีลักษณะรูปร่างตรง มีความสามารถในการอัดและสามารถขึ้นรูปได้ดี รวมทั้งมีลักษณะผิวที่เรียบสม่ำเสมอและปรากฏรอยร้าวที่ผิวของเชื้อเพลิงอัดเม็ดน้อย เมื่อเทียบกับความชื้น 17%wb ที่รูปร่างของเม็ดเชื้อเพลิงมีผิวไม่สม่ำเสมอ (ไม่เรียบ) และมีรอยร้าวที่เกิดขึ้นมากกว่า แสดงในตาราง 4.6

ตารางที่ 4.6 ผลการประเมินลักษณะเบื้องต้นของเชื้อเพลิงอัดเม็ดหญ้าเนเปียร์

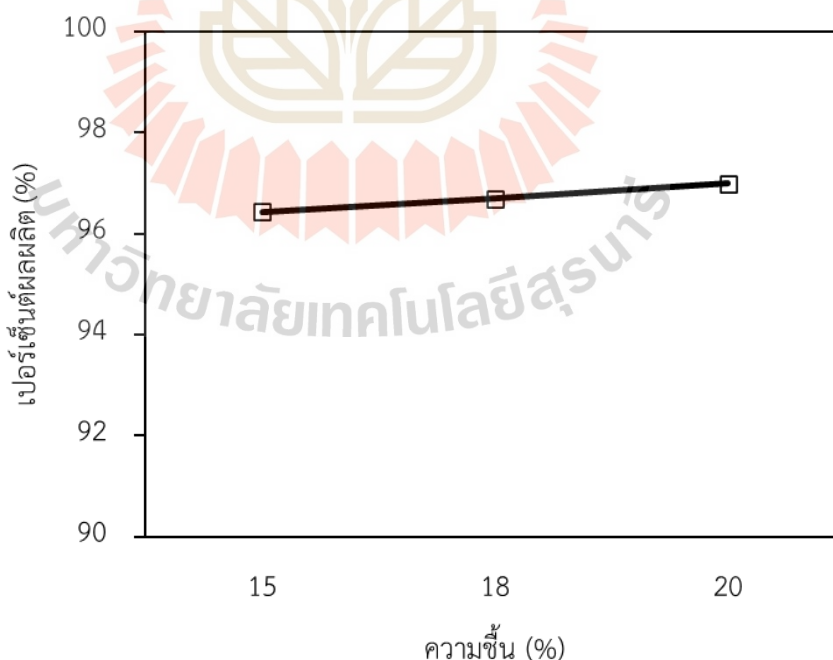
| ลักษณะเบื้องต้น                             | ปริมาณความชื้น |       |          |
|---|----------------|-------|----------|
|   | 7%             | 12%   | 17%      |
| รูปร่าง (ตรง/งอเล็กน้อย/โค้งงอ)             | ตรง            | ตรง   | ตรง      |
| ความสามารถในการอัดเม็ด<br>(ดี/ไม่ดี/ไม่ได้) | ดี             | ดี    | ดี       |
| ความสามารถในการขึ้นรูป<br>(ดี/ไม่ดี/ไม่ได้) | ดี             | ดี    | ดี       |
| ลักษณะผิว (เรียบ/ไม่เรียบ)                  | เรียบ          | เรียบ | ไม่เรียบ |
| รอยร้าว (น้อย/ปานกลาง/มาก)                  | น้อย           | น้อย  | ปานกลาง  |

#### 4.2.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงอัดเม็ด

หลังจากประเมินลักษณะเบื้องต้นของเชื้อเพลิงอัดเม็ดแล้วต่อมาจะวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงอัดเม็ด ได้แก่ เปอร์เซ็นต์ผลผลิต ค่าความหนาแน่นรวม การทดสอบค่าความคงทน การทดสอบค่าความต้านทานน้ำ และอัตราการใช้พลังงานของการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด เป็นต้น

##### 4.2.2.1 เปอร์เซ็นต์ผลผลิตของเชื้อเพลิงกากตะกอนอัดเม็ด

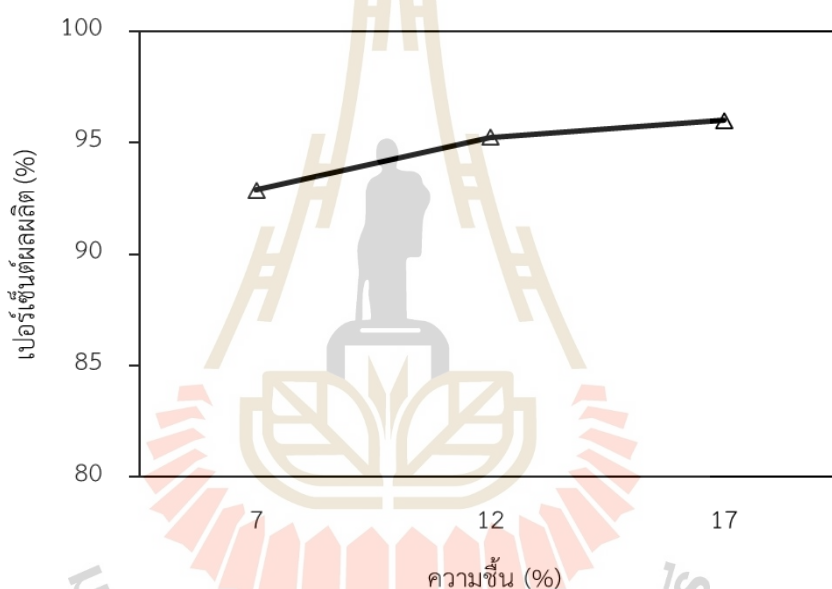
ผลการวิเคราะห์สัดส่วนความชื้นของกากตะกอน 15, 18 และ 20%wb ที่มีต่อค่าเปอร์เซ็นต์ผลผลิตของเชื้อเพลิงกากตะกอนอัดเม็ด แสดงดังรูป 4.4 พบว่า เมื่อเพิ่มสัดส่วนความชื้น เปอร์เซ็นต์ผลผลิตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยมีค่าเท่ากับ 96.43, 96.70 และ 97.00% ตามลำดับ เนื่องจากกากตะกอนที่ใช้มีองค์ประกอบของแบริ่งมันสำปะหลัง เมื่อได้รับความชื้นและความร้อนจะมีคุณสมบัติเป็นกาวในการยึดประสานระหว่างอนุภาคเล็ก ๆ ภายในกากตะกอน ส่งผลให้กากตะกอนสามารถอัดตัวผ่านรูแม่พิมพ์ได้เร็วขึ้น เป็นผลทำให้เปอร์เซ็นต์ผลผลิตเพิ่มสูงขึ้น (เกษรา รัตตะวัน, 2561) ในทางกลับกัน ถ้ากากตะกอนมีความชื้นที่ต่ำเกินไปจะทำให้การเชื่อมประสานระหว่างอนุภาคภายในมีการอัดแน่นจนเกินไปทำให้อัดตัวผ่านรูแม่พิมพ์ได้ยาก หรือความชื้นที่สูงเกินไปจะส่งผลให้ระยะเวลาในการเชื่อมประสานระหว่างอนุภาคนานขึ้นเพื่อไล่ความชื้นจนกระทั่งอยู่ในสภาวะที่เหมาะสมแก่การเกาะตัวเป็นเม็ดเชื้อเพลิง ทำให้เม็ดเชื้อเพลิงที่ได้ไม่สมบูรณ์



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและเปอร์เซ็นต์ผลผลิตของเชื้อเพลิงกากตะกอนอัดเม็ด

#### 4.2.2.2 เปอร์เซ็นต์ผลผลิตของเชื้อเพลิงหญ้าเนเปียร์อัดเม็ด

ผลการวิเคราะห์สัดส่วนความชื้นของหญ้าเนเปียร์ 7, 12 และ 17%wb ที่มีต่อเปอร์เซ็นต์ผลผลิตของเชื้อเพลิงหญ้าเนเปียร์อัดเม็ด แสดงดังรูป 4.5 จะเห็นว่า เมื่อสัดส่วนของความชื้นมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ผลผลิตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 92.88, 95.24 และ 96.00% ตามลำดับ เนื่องจากโครงสร้างภายในของชีวมวล เช่น เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน แป้ง และโปรตีน เมื่อได้รับความชื้นที่เพิ่มขึ้นและผ่านกระบวนการอัดเม็ดภายใต้สภาวะความร้อนและแรงบีบอัดสูง ทำให้อนุภาคเล็ก ๆ ภายในชีวมวลแตกตัวและเกิดการยึดประสานกัน ทำให้สามารถอัดตัวผ่านรูแม่พิมพ์ได้ง่ายขึ้น ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ผลผลิตมีค่าเพิ่มขึ้น (ณัฐกิตต์ และคณะ, 2560)

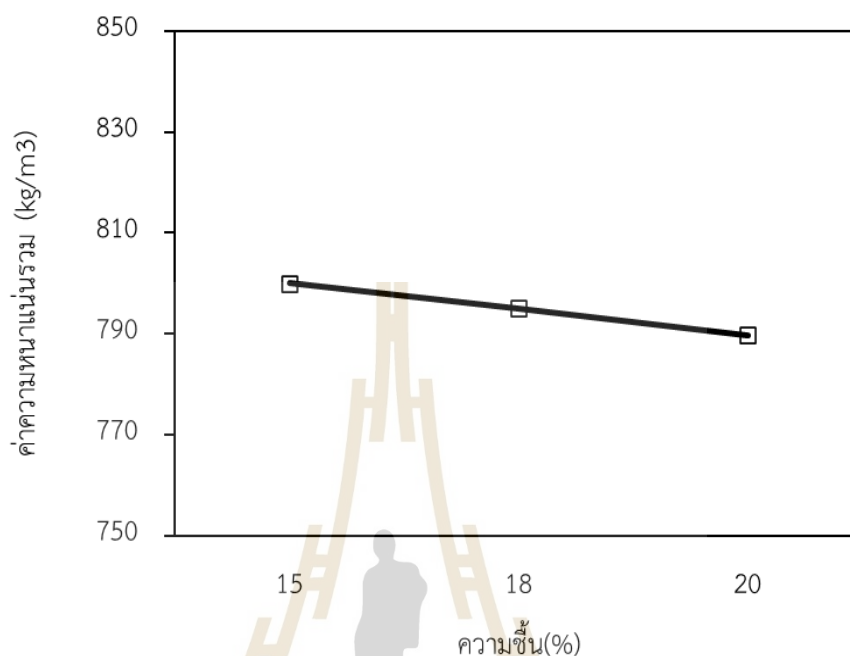


รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและเปอร์เซ็นต์ผลผลิตของเชื้อเพลิงหญ้าเนเปียร์อัดเม็ด

#### 4.2.2.3 ค่าความหนาแน่นรวมของเชื้อเพลิงกากตะกอนอัดเม็ด

ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นรวมของเชื้อเพลิงกากตะกอนอัดเม็ด ในสัดส่วนของความชื้นต่าง ๆ ที่ 15, 18 และ 20%wb แสดงดังรูป 4.6 พบว่า ความหนาแน่นรวมของเชื้อเพลิงอัดเม็ด เท่ากับ 800.02, 795.07 และ 789.71 kg/m<sup>3</sup> ตามลำดับ โดยมีแนวโน้มลดลงเฉลี่ยประมาณ 0.6% ซึ่งไม่แตกต่างกันมาก ทั้งนี้เป็นผลมาจากการเพิ่มสัดส่วนความชื้นจะทำให้การเกาะตัวกันระหว่างอนุภาคภายในกากตะกอนระหว่างกระบวนการอัดเม็ดเชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพลดลงสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Said et al., 2015) ที่ศึกษาเรื่องปริมาณความชื้นที่มีผลต่อคุณสมบัติทาง

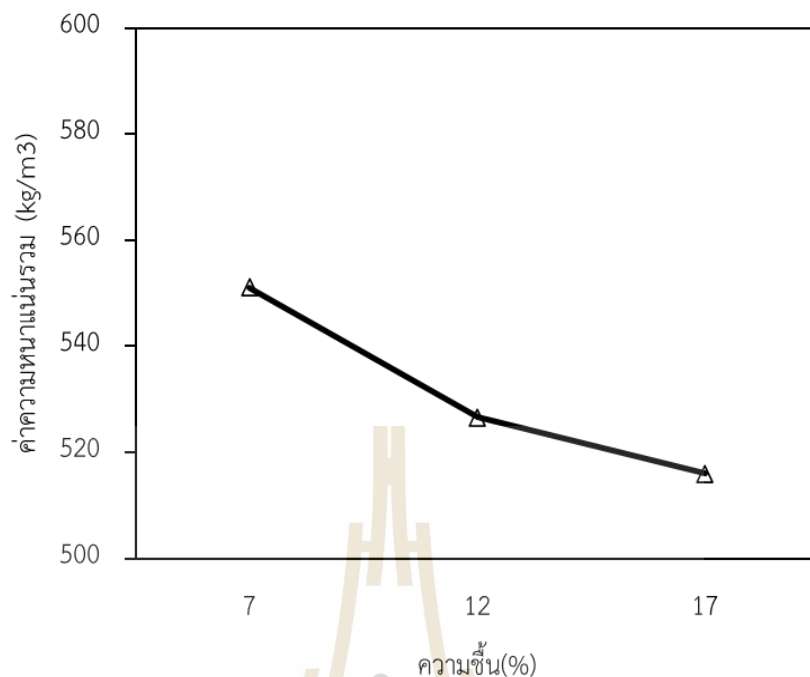
กลของเม็ดเชื้อเพลิงจากฟางข้าว (Rice straw) พบว่า เมื่อชีวมวลมีความชื้นเริ่มต้นสูงจะส่งผลให้ ค่าความคงทนและความหนาแน่นของเชื้อเพลิงอัดเม็ดลดลง



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและความหนาแน่นรวมของเชื้อเพลิงกากตะกอนอัดเม็ด

#### 4.2.2.4 ค่าความหนาแน่นรวมของเชื้อเพลิงหญ้าเนเปียร์อัดเม็ด

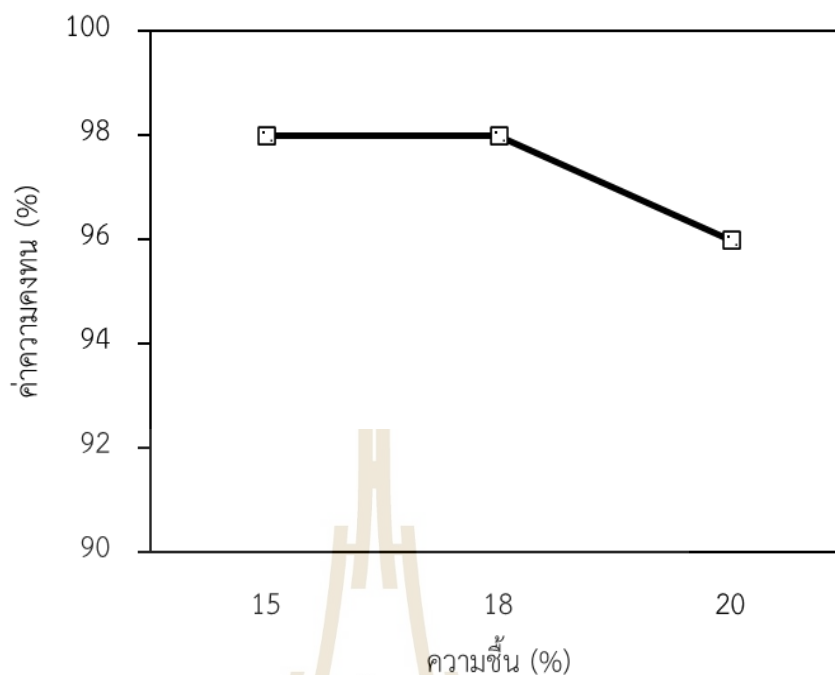
ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นรวมของเชื้อเพลิงหญ้าเนเปียร์อัดเม็ดในสัดส่วนของความชื้นต่าง ๆ ที่ 7, 12 และ 17%wb แสดงดังรูป 4.7 จะเห็นว่า ความหนาแน่นรวมของเชื้อเพลิงอัดเม็ดมีแนวโน้มลดลง จะแปรผกผันกับสัดส่วนความชื้นที่สูงขึ้น มีค่าเท่ากับ 551.09, 526.57 และ 515.98 kg/m<sup>3</sup> ตามลำดับ ซึ่งลดลงประมาณ 2 - 4% เนื่องจากโครงสร้างภายในหญ้าเนเปียร์เมื่อได้เพิ่มสัดส่วนความชื้นที่ภายใต้สภาวะความร้อนและแรงบีบอัดสูงโดยผ่านกระบวนการอัดเม็ดเชื้อเพลิง จะทำให้การเชื่อมประสานระหว่างอนุภาคเล็ก ๆ ของหญ้าเนเปียร์มีประสิทธิภาพลดลงเช่นเดียวกับการทดสอบค่าความหนาแน่นรวมของเชื้อเพลิงกากตะกอนอัดเม็ดในงานวิจัยนี้



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและความหนาแน่นรวมของเชื้อเพลิง  
หญ้าเนเปียร์อัดเม็ด

#### 4.2.2.5 การทดสอบค่าความคงทนของเชื้อเพลิงกากตะกอนอัดเม็ด

ผลการวิเคราะห์สัดส่วนความชื้นกากตะกอน 15, 18 และ 20%wb ที่มีต่อค่าความคงทนของเชื้อเพลิงกากตะกอนอัดเม็ด แสดงดังรูป 4.8 พบว่า เมื่อเพิ่มสัดส่วนความชื้น จะทำให้ค่าความคงทนมีแนวโน้มลดลง โดยมีค่าเท่ากับ 98, 98 และ 96% ตามลำดับ เนื่องจากความชื้นมีผลต่อการเชื่อมประสานของแข็งที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิง โดยการเพิ่มสัดส่วนความชื้นจะทำให้เม็ดเชื้อเพลิงที่ได้มีการสะสมความชื้นมากกว่า จึงทำให้มีการต้านทานต่อการแตกตัวได้น้อยกว่า ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Oduntan et al., 2012) ที่ศึกษาการประเมินประสิทธิภาพเครื่องอัดเม็ดมันสำปะหลังแบบเกลียว (Screw press) โดยทดสอบกับความชื้น 3 ระดับ 18, 20 และ 22%wb พบว่า ความหนาแน่นและความคงทนของเม็ดเชื้อเพลิงจะมีค่าลดลงในขณะที่ปริมาณความชื้นมีค่าเพิ่มขึ้น โดยเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่มีค่าความคงทนไม่น้อยกว่า 96% แสดงว่ามีคุณสมบัติเหมาะสมที่จะนำไปใช้งาน และมีการจับตัวกันอย่างดีทำให้เกิดการแตกร่วนน้อย (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2560)

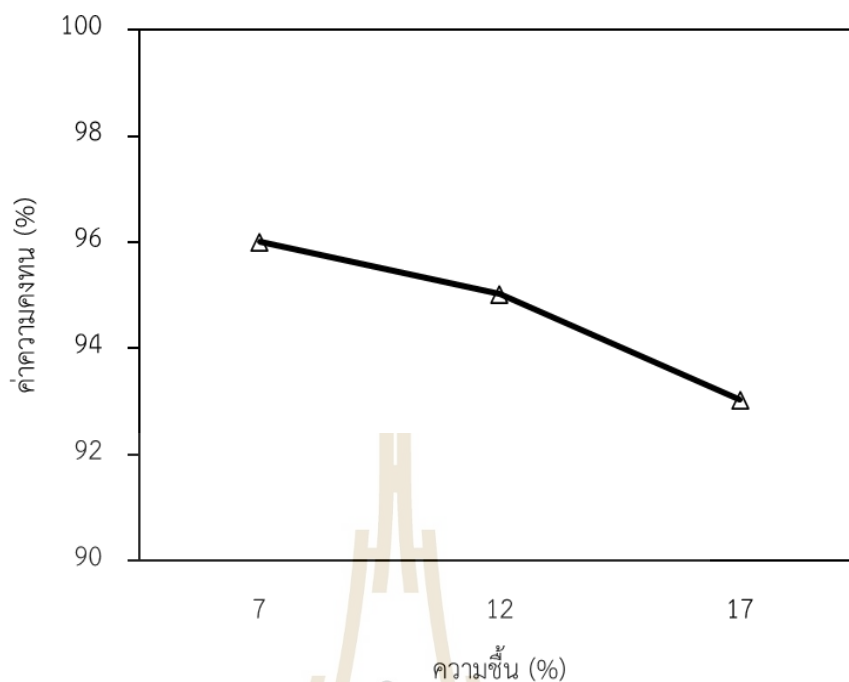


รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและค่าความคงทนของเชื้อเพลิง  
กากตะกอนอัดเม็ด

#### 4.2.2.6 การทดสอบค่าความคงทนของเชื้อเพลิงหญ้าเนเปียร์อัดเม็ด

ผลการวิเคราะห์สัดส่วนความชื้นของหญ้าเนเปียร์ 7, 12 และ 17%wb ที่มีต่อค่าความคงทนของเชื้อเพลิงหญ้าเนเปียร์อัดเม็ด แสดงดังรูป 4.9 จะเห็นว่า ค่าความคงทนมีแนวโน้มลดลง จะแปรผกผันกับสัดส่วนของความชื้นที่เพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่าเท่ากับ 96.01, 95.03 และ 93.04% ตามลำดับ เนื่องจากการต้านทานการแตกตัวที่บ่งบอกถึงความคงทนของหญ้าเนเปียร์ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปเป็นเม็ดเชื้อเพลิงในสถานะที่มีความชื้นเพิ่มขึ้น จะทำให้ความคงทนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ได้มีค่าลดลง ซึ่งจะสอดคล้องกับการทดสอบค่าความคงทนของเชื้อเพลิงกากตะกอนอัดเม็ดในงานวิจัยนี้

