

เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งเตรียมจากขยะทั่วไปโดยใช้โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ ดินสอพอง และใบจามจุรีที่  
ผ่านการหมักแล้วเป็นตัวประสาน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2561  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Refuse Derived Fuel from General Waste with Polyvinyl Alcohol, Marl and Fermented  
Rain Tree Leaves as Binders.



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2018

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งเตรียมจากขยะทั่วไปโดยใช้โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ ดินสอพอง และไบจามจุรีที่ผ่านการหมักแล้วเป็นตัวประสาน
โดย	น.ส.ชนมน วิริยะจารุ
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ประธานกรรมการ
.....	
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรัณย์ เตชะเสน)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล)	
.....	กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนัสกร ราชากรกิจ)	
.....	กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.เพชรพร เขาวกิจเจริญ)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.ธนากร เมธาธรรม)	

ชนมน วิริยะจารุ : เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งเตรียมจากขยะทั่วไปโดยใช้โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ ดินสอพอง และไบจามจู้รีที่ผ่านการหมักแล้วเป็นตัวประสาน. (Refuse Derived Fuel from General Waste with Polyvinyl Alcohol, Marl and Fermented Rain Tree Leaves as Binders.) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล

การเปลี่ยนขยะให้เป็นพลังงานถือเป็นทางเลือกหนึ่งในการช่วยแก้ปัญหาขยะมูลฝอยชุมชน รวมทั้งช่วยลดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลในกระบวนการเผาไหม้ของโรงงานอุตสาหกรรม งานวิจัยนี้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมและประเภทของตัวประสานที่เหมาะสมในขั้นตอนการผลิตเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง ให้เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งมีสมบัติทางกายภาพและเคมีเหมาะสมสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมในกระบวนการเผาไหม้ของโรงงานปูนซีเมนต์ โดยใช้ขยะทั่วไปส่วนที่รีไซเคิลไม่ได้เก็บรวบรวมภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเป็นส่วนประกอบหลักของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง สำหรับตัวประสานที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ ดินสอพองและไบจามจู้รีที่ผ่านการหมักแล้ว และทำการทดสอบการเผาไหม้โดยใช้เตาแก๊สซีไฟเออร์แบบไหลลง จากการวิจัยพบว่าที่สัดส่วนพลาสติก กระจก และกากกาแฟ 5:1:3 ตามลำดับ มีค่าความร้อนสูงสุดคือ 32.9 เมกะจูลต่อกิโลกรัม สภาวะที่เหมาะสมในการอัดแท่งเชื้อเพลิงคือแรงดันไม่ควรต่ำกว่า 100 บาร์ อุณหภูมิควรอยู่ในช่วง 250-300 องศาเซลเซียสและเวลาจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ การใช้โพลีไวนิลแอลกอฮอล์เป็นตัวประสานที่ปริมาณ 0.2 มีสมบัติทางกายภาพและเคมีเหมาะสมที่สุดคือมีค่าความร้อน 33.3 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ความหนาแน่น 869.5 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่ากำลังต้านทานแรงอัด 3.8 เมกะปาสคาล ก๊าซที่เกิดขึ้นมีค่าความร้อนก๊าซเฉลี่ย 3.04 เมกะจูลต่อลูกบาศก์มาตรฐาน และสมบัติทางกายภาพและเคมีผ่านเกณฑ์กำหนด ทนต่อการเผาไหม้ ให้อุณหภูมิในระหว่างการเผาไหม้สูง ติดไฟได้ง่าย เหมาะสมสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมในกระบวนการเผาไหม้ของโรงงานปูนซีเมนต์

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อนิสิต .....  
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

# # 5870395521 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORD: REFUSE DERIVED FUEL: RDF, HEATING VALUES, GENERAL WASTE,  
POLYVINYL ALCOHOL, MARL, FERMENTED RAIN TREE LEAVES,  
GASIFICATION

Chanamon Wiriyajaru :  
Refuse Derived Fuel from General Waste with Polyvinyl Alcohol, Marl and  
Fermented Rain Tree Leaves as Binders.. Advisor: Assoc. Prof. Dr. Chavalit  
Ratanatamskul, Ph.D.

Transforming waste into energy is an alternative way to solve the problem of Municipal Solid Waste as well as to reduce the amount of fossil fuel used in the industrial combustion process. This research aims to investigate the optimal condition and type of binder for the RDF production process, which RDF have suitable physicochemical properties to apply as the co-fuel in combustion process at cement industry. Here, the non-recyclable general wastes collected in Chulalongkorn University. For the binder used in this research were PVA, marl and fermented rain tree leaves. The combustion test of RDF through the downdraft gasifier. From the research, it was found that at the mixing ratio of 5:1:3, the highest heating value of 32.9 MJ/kg could be achieved. The optimal condition for RDF production was with minimum pressure 100 bar, temperature range of 250-300°C and time depending on temperature. The addition of PVA as binder at 0.2 with highest heating value, density and compressive strength at 33.3 MJ/kg, 869.5 kg/m<sup>3</sup> and 3.8 MPa, respectively. The average heating value of fuel at 3.04 MJ/Nm<sup>3</sup>. The obtained RDF had suitable physicochemical properties, high heating value, easily ignite, resistant to combustion and long combustion time for the RDF to be used as co-fuel in cement kiln.

Field of Study: Environmental Engineering Student's Signature .....

Academic Year: 2018 Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาทางศาสตราจารย์ ดร. ขวลิต รัตนธรรมสกุล เป็นอย่างสูงที่ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำและแนวทางในการวิจัย รวมไปถึงการเขียนเล่มวิทยานิพนธ์จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณประธานกรรมการผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศรัณย์ เตชะเสน อาจารย์กรรมการสอบผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มนัสกร ราชกรกิจ รองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เขาวกิจเจริญ และกรรมการภายนอก ดร. ธนากร เมธาธรรม ซึ่งช่วยแนะนำแนวทางในการเขียนเล่ม ตรวจสอบแก้ไข และปรับแก้เล่มวิทยานิพนธ์นี้จนสำเร็จสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคุณครูจันทวรรณ ต้นเจริญ ที่ช่วยให้คำปรึกษาในเรื่องวิธีการวิเคราะห์การทดลองและอนุเคราะห์เรื่องอุปกรณ์การทดลองต่างๆ

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาของผู้วิจัยที่คอยช่วยเหลือและเป็นกำลังใจให้เสมอ ขอขอบคุณนายทอง วิริยะจาร์ ที่คอยช่วยเหลือและสนับสนุนในทุกๆด้าน ขอขอบคุณเพื่อนๆพี่ๆและน้องๆ ที่ให้คำปรึกษาและให้กำลังใจจนสามารถทำการทดลองและเขียนเล่มวิทยานิพนธ์สำเร็จไปได้ด้วยดี

ชนมน วิริยะจาร์

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....ค	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....ง	ง
กิตติกรรมประกาศ.....จ	จ
สารบัญ.....ฉ	ฉ
บทที่ 1 บทนำ..... 1	1
1.1 ชื่อวิทยานิพนธ์..... 1	1
1.2 คำสำคัญ (Key word) ..... 1	1
1.3 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ..... 1	1
บทที่ 2 วัตถุประสงค์และขอบเขตการวิจัย ..... 3	3
2.1 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย..... 3	3
2.2 ขอบเขตงานวิจัย..... 3	3
2.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 4	4
บทที่ 3 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 5	5
3.1 คำนิยามและประเภทของขยะ..... 5	5
3.2 เชื้อเพลิง ..... 6	6
3.3 กระบวนการทางความร้อน..... 6	6
3.4 คำนิยามเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง ..... 11	11
3.5 วัตถุดิบที่สามารถนำมาผลิตเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง ..... 12	12
3.6 ตัวประสาน..... 16	16
3.7 ประเภทของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง ..... 18	18
3.8 สมบัติของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง..... 19	19

3.9	เกณฑ์กำหนดสมบัติของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง.....	21
3.10	ขั้นตอนการผลิตเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง.....	23
3.11	การใช้ประโยชน์จากเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง.....	29
3.12	มลพิษและแนวทางการลดและควบคุมมลพิษ.....	31
3.13	มาตรฐานควบคุมการปล่อยทิ้งอากาศเสีย.....	33
3.14	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	36
บทที่ 4	วิธีดำเนินการวิจัย.....	41
4.1	วัสดุ อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	41
4.2	แผนการวิจัย.....	44
4.3	ตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการวิจัย.....	48
4.4	ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	51
บทที่ 5	ผลการทดลอง.....	63
5.1	ช่วงที่ 1 ผลการเตรียมการวิจัย.....	63
5.1.1	องค์ประกอบทางกายภาพของขยะ.....	63
5.1.2	ผลการวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย.....	66
5.1.3	ผลการลดขนาดขยะ.....	68
5.2	ช่วงที่ 2 ผลการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในขั้นตอนการผลิตเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง.....	69
5.2.1	การทดลองที่ 1 ผลการทดลองหาสัดส่วนของพลาสติก กระจกและกากกาแฟที่เหมาะสม.....	69
5.2.2	การทดลองที่ 2 ผลการทดลองหาสภาวะในการอัดขึ้นรูปแท่งเชื้อเพลิงที่เหมาะสม.....	70
5.2.3	การทดลองที่ 3 ผลการทดลองหาประเภทของตัวประสานและสัดส่วนการใช้ที่เหมาะสม.....	77
5.2.4	การทดลองที่ 4 ผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวประสานและสภาวะต่างๆในการผลิตเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง.....	83
5.2.5	การเปรียบเทียบตัวประสานที่ใช้ในงานวิจัยนี้และงานวิจัยอื่น.....	91



5.3 ช่วงที่ 3 ผลการวิเคราะห์สมบัติด้านต่างๆและการทดสอบการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง	92
5.3.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติด้านต่างๆของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง	92
5.3.2 การจัดประเภทของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง	98
5.3.3 ผลการทดสอบการเผาไหม้	98
5.3.4 การเปรียบเทียบองค์ประกอบก๊าซจากการทดสอบการเผาไหม้ในงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่น	111
<b>บทที่ 6      สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ</b>	<b>113</b>
6.1 สรุปผลการทดลอง	113
6.2 ข้อเสนอแนะ	116
บรรณานุกรม	152
ประวัติผู้เขียน	154

## สารบัญตาราง

ตารางที่ 3.1 ชนิดของผลิตภัณฑ์พลาสติก .....	13
ตารางที่ 3.2 ประเภทของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งจำแนกตามมาตรฐาน ASTM E-75.....	18
ตารางที่ 3.3 เกณฑ์กำหนดสมบัติด้านต่างๆของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งสำหรับ ใช้ในกระบวนการเผาไหม้.....	21
ตารางที่ 3.4 เกณฑ์กำหนดปริมาณโลหะหนักในเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งสำหรับ ใช้ในกระบวนการเผาไหม้.....	23
ตารางที่ 3.5 มาตรฐานอากาศเสียที่ระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรม.....	33
ตารางที่ 3.6 มาตรฐานควบคุมการปล่อยทิ้งอากาศเสียจากโรงไฟฟ้าใหม่.....	34
ตารางที่ 3.7 มาตรฐานควบคุมการปล่อยทิ้งอากาศเสียจากโรงงานปูนซีเมนต์.....	35
ตารางที่ 3.8 องค์ประกอบธาตุและค่าความร้อนของขยะชุมชน.....	37
ตารางที่ 4.1 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องในช่วงที่ 2 การทดลองที่ 1.....	48
ตารางที่ 4.2 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องในช่วงที่ 2 การทดลองที่ 2.....	49
ตารางที่ 4.3 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องในช่วงที่ 2 การทดลองที่ 3.....	49
ตารางที่ 4.4 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องในช่วงที่ 2 การทดลองที่ 4.1 .....	50
ตารางที่ 4.5 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องในช่วงที่ 2 การทดลองที่ 4.2 .....	50
ตารางที่ 4.6 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องในช่วงที่ 2 การทดลองที่ 4.3 .....	50
ตารางที่ 4.7 รายละเอียดสัดส่วนในการอัดขึ้นรูปแท่งเชื้อเพลิง.....	54
ตารางที่ 4.8 รายละเอียดการอัดขึ้นรูปแท่งเชื้อเพลิงที่สภาวะต่างๆ.....	55
ตารางที่ 4.9 รายละเอียดการอัดขึ้นรูปแท่งเชื้อเพลิงของตัวประสานแต่ละประเภท และสัดส่วนการใช้.....	56
ตารางที่ 4.10 รายละเอียดการอัดขึ้นรูปแท่งเชื้อเพลิงโดยลดอุณหภูมิที่ใช้ในการอัด.....	57
ตารางที่ 4.11 รายละเอียดการอัดขึ้นรูปแท่งเชื้อเพลิงโดยลดแรงดันที่ใช้ในการอัด.....	58
ตารางที่ 4.12 รายละเอียดการอัดขึ้นรูปแท่งเชื้อเพลิงโดยลดเวลาที่ใช้ในการอัด.....	58