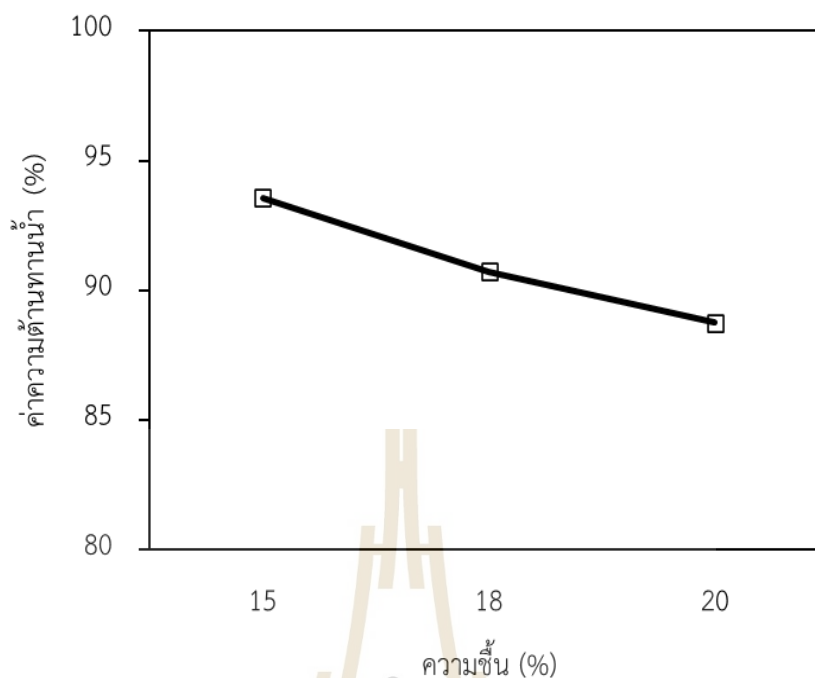




รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและค่าความคงทนของเชื้อเพลิง  
หญาเนเปียร์อัดเม็ด

#### 4.2.2.7 การทดสอบค่าความต้านทานน้ำของเชื้อเพลิงกากตะกอนอัดเม็ด

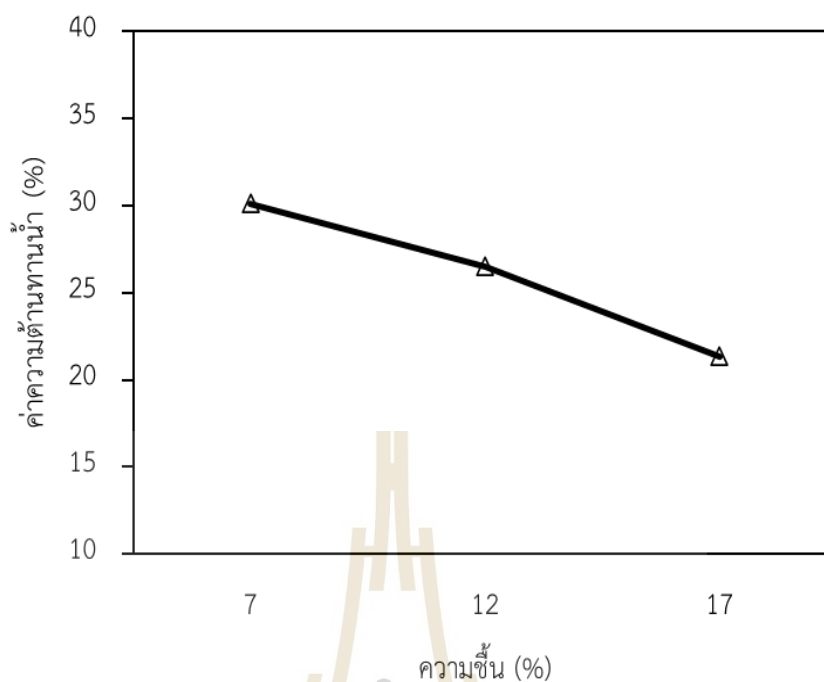
ผลการวิเคราะห์ค่าความต้านทานน้ำของเชื้อเพลิงกากตะกอนอัดเม็ด ในสัดส่วนของความชื้น 15, 18 และ 20%wb แสดงดังรูปที่ 4.10 พบว่า ค่าความต้านทานน้ำมีแนวโน้มลดลง ซึ่งจะแปรผกผันกับสัดส่วนความชื้นที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าเท่ากับ 93.57, 90.73 และ 88.76% ตามลำดับ เนื่องจากการเพิ่มสัดส่วนความชื้นจะทำให้เม็ดเชื้อเพลิงมีการสะสมความชื้นภายในที่สูงขึ้น และการเกาะตัวกันระหว่างอนุภาคภายในเม็ดเชื้อเพลิงมีความหนาแน่นที่น้อยกว่า ทำให้น้ำสามารถแทรกซึมเข้าไปในเม็ดเชื้อเพลิงได้ง่ายกว่า ส่งผลให้เม็ดเชื้อเพลิงเกิดการบวมน้ำและแตกย่อยได้เร็วกว่า



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและค่าความต้านทานน้ำของเชื้อเพลิงกากตะกอนอัดเม็ด

#### 4.2.2.8 การทดสอบค่าความต้านทานน้ำของเชื้อเพลิงหญ้าเนเปียร์อัดเม็ด

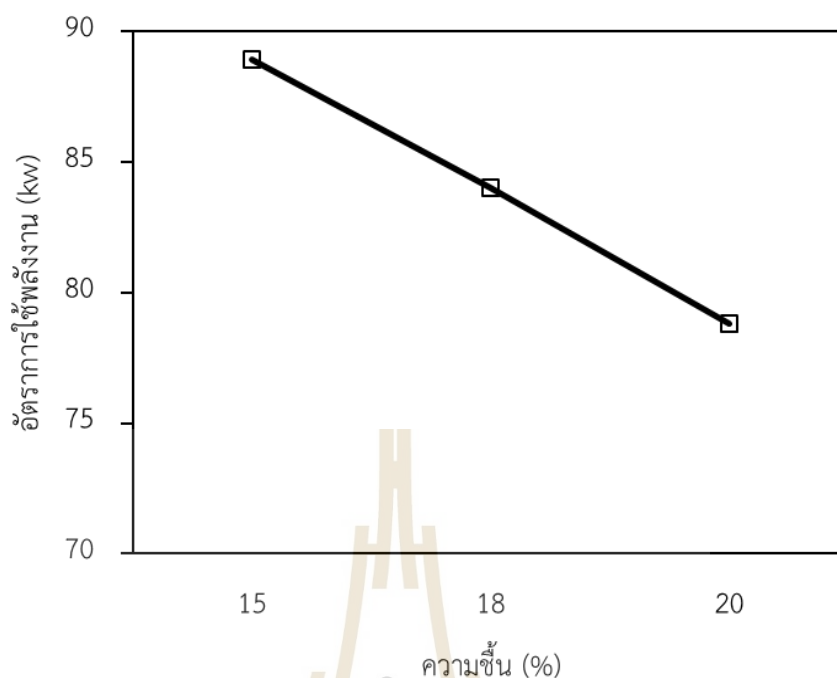
ผลการวิเคราะห์สัดส่วนความชื้นของหญ้าเนเปียร์ 7, 12 และ 17%wb ที่มีต่อค่าความต้านทานน้ำของเชื้อเพลิงหญ้าเนเปียร์อัดเม็ด แสดงดังรูป 4.11 พบว่า ค่าความต้านทานน้ำมีแนวโน้มลดลง ซึ่งจะแปรผกผันกับสัดส่วนความชื้นที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าเท่ากับ 30.12, 26.51 และ 21.33% ตามลำดับ เนื่องจากค่าความต้านทานน้ำจะแปรผันตรงกับค่าความหนาแน่นเชื้อเพลิงอัดเม็ด กล่าวคือ เชื้อเพลิงอัดเม็ดที่มีความชื้นสูงขึ้นจะมีค่าความหนาแน่นที่ต่ำลง ส่งผลให้ความต้านทานน้ำในเชื้อเพลิงอัดเม็ดมีค่าลดลงด้วย สอดคล้องกับงานวิจัยของ (ณัฐกริทธิ์ และคณะ, 2560) ที่ศึกษาเรื่องการวิเคราะห์คุณสมบัติเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากถั่วแระ โดยเปรียบเทียบความต้านทานน้ำของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ได้จากเปลือกถั่วแระและต้นถั่วแระ พบว่าเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากต้นถั่วแระมีความหนาแน่นที่มากกว่า ส่งผลให้ความต้านทานน้ำของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากต้นถั่วแระมีค่าที่สูงกว่าเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากเปลือกถั่วแระ ทั้งนี้หากเปรียบเทียบความหนาแน่นรวมกับเชื้อเพลิงกากตะกอนอัดเม็ด พบว่าเชื้อเพลิงหญ้าเนเปียร์อัดเม็ดมีความหนาแน่นรวมที่น้อยกว่าประมาณ 50% จึงทำให้ความสามารถในการต้านทานน้ำมีค่าค่อนข้างต่ำ



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและค่าความต้านทานน้ำของเชื้อเพลิง  
หญ้าเนเปียร์อัดเม็ด

#### 4.2.2.9 อัตราการใช้พลังงานของการผลิตเชื้อเพลิงกากตะกอนอัดเม็ด

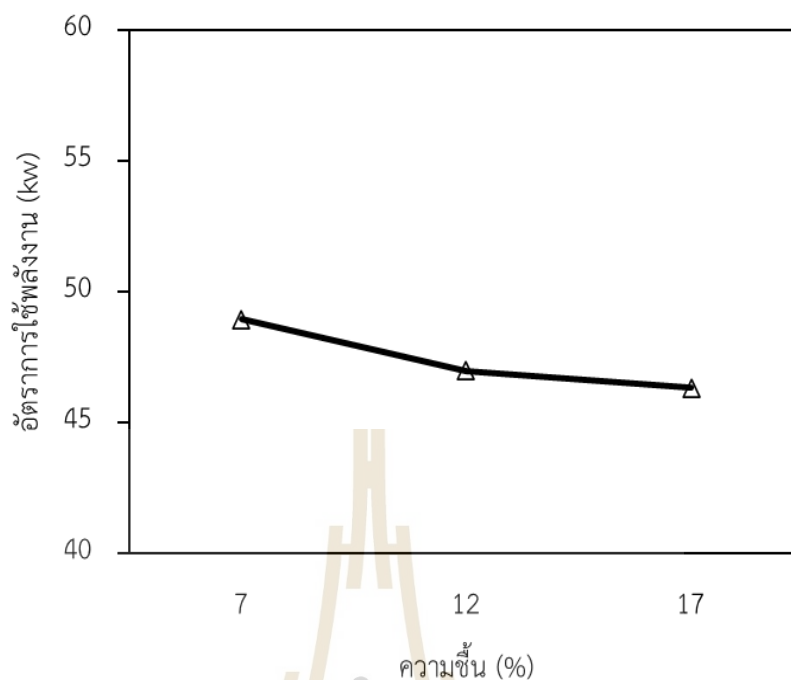
ผลการวิเคราะห์สัดส่วนของความชื้นของกากตะกอน 15, 18 และ 20%wb ที่มีต่ออัตราการใช้พลังงานของการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด แสดงดังรูป 4.12 พบว่า เมื่อเพิ่มสัดส่วนความชื้น ส่งผลให้อัตราการใช้พลังงานมีแนวโน้มลดลงประมาณ 5.8 – 6.6% โดยมีค่าเท่ากับ 88.93, 84.03 และ 78.81 kW ตามลำดับ เนื่องจากกากตะกอนที่มีคุณสมบัติเป็นตัวประสานเมื่อได้รับความชื้นที่เพิ่มขึ้นในระหว่างกระบวนการอัดขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิง จะทำให้เกิดการประสานยึดเกาะกันของอนุภาคภายในวัตถุดิบและอัดตัวผ่านรูแม่พิมพ์ได้เร็วขึ้น ส่งผลให้อัตราการใช้พลังงานลดต่ำลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ (เกษรา รัตตะวัน, 2561) ที่ได้ศึกษาการใช้พลังงานในการอัดขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิงจากเศษไม้กระถิน โดยใช้ตัวประสานคือเหง้ามันสำปะหลังที่ผ่านและไม่ผ่านการหมัก พบว่า เชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ใช้ตัวประสานที่ผ่านระยะเวลาการหมักที่นานขึ้น ทำให้การใช้พลังงานในการขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิงมีแนวโน้มลดลง แต่หากใช้ตัวประสานที่ผ่านการหมักนานเกินไปทำให้มีความชื้นเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ต้องใช้พลังงานมากขึ้นเพื่อไล่ความชื้นในวัตถุดิบให้อยู่ในสภาวะที่เหมาะสมและสามารถอัดออกมาเป็นเม็ดเชื้อเพลิงได้



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและอัตราการใช้พลังงานของการผลิตเชื้อเพลิงกากตะกอนอัดเม็ด

#### 4.2.2.10 อัตราการใช้พลังงานของการผลิตเชื้อเพลิงหญ้าเนเปียร์อัดเม็ด

ผลการวิเคราะห์อัตราการใช้พลังงานของการผลิตเชื้อเพลิงหญ้าเนเปียร์อัดเม็ดในสัดส่วนของความชื้นต่าง ๆ ที่ 7, 12 และ 17%wb แสดงดังรูป 4.13 พบว่า เมื่อเพิ่มสัดส่วนความชื้น ส่งผลให้อัตราการใช้พลังงานมีแนวโน้มลดลงประมาณ 1 - 4% โดยมีค่าเท่ากับ 48.95, 46.99 และ 46.34 kW ตามลำดับ เนื่องจากกระบวนการอัดเม็ดเชื้อเพลิงจะอยู่ในสภาวะที่มีความร้อนและแรงบีบอัดสูง หากมีการปรับความชื้นเพิ่มขึ้นภายใต้สภาวะดังกล่าวจะทำให้โครงสร้างภายใน ชีวมวลเกิดการแตกตัวและยึดประสานกัน ส่งผลให้ชีวมวลสามารถอัดตัวผ่านรูแม่พิมพ์ได้ง่ายขึ้น และใช้พลังงานในการขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิงที่ต่ำลง



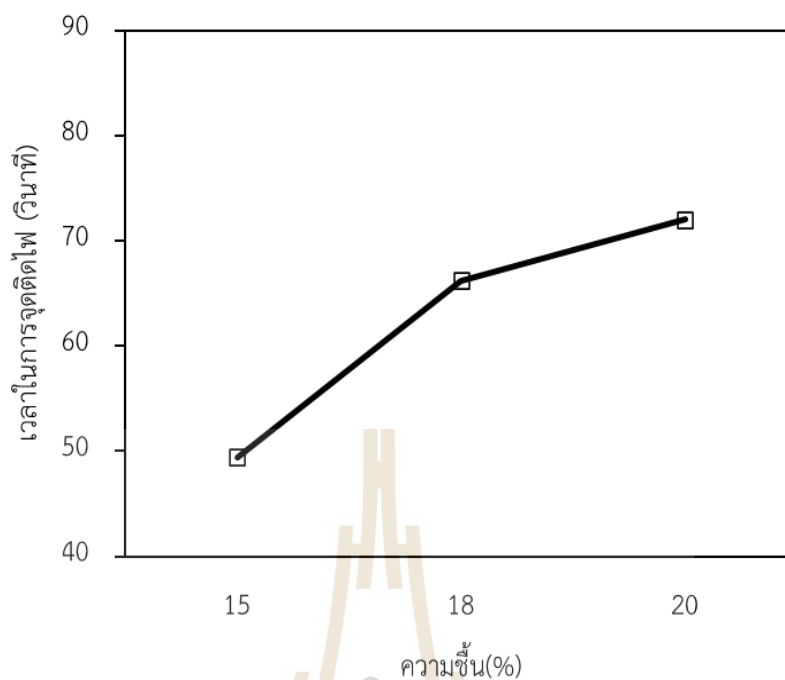
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและอัตราการใช้พลังงานของการผลิตเชื้อเพลิงหญ้าเนเปียร์อัดเม็ด

#### 4.2.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางด้านการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงอัดเม็ด

หลังจากวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงอัดเม็ดแล้วต่อไปจะนำเชื้อเพลิงอัดเม็ดดังกล่าวมาวิเคราะห์คุณสมบัติทางด้านการเผาไหม้ ได้แก่ การหาเวลาในการจุดติดไฟ และการหาระยะเวลาในการเผาไหม้ เป็นต้น

##### 4.2.3.1 การหาเวลาในการจุดติดไฟของเชื้อเพลิงกากตะกอนอัดเม็ด

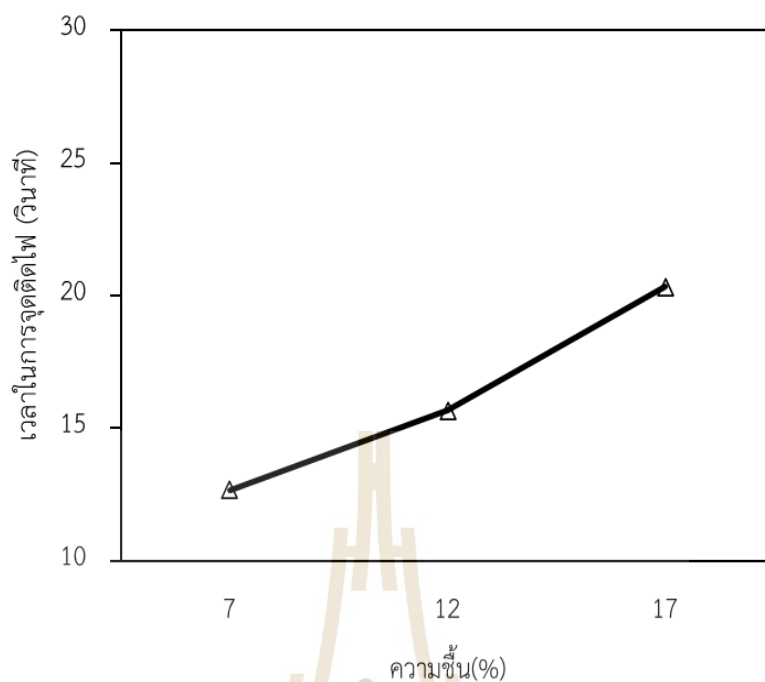
ผลการวิเคราะห์สัดส่วนของความชื้นต่าง ๆ คือ 15, 18 และ 20%wb ที่มีผลต่อเวลาในการจุดติดไฟของเชื้อเพลิงกากตะกอนอัดเม็ด แสดงดังรูป 4.14 พบว่า เมื่อเพิ่มสัดส่วนความชื้น ส่งผลให้เวลาในการจุดติดไฟมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยมีค่าเท่ากับ 50, 67 และ 72 วินาทีตามลำดับ ทั้งนี้เป็นผลมาจากความชื้นของเม็ดเชื้อเพลิงที่มากขึ้น ซึ่งขณะให้ความร้อนแก่เม็ดเชื้อเพลิงนั้นจะใช้เวลาในการไล่ความชื้นภายในเชื้อเพลิงนานขึ้น ทำให้การจุดติดไฟทำได้ยากขึ้น



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและเวลาในการจุกตติไฟของเชื้อเพลิงกากตะกอนอัดเม็ด

#### 4.2.3.2 การหาเวลาในการจุกตติไฟของเชื้อเพลิงหญ้าเนเปียร์อัดเม็ด

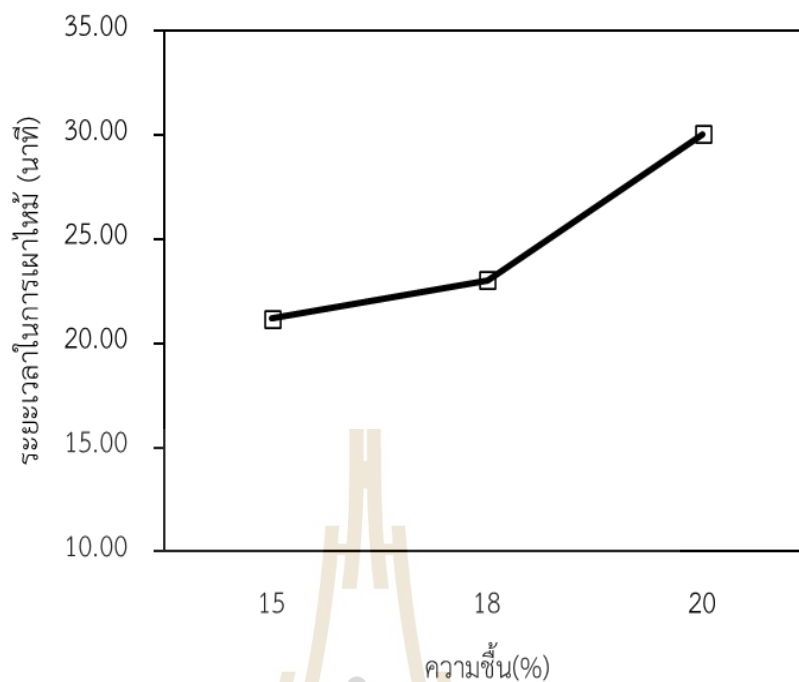
ผลการวิเคราะห์สัดส่วนของความชื้นต่าง ๆ คือ 7, 12 และ 17%wb ที่มีผลต่อเวลาในการจุกตติไฟของเชื้อเพลิงหญ้าเนเปียร์อัดเม็ด แสดงดังรูป 4.15 จะเห็นว่า เมื่อเพิ่มสัดส่วนความชื้น ส่งผลให้เวลาในการจุกตติไฟมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยมีค่าเท่ากับ 12.67, 15.67 และ 20.33 วินาที ตามลำดับ เนื่องจาก การอัดขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิงจากชีวมวลที่มีความชื้นเพิ่มขึ้น จะทำให้ใช้เวลาในการไล่ความชื้นภายในเม็ดเชื้อเพลิงที่นานขึ้น ส่งผลให้การจุกตติไฟทำได้ยากขึ้น เช่นเดียวกับเชื้อเพลิงกากตะกอนอัดเม็ดของงานวิจัยนี้



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและเวลาในการจุกตติไฟของเชื้อเพลิง  
หญ้าเนเปียร์อัดเม็ด