ตารางที่ 4.13 สมบัติที่วิเคราะห์และวิธีการที่ใช้ในการวิเคราะห์ .....	59
ตารางที่ 5.1 องค์ประกอบทางกายภาพของขยะภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยเฉลี่ยตั้งแต่เดือนกรกฎาคมถึงกันยายน ปี พ.ศ. 2560 .....	64
ตารางที่ 5.2 องค์ประกอบขยะประเภทกระดาษโดยเฉลี่ย .....	64
ตารางที่ 5.3 องค์ประกอบขยะประเภทพลาสติกโดยเฉลี่ย.....	65
ตารางที่ 5.4 ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนเบื้องต้นของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย .....	67
ตารางที่ 5.5 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุและความชื้นเบื้องต้นของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย .....	68
ตารางที่ 5.6 ผลการวิเคราะห์สมบัติเชิงกลของขยะอัดแท่งที่สัดส่วนต่างๆของขยะ.....	69
ตารางที่ 5.7 ผลการวิเคราะห์สมบัติเชิงกลของขยะอัดแท่งที่สภาวะต่างๆ ในการอัดขึ้นรูปแท่งเชิงกล.....	70
ตารางที่ 5.8 ผลการวิเคราะห์สมบัติเชิงกลของขยะอัดแท่งที่ประเภทของตัวประสาน และสัดส่วนการใช้ต่างๆในการอัดขึ้นรูปแท่งเชิงกล .....	77
ตารางที่ 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประสานประเภทต่างๆและอุณหภูมิที่ใช้ในการอัด .....	83
ตารางที่ 5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประสานประเภทต่างๆและแรงดันที่ใช้ในการอัด .....	86
ตารางที่ 5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประสานประเภทต่างๆและเวลาที่ใช้ในการอัด.....	88
ตารางที่ 5.12 เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของขยะอัดแท่งระหว่างการใช้และไม่ใช้ตัวประสาน ในสภาวะต่างๆ .....	90
ตารางที่ 5.13 เปรียบเทียบผลการทดลองการใช้ตัวประสานของงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่นๆ.....	91
ตารางที่ 5.14 ผลการวิเคราะห์สมบัติของเชิงกลของขยะอัดแท่งเปรียบเทียบกับเกณฑ์กำหนด.....	92
ตารางที่ 5.15 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของเชิงกลของขยะอัดแท่งเปรียบเทียบกับ กับเกณฑ์กำหนด .....	95
ตารางที่ 5.16 ผลการวิเคราะห์โลหะหนักของเชิงกลของขยะอัดแท่งเปรียบเทียบกับเกณฑ์กำหนด .....	97
ตารางที่ 5.17 อุณหภูมิของช่วงปฏิกิริยาการเผาไหม้ในระหว่างผลิตก๊าซเชิงกล.....	102
ตารางที่ 5.18 สรุปลักษณะของก๊าซเชิงกลจากการเผาไหม้เชิงกลของขยะอัดแท่ง ซึ่งใช้โพลีไวนิลแอลกอฮอล์เป็นตัวประสาน .....	105

ตารางที่ 5.19	สรุปองค์ประกอบของก๊าซเชื้อเพลิงจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง ซึ่งใช้ดินสอพองเป็นตัวประสาน .....	107
ตารางที่ 5.20	สรุปองค์ประกอบของก๊าซเชื้อเพลิงจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง ซึ่งใช้ไบจามจรีที่ผ่านการหมักแล้วเป็นตัวประสาน.....	109
ตารางที่ 5.21	การเปรียบเทียบองค์ประกอบก๊าซจากการทดสอบการเผาไหม้ในงานวิจัยนี้ กับงานวิจัยอื่น.....	111
ตารางที่ 6.1	สรุปประเภทและข้อดีข้อเสียของตัวประสานที่ใช้ในงานวิจัย.....	114



## สารบัญรูป

รูปที่ 3.1 ตัวอย่างระบบการเผาไหม้โดยตรง (เตาเผาแบบตะกรับ) .....	8
รูปที่ 3.2 เตาเผา Fixed Bed Gasifier ชนิดต่างๆ .....	10
รูปที่ 3.3 ตัวอย่างเตาเผาไหม้แบบการกลั่นสลาย .....	11
รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการผลิตเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง.....	23
รูปที่ 3.5 เครื่องลดขนาดแบบ Hammer Mills ชนิดใบตีแนวตั้ง.....	24
รูปที่ 3.6 เครื่องลดขนาดแบบ Hammer Mills ชนิดใบตีแนวนอน .....	25
รูปที่ 3.7 เครื่องลดขนาดแบบ Shear Shredders.....	25
รูปที่ 3.8 ตัวอย่างการทำงานของเครื่องอัดแน่นแบบ Baling Equipment .....	27
รูปที่ 3.9 ตัวอย่างการทำงานของเครื่องอัดแน่นแบบ Hydraulic.....	28
รูปที่ 3.10 ตัวอย่างการทำงานของเครื่องอัดแน่นแบบ Screw.....	28
รูปที่ 3.11 ตัวอย่างการทำงานของเครื่องอัดแน่นแบบ Pellet.....	29
รูปที่ 3.12 การนำเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งมาใช้ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ของโรงงานปูนซีเมนต์ ...	31
รูปที่ 4.1 เครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิงแบบใช้กระบอกลูกสูบไฮดรอลิก .....	42
รูปที่ 4.2 โม้ผสมอเนกประสงค์.....	43
รูปที่ 4.3 เครื่องย่อยขยะและวัสดุเหลือใช้.....	43
รูปที่ 4.4 การเก็บรวบรวมขยะด้วยวิธีการ Quartering .....	51
รูปที่ 4.5 การลดขนาดขยะ .....	52
รูปที่ 4.6 ขยะกระดาษและพลาสติกหลังผ่านการลดขนาดแล้ว .....	52
รูปที่ 4.7 กวนผสมขยะด้วยโม้ผสมอเนกประสงค์.....	52
รูปที่ 4.8 กระบอกลูกสูบอัดแท่งเชื้อเพลิงและการควบคุมแรงดันในการอัด .....	53
รูปที่ 4.9 ตู้คอนโทรลไฟฟ้าสำหรับตั้งเวลาและอุณหภูมิ.....	53
รูปที่ 5.1 องค์ประกอบของขยะ.....	66

รูปที่ 5.2 ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงขยะอัดแห้งที่แรงดัน 100 บาร์ ในสภาวะต่างๆ.....	72
รูปที่ 5.3 ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงขยะอัดแห้งที่แรงดัน 150 บาร์ ในสภาวะต่างๆ.....	72
รูปที่ 5.4 ค่ากำลังต้านทานแรงอัดของเชื้อเพลิงขยะอัดแห้งที่แรงดัน 100 บาร์ ในสภาวะต่างๆ .....	74
รูปที่ 5.5 ค่ากำลังต้านทานแรงอัดของเชื้อเพลิงขยะอัดแห้งที่แรงดัน 150 บาร์ ในสภาวะต่างๆ .....	74
รูปที่ 5.6 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงขยะอัดแห้งที่แรงดัน 100 บาร์ ในสภาวะต่างๆ .....	76
รูปที่ 5.7 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงขยะอัดแห้งที่แรงดัน 150 บาร์ ในสภาวะต่างๆ .....	76
รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการใช้ตัวประสานและความหนาแน่น.....	78
รูปที่ 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการใช้ตัวประสานและค่ากำลังต้านทานแรงอัด .....	79
รูปที่ 5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการใช้ตัวประสานและค่าความร้อน.....	80
รูปที่ 5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประสานประเภทต่างๆกับความหนาแน่น เมื่อลดอุณหภูมิในการอัด .....	84
รูปที่ 5.12 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประสานประเภทต่างๆกับค่ากำลังต้านทานแรงอัด เมื่อลดอุณหภูมิในการอัด .....	84
รูปที่ 5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประสานประเภทต่างๆกับความหนาแน่น เมื่อลดแรงดันในการอัด.....	86
รูปที่ 5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประสานประเภทต่างๆกับค่ากำลังต้านทานแรงอัด เมื่อลดแรงดันในการอัด.....	87
รูปที่ 5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประสานประเภทต่างๆกับความหนาแน่น เมื่อลดเวลาในการอัด .....	89
รูปที่ 5.16 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประสานประเภทต่างๆกับค่ากำลังต้านทานแรงอัด เมื่อลดเวลาในการอัด .....	89
รูปที่ 5.17 จุดเก็บอุณหภูมิในเตาแก๊สซีไฟเออร์แบบไหลลง .....	99
รูปที่ 5.18 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการเผาไหม้และอุณหภูมิในเตาเผาของเชื้อเพลิง ขยะอัดแห้งซึ่งใช้โพลีไวนิลแอลกอฮอล์เป็นตัวประสาน.....	100
รูปที่ 5.19 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการเผาไหม้และอุณหภูมิในเตาเผาของเชื้อเพลิง ขยะอัดแห้งซึ่งใช้ดินสอพองเป็นตัวประสาน .....	101

รูปที่ 5.20 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการเผาไหม้และอุณหภูมิในเตาเผาของเชื้อเพลิง ขยะอัดแท่งซึ่งใช้ไบจามจรีที่ผ่านการหมักแล้วเป็นตัวประสาน .....	101
รูปที่ 5.21 อุณหภูมิของช่วงปฏิกิริยาการเผาไหม้ อ้างอิงจากระดับความสูงของเตาเผา .....	102
รูปที่ 5.22 องค์ประกอบก๊าซเชื้อเพลิงจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งซึ่งใช้ โพลีไวนิลแอลกอฮอล์เป็นตัวประสานตัวอย่างครั้งที่ 1 .....	103
รูปที่ 5.23 องค์ประกอบก๊าซเชื้อเพลิงจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งซึ่งใช้ โพลีไวนิลแอลกอฮอล์เป็นตัวประสานตัวอย่างครั้งที่ 2 .....	104
รูปที่ 5.24 องค์ประกอบก๊าซเชื้อเพลิงจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งซึ่งใช้ โพลีไวนิลแอลกอฮอล์เป็นตัวประสานตัวอย่างครั้งที่ 3 .....	104
รูปที่ 5.25 องค์ประกอบก๊าซเชื้อเพลิงจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งซึ่งใช้ ดินสอพองเป็นตัวประสานตัวอย่างครั้งที่ 1 .....	105
รูปที่ 5.26 องค์ประกอบก๊าซเชื้อเพลิงจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งซึ่งใช้ ดินสอพองเป็นตัวประสานตัวอย่างครั้งที่ 2 .....	106
รูปที่ 5.27 องค์ประกอบก๊าซเชื้อเพลิงจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งซึ่งใช้ ดินสอพองเป็นตัวประสานตัวอย่างครั้งที่ 3 .....	106
รูปที่ 5.28 องค์ประกอบก๊าซเชื้อเพลิงจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งซึ่งใช้ ไบจามจรีที่ผ่านการหมักแล้วเป็นตัวประสานตัวอย่างครั้งที่ 1 .....	107
รูปที่ 5.29 องค์ประกอบก๊าซเชื้อเพลิงจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งซึ่งใช้ ไบจามจรีที่ผ่านการหมักแล้วเป็นตัวประสานตัวอย่างครั้งที่ 2 .....	108
รูปที่ 5.30 องค์ประกอบก๊าซเชื้อเพลิงจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งซึ่งใช้ ไบจามจรีที่ผ่านการหมักแล้วเป็นตัวประสานตัวอย่างครั้งที่ 3 .....	108

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

As	= ธาตุสารหนู (Arsenic)
Ash Pit	= ช่องเก็บเถ้า
ASTM	= American Society for Testing and Materials
Bar	= บาร์
C	= ธาตุคาร์บอน (Carbon)
°C	= องศาเซลเซียส (Degree Celsius)
Cd	= ธาตุแคดเมียม (Cadmium)
CH <sub>4</sub>	= ก๊าซมีเทน (Methane)
Co	= ธาตุโคบอลต์ (Cobalt)
CO	= ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon Monoxide)
Cr	= ธาตุโครเมียม (Chromium)
Cu	= ธาตุทองแดง (Copper)
Downdraft Gasifier	= เตาแก๊สซิฟิเคชันแบบไหลลง
Drying	= การอบแห้ง
%DM	= ร้อยละวัตถุแห้ง (Percent Dry Matter Basis)
Fluidized Bed Combustor	= เตาเผาไหม้แบบฟลูอิดไธซ์เบด
Gasification	= กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน
H	= ธาตุไฮโดรเจน (Hydrogen)
H <sub>2</sub>	= ก๊าซไฮโดรเจน (Gas Hydrogen)
HCl	= กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric Acid)
Hg	= ธาตุปรอท (Mercury)
H <sub>2</sub> O	= น้ำ
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	= กรดกำมะถัน (Sulfuric Acid)
IGCC	= การผสมผสานระหว่างเทคโนโลยีที่เปลี่ยนสถานะถ่านหินให้เป็นก๊าซ กับโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมกังหันก๊าซ (Integrated Gasification Combined Cycle)
kg/m <sup>3</sup>	= กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (Kilogram per Cubic Meter)
L/min	= ลิตรต่อนาที (Liter per Minute)



mg/kg	= มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Milligram per Kilogram)
Min	= นาที (Minute)
MJ/kg	= เมกะจูลต่อกิโลกรัม (Mega Joule per Kilogram)
MJ/Nm <sup>3</sup>	= เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตรมาตรฐาน (Mega Joule per Normal Cubic Meter)
mm	= มิลลิเมตร (Millimeter)
Mn	= ธาตุแมงกานีส (Manganese)
MPa	= เมกะปาสคาล (Megapascal)
N	= ธาตุไนโตรเจน (Nitrogen)
N/A	= Not Analysis
Ni	= ธาตุนิเกิล (Nickle)
NO <sub>2</sub>	= ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (Nitrogen Dioxide)
NO <sub>x</sub>	= ก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน (Nitrogen Oxide)
O	= ธาตุออกซิเจน (Oxygen)
Oxidation Reaction	= ปฏิกิริยาออกซิเดชัน
Pb	= ธาตุตะกั่ว (Lead)
PCDDs	= โพลีคลอริเนตเตด ไดเบนโซ พารา-ไดออกซิน (Polychlorinated dibenzo-para-dioxins)
PVA	= โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl Alcohol)
Pyrolysis Reaction	= ปฏิกิริยาไพโรไลซิส
RDF	= เชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง (Refuse Derived Fuel)
Reduction Reaction	= ปฏิกิริยารีดักชัน
S	= ธาตุซัลเฟอร์ (Sulfur)
SO <sub>2</sub>	= ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Sulfur Dioxide)
SO	= ก๊าซออกไซด์ของซัลเฟอร์ (Sulfur Oxide)
Syn-Gas	= ก๊าซเชื้อเพลิง
%wt	= ร้อยละโดยน้ำหนัก (Percent Weight)
Zn	= ธาตุสังกะสี (Zinc)

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ชื่อวิทยานิพนธ์

ภาษาไทย เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งเตรียมจากขยะทั่วไปโดยใช้โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ ดินสอพอง และไบจามจู้รีที่ผ่านการหมักแล้วเป็นตัวประสาน

ภาษาอังกฤษ Refuse Derived Fuel from General Waste with Polyvinyl Alcohol, Marl and Fermented Rain Tree Leaves as Binders.