#### 4.2.3.3 การหาระยะเวลาในการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกากตะกอนอัดเม็ด

ผลการศึกษาระยะเวลาในการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกากตะกอนอัดเม็ด ในสัดส่วนของความชื้นต่าง ๆ ที่ 15, 18 และ 20%wb แสดงดังรูป 4.16 พบว่า ระยะเวลาในการเผาไหม้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยมีค่าเท่ากับ 21.20, 23.02 และ 30.05 นาที ตามลำดับ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะไปในทิศทางเดียวกับการหาระยะเวลาในการจุกตติไฟ กล่าวคือ เชื้อเพลิงอัดเม็ดที่มีความชื้นเพิ่มขึ้น จะใช้เวลาในการเผาไหม้เม็ดเชื้อเพลิงจนเป็นขี้เถ้าที่นานกว่า ส่งผลให้ระยะเวลาในการเผาไหม้นานขึ้น

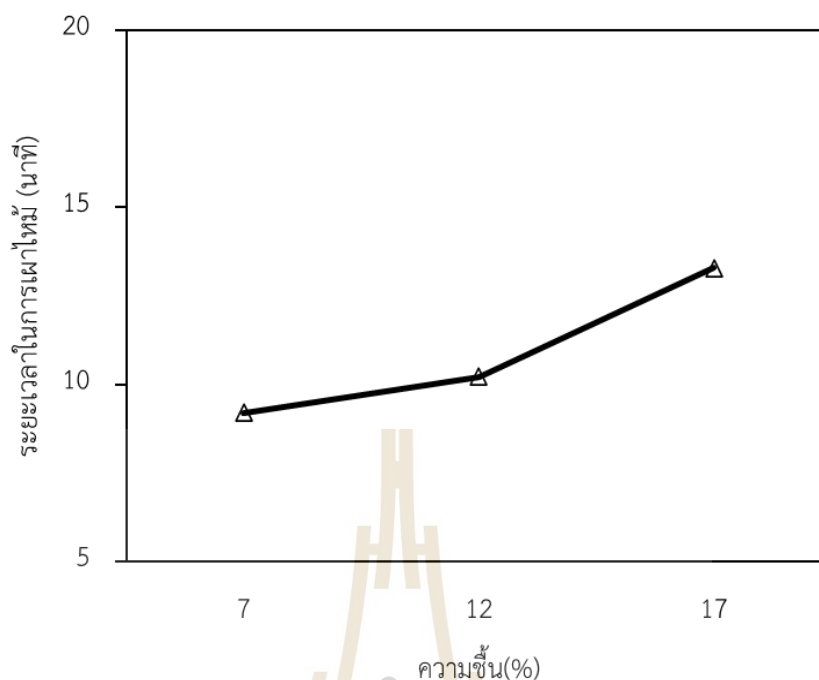


รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและระยะเวลาในการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกากตะกอนอัดเม็ด

#### 4.2.3.4 การหาระยะเวลาในการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงหญ้าเนเปียร์อัดเม็ด

ผลการศึกษาสัดส่วนของความชื้นต่าง ๆ ที่ 15, 18 และ 20%wb ที่มีต่อระยะเวลาในการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงหญ้าเนเปียร์อัดเม็ด แสดงดังรูป 4.17 จะเห็นว่า สัดส่วนความชื้นจะแปรผันตรงกับระยะเวลาในการเผาไหม้ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 9.20, 10.21 และ 13.29 นาทีตามลำดับ โดยความชื้นในเม็ดเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ระยะเวลาในการเผาไหม้เม็ดเชื้อเพลิงจนเป็นขี้เถ้ามากขึ้น เช่นเดียวกับการทดสอบเชื้อเพลิงกากตะกอนอัดเม็ดของงานวิจัยนี้





รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและระยะเวลาในการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง  
หญ้าเนเปียร์อัดเม็ด

#### 4.3 ผลการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดโดยการผสมวัตถุดิบ (Blending raw materials)

การผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดโดยการผสมวัตถุดิบ จะใช้วัตถุดิบ 2 ชนิดคือ กากตะกอนและหญ้าเนเปียร์ที่ผ่านการปรับความชื้นมาแล้วนำมาอัดขึ้นรูปเป็นเม็ดเชื้อเพลิง และนำมาเปรียบเทียบกับคุณสมบัติโดยรวมเพื่อเลือกความชื้นที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัตถุดิบทั้งสองชนิดนี้ ซึ่งผลการเปรียบเทียบในด้านการประเมินลักษณะเบื้องต้น คุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติทางการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงอัดเม็ด พบว่า เชื้อเพลิงกากตะกอนอัดเม็ดที่ความชื้นก่อนอัดเม็ด 15%wb มีคุณสมบัติโดยรวมที่เหมาะสมที่สุดเมื่อเทียบกับความชื้นที่สัดส่วนอื่น และเชื้อเพลิงหญ้าเนเปียร์อัดเม็ดที่ความชื้นก่อนอัดเม็ด 12%wb เมื่อเปรียบเทียบลักษณะเบื้องต้น คุณสมบัติทางกายและด้านการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงอัดเม็ด จะมีค่าใกล้เคียงกับที่ความชื้น 7%wb ทั้งนี้ในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจะมีการสูญเสียความชื้นของวัตถุดิบภายในกระบวนการ เมื่อใช้วัตถุดิบที่มีความชื้นต่ำเกินไปจะทำให้เกิดการจับตัวกันเป็นแผ่นแข็งที่แม่พิมพ์เครื่องอัดทำให้ไม่สามารถอัดขึ้นรูปเป็นเม็ดเชื้อเพลิงได้ รวมทั้งเกิดการสิ้นเปลืองพลังงานในการบดอัดวัตถุดิบออกจากกรูแม่พิมพ์และขึ้นรูปเป็นเม็ดเชื้อเพลิงมากขึ้น โดยสรุปจึงเลือกความชื้นก่อนผลิตเชื้อเพลิงหญ้าเนเปียร์อัดเม็ดที่ 12%wb ซึ่งเป็นความชื้นที่เหมาะสมที่สุดมาผสมรวมกับกากตะกอนที่มีความชื้นก่อนอัดเม็ดเชื้อเพลิง เท่ากับ 15%wb

หลังจากได้ความชื้นที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากตะกอนและหญ้าเนเปียร์แล้ว จะวัตถุดิบทั้งสองมาปรับความชื้นก่อนแล้วค่อยนำมาผสมกันในรูปแบบการผสมวัตถุดิบ (Blending raw materials) ในสัดส่วนต่าง ๆ เช่น วัตถุดิบผสม SS/NG (50/50) และวัตถุดิบผสม SS/NG (70/30) แล้วนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ด รวมทั้งประเมินลักษณะเบื้องต้น คุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติทางด้าน การเผาไหม้ ในลำดับต่อไป

#### 4.3.1 ผลการประเมินลักษณะเบื้องต้นของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัตถุดิบผสม

การประเมินลักษณะเบื้องต้นของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจะทำการเปรียบเทียบระหว่างเชื้อเพลิงกากตะกอนอัดเม็ด (SS), เชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัตถุดิบผสม SS/NG (50/50), เชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัตถุดิบผสม SS/NG (70/30) และเชื้อเพลิงหญ้าเนเปียร์อัดเม็ด (NG) แสดงในตารางที่ 4.7 พบว่าเชื้อเพลิงอัดเม็ดโดยรวมมีลักษณะที่เหมือนกัน ในแง่ของลักษณะรูปร่างที่ตรง ความสามารถในการอัดเม็ดและสามารถขึ้นรูปได้ดี มีลักษณะผิวที่เรียบสม่ำเสมอ รวมทั้งมีรอยร้าวที่ปรากฏที่ผิวก่อนข้างน้อย ซึ่งบ่งบอกถึงความสามารถในการรวมตัวกันระหว่างวัตถุดิบกากตะกอนและหญ้าเนเปียร์ที่สามารถประสานเข้ากันได้เป็นอย่างดีเมื่อผ่านกระบวนการอัดเม็ดเชื้อเพลิง

ตารางที่ 4.7 ผลการประเมินลักษณะเบื้องต้นของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัตถุดิบผสม

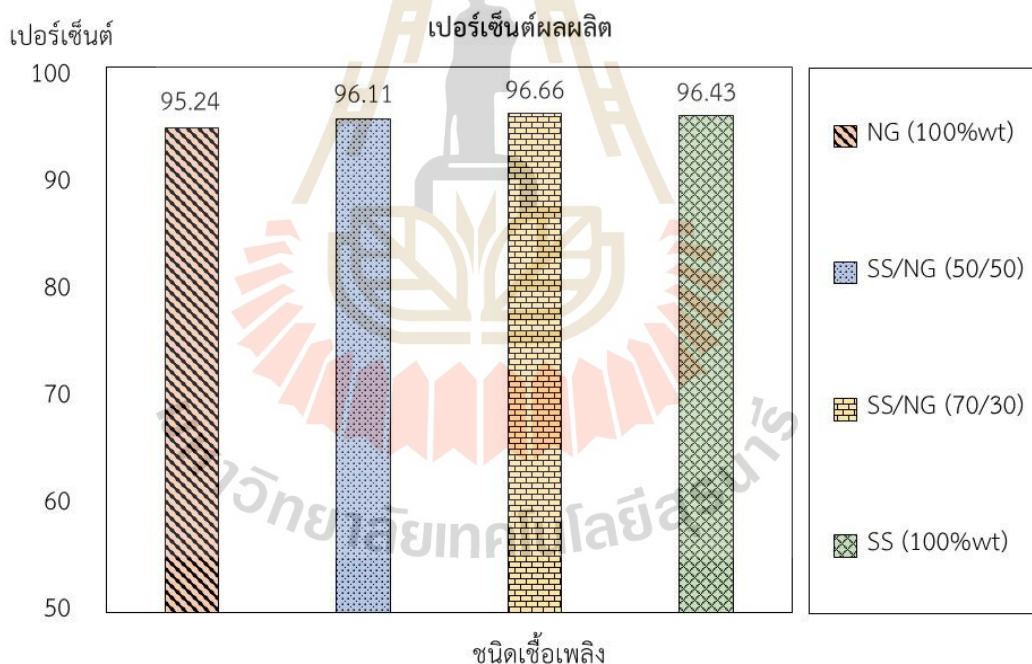
| ลักษณะเบื้องต้น                             | อัตราส่วนผสมกากตะกอน (SS) / หญ้าเนเปียร์ (NG)<br>โดยน้ำหนัก |                  |                  |       |
|---|---|------------------|------------------|-------|
|   | SS  | SS/NG<br>(50/50) | SS/NG<br>(70/30) | NG    |
| รูปร่าง (ตรง/งอเล็กน้อย/<br>โค้งงอ)         | ตรง   | ตรง              | ตรง              | ตรง   |
| ความสามารถในการอัดเม็ด<br>(ดี/ไม่ดี/ไม่ได้) | ดี  | ดี               | ดี               | ดี    |
| ความสามารถในการขึ้นรูป<br>(ดี/ไม่ดี/ไม่ได้) | ดี  | ดี               | ดี               | ดี    |
| ลักษณะผิว (เรียบ/ไม่เรียบ)                  | เรียบ   | เรียบ            | เรียบ            | เรียบ |
| รอยร้าว (น้อย/ปานกลาง/มาก)                  | น้อย  | น้อย             | น้อย             | น้อย  |

#### 4.3.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัสดุบดผสม

การวิเคราะห์ในหัวข้อนี้ จะประกอบไปด้วย เปอร์เซ็นต์ผลผลิต ค่าความหนาแน่นรวม การทดสอบค่าความคงทน การทดสอบค่าความต้านทานน้ำ และอัตราการใช้พลังงานของการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด เป็นต้น

##### 4.3.2.1 เปอร์เซ็นต์ผลผลิตของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัสดุบดผสม

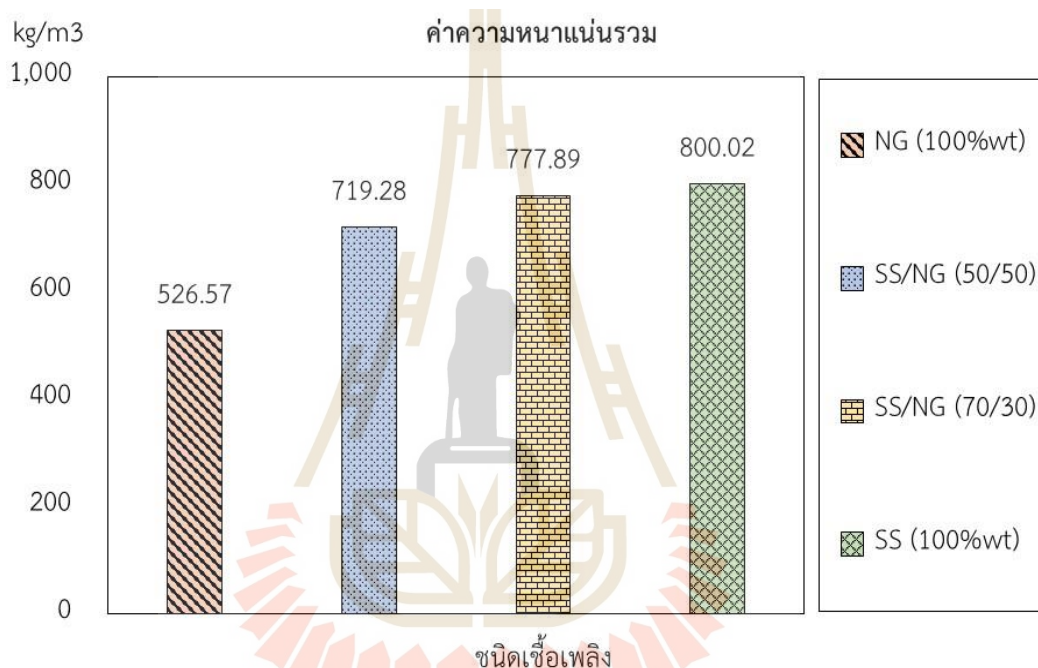
ผลการทดสอบหาเปอร์เซ็นต์ผลผลิตของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจะทำการเปรียบเทียบระหว่างเชื้อเพลิงกากตะกอนอัดเม็ด (SS), เชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัสดุบดผสม SS/NG (50/50), เชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัสดุบดผสม SS/NG (70/30) และเชื้อเพลิงหญ้าเนเปียร์อัดเม็ด (NG) แสดงดังรูปที่ 4.18 พบว่า เปอร์เซ็นต์ผลผลิตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มส่วนผสมของกากตะกอนในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัสดุบดผสม เนื่องจากองค์ประกอบของแป้งมันสำปะหลังที่อยู่ในกากตะกอน ทำหน้าที่เป็นตัวการประสานให้เกิดการยึดเกาะกันระหว่างวัสดุบดได้ดีขึ้น ทำให้สามารถขึ้นรูปและคงสภาพเม็ดเชื้อเพลิงได้อย่างดี



รูปที่ 4.18 ผลการทดสอบหาเปอร์เซ็นต์ผลผลิตของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัสดุบดผสม

#### 4.3.2.2 ค่าความหนาแน่นรวมของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัตถุดิบผสม

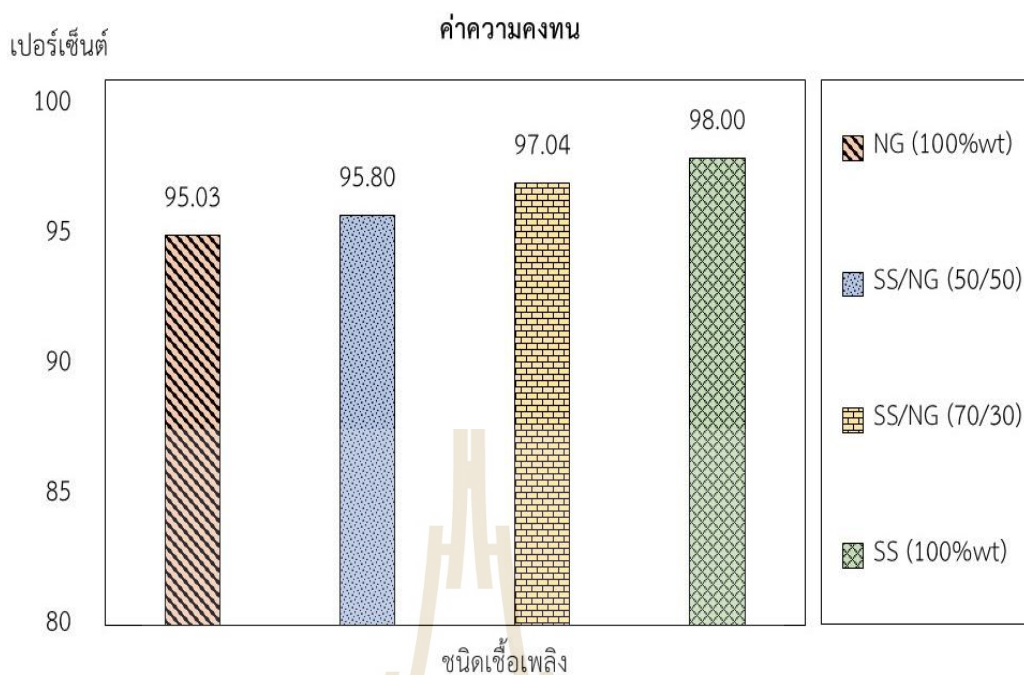
ผลการทดสอบค่าความหนาแน่นรวมของเชื้อเพลิงอัดเม็ดโดยทำการเปรียบเทียบระหว่างเชื้อเพลิงกากตะกอนอัดเม็ด (SS), เชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัตถุดิบผสม SS/NG (50/50), เชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัตถุดิบผสม SS/NG (70/30) และเชื้อเพลิงหญ้าเนเปียร์อัดเม็ด (NG) แสดงดังรูปที่ 4.19 พบว่า การเพิ่มส่วนผสมของกากตะกอนในขั้นตอนการอัดขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิงจากวัตถุดิบผสม ส่งผลทำให้ค่าความหนาแน่นรวมของเชื้อเพลิงอัดเม็ดดังกล่าวมีแนวโน้มสูงขึ้น ซึ่งชี้ให้เห็นถึงความสามารถในการรวมตัวและประสานเข้าด้วยกันได้อย่างดี



รูปที่ 4.19 ผลการทดสอบหาค่าความหนาแน่นรวมของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัตถุดิบผสม

#### 4.3.2.3 ค่าความคงทนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัตถุดิบผสม

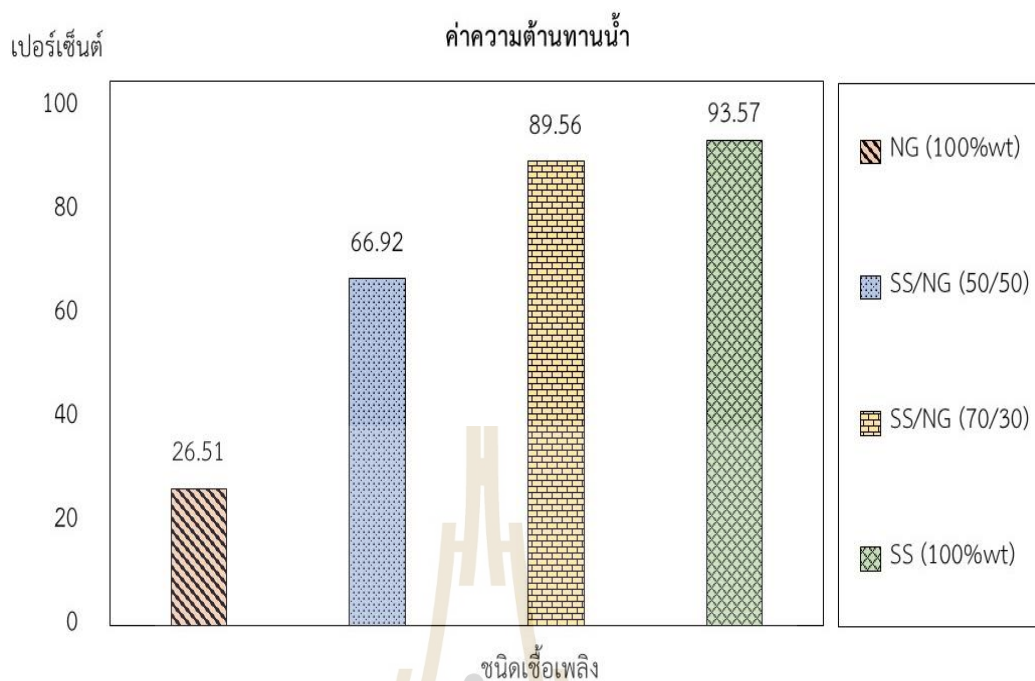
ผลการทดสอบค่าความคงทนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดโดยทำการเปรียบเทียบระหว่างเชื้อเพลิงกากตะกอนอัดเม็ด (SS), เชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัตถุดิบผสม SS/NG (50/50), เชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัตถุดิบผสม SS/NG (70/30) และเชื้อเพลิงหญ้าเนเปียร์อัดเม็ด (NG) แสดงดังรูปที่ 4.20 พบว่า ค่าความคงทนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มส่วนผสมของกากตะกอนในขั้นตอนการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัตถุดิบผสม ทำให้ลักษณะเม็ดเชื้อเพลิงที่ได้มีความหนาแน่นมากขึ้น และมีความคงทนต่อการกระแทกได้ดีขึ้น



รูปที่ 4.20 ผลการทดสอบหาค่าความคงทนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัสดุผสม

#### 4.3.2.4 ค่าความต้านทานน้ำของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัสดุผสม

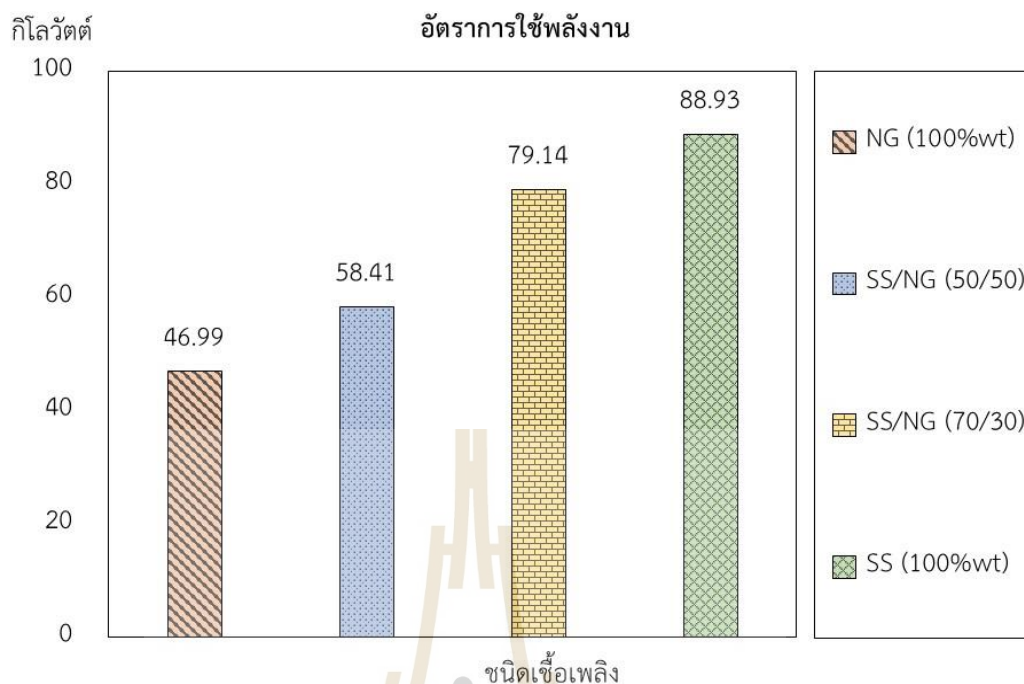
ผลการทดสอบค่าความต้านทานน้ำของเชื้อเพลิงอัดเม็ดโดยทำการเปรียบเทียบระหว่างเชื้อเพลิงกากตะกอนอัดเม็ด (SS), เชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัสดุผสม SS/NG (50/50), เชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัสดุผสม SS/NG (70/30) และเชื้อเพลิงหญ้าเนเปียร์อัดเม็ด (NG) แสดงดังรูปที่ 4.21 พบว่า ส่วนผสมของกากตะกอนในขั้นตอนการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัสดุผสมที่เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความต้านทานน้ำของเชื้อเพลิงอัดเม็ดดังกล่าวมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งเป็นการเพิ่มความสามารถในการทนต่อสภาพแวดล้อม เช่น น้ำและความชื้น ได้ดียิ่งขึ้น



รูปที่ 4.21 ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานน้ำของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัตถุดิบผสม

#### 4.3.2.5 อัตราการใช้พลังงานของการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัตถุดิบผสม

ผลการทดสอบอัตราการใช้พลังงานของการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดโดยทำการเปรียบเทียบระหว่างเชื้อเพลิงกากตะกอนอัดเม็ด (SS), เชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัตถุดิบผสม SS/NG (50/50), เชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัตถุดิบผสม SS/NG (70/30) และเชื้อเพลิงหญ้าเนเปียร์อัดเม็ด (NG) แสดงดังรูปที่ 4.22 พบว่า อัตราการใช้พลังงานในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัตถุดิบผสมมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มส่วนผสมของกากตะกอนในการขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิง เนื่องจาก องค์ประกอบของกากตะกอนที่มีคุณสมบัติเป็นตัวประสานที่เพิ่มการยึดเกาะกันระหว่างวัตถุดิบทำให้เชื้อเพลิงที่ได้มีความหนาแน่นและแข็งแรงขึ้น ซึ่งส่งผลโดยตรงต่ออัตราการใช้พลังงานในการอัดเม็ดเชื้อเพลิง กล่าวคือ เครื่องอัดเม็ดจะใช้พลังงานเพิ่มขึ้นในการบดอัดวัตถุดิบผ่านรูแม่พิมพ์เพื่อขึ้นรูปเป็นเม็ดเชื้อเพลิง



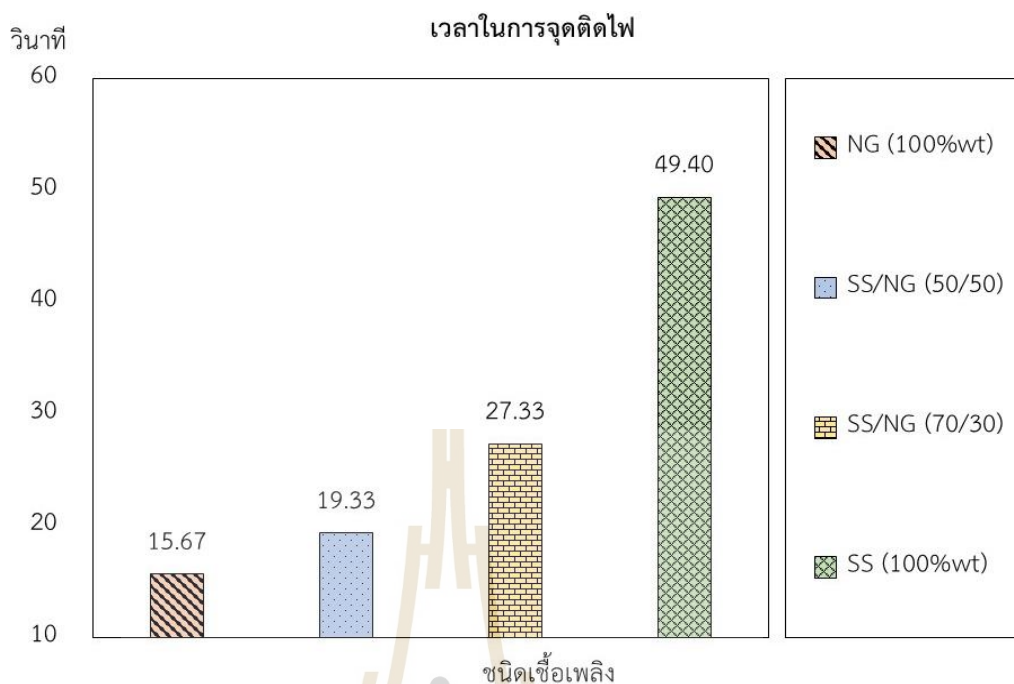
รูปที่ 4.22 ผลการทดสอบอัตราการใช้พลังงานของการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัตถุดิบผสม

#### 4.3.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัตถุดิบผสม

การวิเคราะห์ในหัวข้อนี้ จะประกอบไปด้วย การหาเวลาในการจุดติดไฟ และ การหาระยะเวลาในการเผาไหม้ ดังนี้

##### 4.3.3.1 การหาเวลาในการจุดติดไฟของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัตถุดิบผสม

ผลการทดสอบเวลาในการจุดติดไฟของเชื้อเพลิงอัดเม็ดโดยทำการเปรียบเทียบระหว่างเชื้อเพลิงกากตะกอนอัดเม็ด (SS), เชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัตถุดิบผสม SS/NG (50/50), เชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัตถุดิบผสม SS/NG (70/30) และเชื้อเพลิงหญ้าเนเปียร์อัดเม็ด (NG) แสดงดังรูปที่ 4.23 พบว่า เมื่อเพิ่มส่วนผสมของกากตะกอนในกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัตถุดิบผสม จะส่งผลให้เวลาในการจุดติดไฟมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากกากตะกอนมีคุณสมบัติการเป็นเชื้อเพลิงที่ค่อนข้างต่ำ จึงทำให้การจุดติดไฟของเชื้อเพลิงอัดเม็ดดังกล่าวมีระยะเวลานานขึ้น

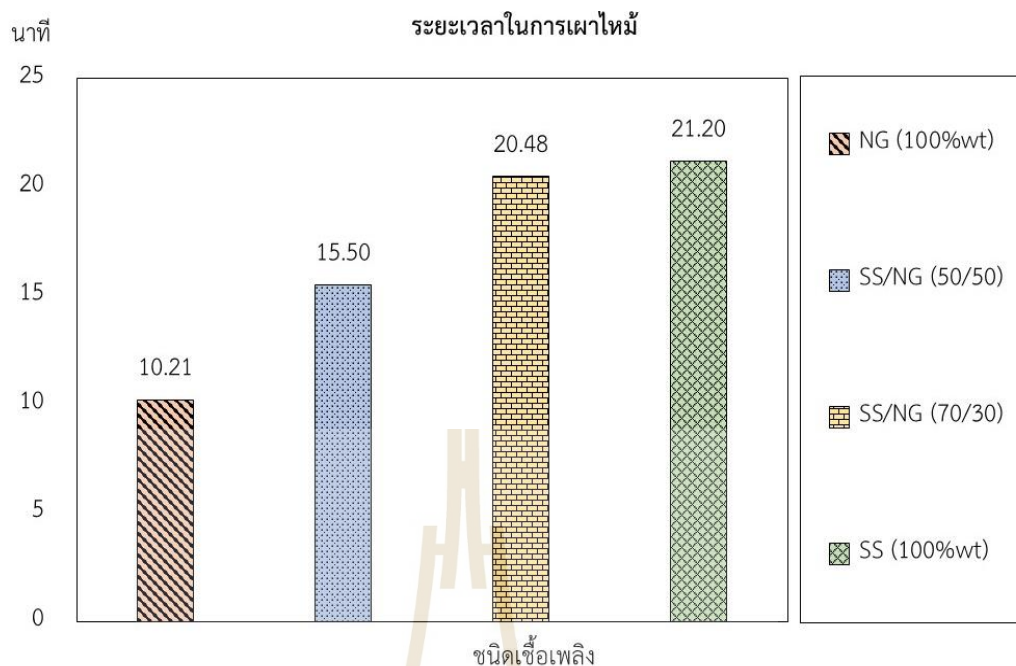


รูปที่ 4.23 ผลการทดสอบเวลาในการจุดติดไฟของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัสดุผสม

#### 4.3.3.2 การหาระยะเวลาในการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัสดุผสม

ผลการทดสอบระยะเวลาในการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงอัดเม็ดโดยทำการเปรียบเทียบระหว่างเชื้อเพลิงกากตะกอนอัดเม็ด (SS), เชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัสดุผสม SS/NG (50/50), เชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัสดุผสม SS/NG (70/30) และเชื้อเพลิงหญ้าเนเปียร์อัดเม็ด (NG) แสดงดังรูปที่ 4.24 จะเห็นว่า เมื่อเพิ่มส่วนผสมของกากตะกอนที่มีคุณสมบัติการเป็นเชื้อเพลิงที่ค่อนข้างต่ำในกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัสดุผสม ส่งผลให้จะต้องใช้ระยะเวลาในการเผาไหม้เม็ดเชื้อเพลิงจนเป็นขี้เถ้ามากขึ้น





รูปที่ 4.24 ผลการทดสอบระยะเวลาในการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัตถุดิบผสม

#### 4.4 ผลการศึกษาการผลิตพลังงานด้วยเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการผลิตพลังงานด้วยเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันจากกากตะกอนและหญ้าเนเปียร์ในรูปแบบของการผสมวัตถุดิบ (Blending raw materials) และทำการอัดขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิง โดยสมมติฐานที่ว่า การผสมหญ้าเนเปียร์จะทำให้สามารถเดินระบบด้วยเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันได้อย่างเสถียรภาพมากยิ่งขึ้น ทั้งนี้ในการทดสอบจะใช้เชื้อเพลิงอัดเม็ด 4 ประเภท คือ เชื้อเพลิงกากตะกอนอัดเม็ด (SS), เชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัตถุดิบผสม SS/NG (50/50), เชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัตถุดิบผสม SS/NG (70/30) และเชื้อเพลิงหญ้าเนเปียร์อัดเม็ด (NG) โดยทำการปรับเปลี่ยนค่าอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงในระบบเป็น 3 ระดับ คือ 140, 180 และ 220 Nm<sup>3</sup>/hr ในการเดินระบบ ซึ่งในทางปฏิบัติไม่สามารถควบคุมอัตราการไหลให้คงที่ตามที่ต้องการได้ ดังนั้น ค่าอัตราการไหลจากการเดินระบบจะเป็นค่าเฉลี่ย ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับระดับอัตราการไหลที่กำหนดไว้

ทั้งนี้ ผลการศึกษาของหัวข้อนี้ ประกอบไปด้วย 1) การกระจายตัวของอุณหภูมิในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง, 2) ผลวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง, 3) ผลการวิเคราะห์ปริมาณทาร์และฝุ่น 4) อัตราการใช้เชื้อเพลิง, 5) อัตราการเกิดเถ้า และ 6) ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Cold gasification efficiency) ดังรายละเอียดต่อไปนี้

#### 4.4.1 การกระจายตัวของอุณหภูมิในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง

การศึกษาอุณหภูมิของแก๊สเชื้อเพลิงและชั้นของอุณหภูมิภายในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงเพื่ออธิบายปฏิกิริยาอุณหเคมีที่เกิดขึ้นในระยะเวลาความสูงต่าง ๆ โดยวัดอุณหภูมิที่ 5 ชั้นความสูง คือ  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ ,  $T_4$  และ  $T_5$  ซึ่งมีความสูงจากระยะอ้างอิง (ความสูงจากด้านบนเตาลงสู่ด้านล่างเตา) เท่ากับ 330, 800, 1,230, 1,840 และ 2,350 mm ตามลำดับ โดยอุณหภูมิของแก๊สเชื้อเพลิงจะถูกบันทึกแบบต่อเนื่องด้วยระบบ Online Measuring System เป็นการเก็บข้อมูลต่อเนื่องทุก ๆ 30 วินาที

ทั้งนี้ การกระจายตัวของอุณหภูมิในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบ Fixed bed downdraft gasification ตามทฤษฎีของปฏิกิริยาอุณหเคมีในระบบแก๊สซิฟิเคชัน คือ ที่ระยะความสูง  $T_1$ - $T_2$  ซึ่งเป็นความสูงช่วงบนเตา กระบวนการที่เกิดขึ้นจะเป็นช่วงของโซนอบแห้ง (Drying zone) อุณหภูมิเฉลี่ยค่อนข้างต่ำ เท่ากับ 100 – 200 °C เป็นช่วงที่ความชื้นในเชื้อเพลิงถูกกำจัดออก ที่ระยะความสูง  $T_2$ - $T_3$  เป็นโซนของปฏิกิริยา Pyrolysis หรือ Distillation ช่วงอุณหภูมิ 200 – 500 °C โดยของแข็งที่เหลืออยู่ภายหลังจากผ่านกระบวนการนี้คือ คาร์บอนในรูปถ่าน ซึ่งจะทำปฏิกิริยาต่อในโซน Combustion และ Reduction ส่วนที่ระยะความสูงระหว่าง  $T_3$ - $T_4$  เป็นจุดป้อนอากาศเข้าสู่เตา เป็น Hot zone หรือ Heat hearth ที่เกิดจากกระบวนการ Combustion เป็นช่วงที่อาจมีอุณหภูมิสูงถึง 1,100 – 1,500 °C และที่ระยะความสูงระหว่าง  $T_4$ - $T_5$  จะเป็นช่วงของ Reduction zone แก๊สร้อนที่ผ่านมาจาก Combustion zone จะทำให้เกิดปฏิกิริยา Reduction โดยจะมีอุณหภูมิระหว่าง 500 – 900 °C

จากการทดสอบ ได้นำข้อมูลอุณหภูมิเฉลี่ยจากการเดินระบบต่อเนื่อง ที่ระยะความสูงต่าง ๆ ( $T_1$ - $T_5$ ) และอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงทั้ง 3 ระดับ คือ 140, 180 และ 220 Nm<sup>3</sup>/hr มาหาความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในเตาตามระยะความสูง ดังแสดงในรูปที่ 4.25 ซึ่งสามารถสรุปรูปแบบของการกระจายตัวของอุณหภูมิในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง ได้ดังต่อไปนี้

- 1) เชื้อเพลิงหลู๊นเปียร์อัดเม็ด (NG) มีความหนาแน่นรวม (526.57 kg/m<sup>3</sup>) โดยระยะความสูง  $T_1$  –  $T_2$  (Drying zone) ซึ่งเป็นความสูงช่วงบนเตา มีอุณหภูมิเฉลี่ยค่อนข้างต่ำ ไม่เกิน 100 °C และที่ระยะความสูง  $T_2$  –  $T_3$  (Pyrolysis zone) มีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นเป็นระดับ 620 – 660 °C จากนั้นที่ระยะความสูง  $T_3$  –  $T_4$  (Combustion zone) อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นอีกเป็น 720 – 770 °C และอุณหภูมิในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจะมีค่าลดลงเหลือ 390 – 430 °C ที่ช่วงระยะความสูง  $T_4$  –  $T_5$  (Reduction zone) ซึ่งลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงนี้จะสอดคล้องกับทฤษฎีแก๊สซิฟิเคชัน แสดงดังรูป 4.25 (ก)

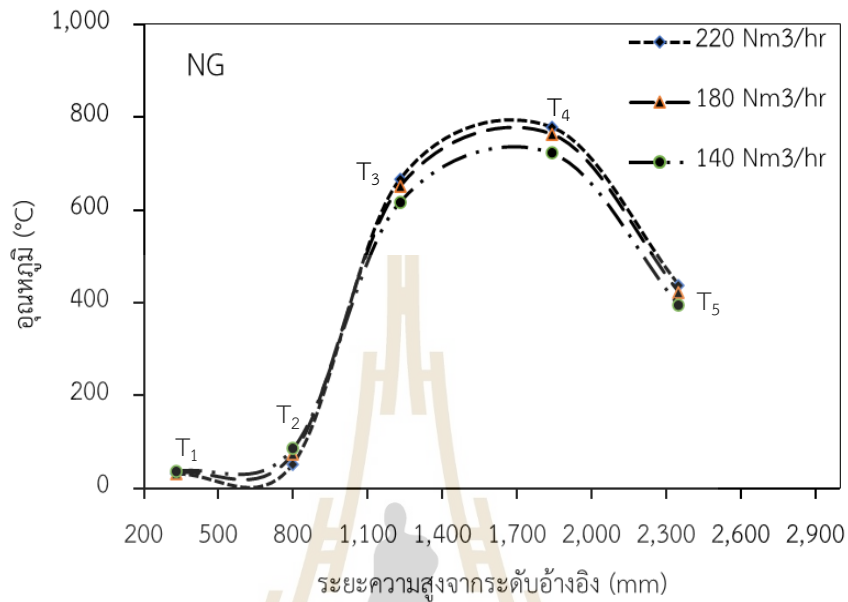
2) เชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัตถุดิบผสม SS/NG (50/50) มีความหนาแน่นรวมเพิ่มสูงขึ้น ( $719.28 \text{ kg/m}^3$ ) ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรเพิ่มขึ้นและช่องว่างระหว่างเชื้อเพลิงลดลง การพาความร้อนและการถ่ายเทความร้อนในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงเกิดขึ้นช้าลง สังเกตได้จากที่ระยะความสูง  $T_1 - T_2$  (Drying zone) มีอุณหภูมิเฉลี่ยไม่เกิน  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  และที่ระยะความสูง  $T_2 - T_3$  (Pyrolysis zone) มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น  $500 - 550 \text{ }^\circ\text{C}$  จากนั้นเพิ่มขึ้นสูงอีกเป็น  $700 - 750 \text{ }^\circ\text{C}$  ที่ระยะความสูง  $T_3 - T_4$  (Combustion zone) และอุณหภูมิในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าลดลงเหลือ  $320 - 340 \text{ }^\circ\text{C}$  ที่ช่วงระยะความสูง  $T_4 - T_5$  (Reduction zone) แสดงดังรูป 4.25 (ข)

3) เชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัตถุดิบผสม SS/NG (70/30) จะเห็นว่า การเพิ่มส่วนผสมของกากตะกอน จะทำให้มีความหนาแน่นเพิ่มสูงขึ้น ( $777.89 \text{ kg/m}^3$ ) ซึ่งสอดคล้องกัน คือ การพาความร้อนและการถ่ายเทความร้อนในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจะเกิดขึ้นช้าลงอย่างเห็นได้ชัด โดยที่ระยะความสูง  $T_1 - T_2$  (Drying zone) มีอุณหภูมิเพิ่มอย่างช้า ๆ ไม่เกิน  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  และที่ระยะความสูง  $T_2 - T_3$  (Pyrolysis zone) มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเพียง  $450 - 510 \text{ }^\circ\text{C}$  จากนั้นที่ระยะความสูง  $T_3 - T_4$  (Combustion zone) เป็นช่วงที่มีการบ่อนอากาศ พบว่าอุณหภูมิสูงสุดอยู่ในช่วง  $580 - 640 \text{ }^\circ\text{C}$  ซึ่งถือว่าค่อนข้างต่ำ และที่ระยะความสูง  $T_4 - T_5$  (Reduction zone) อุณหภูมิมีค่าลดลงเหลือเพียง  $260 - 270 \text{ }^\circ\text{C}$  แสดงดังรูป 4.25 (ค)