### 1.2 คำสำคัญ (Key word)

เชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง (Refuse Derived Fuel : RDF)  
ค่าความร้อน (Heating Values)  
ขยะทั่วไป (General Waste)  
โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl Alcohol)  
ดินสอพอง (Marl)  
ไบจามจู้รีที่ผ่านการหมักแล้ว (Fermented Rain Tree Leaves)  
กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 1.3 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันแนวโน้มปัญหาขยะมูลฝอยของประเทศไทยเพิ่มมากขึ้น อัตราการเกิดขยะต่อหัวประชากรสูงและยังคงสูงต่อไป ปริมาณการนำกลับมาใช้ใหม่น้อย จากสถานการณ์ขยะมูลฝอยในปี พ.ศ.2556 มีปริมาณขยะมูลฝอยถึง 26.8 ล้านตัน ได้รับการจัดการอย่างถูกต้องเพียง 7.2 ล้านตัน และส่วนที่สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้เพียง 5.1 ล้านตัน ที่เหลือเป็นการกำจัดขยะมูลฝอยที่ไม่ถูกต้องตามหลักวิชาการ (กรมควบคุมมลพิษ, 2556) ขยะมูลฝอยส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นคือเศษอาหารและสารอินทรีย์ ซึ่งเป็นขยะที่ย่อยสลายได้ง่ายเหมาะที่จะนำไปผลิตปุ๋ยหมักชีวภาพหรือก๊าซชีวภาพ รองลงมาคือพลาสติกและกระดาษซึ่งบางส่วนสามารถนำไปรีไซเคิลได้ ขยะที่เป็นอันตรายจะถูกส่งไปกำจัดอย่างถูกวิธี ส่วนขยะที่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ได้และส่วนที่เหลือจากการจัดการด้วยวิธีอื่นๆจะถูกส่งไปยังหลุมฝังกลบ โดยปัญหาหลักของหลุมฝังกลบคือใช้พื้นที่ในการก่อสร้างเยอะมักมีการรั่วไหลของก๊าซและน้ำชะขยะปนเปื้อนต่อสิ่งแวดล้อมควบคุมระบบได้ยากจึงทำให้ไม่เป็นที่ยอมรับของชุมชน

พลังงานเป็นปัจจัยพื้นฐานที่สำคัญในการตอบสนองความต้องการขั้นพื้นฐานของประชาชนและเป็นปัจจัยพื้นฐานการผลิตในภาคธุรกิจและอุตสาหกรรม ดังนั้นจึงต้องมีการจัดหาพลังงานให้มีปริมาณที่เพียงพอ มีราคาที่เหมาะสมและมีคุณภาพที่ดี (สำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ, 2542)

ภาคอุตสาหกรรมมีความต้องการใช้พลังงานในปริมาณค่อนข้างสูงเพื่อนำไปผลิตพลังงานความร้อน โดยถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการผลิตไฟฟ้า อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์และอุตสาหกรรมที่ใช้หม้อไอน้ำ เช่น โรงงานกระดาษ เป็นต้น ดังนั้นการแปลงขยะให้เป็นพลังงานในลักษณะเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งถือเป็นทางเลือกหนึ่งในการลดปริมาณการใช้ถ่านหิน ลดการนำเข้าเชื้อเพลิงเหล่านี้จากต่างประเทศและยังช่วยลดปริมาณขยะมูลฝอยที่จะส่งไปหลุมฝังกลบซึ่งถือเป็นการยืดอายุการใช้งานให้หลุมฝังกลบ

งานวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับแนวทางการนำขยะชุมชนกลับมาใช้ใหม่ในรูปแบบของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง โดยทำการศึกษาหาสภาวะต่างๆที่เหมาะสมในขั้นตอนการผลิตเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งโดยใช้ขยะมูลฝอยภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทำการคัดเลือกขยะทั่วไปที่เป็นปัญหาในการจัดการมา 3 ชนิด ได้แก่ ขยะพลาสติก ขยะกระดาษ และกากกาแฟ ศึกษาประเภทของตัวประสาน 3 ชนิด ได้แก่ โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ ดินสอพองและไบจามจูรีที่ผ่านการหมักแล้ว หลังจากนั้นนำเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่ได้มาวิเคราะห์สมบัติต่างๆและทดสอบการเผาไหม้เพื่อมาพิจารณาประกอบตามเกณฑ์กำหนดให้เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งนี้มีความเหมาะสมในการนำมาใช้งานเป็นเชื้อเพลิงร่วมในกระบวนการเผาไหม้ที่ใช้อุณหภูมิสูงของโรงงานปูนซีเมนต์ซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด

## บทที่ 2

### วัตถุประสงค์และขอบเขตการวิจัย

#### 2.1 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

2.1.1 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการอัดขึ้นรูปแท่งเชื้อเพลิง ได้แก่ สัดส่วนการผสมของขยะ อุณหภูมิในการอัด เวลาในการอัด แรงดันในการอัด ประเภทของตัวประสานและสัดส่วนการใช้ ซึ่งส่งผลต่อค่าความร้อนต่อหน่วยน้ำหนัก ความหนาแน่นและค่ากำลังต้านทานแรงอัดของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง

2.1.2 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวประสานและสภาวะในการอัดขึ้นรูปแท่งเชื้อเพลิง ได้แก่ อุณหภูมิในการอัด เวลาในการอัดและแรงดันในการอัดซึ่งส่งผลต่อค่าความร้อนต่อหน่วยน้ำหนัก ความหนาแน่นและค่ากำลังต้านทานแรงอัดของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง

2.1.3 ผลิตเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งซึ่งมีสมบัติทางกายภาพและเคมีเหมาะสม สำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมในกระบวนการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูง (สูงกว่า 1100 องศาเซลเซียส) ของโรงงานปูนซีเมนต์

#### 2.2 ขอบเขตงานวิจัย

2.2.1 เป็นการวิจัยเชิงทดลองในระดับปฏิบัติการ ทำการทดลองผลิตเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งโดยใช้เครื่องอัดแน่นแบบใช้กระบอกไฮดรอลิกที่อุณหภูมิห้อง ณ ตึกสี่ภาควิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2.2 ขยะที่ใช้ในการวิจัยเป็นขยะทั่วไปที่เก็บรวบรวมภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยเน้นขยะส่วนที่รีไซเคิลไม่ได้ ได้แก่

- 1) ขยะพลาสติกประเภทต่างๆ ซึ่งผ่านการคัดแยกขยะพลาสติกที่รีไซเคิลได้และพลาสติกประเภทโพลีไวนิลคลอไรด์ออก เช่น ถุงพลาสติก ถุงขนมขบเคี้ยว บรรจุภัณฑ์พลาสติก หลอดดูดพลาสติก เป็นต้น
- 2) ขยะกระดาษประเภทต่างๆ ซึ่งผ่านการคัดแยกขยะกระดาษที่รีไซเคิลได้ออก เช่น กล่องขนม กล่องนม กระดาษทิชชู งานกระดาษ แก้วกระดาษ เป็นต้น
- 3) กากกาแฟ