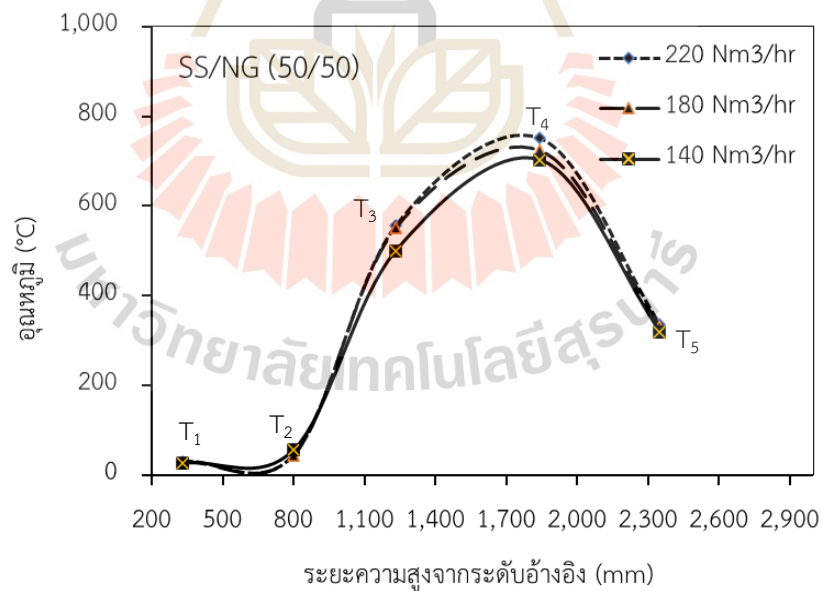
4) เชื้อเพลิงกากตะกอนอัดเม็ด (SS) เนื่องจากมีความหนาแน่นรวมที่สูงมาก ( $800.02 \text{ kg/m}^3$ ) ซึ่งส่งผลให้มีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรเพิ่มขึ้นและช่องว่างระหว่างเชื้อเพลิงลดลงอย่างมาก ทำให้การพาความร้อนและการถ่ายเทความร้อนจาก Combustion zone ทำได้ยากมาก ประกอบกับคุณสมบัติทางเคมีที่บ่งบอกถึงความสามารถในการเป็นเชื้อเพลิงที่ค่อนข้างต่ำ เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางด้านเคมีของเชื้อเพลิงกากตะกอนอัดเม็ดได้แก่เวลาในการจุดติดไฟและระยะเวลาในการเผาไหม้ ซึ่งทั้งสองตัวแปรนี้จะบ่งบอกถึงความสามารถในการเผาไหม้เชื้อเพลิงอัดเม็ดในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน กล่าวคือ เชื้อเพลิงกากตะกอนอัดเม็ดจะมีเวลาในการจุดติดไฟและระยะเวลาในการเผาไหม้นานที่สุดเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงอัดเม็ดประเภทอื่น จึงทำให้ประสิทธิภาพในการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงอัดเม็ดดังกล่าวค่อนข้างต่ำประกอบกับเหตุผลในข้างต้น ส่งผลให้การจุดติดไฟในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง ณ ตำแหน่ง Ignition port ของ Combustion zone เพื่อสังเกตลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงและการเกิดปฏิกิริยาอุณหเคมีในกระบวนการทำได้ค่อนข้างยาก ทำให้เชื้อเพลิงกากตะกอนอัดเม็ดไม่เหมาะสำหรับนำมาใช้ในการผลิตพลังงานด้วยเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน

นอกจากนี้ยังพบว่า การเดินระบบที่อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงทั้ง 3 ระดับ ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิไปในทางเดียวกัน และมีระดับอุณหภูมิในเตาเพิ่มสูงขึ้นตามอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้นด้วย ทั้งนี้อุณหภูมิในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่สูงและพอเหมาะจะ

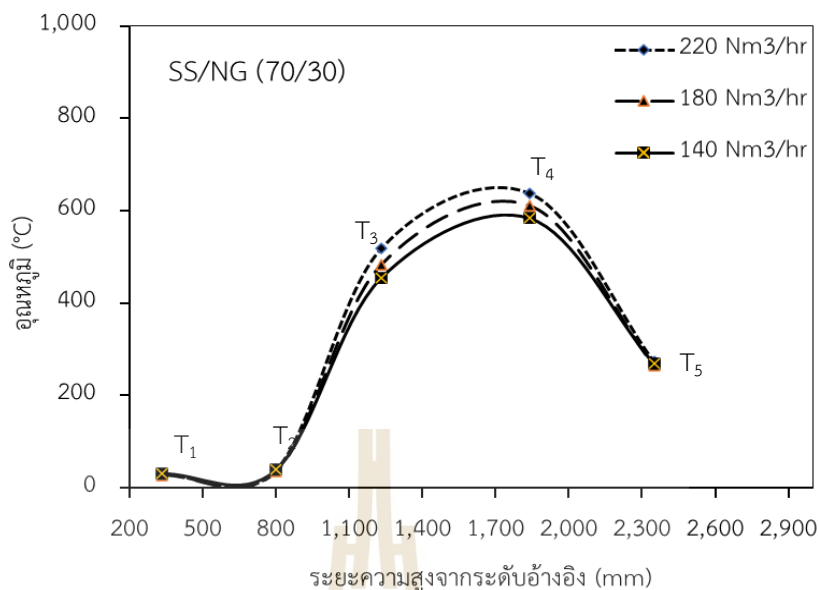
เป็นผลดีต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และการเกิดแก๊สเชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ ใน Reduction zone (Arjhan et al., 2012, 2013)



ก. เชื้อเพลิงหญ้าเนเปียร์อัดเม็ด (NG)



ข. เชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัตถุดิบผสม SS/NG (50/50)



ค. เชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัตถุดิบผสม SS/NG (70/30)

รูปที่ 4.25 ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์ (Temperature profile) ของเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้ง 3 ประเภท

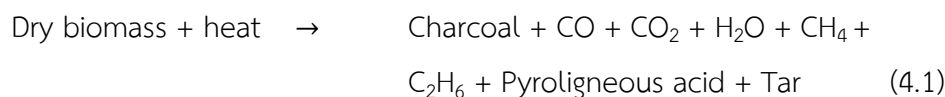
#### 4.4.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง

การทดสอบการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงอัดเม็ด 3 ประเภท ได้แก่ เชื้อเพลิงหญ้าเนเปียร์อัดเม็ด (NG), เชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัตถุดิบผสม SS/NG (50/50) และเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัตถุดิบผสม SS/NG (70/30) ในระบบแก๊สซิฟิเคชัน มีวัตถุประสงค์เพื่อหาสภาวะของการเดินระบบที่มีความต่อเนื่อง และสามารถเดินระบบได้ในระยะยาว โดยองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้สามารถจัดเป็น 2 กลุ่มหลัก ๆ คือ 1) กลุ่มที่จุดไฟติด (Combustible gas) ประกอบด้วย CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> และ 2) กลุ่มที่จุดไฟไม่ติด (Non-combustible gas) ประกอบด้วย N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> และ CO<sub>2</sub> ทั้งนี้การผลิตแก๊สเชื้อเพลิงควรมีค่าความร้อนที่สูงเพียงพอต่อการนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ

ปฏิกิริยาอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงมีผลมาจากอุณหภูมิและการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงและองค์ประกอบของเชื้อเพลิง โดยสามารถอธิบายได้ ดังต่อไปนี้

Drying zone คือช่วงที่ความชื้นในเชื้อเพลิงถูกกำจัดออกโดยเกิดที่ระยะความสูง 330 – 800 mm ซึ่งเป็นความสูงช่วงบนของเตา ตามที่ได้กล่าวมา

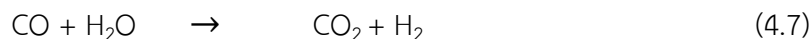
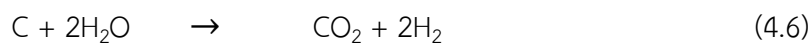
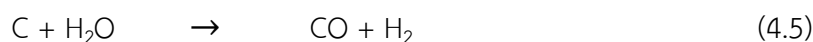
Pyrolysis zone หรือ Distillation โดยเกิดที่ระยะความสูง 800 – 1,230 mm ช่วงอุณหภูมิ 200 - 500 °C ในช่วงนี้ถ้าอุณหภูมิของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสูงพอเหมาะ จะได้ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นประกอบไปด้วยของแข็ง ของเหลว สารอินทรีย์ระเหยง่าย และแก๊ส ดังสมการที่ (4.1)



Combustion หรือ Oxidation zone ในช่วงที่อุณหภูมิสูงที่สุด คือจุดที่ป้อนอากาศเข้าสู่เตา โดยเกิดที่ระยะความสูง 1,230 – 1,840 mm ช่วงนี้จะเป็นหัวใจ Heat Hearth หรือ Hot Zone ที่เกิดกระบวนการ Combustion หรือ Oxidation เมื่อเชื้อเพลิงถูกกระตุ้นด้วยความร้อนจะลุกไหม้เกิดปฏิกิริยาอุณหภูมิระหว่างแก๊สออกซิเจนในอากาศกับคาร์บอนและไฮโดรเจน ซึ่งอยู่ในเชื้อเพลิง ผลของปฏิกิริยาดังกล่าวก่อให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ ดังสมการที่ (4.2) และ (4.3)



Reduction Zone จะเกิดที่ระยะความสูงระหว่าง 1,840 – 2,350 mm จะเป็นช่วงมีอุณหภูมิในช่วง 500 – 700 °C ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากโซนก่อนหน้านี้นี้จะถูกนำมาใช้ เพื่อเป็นสารตั้งต้นโดยปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในช่วง T<sub>3</sub>-T<sub>4</sub> นี้คือปฏิกิริยาของ C กับ CO<sub>2</sub> เกิดเป็น CO ดังสมการที่ (4.4) เรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น คือ Boudouard reaction และจะเกิดปฏิกิริยา Water shift reaction โดยเป็นปฏิกิริยาของ C กับ H<sub>2</sub>O เกิดเป็น H<sub>2</sub> ดังสมการที่ (4.5) ซึ่งปฏิกิริยาทั้งสองเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อนและเป็นปฏิกิริยาหลักที่ทำให้เกิดแก๊สเชื้อเพลิงที่ต้องการ คือ CO และ H<sub>2</sub> สำหรับกรณีเชื้อเพลิงที่มีความชื้นสูง ปริมาณน้ำส่วนเกิน (H<sub>2</sub>O) จะทำปฏิกิริยากับ C และ CO ต่อเนื่องทำให้ปริมาณ CO ลดลงและมีปริมาณแก๊ส CO<sub>2</sub> สูงขึ้น ดังสมการที่ (4.6) และ (4.7) ส่งผลให้ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้มีค่าลดลง จึงจำเป็นต้องควบคุมความชื้นของเชื้อเพลิงให้มีค่าต่ำ ทั้งนี้ H<sub>2</sub> บางส่วนจะทำปฏิกิริยากับ C ทำให้เกิดแก๊สมีเทนซึ่งเป็นปฏิกิริยาหลักของการผลิตแก๊สมีเทน ดังสมการที่ (4.8) ปฏิกิริยานี้ เรียกว่า Methane production หรือ Methanization



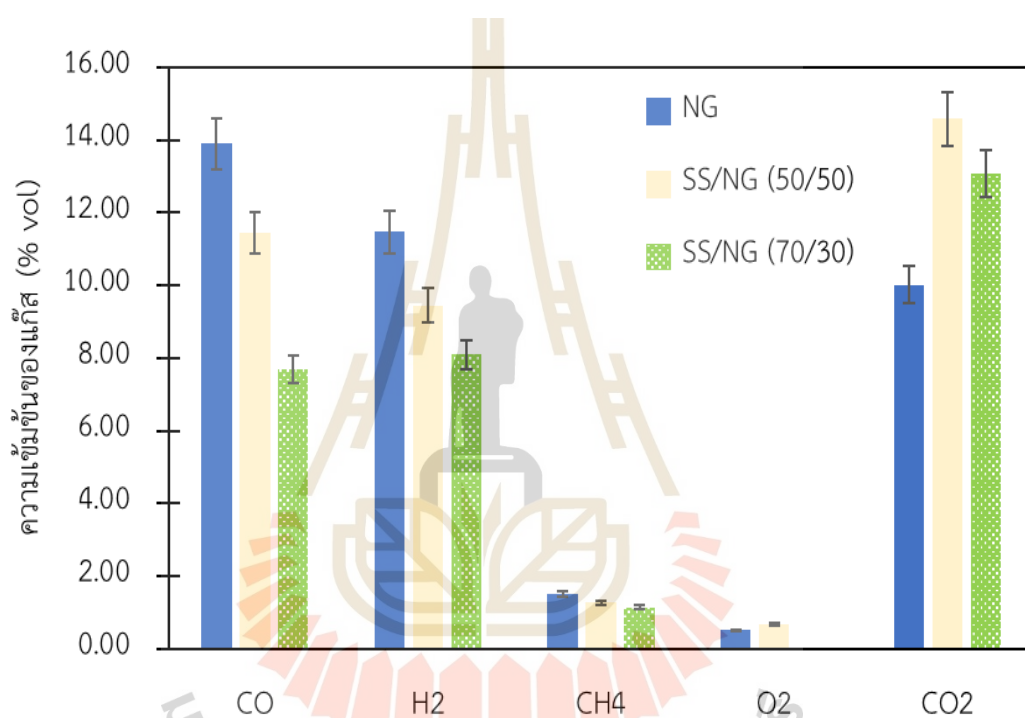
คุณสมบัติและค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิง จากการเดินระบบสำหรับเชื้อเพลิงอัดเม็ด 3 ประเภท คือ เชื้อเพลิงหญ้าเนเปียร์อัดเม็ด (NG), เชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัตถุดิบผสม SS/NG (50/50) และเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัตถุดิบผสม SS/NG (70/30) ที่อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงทั้ง 3 ระดับ คือ 140, 180 และ 220 Nm<sup>3</sup>/hr แสดงในตารางที่ 4.8 ซึ่งสรุป ได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.8 องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตจากเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้ง 3 ประเภท

| ประเภท<br>เชื้อเพลิง | คุณสมบัติของแก๊สเชื้อเพลิง<br>สัดส่วนโดยปริมาตรเฉลี่ย (%vol) |       |                |                 |                |                 | ค่าความร้อน<br>ของแก๊ส<br>เชื้อเพลิง<br>(MJ/Nm <sup>3</sup> ) |
|----------------------|--|-------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|---|
|                      | Flow<br>(Nm <sup>3</sup> /hr)                                | CO    | H <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | O <sub>2</sub> | CO <sub>2</sub> |   |
| NG                   | 140 ± 3.71   | 12.87 | 10.23          | 1.24            | 1.45           | 7.10            | 3.55  |
|                      | 180 ± 2.17   | 13.28 | 11.13          | 1.36            | 0.05           | 8.13            | 3.77  |
|                      | 220 ± 0.85   | 13.90 | 11.46          | 1.52            | 0.51           | 10.02           | 3.96  |
| SS/NG<br>(50/50)     | 140 ± 0.75   | 9.95  | 8.43           | 1.09            | 0.00           | 9.37            | 2.87  |
|                      | 180 ± 1.26   | 10.98 | 8.84           | 1.15            | 0.29           | 10.60           | 3.08  |
|                      | 220 ± 0.46   | 11.43 | 9.44           | 1.27            | 0.66           | 14.58           | 3.27  |
| SS/NG<br>(70/30)     | 140 ± 3.30   | 7.31  | 6.90           | 1.03            | 0.00           | 9.66            | 2.29  |
|                      | 180 ± 1.39   | 7.63  | 7.83           | 1.10            | 0.00           | 12.75           | 2.49  |
|                      | 220 ± 1.23   | 7.70  | 8.09           | 1.13            | 0.00           | 13.07           | 2.54  |

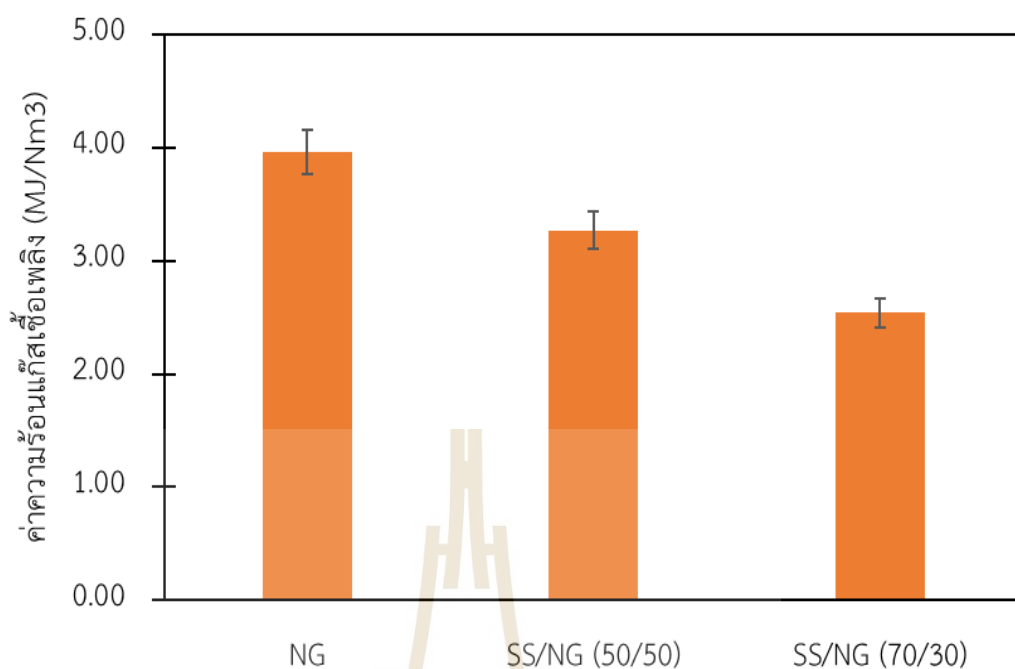
จากตารางที่ 4.8 เห็นว่า ที่อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงสูงสุดของเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้ง 3 ประเภท ซึ่งจะอยู่ในช่วง 220 Nm<sup>3</sup>/hr จะให้แก๊สเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพทางด้านค่าความร้อนสูงที่สุดเมื่อเทียบกับอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงที่ระดับอื่น (ทิพย์สุภินทร์ หินชุย, 2556; นัยวัฒน์ สุขทั้ง, 2558) ทั้งนี้หากพิจารณา รูปที่ 4.26 และ 4.27 ซึ่งเป็นการนำเสนอข้อมูลองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง และค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิง ที่ระดับอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงในช่วง

220 Nm<sup>3</sup>/hr พบว่า การเพิ่มสัดส่วนของหญ้าเนเปียร์ในการผสมวัตถุดิบสำหรับผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด จะส่งผลให้องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง เช่น CO, H<sub>2</sub> และ CH<sub>4</sub> ที่เป็นกลุ่มของที่สามารถเผาไหม้ได้ และทำให้ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงมีแนวโน้มสูงขึ้น ซึ่งจะสอดคล้องกับงานวิจัยของ ทิพย์สุภินทร์ หินชุย, 2556 ที่ศึกษาการเพิ่มสัดส่วนของ Wood chip (ไม้สับ) ในการผสมเชื้อเพลิง (Blending fuel) กับ RDF-5 (เชื้อเพลิงขยะประเภท 5) ที่ส่งผลต่อคุณภาพของแก๊สเชื้อเพลิงพบว่า เมื่อสัดส่วนของ Wood chip สูงขึ้น จะส่งผลให้องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง คือ CO, H<sub>2</sub> และ CH<sub>4</sub> มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและทำให้ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน



รูปที่ 4.26 องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง 220 Nm<sup>3</sup>/hr





รูปที่ 4.27 ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิง ที่อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง 220 Nm<sup>3</sup>/hr

#### 4.4.3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณทาร์และฝุ่น

การวิเคราะห์หองค์ประกอบที่ปนเปื้อนในแก๊สเชื้อเพลิงจะทำการวิเคราะห์ทาร์และฝุ่น (Tar and dust) ในแก๊สเชื้อเพลิงซึ่งได้ผ่านการทำความสะอาดจาก 3 ระบบ ได้แก่ 1) Cyclone collector, 2) Water scrubber และ 3) Chiller scrubber ผลการศึกษาแสดงในตารางที่ 4.9 พบว่า แนวโน้มของปริมาณการปนเปื้อนของทาร์และฝุ่นในแก๊สเชื้อเพลิงเรียงตามลำดับ คือ NG > SS/NG (50/50) > SS/NG (70/30) เมื่อเพิ่มส่วนผสมของหญ้าเนเปียร์ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลในกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัตถุดิบผสม โดยทั่วไปมีการปนเปื้อนของอนุภาคขนาดเล็กและฝุ่น รวมทั้งการปรับอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงที่ระดับสูงขึ้น จะยังมีแนวโน้มของปริมาณการปนเปื้อนของทาร์และฝุ่นมากขึ้น กล่าวคือ เมื่อปรับเพิ่มอัตราการไหลในระบบท่อลำเลียงแก๊สเชื้อเพลิงจะมีผลทำให้ ดีกรีความปั่นป่วนเพิ่มขึ้น จึงเกิดการฟุ้งกระจายของฝุ่นและอนุภาคขนาดเล็กในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงมากยิ่งขึ้น

ตารางที่ 4.9 ปริมาณทาร์และฝุ่นของแก๊สเชื้อเพลิง

| ประเภทเชื้อเพลิง | อัตราการไหล<br>(Nm <sup>3</sup> /hr) | ปริมาณ (mg/Nm <sup>3</sup> ) |        |        |
|------------------|--------------------------------------|------------------------------|--------|--------|
|                  |                                      | ทาร์และฝุ่น                  | ทาร์   | ฝุ่น   |
| NG               | 140 ± 3.71                           | 129.843                      | 44.460 | 85.383 |
|                  | 180 ± 2.17                           | 141.748                      | 76.308 | 65.441 |
|                  | 220 ± 0.85                           | 149.235                      | 63.700 | 85.535 |
| SS/NG (50/50)    | 140 ± 0.75                           | 121.017                      | 44.833 | 76.184 |
|                  | 180 ± 1.26                           | 130.848                      | 90.379 | 40.469 |
|                  | 220 ± 0.46                           | 139.650                      | 64.245 | 75.406 |
| SS/NG (70/30)    | 140 ± 3.30                           | 118.558                      | 66.903 | 51.656 |
|                  | 180 ± 1.39                           | 122.250                      | 39.852 | 82.399 |
|                  | 220 ± 1.23                           | 127.664                      | 47.833 | 79.831 |

อย่างไรก็ดีปริมาณทาร์และฝุ่นที่ผ่านกระบวนการทำความสะอาดแล้วพบว่า อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ คือ มีปริมาณทาร์และฝุ่นอยู่ในช่วง 118.59 – 149.24 mg/Nm<sup>3</sup> ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Milne et al., 1988; Singh et al., 2014 ที่ได้สรุปว่าการปนเปื้อนของทาร์และฝุ่นของเทคโนโลยี Downdraft gasifier โดยทั่วไป จะมีค่าประมาณ 50 - 500 mg/ Nm<sup>3</sup> จึงสรุปได้ว่าคุณภาพของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้เมื่อผ่านกระบวนการทำความสะอาดแล้ว จะมีคุณภาพที่ดีขึ้นซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อไปได้