2.2.3 ตัวประสานที่ใช้ในการวิจัย

- 1) โพลีไวนิลแอลกอฮอล์
- 2) ดินสอพอง

3) ใบจามจรีที่ผ่านการหมักแล้ว วิธีการเตรียมอ้างอิงจากโครงการ JICA ผลิตปุ๋ยสูตรใบจามจรีโดยใช้หัวเชื้อจากถังหมักขยะอินทรีย์ (ชวลิต รัตนธรรมสกุล, 2559)

#### 2.2.4 เครื่องอัดแน่นแบบใช้กระบอกไฮดรอลิก (Hydraulic Press Densifier)

งานวิจัยนี้ได้สั่งทำเครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิง เป็นเครื่องอัดแน่นด้วยกระบอกไฮดรอลิกทำการอัดที่ละแท่ง อัดแท่งด้วยแรงดันและความร้อน สามารถควบคุมอุณหภูมิและเวลาในการอัดแท่งเชื้อเพลิงได้ ซึ่งมีรายละเอียดของผลิตภัณฑ์ ดังนี้

- ใช้ฮีตเตอร์ในการให้ความร้อน สามารถสร้างอุณหภูมิได้สูงสุดประมาณ 350 องศาเซลเซียส
- ชุดอัดไฮดรอลิกสามารถสร้างแรงดันได้สูงสุด 200 บาร์
- กระบอกแม่แบบขยะอัดแท่งทำจากสแตนเลสสตีล ความยาว 15 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 6 เซนติเมตร

#### 2.2.5 อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองเป็นอุณหภูมิของเครื่องอัด

#### 2.2.6 เตาเผาที่ใช้ในการทดสอบการเผาไหม้

งานวิจัยนี้ได้ทดสอบการเผาไหม้โดยใช้เตาเผาแก๊สซีฟิเออร์แบบไหลลงในระดับห้องปฏิบัติการของศูนย์วิจัยการเผาไหม้กากของเสีย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

- ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 600 มิลลิเมตร และสูง 2000 มิลลิเมตร
- มีจุดวัดอุณหภูมิ 8 จุด โดยใช้เทอร์มोकัปเปิลชนิดเค (Thermocouple type K) เป็นตัววัดอุณหภูมิ ต่อสายเข้า Data logger แปลงสัญญาณส่งเข้าบันทึกค่าในคอมพิวเตอร์

### 2.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

2.3.1 ทราบถึงสถานะที่เหมาะสมในการอัดขึ้นรูปแท่งเชื้อเพลิง ได้แก่ สัดส่วนการผสมของขยะอุณหภูมิในการอัด เวลาในการอัด แรงดันในการอัด ประเภทของตัวประสานและสัดส่วนการใช้ ซึ่งส่งผลต่อค่าความร้อนต่อหน่วยน้ำหนัก ความหนาแน่นและค่ากำลังต้านทานแรงอัดของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง

2.3.2 ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประสานและสถานะในการอัดขึ้นรูปแท่งเชื้อเพลิง ได้แก่ อุณหภูมิในการอัด เวลาในการอัดและแรงดันในการอัดซึ่งส่งผลต่อค่าความร้อนต่อหน่วยน้ำหนัก ความหนาแน่นและค่ากำลังต้านทานแรงอัดของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง เพื่อเป็นแนวทางในการลดพลังงานที่ใช้ในกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง

2.3.3 ได้เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่มีสมบัติทางกายภาพและเคมีเหมาะสม ผ่านเกณฑ์กำหนดเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งจากแหล่งต่างๆ สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมในกระบวนการเผาไหม้ของโรงงานอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์โดยส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในระดับต่ำ

2.3.4 เป็นทางเลือกเพื่อช่วยในการจัดการขยะมูลฝอย

## บทที่ 3

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 3.1 คำนิยามและประเภทของขยะ

พระราชบัญญัติสาธารณสุข ปี พ.ศ. 2535 ให้นิยามคำว่า มูลฝอย หมายถึง สิ่งต่างๆที่เราไม่ต้องการที่เป็นของแข็งหรืออ่อน มีความชื้น ได้แก่ เศษกระดาษ เศษผ้า เศษอาหาร ถุงพลาสติก ภาชนะกล่องใส่อาหาร แก้ว มูลสัตว์ หรือซากสัตว์รวมตลอดถึง วัตถุอื่นสิ่งใดที่เก็บกวาดได้จากถนน ตลาด ที่เลี้ยงสัตว์หรือที่อื่น

พจนานุกรมฉบับราชบัณฑิตยสถานฉบับ ปี พ.ศ. 2542 ให้นิยามคำว่า มูลฝอย หมายถึง เศษกระดาษ เศษผ้า เศษอาหาร เศษสินค้า ถุงพลาสติก ภาชนะที่ใส่อาหาร แก้ว มูลสัตว์ หรือซากสัตว์รวมตลอดถึงสิ่งอื่นใดที่เก็บกวาดจากถนน ตลาด ที่เลี้ยงสัตว์หรือที่อื่น

สำนักจัดการกากของเสียและสารอันตราย (2555) ได้จัดแบ่งประเภทของขยะมูลฝอยชุมชน ออกตามลักษณะทางกายภาพได้เป็น 4 ประเภท ได้แก่

- 1) ขยะย่อยสลาย (Compostable Waste) หรือ มูลฝอยย่อยสลาย หมายถึง ขยะที่เน่าเสียหรือย่อยสลายได้เร็ว สามารถนำมาหมักทำปุ๋ยได้ เช่น เศษผัก เปลือกผลไม้ เศษอาหาร ใบไม้ เศษเนื้อสัตว์ เป็นต้น
- 2) ขยะรีไซเคิล (Recyclable Waste) หมายถึง ขยะของเสียบรรจุภัณฑ์ หรือวัสดุเหลือใช้ซึ่งสามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ได้ โดยการนำมาแปรรูปเป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตหรือใช้สำหรับผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ เช่น แก้ว กระดาษ กระจก เครื่องดื่ม พลาสติก เศษโลหะ อลูมิเนียม ยางรถยนต์ เป็นต้น
- 3) ขยะอันตราย (Hazardous waste) หมายถึง ของเสียที่เป็นพิษมีฤทธิ์กัดกร่อนและระเบิดได้ง่ายต้องใช้กรรมวิธีในการทำลายเป็นพิเศษเนื่องจากเป็นวัสดุที่มีอันตราย เช่น สารฆ่าแมลง ถ่านไฟฉาย แบตเตอรี่รถยนต์ หลอดไฟ สเปรย์ฉีดผม เป็นต้น
- 4) ขยะทั่วไป (General Waste) หมายถึง ขยะประเภทอื่นนอกเหนือจากขยะย่อยสลาย ขยะรีไซเคิลและขยะอันตราย มีลักษณะที่ย่อยสลายยากและไม่คุ้มค่าสำหรับการนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ เช่น กล่องนม ห่อพลาสติกใส่ขนม ถุงพลาสติกบรรจุผงซักฟอก ซองบะหมี่กึ่งสำเร็จรูป พลาสติกห่อลูกอม ถุงพลาสติกเปื้อนเศษอาหาร โฟม ฟอล์ยเปื้อนเศษอาหาร เป็นต้น