#### 4.4.4 ประสิทธิภาพการผลิตพลังงานของระบบ

โดยการประเมินประสิทธิภาพการผลิตพลังงานของระบบ จะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ 1) การประเมินประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง Cold gasification efficiency ( $\eta_{cg}$ ) และ 2) การเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบ แสดงดังต่อไปนี้

##### 4.4.4.1 การประเมินประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง

แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการเปลี่ยนรูปพลังงานที่สะสมอยู่ในเชื้อเพลิงแข็งไปเป็นแก๊สเชื้อเพลิงที่สามารถเผาไหม้ได้ (Combustible gas) ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ตารางที่ 4.10 แสดงแนวโน้มของประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงของเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้ง 3 ประเภท พบว่า  $\eta_{cg}$  มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงสูงขึ้น ซึ่งจะสอดคล้องกับอุณหภูมิ และค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิง ในหัวข้อที่ผ่านมา สามารถสรุปรายละเอียดได้ดังนี้

1) เชื้อเพลิงหญ้าเนเปียร์อัดเม็ด (NG) ซึ่งมีคุณสมบัติการเป็นเชื้อเพลิงที่ดี จึงเหมาะสมกับระบบแก๊สซิฟิเคชัน ส่งผลให้การเดินระบบราบเรียบ และจากการเดินระบบที่ระดับ อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง 220 Nm<sup>3</sup>/hr พบว่า ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าสูงที่สุด เท่ากับ 71.10% ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยอื่น ๆ (ทิพย์สุภินทร์ หินชุย, 2556; นัยวัฒน์ สุขทั้ง, 2558)

2) เชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัตถุดิบผสม SS/NG (50/50) พบว่า ที่ระดับ อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง 220 Nm<sup>3</sup>/hr มีประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงลดลง เมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงหญ้าเนเปียร์อัดเม็ด ซึ่งมีค่า  $\eta_{cg}$  เท่ากับ 62.72%

3) เชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัตถุดิบผสม SS/NG (70/30) พบว่า ที่ระดับ อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง 220 Nm<sup>3</sup>/hr มีประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงลดลงอย่างมาก เมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงหญ้าเนเปียร์อัดเม็ด และเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัตถุดิบผสม SS/NG (50/50) ซึ่งก็ สอดคล้องกับ ผลของอุณหภูมิ องค์ประกอบและค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิง ที่มีค่าค่อนข้างต่ำ โดยมีค่า  $\eta_{cg}$  เท่ากับ 46.27%

ตารางที่ 4.10 ผลการประเมินประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงของระบบแก๊สซิฟิเคชัน

| ประเภทเชื้อเพลิง | อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง (Nm <sup>3</sup> /hr) | อัตราการใช้เชื้อเพลิง (kg/hr) | อัตราการเกิดเถ้า (kg/hr) | อัตราการดึงเถ้าออก (%) | ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (%) |
|------------------|--|-------------------------------|--------------------------|------------------------|--------------------------------------|
| NG               | 140 ± 3.71   | 60.45                         | 7.86                     | 13.01                  | 62.53                                |
|                  | 180 ± 2.17   | 75.58                         | 9.49                     | 12.56                  | 67.38                                |
|                  | 220 ± 0.85   | 91.14                         | 11.05                    | 12.12                  | 71.10                                |
| SS/NG (50/50)    | 140 ± 0.75   | 88.35                         | 33.66                    | 38.10                  | 49.79                                |
|                  | 180 ± 1.26   | 110.25                        | 41.50                    | 37.64                  | 55.21                                |
|                  | 220 ± 0.46   | 124.78                        | 47.72                    | 38.24                  | 62.72                                |
| SS/NG (70/30)    | 140 ± 3.30   | 105.19                        | 54.81                    | 52.11                  | 37.33                                |
|                  | 180 ± 1.39   | 120.12                        | 62.94                    | 52.40                  | 44.17                                |
|                  | 220 ± 1.23   | 145.24                        | 76.66                    | 52.78                  | 46.27                                |

#### 4.4.4.2 การเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบ เช่น การประเมินค่าพลังงานสุทธิของระบบ (Net energy yield)

การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบ เพื่อเปรียบเทียบระหว่างเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้ง 3 ประเภทด้วยระบบแก๊สซิฟิเคชัน ที่อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงสูงสุด 220 Nm<sup>3</sup>/hr ซึ่งจะผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้มีค่าความร้อนสูงที่สุด โดยผลการประเมินค่าพลังงานที่ได้จากระบบแก๊สซิฟิเคชัน แสดงในตารางที่ 4.11 พบว่า การเพิ่มส่วนผสมของหญ้าเนเปียร์ในกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัตถุดิบผสม จะทำให้ค่าพลังงานแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ และอัตราส่วนพลังงานจากแก๊สเชื้อเพลิงต่อเชื้อเพลิงที่เข้าระบบ (Energy yield) สูงขึ้น จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง เพิ่มขึ้นเฉลี่ยในช่วง 12 - 26%

ตารางที่ 4.11 การเปรียบเทียบสมรรถนะการผลิตพลังงานของระบบระหว่างเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้ง 3 ประเภท

| พารามิเตอร์   | NG         | SS/NG<br>(50/50) | SS/NG<br>(70/30) |
|---|------------|------------------|------------------|
| อัตราการใช้เชื้อเพลิง (kg/hr)   | 91.14      | 124.78           | 145.24           |
| อัตราการเกิดเถ้า (kg/hr)  | 11.05      | 47.72            | 76.66            |
| อัตราการดึงเถ้าออก (%)  | 12.12      | 38.24            | 52.78            |
| ระยะเวลาการทำงาน (hr)   | 4          | 4                | 4                |
| ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (MJ/kg)  | 13.49      | 9.17             | 8.37             |
| อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง (Nm <sup>3</sup> /hr)  | 220 ± 0.85 | 220 ± 0.46       | 220 ± 1.23       |
| ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิง (CV <sub>g</sub> , MJ/Nm <sup>3</sup> )                                      | 3.96       | 3.27             | 2.54             |
| พลังงานของเชื้อเพลิงเข้าระบบ (MJ/hr)  | 1,229.48   | 1,144.23         | 1,215.66         |
| พลังงานของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ที่สภาวะมาตรฐาน (MJ/hr)   | 874.57     | 717.66           | 562.46           |
| อัตราส่วนปริมาตรแก๊สเชื้อเพลิง/เชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าระบบ (Volume producer gas yield, Nm <sup>3</sup> /kg) | 2.42       | 1.76             | 1.52             |
| อัตราส่วนพลังงานแก๊สเชื้อเพลิง/เชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าระบบ (Energy yield, MJ/kg)                            | 9.60       | 5.75             | 3.87             |
| ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Cold-gasification efficiency) (%)                                       | 71.10      | 62.72            | 46.27            |

ทั้งนี้จากผลการทดสอบการผลิตพลังงานด้วยเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันจากเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้ง 3 ประเภท ได้แก่ เชื้อเพลิงหญ้าเนเปียร์อัดเม็ด (NG), เชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัตถุดิบผสม SS/NG (50/50) และ เชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัตถุดิบผสม SS/NG (70/30) พบว่า เชื้อเพลิงหญ้าเนเปียร์อัดเม็ด (NG) มีประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงและมีสมรรถนะการผลิตพลังงานดีที่สุดในเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงอัดเม็ดประเภทอื่น แต่ในส่วนของวัตถุประสงค์งานวิจัยนี้ได้เน้นเกี่ยวกับการนำกากตะกอนมาเป็นเชื้อเพลิงเสริมในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันร่วมกับหญ้าเนเปียร์ ดังนั้นจึงพิจารณาเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัตถุดิบผสม SS/NG (50/50)

โดยผลการทดสอบการผลิตพลังงานด้วยเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัตถุดิบผสม SS/NG (50/50) พบว่า ที่อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงสูงสุด คือ  $220 \text{ Nm}^3/\text{hr}$  มีความสามารถในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนเท่ากับ  $3.27 \text{ MJ}/\text{Nm}^3$  โดยสามารถนำแก๊สเชื้อเพลิงดังกล่าวนี้ไปใช้เป็นแหล่งพลังงานความร้อนโดยตรงให้กับชุดหัวเผาสำหรับอบแห้งชีวมวลหรือนำแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้ไปใช้กับหม้อไอน้ำความดันในการผลิตไอน้ำและนำไปหมุนเครื่องกังหันไอน้ำเพื่อผลิตไฟฟ้า อีกทั้งยังมีปริมาณทาร์และฝุ่นในแก๊สเชื้อเพลิงที่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน คือ  $139.650 \text{ mg}/\text{Nm}^3$  รวมทั้งมีประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง เท่ากับ 62.72%

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัตถุดิบผสม SS/NG (50/50) เป็นเชื้อเพลิงที่มีความสามารถ และประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง รวมทั้งมีสมรรถนะการผลิตพลังงานที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ซึ่งถือเป็นทางเลือกที่ต้ออย่างหนึ่งในการพัฒนาระบบกำจัดกากตะกอนร่วมกับการใช้ประโยชน์จากหญ้าเนเปียร์ในการผลิตพลังงานทดแทนและช่วยลดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมในอนาคตได้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

ผลศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากตะกอนน้ำเสีย (SS), หญาเนเปียร์ (NG) วัตถุดิบผสม SS/NG (50/50) และวัตถุดิบผสม SS/NG (70/30) รวมทั้งทดสอบประสิทธิภาพการผลิตพลังงานโดยใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน ผลการศึกษาสรุปได้ดังต่อไปนี้

##### 5.1.1 คุณสมบัติทางเคมีของวัตถุดิบ

1) กากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมผลิตแอมโมเนียสำหรับบริษัท สวงวงษ์ อุตสาหกรรม จำกัด มีความสามารถในการนำมาเป็นเชื้อเพลิงที่ต่ำ เนื่องจากมีค่าความร้อน ปริมาณสารระเหย ธาตุคาร์บอน และธาตุไฮโดรเจนที่ค่อนข้างต่ำ รวมทั้งมีปริมาณเถ้าที่สูง จึงมีแนวคิดที่จะนำหญาเนเปียร์มาผสมกับกากตะกอนในรูปแบบการผสมวัตถุดิบ (Blending raw materials) เพื่อเพิ่มความสามารถในการนำมาเป็นเชื้อเพลิงได้ดีขึ้น ผลการศึกษาพบว่า คุณสมบัติทางเคมีโดยรวมของกากตะกอนมีแนวโน้มสูงขึ้น และมีปริมาณเถ้าที่ลดลง

2) โลหะหนักในกากตะกอนน้ำเสีย พบการปนเปื้อนของเหล็ก (Fe) และคลอรีน (Cl) ค่อนข้างสูงถึงจะผ่านการผสมกับหญาเนเปียร์แล้วก็ตาม ทั้งนี้ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันวัฏจักรของโลหะหนักส่วนใหญ่จะอยู่ในเถ้า ในส่วนคลอรีนส่วนใหญ่จะถูกดักจับด้วยระบบสครับเบอร์ และน้ำเสียที่เกิดขึ้นจะผ่านการบำบัดโดยวิธีการทางเคมีในลำดับต่อไป

##### 5.1.2 ผลการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด

1) ทำการเตรียมวัตถุดิบกากตะกอนและหญาเนเปียร์โดยนำมาตากแดดลดความชื้น และลดขนาดโดยใช้เครื่องบด ในส่วนของกากตะกอนจะลดความชื้นให้ต่ำกว่า 10%wb และลดขนาดให้น้อยกว่า 10 มิลลิเมตร จากนั้นทำการปรับความชื้น 4 ระดับ 10, 15, 18 และ 20%wb นอกจากนี้ในการเตรียมวัตถุดิบหญาเนเปียร์จะลดความชื้นให้ต่ำกว่า 7% และลดขนาดให้น้อยกว่า 5 mm พร้อมทั้งปรับความชื้น 3 ระดับ 7, 12 และ 17%wb เพื่อหาความชื้นที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดของวัตถุดิบทั้งสอง โดยเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผลิตได้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm ความยาวเฉลี่ย 10 – 40 mm มีความหนาแน่นรวมเฉลี่ย 795 kg/m<sup>3</sup> และ 531.21 kg/m<sup>3</sup> ของเชื้อเพลิงกากตะกอนอัดเม็ดและเชื้อเพลิงหญาเนเปียร์อัดเม็ด ตามลำดับ

2) เปรียบเทียบการผลิตเชื้อเพลิงกากตะกอนอัดเม็ด (SS) และเชื้อเพลิงหญ้าเนเปียร์อัดเม็ด (NG) ที่ผ่านการปรับความชื้นมาแล้ว ในแง่ของการประเมินลักษณะเบื้องต้น คุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ เปอร์เซ็นต์ผลผลิต ค่าความหนาแน่นรวม ค่าความคงทน ค่าความต้านทานน้ำ และอัตราการใช้พลังงานของการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด รวมทั้งประเมินคุณสมบัติทางการเผาไหม้ เช่น เวลาในการจุดติดไฟและระยะเวลาในการเผาไหม้ เพื่อเลือกสัดส่วนความชื้นที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดและนำมาใช้ในการปรับความชื้นของวัตถุดิบทั้งสองก่อนนำมาผสมกันในลำดับต่อไป

3) ผลการเปรียบเทียบเชื้อเพลิงกากตะกอนอัดเม็ดที่ผ่านการปรับความชื้น พบว่าเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ความชื้น 15%wb มีความเหมาะสมทั้งในแง่ของการประเมินลักษณะเบื้องต้นและคุณสมบัติทางกายภาพรวมทั้งคุณสมบัติด้านการเผาไหม้โดยรวมมีประสิทธิภาพที่สูงกว่าความชื้นระดับอื่น ในส่วนเชื้อเพลิงหญ้าเนเปียร์อัดเม็ดที่ความชื้น 12%wb มีประสิทธิภาพในด้านการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดโดยรวมที่เหมาะสมที่สุด

### 5.1.3 ผลการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดโดยการผสมวัตถุดิบ

หลังจากได้ความชื้นที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากตะกอน (SS) และหญ้าเนเปียร์ (NG) แล้ว จะนำวัตถุดิบทั้งสองมาผสมกันในรูปแบบการผสมวัตถุดิบ (Blending raw materials) ในสัดส่วนต่าง ๆ เช่น วัตถุดิบผสม SS/NG (50/50) และ วัตถุดิบผสม SS/NG (70/30) แล้วนำมาผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด รวมทั้งประเมินลักษณะเบื้องต้น คุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติทางการเผาไหม้ ซึ่งผลการประเมินพบว่า เมื่อเพิ่มส่วนผสมของกากตะกอนในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด จะทำให้ลักษณะเบื้องต้นของเม็ดเชื้อเพลิงสมบูรณ์ขึ้น และคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น เปอร์เซ็นต์ผลผลิต ค่าความหนาแน่นรวม ค่าความคงทน ค่าความต้านทานน้ำ และอัตราการใช้พลังงานของการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดมีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้น รวมทั้งคุณสมบัติทางการเผาไหม้ เช่น เวลาในการจุดติดไฟ และระยะเวลาในการเผาไหม้มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน

### 5.1.4 ผลการศึกษาการผลิตพลังงานด้วยเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน

จากการทดสอบผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงอัดเม็ด 4 ประเภท คือ เชื้อเพลิงกากตะกอนอัดเม็ด (SS), เชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัตถุดิบผสม SS/NG (50/50), เชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัตถุดิบผสม SS/NG (70/30) และเชื้อเพลิงหญ้าเนเปียร์อัดเม็ด (NG) ในสภาวะการทำงานที่อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง 140, 180 และ 220 Nm<sup>3</sup>/hr พบว่า

1) การกระจายตัวของอนุภาคในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่มีการเปลี่ยนอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงทั้ง 3 ระดับ พบว่า เมื่อเพิ่มส่วนผสมของหญ้าเนเปียร์ในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัตถุดิบผสม ทำให้เชื้อเพลิงมีความหนาแน่นลดลง ซึ่งจะส่งผลให้มีพื้นที่ผิวต่อปริมาตร

ลดลงและช่องว่างระหว่างเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น รวมทั้งการพาความร้อนและการถ่ายเทความร้อนในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจะเกิดเร็วขึ้น ทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยในแต่ละโซน (Drying zone, Pyrolysis zone, Combustion zone และ Reduction zone) มีค่าเพิ่มขึ้น ยกเว้นเชื้อเพลิงกากตะกอนอัดเม็ดที่มีความหนาแน่นรวมที่สูงซึ่งส่งผลให้มีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรเพิ่มขึ้นและช่องว่างระหว่างเชื้อเพลิงลดลงอย่างมาก ทำให้การพาความร้อนและการถ่ายเทความร้อนจาก Combustion zone ทำได้ยากมาก รวมทั้งคุณสมบัติทางเคมีที่บ่งบอกถึงความสามารถในการเป็นเชื้อเพลิงต่ำ ส่งผลให้การจุดติดไฟในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงเพื่อสังเกตลักษณะการเกิดปฏิกิริยาอุณหเคมีในกระบวนการทำได้ค่อนข้างยาก ดังนั้นเชื้อเพลิงกากตะกอนอัดเม็ดจึงไม่เหมาะสำหรับนำมาใช้ในการผลิตพลังงานด้วยเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน

2) การวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง พบว่า ที่อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงสูงสุดของเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้ง 3 ประเภท เท่ากับ  $220 \text{ Nm}^3/\text{hr}$  จะให้แก๊สเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพด้านค่าความร้อนสูงที่สุดเมื่อเทียบกับอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงตัวอื่น โดยการเพิ่มส่วนผสมของหญ้าเนเปียร์ในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัตถุดิบผสม จะส่งผลให้องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง เช่น  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$  และ  $\text{CH}_4$  จะเป็นกลุ่มของแก๊สที่สามารถเผาไหม้ได้และค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

3) ปริมาณทาร์และฝุ่นที่ผ่านกระบวนการทำความสะอาดแล้ว พบว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ คือ มีปริมาณทาร์และฝุ่นรวมอยู่ในช่วง  $118.59 - 149.24 \text{ mg}/\text{Nm}^3$  โดยการเพิ่มส่วนผสมของหญ้าเนเปียร์ ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลโดยทั่วไปมีการปนเปื้อนของอนุภาคขนาดเล็กและฝุ่น รวมทั้งการปรับอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงที่ระดับสูงขึ้น จะยังมีแนวโน้มของปริมาณการปนเปื้อนของทาร์และฝุ่นมากขึ้น กล่าวคือ เมื่อปรับเพิ่มอัตราการไหลในระบบท่อลำเลียงแก๊สเชื้อเพลิงจะมีผลทำให้ดริกรความปั่นป่วนเพิ่มขึ้น จึงเกิดการฟุ้งกระจายของฝุ่นและอนุภาคขนาดเล็กในเตามากยิ่งขึ้น

4) ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Cold gasification efficiency:  $\eta_{cg}$ ) ของเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้ง 3 ประเภท ที่อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง  $220 \text{ Nm}^3/\text{hr}$  อยู่ในช่วง  $46.27 - 71.10\%$  โดยการเพิ่มส่วนผสมของหญ้าเนเปียร์ในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัตถุดิบผสม จะทำให้อุณหภูมิภายในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง องค์ประกอบแก๊สเชื้อเพลิง และค่าความร้อนแก๊สเชื้อเพลิงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งทั้ง 3 ตัวแปรนี้มีผลโดยตรงกับประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง จึงทำให้  $\eta_{cg}$  มีค่าเพิ่มขึ้น

5) การเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบเพื่อประเมินค่าพลังงานที่ได้จากระบบแก๊สซิฟิเคชัน ของเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้ง 3 ประเภท ที่อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง  $220 \text{ Nm}^3/\text{hr}$  ซึ่งจะผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนสูงที่สุด พบว่า การเพิ่มส่วนผสมของหญ้าเนเปียร์ในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัตถุดิบผสม ทำให้ค่าพลังงานแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้สูงขึ้น อัตราส่วนพลังงานจาก



แก๊สเชื้อเพลิงต่อเชื้อเพลิงที่เข้าระบบ (Energy yield) สูงขึ้น จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นประมาณ 12 – 26%

6) ผลการทดสอบการผลิตพลังงานด้วยเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันจากเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้ง 3 ประเภท ได้แก่ เชื้อเพลิงหญ้าเนเปียร์อัดเม็ด (NG), เชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัตถุดิบผสม SS/NG (50/50) และ เชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัตถุดิบผสม SS/NG (70/30) พบว่า เชื้อเพลิงหญ้าเนเปียร์อัดเม็ด (NG) มีประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงและมีสมรรถนะการผลิตพลังงานดีที่สุดเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงอัดเม็ดประเภทอื่น แต่ในส่วนของวัตถุประสงค์งานวิจัยนี้ได้เน้นเกี่ยวกับการนำกากตะกอนมาเป็นเชื้อเพลิงเสริมในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันร่วมกับหญ้าเนเปียร์ ดังนั้นจึงพิจารณาเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัตถุดิบผสม SS/NG (50/50) ซึ่งพบว่าที่อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงสูงสุด คือ  $220 \text{ Nm}^3/\text{hr}$  มีความสามารถในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนเท่ากับ  $3.27 \text{ MJ}/\text{Nm}^3$  โดยสามารถนำแก๊สเชื้อเพลิงดังกล่าวนี้ไปใช้เป็นแหล่งพลังงานความร้อนโดยตรงให้กับชุดหัวเผาสำหรับอบแห้งชีวมวลหรือนำแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้ไปใช้กับหม้อไอน้ำความดันในการผลิตไอน้ำและนำไปหมุนเครื่องกังหันไอน้ำเพื่อผลิตไฟฟ้า อีกทั้งยังมีปริมาณทาร์และฝุ่นในแก๊สเชื้อเพลิงที่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคือ  $139.650 \text{ mg}/\text{Nm}^3$  รวมทั้งมีประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง เท่ากับ 62.72% ดังนั้นจึงเลือกเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัตถุดิบผสม SS/NG (50/50) เป็นเชื้อเพลิงที่มีความสามารถ และประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง รวมทั้งมีสมรรถนะการผลิตพลังงานที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ซึ่งถือเป็นทางเลือกที่ตืออย่างหนึ่งในการพัฒนาระบบกำจัดกากตะกอนร่วมกับการใช้ประโยชน์จากหญ้าเนเปียร์ในการผลิตพลังงานทดแทนและช่วยลดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมในอนาคตได้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1) ควรคำนึงถึงความพร้อมของสภาพอากาศ พื้นที่ และเครื่องจักรในการเตรียมวัตถุดิบเนื่องจากวัตถุดิบกากตะกอนและหญ้าเนเปียร์มีลักษณะเบื้องต้นที่ยังไม่เหมาะสมต่อการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดต้องผ่านการเตรียมวัตถุดิบก่อน และต้องใช้เชื้อเพลิงจำนวนมากในการนำมาใช้กับระบบแก๊สซิฟิเคชัน

2) ควรมีการวิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์ในรูปแบบของการวิเคราะห์ทางการเงินและการลงทุนในเชิงอุตสาหกรรมว่ามีจุดคุ้มทุนเพียงใดในการนำกากตะกอนและหญ้าเนเปียร์มาผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ด

3) การนำเชื้อเพลิงที่มีความหนาแน่นรวมสูงมาใช้กับระบบแก๊สซิฟิเคชัน ต้องมีการคำนึงถึงขนาดพัดลม-ดูดอากาศ (Blower) ต้องมีความเหมาะสมเพียงพอต่อการลำเลียงแก๊สเชื้อเพลิงจากกระบวนการไปใช้ประโยชน์ต่อไป

## รายการอ้างอิง

- กิตติกร สาสุจิตต์, วราพงศ์ แสนพินิจ, ณัฐพงษ์ วงศ์รินทร์, ณัฐวุฒิ ดุษฎี. (2558). การผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากวัสดุเหลือทิ้งซังและเปลือกข้าวโพดด้วยเทคนิคการอัดรีดขึ้นรูปโดยใช้ตัวประสานแป้งมันผสมปูนขาว. วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณปีที่ 18 ฉบับที่ 1.
- เกียรติไกร อายุวัฒน์, บุญรอด สัจกุลนุกิจ, ธันวา ใจเที่ยง และจิรัฐญา เผ่าหลักแหลม. (2549). ความก้าวหน้าของเทคโนโลยีไฟโรไลซิส / ก๊าซซิพิเคชั่นสำหรับการผลิตพลังงานจากชีวมวลและขยะมูลฝอย. โครงการพัฒนาระบบผลิตพลังงานจากชีวมวล. การประชุมวิชาการแห่งชาติ ครั้งที่ 1. หน้า 126-130.
- เกษรา รัตตะวัน. (2561). ผลของตัวประสานทางธรรมชาติที่มีผลต่อคุณลักษณะทางกายภาพและต้นทุนพลังงานในกระบวนการขึ้นรูปแบบอัดแท่งตะเกียบจากเศษไม้กระถิน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- กรมควบคุมมลพิษ. (2562). คู่มือเฝ้าระวังติดตามปัญหามลพิษจากการลักลอบทิ้งกากของเสียอันตรายในพื้นที่เสี่ยง. สืบค้นจาก <https://www.pcd.go.th/publication/13646/>
- กัญธนา ดิษฐ์แก้ว, กิตติศักดิ์ เจริมประสิทธิ์ประเสริฐ. (2564). อิทธิพลของคุณภาพสารสนเทศทางบัญชีบริหารกับศักยภาพการจัดการห่วงโซ่อุปทานเพื่อสร้างรายได้เปรียบทางการแข่งขันอย่างยั่งยืนของบริษัทแปรรูปมันสำปะหลังในประเทศไทย. วารสารวิชาการสังคมศาสตร์เครือข่ายวิจัยประชาชื่นปีที่ 3 ฉบับที่ 2.
- ชมธิดา ชื่นนิยม. (2553). การศึกษาการเพิ่มมูลค่าของเศษซังข้าวโพดโดยการทำเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- ณัฐกิตต์ ก้อยผ่านกิจ, นิกราน หอมดวง, เจนจิรา อุตเรือน, เสริมสุข บัวเจริญ, ณัฐวุฒิ ดุษฎี. (2560). การศึกษากระบวนการผลิตและการวิเคราะห์คุณสมบัติเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากถั่วแระ. การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 13.
- ทองทิพย์ พูลเกษม. (2542). การศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากเปลือกทุเรียนเพื่อทดแทนฟืนและถ่านในการหุงต้มในครัวเรือน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาเทคโนโลยีที่เหมาะสมเพื่อการพัฒนาทรัพยากรบัณฑิตวิทยาลัย คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล.

- ทิพย์สุภินทร์ หินซุย. (2550). การศึกษาการกำจัดกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อผลิตพลังงานโดยใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน : กรณีศึกษาจากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมฟอกล้อม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ทิพย์สุภินทร์ หินซุย, ปภัส ชนะโรค และวีรชัย อัจหาญ. (2551). การศึกษามลพิษและของเสียจากโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กสำหรับชุมชน. การประชุมวิชาการครั้งที่ 9 ประจำปี 2551, สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย. 188-189.
- ทิพย์สุภินทร์ หินซุย. (2556). การศึกษาการกำจัดขยะชุมชนเพื่อผลิตพลังงานโดยใช้เทคโนโลยีพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- นัยวัฒน์ สุขทั้ง. (2558). การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตพลังงานจากชีวมวลความชื้นสูงโดยใช้พลาสมาเสริมในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิตสาขาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- รัศมี สิทธิชันแก้ว, พิระพงษ์ ยืนยงชัยวัฒน์, วรานนท์ อินตะธรรม และรวิภา ยงประยูร. (2560). การผลิตและการประเมินศักยภาพของหญ้าเนเปียร์อัดเม็ดโดยใช้น้ำหมักชีวภาพเป็นตัวประสานเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลสำหรับเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลง. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาปีที่ 2 ฉบับที่ 1 มกราคม - มิถุนายน 2560.
- วีรชัย อัจหาญ, นิวัฒน์ คงกะพี้, กฤษกร รับสมบัติ, ทิพย์สุภินทร์ หินซุย, ปภัส ชนะโรค, ญัฐพงษ์ ประภาการ, สาวิตรี คำหอม, สุภัทร หนูแยม, พจนาลัย ชาวห้อยหมาก, ชัยชนะ เลิศศรีสกุล, ศรัลย์ ปานศรีพงษ์, ชิงชัย วิริยะบัญชา, สมิต บุญเสริมสุข และจิราวัฒน์ วงษ์มาศจันทร์. (2551). โรงไฟฟ้าต้นแบบชีวมวลขนาดเล็กสำหรับชุมชนแบบครบวงจร. รายงานการวิจัย. ภารกิจโครงการและประสานงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.
- วัชรภรณ์ ยุกเขต และ ดาริวรรณ เศรษฐธรรม. (2560). เปรียบเทียบคุณสมบัติของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากขยะเศษใบไม้ที่ได้จากการอัดด้วยเครื่องอัดและอัดด้วยมือ. วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยขอนแก่นปีที่ 17 ฉบับที่ 4.
- ศุภชัย ธรรมศิริทรัพย์ และภูมิพัฒน์ ภาชนะ. (2558). การศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากหญ้าเนเปียร์. การประชุมวิชาการและนำเสนอผลงานวิจัยระดับชาติและนานาชาติ ครั้งที่ 6. กลุ่มระดับชาติด้านวิทยาศาสตร์. หน้า 502-512.

- สีวลี ดีประเสริฐ, ศุภชัย บุญนำมา, วิทยา บุตรทองมูล, บุญผา ชินเชิดวงศ์, วีระ โลหะ. (2555). การใช้ประโยชน์จากกากมันสำปะหลังเพื่อผลิตเป็นน้ำตาล. วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณปีที่ 15 ฉบับที่ 3 ฉบับพิเศษ.
- สุริยา ชัยเดชทยากุล. (2544). การทำเชื้อเพลิงอัดแท่งจากส่วนผสมกากตะกอนของระบบบำบัดน้ำเสียของเศษชิ้นไม้สับของโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาเทคโนโลยีที่เหมาะสมเพื่อการพัฒนาทรัพยากรบัณฑิตวิทยาลัย คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล.
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2560). ค้นหาข้อมูล มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เชื้อเพลิงชีวมวลแข็งอัดเม็ด [ออนไลน์]. ได้จาก [https://www.tisi.go.th/data/standard/pdf\\_files/tis/a2772-2560.pdf](https://www.tisi.go.th/data/standard/pdf_files/tis/a2772-2560.pdf)
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. (2563). มันสำปะหลังโรงงาน: เนื้อที่เพาะปลูก เนื้อที่เก็บเกี่ยว ผลผลิต และผลผลิตต่อไร่ ปี 2563. สืบค้นจาก <https://www.oae.go.th/assets/portals/1/fileups/prcaidata/files/casava63.pdf>
- อาภาณี เหลืองนฤมิตชัย. (2538). การผลิตแก๊สเชื้อเพลิงในเบตนิง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อังศุมน สังข์พันธ์. (2560). เชื้อเพลิงอัดแท่งร่วมจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน: กรณีศึกษาโรงบำบัดน้ำเสียชุมชนแห่งหนึ่งในเมืองพัทยา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- Arjharn, W., Hinsui, T., Liplap, P., & Raghavan, G. S. (2012). Evaluation of electricity production from different biomass feedstocks using a pilot-scale downdraft gasifier. *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*, 6(3), 309-318.
- Arjharn, W., Hinsui, T., Liplap, P., & Raghavan, G. V. (2013). Evaluation of an energy production system from sewage sludge using a pilot-scale downdraft gasifier. *Energy & fuels*, 27(1), 229-236.
- Avelar, N. V., Rezende, A. A. P., Carneiro, A. D. C. O., & Silva, C. M. (2016). Evaluation of briquettes made from textile industry solid waste. *Renewable Energy*, 91, 417-424.
- Ayol, A., Yurdakos, O. T., & Gurgun, A. (2019). Investigation of municipal sludge gasification potential: Gasification characteristics of dried sludge in a pilot-scale downdraft fixed bed gasifier. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(32), 17397-17410.

- Belgiorno, V., De Feo, G., Della Rocca, C., & Napoli, D. R. (2003). Energy from gasification of solid waste. *Waste Management*, 23(1), 1-15.
- Franco, C., Pinto, F., Gulyurtlu, I., & Cabrita, I. (2003). The study of reactions influencing the biomass steam gasification process. *Fuel*, 82(7), 835-842.
- Jain, A.K., Sharma, S.K. and Singh, D. (2002). Development of a kinetic model for designing throat less gasifier, *Indian Chemical Engr* 44 (4): 232-240.
- Jamradloedluk, J., & Lertsatitthanakorn, C. (2017). Influences of mixing ratios and binder types on properties of biomass pellets. *Energy Procedia* 138, 1147-1152.
- Kim, M., Lee, Y., Park, J., Ryu, C., & Ohm, T.I. (2016). Partial oxidation of sewage sludge briquettes in a updraft fixed bed. *Waste Management*, 49, 204-211.
- Kirubakaran, V., Sivaramakrishnan, V., Nalini, R., Sekar, T., Premalatha, M., & Subramanian, P. (2009). A review on gasification of biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(1), 179-186.
- Midilli, A., Dogru, M., Howarth, C. R., Ling, M. J., & Ayhan, T. (2001). Combustible gas production from sewage sludge with a downdraft gasifier. *Energy Conversion & management*, 42(2), 157-172.
- Milne, T. A., Evans, R. J., & Abatzoglou, N. (1998). Biomass gasifier "Tars": their nature, formation, and conversion.
- Oduntan, O. B., Koya, O. A., Faborode, M. O., & Oduntan, A. O. (2012). The performance evaluation of a cassava pelletizer. *Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 2(5), 20-24.
- Oladejo, J., Shi K., Luo X., Yang G., & Wu, T. (2019). A review of sludge-to-energy recovery methods. *Energies*, 12(1), 60.
- Pinto, F., Lopes, H., Andre, R. N., Gulyurtlu, I., & Cabrita, I. (2008). Effect of catalysts in the quality of syngas and by-products obtained by co-gasification of coal and wastes. 2: Heavy metal, Sulphur and halogen compounds abatement. *Fuel*. 87(7), 1050-1062.
- Said, N., Garcia-Maraver, A., & Zamorano, M. (2015). Influence of densification parameters on quality properties of rice straw pellets. *Fuel Processing Technology*, 138, 56-64.

- Sheth, P. N., & Babu, B. V. (2009). Experimental studies on producer gas generation from wood waste in a downdraft biomass gasifier. *Bioresource technology* 100(12), 3127-3133.
- Singh, R. N., Singh, S. P., & Balwanshi, J. B. (2014). Tar removal from producer gas: a review. *Research Journal of Engineering Sciences*, ISSN, 2278, 9472.
- Williams, O., Taylor, S., Lester, E., Kingman, S., Giddings, D., & Eastwick, C. (2018). Applicability of mechanical tests for biomass pellet characterization for bioenergy applications. *Materials*, 11(8), 1329.
- XIE, L. P., Tao, L. I., GAO, J. D., Fei, X. N., Xia, W. U., & Jiang Y. G. (2010). Effect of moisture content in sewage sludge on air gasification. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 38(5), 615-620.





ภาคผนวก ก

วิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ

## ก1. การหาคุณสมบัติทางกายภาพ

### ก1.1 ความหนาแน่นก่อนการอัด

วิธีการทดลองนำมาจัดเรียงให้ชิดกันที่สุดในภาชนะขนาด  $50 \times 50 \times 50 \text{ cm}^3$  นำไปชั่งน้ำหนักแล้วบันทึกผล คำนวณของตัวอย่างต่อหน่วยปริมาตรที่แน่นอน

### ก1.2 ความหนาแน่นหลังการอัด

วิธีการทดลอง ทำการวัดค่ามวลต่อปริมาตรของตัวอย่าง แล้วนำค่าที่ได้จากการทดลองมาคำนวณตามสมการที่ 1 (ก1)

$$\text{Density} = \frac{\text{Mass}(\text{kg})}{\text{Volume}(\text{m}^3)} \quad (\text{ก1})$$

### ก1.3 ความชื้น

คือเปอร์เซ็นต์ของน้ำต่อน้ำหนักตัวอย่าง โดยหาเป็นร้อยละของความชื้นมาตรฐานเปียก (Wet basis) ซึ่งมีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังนี้

- อบถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาในเตาอบ (Drying oven) ที่อุณหภูมิ  $105 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำเข้าเดสิเคเตอร์ (Desiccator) ทิ้งไว้ประมาณ 15 นาทีจากนั้นนำไปชั่งและบันทึกน้ำหนัก
- ชั่งตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองประมาณ 1 กรัม ลงในถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาที่ทราบน้ำหนักจากนั้นบันทึกน้ำหนักตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง
- นำตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองไปเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ  $105 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 1 ชั่วโมงหรือจนกว่าน้ำหนักตัวอย่างของตัวอย่างคงที่
- นำถาดอลูมิเนียมมาทิ้งไว้ให้เย็นแล้วนำเข้าเดสิเคเตอร์ จากนั้นทิ้งไว้ประมาณ 1 นาที จึงทำการชั่งน้ำหนักถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาที่มีตัวอย่างที่ทำการอบแล้วอยู่ภายใน และทำการบันทึกผลจากนั้นนำผลการทดลองมาคำนวณตามสมการที่ (ก2)

$$M(\text{wb}) = 100 \times \frac{(W_1 - W_2)}{W} \quad (\text{ก2})$$

เมื่อ

- $M(\text{wb})$  คือ ร้อยละของความชื้นมาตรฐานเปียก (Wet basis)
- $W_1$  คือ น้ำหนักของถาดอลูมิเนียมพร้อมฝารวมกับน้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองก่อนทำการอบ (กรัม)



- $W_2$  คือ น้ำหนักของธาตุอลูมิเนียมพร้อมฝารวมกับน้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองหลังทำการอบ (กรัม)
- $W$  คือ น้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง (กรัม)

## ก.2 การหาค่าประกอบแบบประมาณ (Proximate analysis)

การหาค่าประกอบแบบประมาณ ได้แก่ ความชื้น เถ้า (Ash) ปริมาณสารระเหย (Volatile matter) และปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) โดยใช้วิธีการตามมาตรฐานของ ASTM D1762-84 ซึ่งมีวิธีการดังนี้

### ก.2.1 ความชื้น

คือเปอร์เซ็นต์ของน้ำต่อน้ำหนักตัวอย่างแห้ง โดยหาเป็นร้อยละของความชื้นมาตรฐานแห้ง (dry basis) ซึ่งมีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังนี้

- อบธาตุอลูมิเนียมพร้อมฝาในเตาอบ (Drying oven) ที่อุณหภูมิ  $105 \pm 1$  °C เป็นเวลา 30 นาที และนำเข้าเดสิเคเตอร์ (Desiccator) ทิ้งไว้ประมาณ 15 นาที จากนั้นนำไปชั่งและบันทึกน้ำหนัก
- ชั่งตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองประมาณ 1 กรัม ลงในธาตุอลูมิเนียมพร้อมฝาทึบหรือน้ำหนักจากนั้นบันทึกน้ำหนักตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง
- นำตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองไปเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ  $105 \pm 1$  °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงหรือจนกว่าน้ำหนักตัวอย่างของตัวอย่างคงที่
- นำธาตุอลูมิเนียมมาทิ้งไว้ให้เย็นแล้วนำเข้าเดสิเคเตอร์ จากนั้นทิ้งไว้ประมาณ 1 นาที จึงทำการชั่งน้ำหนักธาตุอลูมิเนียมพร้อมฝามีตัวอย่างที่ทำการอบแล้วอยู่ภายในและทำการบันทึกผลจากนั้นนำผลการทดลองมาคำนวณตามสมการที่ (ก3)

$$M(db) = 100 \times \frac{(W_1 - W_2)}{W_2 - W_0} \quad (ก3)$$

เมื่อ

- $M(db)$  คือ ร้อยละของความชื้นมาตรฐานแห้ง (Dry basis)
- $W_0$  คือ น้ำหนักของธาตุอลูมิเนียมพร้อมฝาที่ใช้ในการทดลอง (กรัม)
- $W_1$  คือ น้ำหนักของธาตุอลูมิเนียมพร้อมฝารวมกับน้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองก่อนทำการอบ (กรัม)
- $W_2$  คือ น้ำหนักของธาตุอลูมิเนียมพร้อมฝารวมกับน้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองหลังทำการอบ (กรัม)

## ก2.2 เถ้า (Ash)

▪ เเผาครุชชีเบลพอร์ซเลน (Porcelain crucible) พร้อมฝาในเตาเผา (Muffle furnace) ที่อุณหภูมิ 750 °C เป็นเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง จากนั้นนำออกมาทำให้เย็นในเตสติกเตอร์ แล้วทำการชั่งน้ำหนักครุชชีเบลพอร์ซเลนพร้อมฝา

- ชั่งน้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองใส่ครุชชีเบลพอร์ซเลนประมาณ 1 กรัม
- นำไปเผาบนตะเกียงเบนเซน รอจนควันระเหยออกหมด
- ใส่ครุชชีเบลพอร์ซเลนพร้อมฝาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 750 °C ทิ้งไว้เป็นเวลาประมาณ 2 ชั่วโมงหรือรอจนน้ำหนักเถ้าคงที่
- นำครุชชีเบลพอร์ซเลนออกจากเตาเผาแล้วนำทิ้งไว้ในเย็นลง จากนั้นนำไปใส่ในเตสติกเตอร์ทำการชั่งน้ำหนักและบันทึกผล แล้วทำการคำนวณตามสมการที่ (ก4)

$$A = 100 \times \frac{(W_3 - W_4)}{W} \quad (\text{ก4})$$

เมื่อ

|       |     |  |
|-------|-----|--|
| A     | คือ | ร้อยละของเถ้า                                      |
| $W_3$ | คือ | น้ำหนักของครุชชีเบลพอร์ซเลนพร้อมฝาที่มีเถ้า (กรัม) |
| $W_4$ | คือ | น้ำหนักของครุชชีเบลพอร์ซเลนพร้อมฝา (กรัม)          |
| W     | คือ | น้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง (กรัม)          |

## ก2.3 ปริมาณสารระเหย

▪ เเผาครุชชีเบลพร้อมฝาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 950 °C ทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที จากนั้นนำออกจากเตาเผาและทิ้งไว้ให้เย็นในเตสติกเตอร์ หลังจากนั้นทำการชั่งน้ำหนักของครุชชีเบลพร้อมฝาและทำการบันทึกผล

- ชั่งตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองใส่ในครุชชีเบลประมาณ 1 กรัม
- ปิดครุชชีเบลให้เรียบร้อย จากนั้นนำไปให้ความร้อนโดยให้อยู่เหนือปากเตาเผาที่อุณหภูมิประมาณ 300 °C เป็นเวลาประมาณ 6 นาที
- หย่อนครุชชีเบลให้อยู่บริเวณปากเตา อุณหภูมิประมาณ 600 °C ทิ้งไว้เป็นเวลาประมาณ 10 นาที
- หย่อนครุชชีเบลให้อยู่กึ่งกลางเตาเผา อุณหภูมิประมาณ 950 °C เป็นเวลาประมาณ 6 นาที
- นำครุชชีเบลออกมาทิ้งไว้ให้เย็นลงและนำไปใส่ไว้ในเตสติกเตอร์ประมาณ 15 นาที จากนั้นจึงนำไปชั่งน้ำหนักและทำการบันทึกผลแล้วทำการคำนวณตามสมการที่ (ก5)

$$V = 100 \times \frac{(W_5 - W_6)}{W} \quad (ก5)$$

เมื่อ

|       |     |   |
|-------|-----|---|
| V     | คือ | ร้อยละของสารระเหย   |
| $W_5$ | คือ | น้ำหนักของครุชชีเบลพร้อมฝารวมกับน้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองก่อนทำการเผา (กรัม) |
| $W_6$ | คือ | น้ำหนักของครุชชีเบลพร้อมฝารวมกับน้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองหลังทำการเผา (กรัม) |
| W     | คือ | น้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง (กรัม)   |