โดยงานวิจัยนี้เลือกใช้ขยะประเภทขยะทั่วไปในการผลิตเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง เพื่อเป็นการเพิ่มทางเลือกในการจัดการขยะมูลฝอยและยังช่วยลดปริมาณขยะมูลฝอยที่ถูกส่งไปยังหลุมฝังกลบ

### 3.2 เชื้อเพลิง

เชื้อเพลิง (Fuel) หมายถึง สารที่สามารถเผาไหม้ได้เมื่อทำปฏิกิริยากับอากาศหรือออกซิเจน และให้พลังงานความร้อนออกมาในปริมาณที่สูงพอที่จะนำไปใช้ประโยชน์ได้ เป็นแหล่งกำเนิดที่ทำให้เกิดพลังงานในรูปแบบต่างๆ เชื้อเพลิงที่ดีควรมีลักษณะดังนี้ (สุพัฒตรา ส่งเสริม, 2558) สามารถเผาไหม้และควบคุมการเผาไหม้ได้ มีค่าความร้อนสูง ราคาไม่แพง เมื่อเกิดการเผาไหม้แล้วให้สารที่เป็นมลพิษในระดับต่ำ ง่ายต่อการลำเลียงขนส่ง เก็บรักษาง่าย และมีความปลอดภัยทั้งเวลาใช้และเก็บรักษา

โดยสามารถจำแนกเชื้อเพลิงตามสถานะทางกายภาพออกได้เป็น 3 ชนิด ได้แก่ เชื้อเพลิงแข็ง เชื้อเพลิงเหลว และเชื้อเพลิงก๊าซ ซึ่งงานวิจัยนี้จะขอกกล่าวถึงเชื้อเพลิงแข็งเท่านั้น

3.2.1 เชื้อเพลิงแข็ง หมายถึง เชื้อเพลิงที่มีสถานะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิปกติและธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลักของเชื้อเพลิงชนิดนี้ประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน เมื่อทำปฏิกิริยาทางเคมีกับออกซิเจนในอากาศจะให้พลังงานความร้อนออกมา เชื้อเพลิงแข็งสามารถจำแนกประเภทตามกระบวนการผลิตได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่

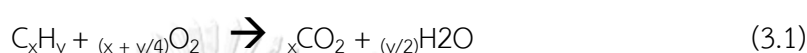
- 1) เชื้อเพลิงธรรมชาติ (Natural Fuel) หมายถึง เชื้อเพลิงที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ จากพืช จากสัตว์ (เชื้อเพลิงชีวมวล) หรือการทับถมของซากพืช ซากสัตว์ เป็นเวลานานนับล้านๆ ปี (เชื้อเพลิงฟอสซิล) เชื้อเพลิงเหล่านี้สามารถนำไปใช้ได้โดยตรงไม่ต้องแปรรูป เช่น ฝืน ถ่านหิน ทินน้ำมัน ซีลื้อย แกลบ เป็นต้น
- 2) เชื้อเพลิงสังเคราะห์ (Synthetic Fuel) หมายถึง เชื้อเพลิงที่ได้จากการสังเคราะห์ขึ้น โดยทำการสังเคราะห์จากเชื้อเพลิงธรรมชาติ ซึ่งการสังเคราะห์นี้จะใช้กระบวนการทางความร้อน คือ การคาร์บอนเซชัน (Carbonization) หรือไพโรไลซิส (Pyrolysis) ทำให้ได้เชื้อเพลิงแข็งสังเคราะห์คุณภาพดีขึ้น

### 3.3 กระบวนการทางความร้อน

3.3.1 การเผาไหม้ (Combustion) หมายถึง กระบวนการที่เกิดขึ้นภายในระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงทางปฏิกิริยาเคมี เกิดขึ้นเมื่อเชื้อเพลิงเกิดการออกซิเดชันกับอากาศจะให้ผลผลิตและความร้อนออกมา ในการเผาไหม้ส่วนใหญ่จะไม่ใช้ออกซิเจนเพียงอย่างเดียว แต่ใช้อากาศแทน

เนื่องจากอากาศมีออกซิเจนอยู่ประมาณร้อยละ 21 โดยปริมาตรหรือร้อยละ 23 โดยน้ำหนัก ตัวอย่างระบบการเผาไหม้โดยตรงแสดงดังรูปที่ 3.1 สามารถจำแนกรูปแบบการเผาไหม้ได้ 2 ลักษณะ ได้แก่

3.3.1.1 การเผาไหม้แบบสมบูรณ์ (Complete Combustion) หมายถึง การที่ก๊าซออกซิเจนทำปฏิกิริยาพอดีกับธาตุในเชื้อเพลิงแล้วสามารถให้ปริมาณความร้อนเท่ากับค่าความร้อนของเชื้อเพลิงและมีองค์ประกอบของการเผาไหม้ที่ดีที่สุดคือการผสมกันระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศจะต้องเป็นไปอย่างทั่วถึงรวมไปถึงระยะเวลาและอุณหภูมิของเชื้อเพลิงต้องเหมาะสมผลที่ได้จากการเผาไหม้จะอยู่ในรูปของคาร์บอนไดออกไซด์กับน้ำ ดังสมการที่ 3.1



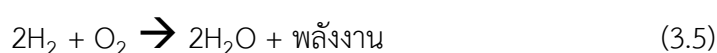
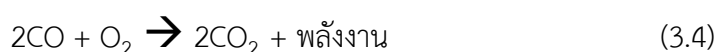
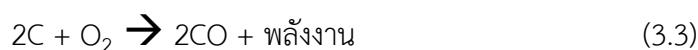
ปัจจัยที่ส่งผลให้การเผาไหม้สมบูรณ์ มีดังนี้

- เวลา (Time) เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาการเผาไหม้ต้องเพียงพอ
- อุณหภูมิ (Temperature) อุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ต้องเหมาะสม
- ความปั่นป่วน (Turbulence) การผสมกันระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศต้องอยู่ภายใต้ระดับการไหลแบบปั่นป่วนที่สูงเพียงพอ