#### ก2.4 ปริมาณคาร์บอนคงตัว

ปริมาณคาร์บอนคงตัว สามารถคำนวณ ได้ตามสมการที่ (ก6)

$$\text{ร้อยละของคาร์บอนคงตัว} = 100 - \text{ร้อยละของความชื้น} - \text{ร้อยละของสารระเหย} - \text{ร้อยละของเถ้า} \quad (ก6)$$

#### ก2.5 การหาค่าความร้อนของการเผาไหม้ (Calorific value)

การหาค่าความร้อนของการเผาไหม้ตัวอย่างโดยใช้เครื่อง Bomb calorimeter ตามมาตรฐานของ ASTM D 2015-77 โดยนำตัวอย่างแห้งบดละเอียด อัดเป็นเม็ด พันด้วยลวดเผาไหม้ (Ignition wire) ใส่ลงในถ้วยตัวอย่าง วางในเครื่องบอมบปิดฝา อัดแก๊สออกซิเจนบริสุทธิ์เข้าไปด้วยความดัน  $30 \text{ kg/cm}^3$  ประมาณ 5 นาที แล้วประกอบเข้าในถัง (Jacket) เต็มน้ำ ประมาณ 1,800 มิลลิลิตร กดปุ่มเผาไหม้ตัวอย่าง อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนกระทั่ง ความร้อนที่เกิดขึ้นจะถูกถ่ายเทให้กับน้ำ แล้วนำค่าความแตกต่างของอุณหภูมิไปคำนวณหาค่าความร้อนของตัวอย่าง โดยเทียบกับค่าความร้อนที่ได้จากการ บอมบ Benzoic acid มาตรฐาน

ค่าความร้อนทางเชื้อเพลิง คือ ปริมาณความร้อนที่ต้องถ่ายเทออกจากเชื้อเพลิง เนื่องจากการสันดาปที่เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ในระบบ โดยปกติการสันดาปของเชื้อเพลิงจำพวก ไฮโดรคาร์บอนเมื่อสันดาปในบรรยากาศของออกซิเจน ผลของการสันดาปจะได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ (ซึ่งอยู่ในรูปของไอน้ำ) ถ้าไอน้ำสามารถกลั่นตัวแล้วคายความร้อนแฝงออกมา ค่าความร้อนเชื้อเพลิงที่ได้จะเป็นค่าความร้อนสูงสุด แต่ถ้าไอน้ำไม่กลั่นตัว ค่าความร้อนทางเชื้อเพลิงจะเป็นค่าความร้อนต่ำ การหาค่าความร้อนทางเชื้อเพลิงโดยการนำเอาเชื้อเพลิงที่จะทำการทดสอบไปชั่งน้ำหนักให้ละเอียดมาเผาไหม้กับออกซิเจนบริสุทธิ์ ภายใต้ความดันภายใน Bomb calorimeter ความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้จะถ่ายเทให้กับน้ำหล่อเย็นรอบตัวบอมบแคลอรีมิเตอร์ซึ่งสามารถวัดอุณหภูมิของน้ำได้โดยใช้เทอร์โมมิเตอร์และปริมาณความร้อนสามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ (ก7)

$$Q = m.c.\Delta T \quad (ก7)$$

เมื่อ

|            |     |  |
|------------|-----|--|
| Q          | คือ | ปริมาณความร้อน (MJ/Kg)                 |
| m          | คือ | มวลของน้ำในแคลอรีมิเตอร์ (kg)          |
| c          | คือ | ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ (4.186 KJ/kg)  |
| $\Delta T$ | คือ | อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง ( $^{\circ}C$ ) |

### ก.3 การหาคุณสมบัติแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis)

#### ก3.1 องค์ประกอบของธาตุ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และ ซัลเฟอร์

สามารถทำได้โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ C H N S Elemental analyzer นำตัวอย่างบดให้ละเอียด ชั่งปริมาณที่แน่นอนประมาณ 1-2 mg ใส่ภาชนะ นำไปเผาที่อุณหภูมิประมาณ  $925^{\circ}C$  ภายใต้ออกซิเจนบริสุทธิ์ ผ่านเข้าไปใน Reagent  $CO_2$   $H_2O$   $N_2$  ความคุมความดัน อุณหภูมิ ปริมาตรให้คงที่

#### ก3.2 องค์ประกอบของธาตุออกซิเจน

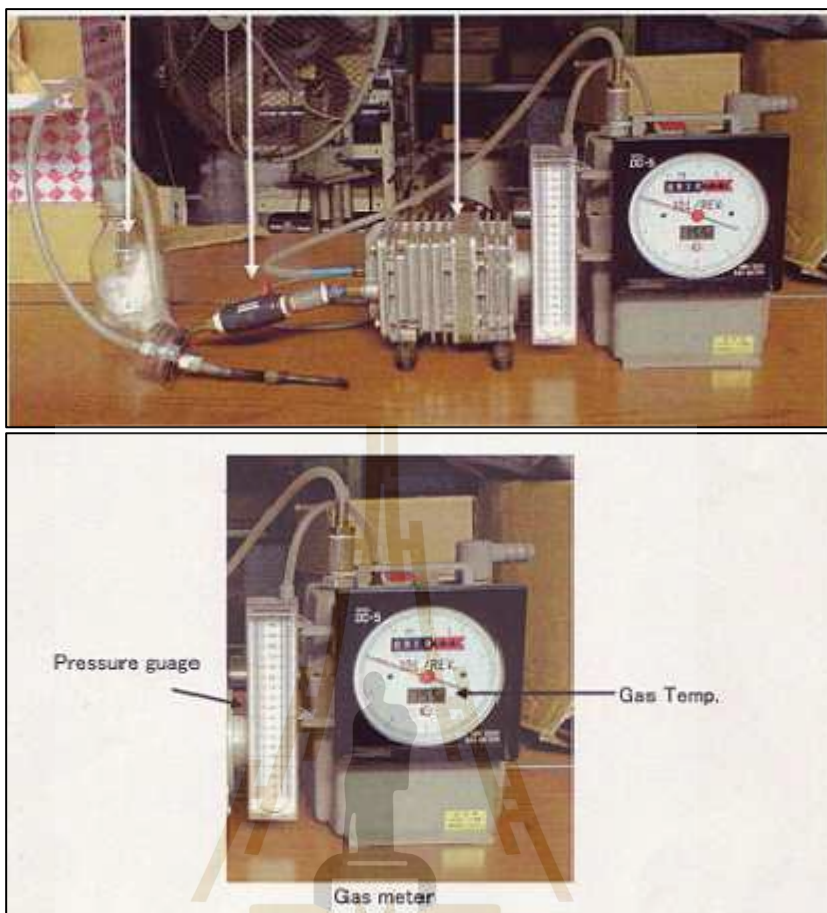
ปริมาณออกซิเจนของเชื้อเพลิงตัวอย่าง หาได้จากการคำนวณดังสมการที่ (ก8)

$$\text{ปริมาณออกซิเจน (\%)} = 100 - (\% \text{คาร์บอน} - \% \text{ไฮโดรเจน} - \% \text{ไนโตรเจน} - \% \text{ซัลเฟอร์}) \quad (ก8)$$

### ก.4 การวิเคราะห์ปริมาณทาร์และฝุ่น (Tars and dust)

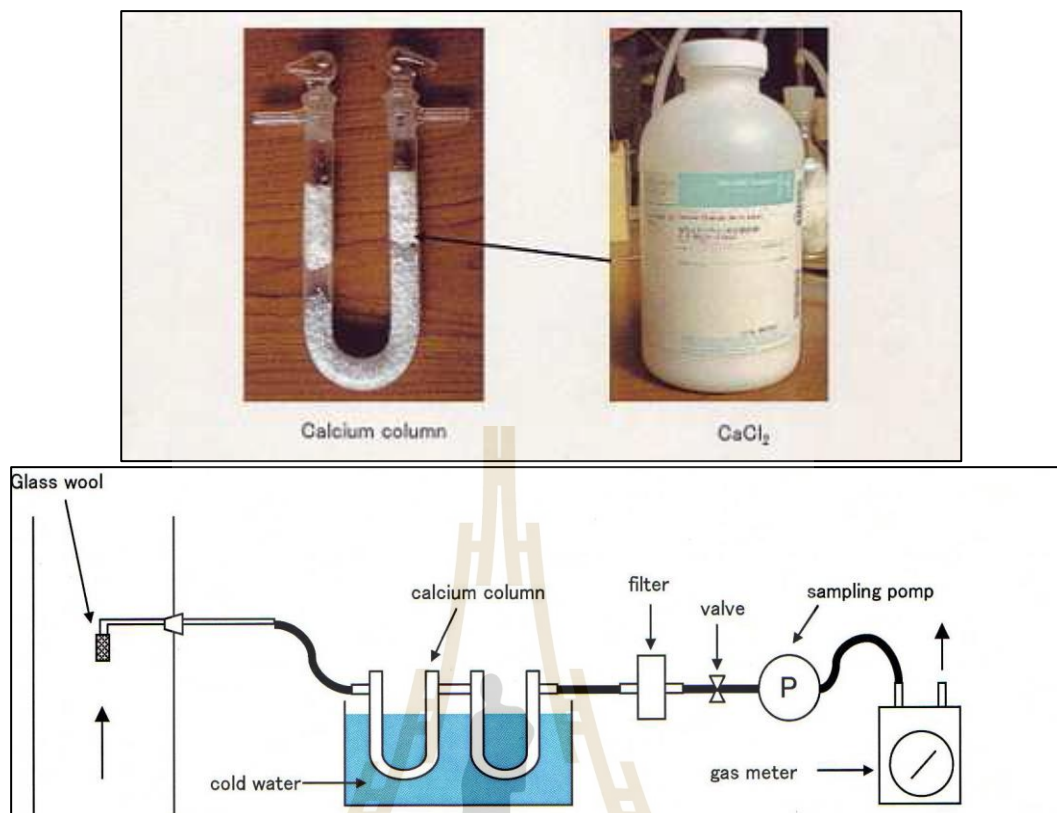
การวิเคราะห์ปริมาณการปนเปื้อนของทาร์และฝุ่น อ้างอิงตามคู่มือการเดินระบบของ โรงไฟฟ้าชีวมวลสุรนารี (Technical training manual : technical support materials on the biomass gasification power plant) โดยวิธีการวิเคราะห์มีรายละเอียดดังนี้

1) เตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับวิเคราะห์ ดังแสดงในรูปที่ ก1 คือบ่มที่สามารถควบคุมอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้ เนื่องจากการเก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ทาร์และฝุ่น ต้องควบคุมปริมาตรให้ได้เท่ากันทุกครั้งที่ทำกรเก็บตัวอย่าง เพื่อลดความคลาดเคลื่อน โดยปริมาตรที่กำหนด คือ ไม่เกิน 300L



รูปที่ ก1 การเตรียมเครื่องมือสำหรับวิเคราะห์

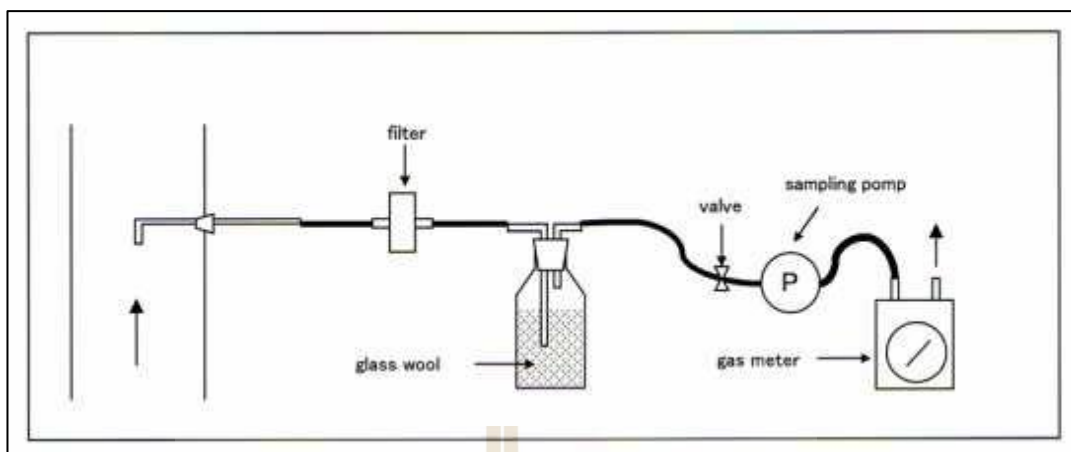
2) เตรียมอุปกรณ์และสารเคมีสำหรับวิเคราะห์ ดังแสดงในรูปที่ ก2 คือ  $\text{CaCl}_2$  ซึ่งทำหน้าที่ดูดความชื้นที่มีอยู่ในแก๊ส โดยทำการเติม  $\text{CaCl}_2$  ลงไปใน Calcium ทำการทดลองดังแสดงในรูปที่ ก2 นำข้อมูลที่ได้มาทำการวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์ความชื้นของแก๊สเชื้อเพลิง ( $X_w$ ) เพื่อนำมาคำนวณหาปริมาตรของแก๊สที่มีความชื้น ( $V_m$ ) ก่อนที่จะคำนวณในรูป ปริมาตรของแก๊สแห้ง ( $V_N$ ) หรือที่ใช้ในหน่วย  $\text{Nm}^3$



รูปที่ ก2 การเตรียมอุปกรณ์สำหรับใช้วิเคราะห์ความชื้นของแก๊สเชื้อเพลิง

3) จากนั้นเตรียมอุปกรณ์และสารเคมีสำหรับวิเคราะห์ทาร์และฝุ่น คือ Filter Holder สำหรับใส่กระดาษกรอง ซึ่งจะใช้กระดาษกรอง GF/B Dia. 47 mm. ที่ผ่านการอบไล่ความชื้นแล้วที่อุณหภูมิ 103 – 105 °C โดยทำการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ ก3





รูปที่ ก3 การเตรียมอุปกรณ์สำหรับใช้วิเคราะห์ทาร์และฝุ่น

4) ทำการเก็บตัวอย่างทาร์และฝุ่นในแก๊สเชื้อเพลิงจนได้ปริมาณที่กำหนด คือ ไม่เกิน 300 L จากนั้นนำกระดาศกรองไปอบไล่ความชื้นก่อน แล้วทำการชั่งน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งน้ำหนักที่ได้คือปริมาณของทาร์และฝุ่นรวมกัน ตัวอย่างกระดาศกรองหลังการเก็บตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ ก4



รูปที่ ก4 กระดาศกรองหลังผ่านการเก็บตัวอย่าง (ทาร์และฝุ่นรวมกัน)

5) ทำการล้างทาร์ออกจากกระดาศกรองโดยใช้สารละลาย Anisole ดังแสดงในรูปที่ ก5 จากนั้นนำกระดาศกรองไปอบไล่ความชื้นก่อน แล้วทำการชั่งน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ ก5 การล้างด้วยสารเคมี Anisole เพื่อกำจัดทาร์ออกจากกระดาษกรอง

- 6) จากนั้นนำข้อมูลที่ได้จากการทดลอง มาคำนวณโดยอาศัยความสัมพันธ์ดังนี้

$$X_w = \frac{1.24m + 100}{V_m \times \left( \left( \frac{273}{273 + \theta_m} \right) \times \left( \frac{P_a + P_m}{101.3} \right) \right) + 1.24m} \quad (\text{ก9})$$

$$V_m = \frac{V_L \times \left( \left( \frac{273}{273 + \theta_m} \right) \right) \times \left( \left( \frac{P_a + P_m}{101.3} \right) \right)}{1,000} \quad (\text{ก10})$$

เมื่อ

|            |     |  |
|------------|-----|--|
| $X_w$      | คือ | % ความชื้นของแก๊สเชื้อเพลิง                            |
| $m$        | คือ | น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงของแคลเซียมคลอไรด์ (mg)           |
| $V_L$      | คือ | ปริมาตรของแก๊สที่มีความชื้น (L)                        |
| $V_m$      | คือ | ปริมาตรของแก๊สที่มีความชื้น ( $m^3$ )                  |
| $\theta_m$ | คือ | อุณหภูมิที่อ่านได้จาก Gas meter ( $^{\circ}\text{C}$ ) |
| $P_a$      | คือ | ความดันบรรยากาศ (kPa)                                  |
| $P_m$      | คือ | ความดันแก๊สที่อ่านได้จาก Gas meter (kPa)               |



$$V_n = V_m \times \left(1 - \frac{X_w}{100}\right) \quad (ก11)$$

$$W_d = \left(\frac{m_3 - m_1}{V_N}\right) \quad (ก12)$$

$$W_t = \left(\frac{m_2 - m_3}{V_N}\right) \quad (ก13)$$

เมื่อ

|       |     |   |
|-------|-----|---|
| $V_m$ | คือ | ปริมาตรของแก๊สที่มีความชื้น ( $m^3$ )                                   |
| $V_N$ | คือ | ปริมาตรของแก๊สแห้ง ( $Nm^3$ )   |
| $W_t$ | คือ | ความเข้มข้นของทาร์ (Tar concentration, $mg/Nm^3$ )                      |
| $W_d$ | คือ | ความเข้มข้นของฝุ่น (Dust concentration, $mg/Nm^3$ )                     |
| $m_1$ | คือ | น้ำหนักกระดาษกรองเริ่มต้น (mg)  |
| $m_2$ | คือ | น้ำหนักหลังการกรองและอบที่อุณหภูมิ 103 °C (mg)                          |
| $m_3$ | คือ | น้ำหนักหลังล้างทาร์ออกด้วยสารละลาย Anisole และอบที่อุณหภูมิ 130 °C (mg) |

## ประวัติผู้เขียน

นายฐิติกร กิจจนศิริ เกิดเมื่อวันที่ 25 ตุลาคม พ.ศ. 2535 ณ จังหวัดสระบุรี เป็นบุตรของ นายประนอม กิจจนศิริ และนางสมพร กิจจนศิริ สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจาก โรงเรียนราชสีมาวิทยาลัย อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา ในปีการศึกษา 2553 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีจากสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 2558 หลังจากสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี ได้เข้าทำงานที่บริษัท เอสยูที โกลบอล จำกัด ในตำแหน่งวิศวกร

ในปี พ.ศ. 2560 ได้เข้ารับการศึกษาในระดับปริญญาโทในสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยขณะศึกษาได้ทำงานในตำแหน่งวิศวกร ประจำศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ผลงานวิจัยที่เผยแพร่ในระหว่างที่ทำการศึกษา

- 1) มนัญญา แสงสายออ, ทิพย์สุภินทร์ หินซุย, ฐิติกร กิจจนศิริ, พรรษา ลิบลับ และ วีรชัย ออาจหาญ. (2561). การศึกษาศักยภาพการผลิตแก๊สไบโอมีเทนอัด (compressed bio-methane gas:CBG) จากหญ้าเนเปียร์ในพื้นที่เขตพัฒนาเศรษฐกิจพิเศษตาก. การประชุมวิชาการวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ ครั้งที่ 5 ณ โรงแรมเจริญธานี อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น. วันที่ 14 ธันวาคม 2561
- 2) Thongnak, C., Liplap, P., Arjham, W., Sukjit, E., Kijjanasiri, T. (2019). Evaluation of engine performance and emission using plastic-derived diesel oil. Proceedings of the 13<sup>th</sup> South East Asian Technical University Consortium Symposium (SEATUC 2019), Department of Energy and Environmental Engineering and Science, Hanoi University of Science and Technology
- 3) ฐิติกร กิจจนศิริ, พรรษา ลิบลับ, วีรชัย ออาจหาญ, ทิพย์สุภินทร์ หินซุย, มนัญญา แสงสายออ. (2562). การศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลัง. การประชุมการประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ระดับชาติ ครั้งที่ 20 ณ โรงแรมฮาร์ดร็อค พัทยา จังหวัดชลบุรี. ระหว่างวันที่ 14-15 มีนาคม 2562

## ประวัติผู้เขียน (ต่อ)

- 4) นนทกร ภาคภูมิ, ฐิติกร กิจจนศิริ, พงษ์ศิริ มีสิงห์, ศิว แม้นมีศรี, พงษ์พัฒน์ รongเมือง, พรรษา ลิบลับ, ทิพย์สุภินทร์ หินชุย, วีรชัย ออาจหาญ. (2563). การทดสอบอบแห้งหญ้าเนเปียร์สำหรับแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงชีวมวล โดยใช้กระบวนการอบแห้งแบบพาหะลม. การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ระดับชาติ ครั้งที่ 21 ณ โรงแรมแคนทารี โคราช อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา. ระหว่างวันที่ 30 เมษายน - 1 พฤษภาคม 2563
- 5) ไพศาล สุพรเงิน, พรชิตา จันเรียง, จีระศักดิ์ โสรส, ฐิติกร กิจจนศิริ, พรรษา ลิบลับ, ทิพย์สุภินทร์ หินชุย, วีรชัย ออาจหาญ, นนทกร ภาคภูมิ. (2563). การศึกษากระบวนการผลิตและการวิเคราะห์คุณสมบัติเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัสดุเหลือทิ้งซังข้าวโพด. การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ระดับชาติ ครั้งที่ 21 ณ โรงแรมแคนทารี โคราช อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา. ระหว่างวันที่ 30 เมษายน - 1 พฤษภาคม 2563
- 6) Kijjanasiri, T., Liplap, P., Arjharn, W., Hinsui, T., (2021). Preparation of Sewage Sludge Using Pelletization as Raw Material in Gasification Process. Proceedings of the 14<sup>th</sup> Thai Society of Agricultural Engineering International Conference, 51-55: Department of Energy and Environmental, Khon Kaen University. (in Thai)