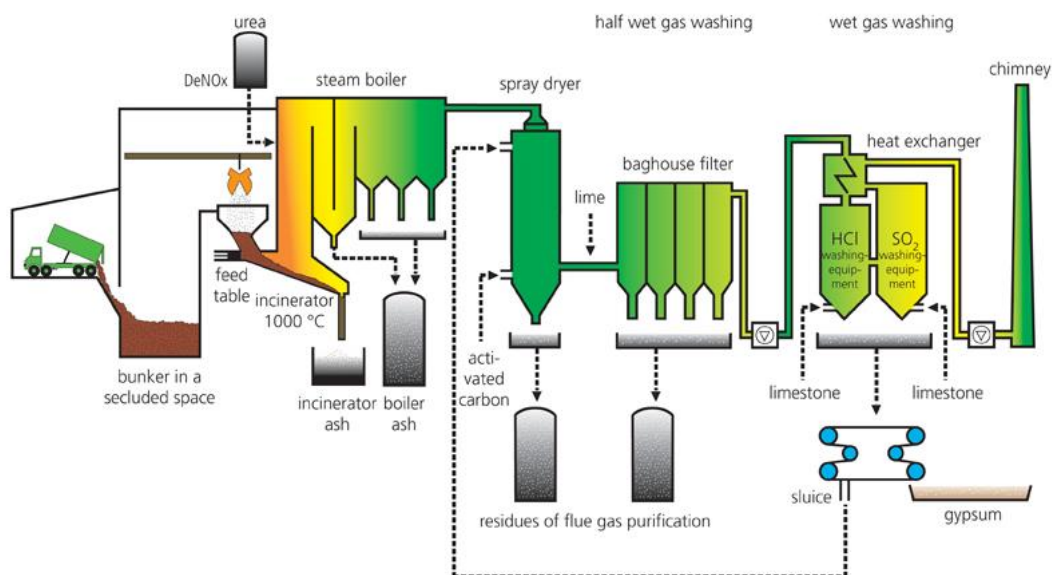
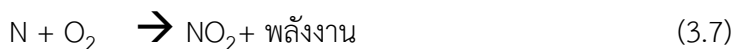
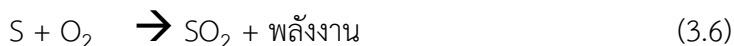
3.3.1.2 การเผาไหม้แบบไม่สมบูรณ์ (Incomplete Combustion) หมายถึง การที่ก๊าซออกซิเจนน้อยเกินไปในการทำปฏิกิริยาธาตุในเชื้อเพลิง เชื้อเพลิงเผาไหม้ไม่หมด มีเขม่าควันดำ พลังงานที่ได้จะน้อย ผลที่ได้จากการเผาไหม้จะอยู่ในรูปของคาร์บอนมอนอกไซด์และอื่นๆ ดังสมการที่ 3.2



โดยเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งประกอบไปด้วยธาตุต่างๆคือ คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ออกซิเจน (O) ไนโตรเจน (N) และซัลเฟอร์ (S) เมื่อนำเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งมาเผาไหม้จะมีขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาหลัก ดังสมการที่ 3.3-3.7







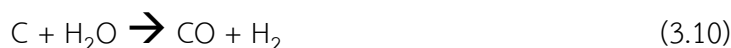
รูปที่ 3.1 ตัวอย่างระบบการเผาไหม้โดยตรง (เตาเผาแบบตะแกรง)

(<http://www.indaver.be/en/installations-processes/waste-to-energy/grate-incinerators>)

3.3.2 แก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) เป็นกระบวนการเปลี่ยนเชื้อเพลิงแข็งให้อยู่ในสถานะก๊าซที่สามารถเผาไหม้ได้หรือเรียกว่า ก๊าซเชื้อเพลิง (Syn Gas) ซึ่งอยู่ในรูปของก๊าซไฮโดรเจน ( $H_2$ ) ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ( $CO$ ) และก๊าซมีเทน ( $CH_4$ ) ภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีการจำกัดออกซิเจน โดยใช้อากาศในการทำปฏิกิริยาช่วง 25-50% ของอากาศทั้งหมดของการเผาไหม้สมบูรณ์ ปฏิกิริยาการเผาไหม้แบ่งออกเป็น 4 ช่วง คือ

- การอบแห้ง (Drying) เป็นขั้นตอนการไล่ความชื้นในเชื้อเพลิง
- ปฏิกิริยาไพโรไลซิส (Pyrolysis) เป็นกระบวนการแตกตัวทางความร้อนของเชื้อเพลิงในที่ไม่มีออกซิเจน โดยอาศัยความร้อนจากโซนเผาไหม้ทำให้สารระเหยที่อยู่ในเชื้อเพลิงสลายตัว ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะประกอบด้วย ถ่านคาร์บอน น้ำมัน และก๊าซ
- ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation หรือ combustion) เป็นบริเวณที่มีการป้อนออกซิเจนเข้าไป เพื่อให้เกิดการสันดาปของไฮโดรเจนและคาร์บอนในเชื้อเพลิงกับออกซิเจน ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ

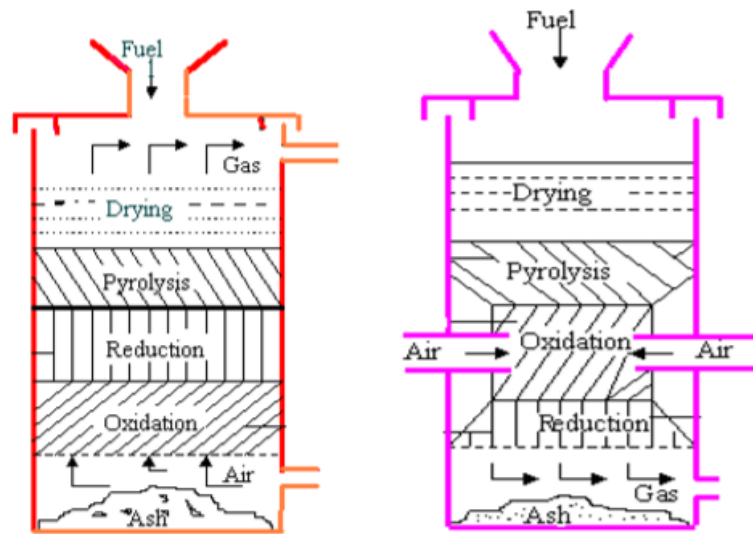
- ปฏิกริยารีดักชัน (Reduction) เป็นกระบวนการที่มีอุณหภูมิสูงในสถานะที่ออกซิเจนไม่เพียงพอ ซึ่งผลิตภัณฑ์หลักที่เกิดขึ้นคือก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และก๊าซไฮโดรเจน กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันมีขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาหลักดังสมการที่ 3.8-3.11



ชนิดของเตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิง (Gasifier) แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ

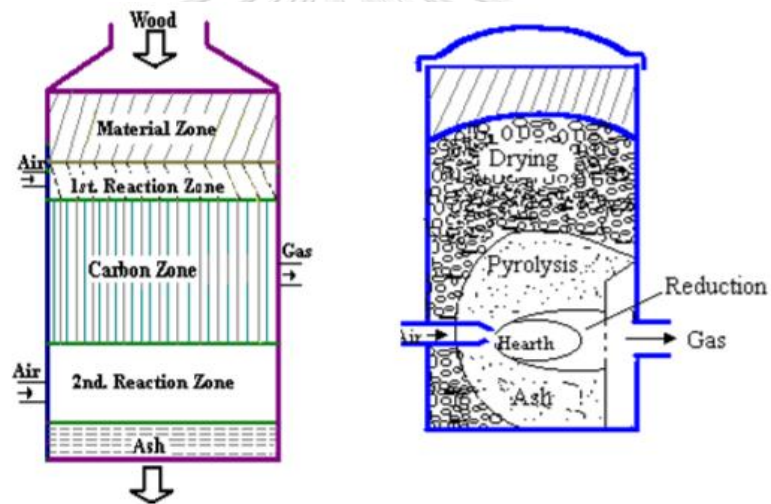
- 1) Fluidized Bed Gasifier เหมาะสำหรับใช้กับเชื้อเพลิงบางชนิด เช่น เชื้อเพลิงที่มีขนาดเล็ก มีความหนาแน่นต่ำ มีปริมาณเถ้าสูง เป็นต้น เตาชนิดนี้การสัมผัสระหว่างอากาศและสารตัวกลางกับเชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพสูง อุณหภูมิของสารตัวกลางจะมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอทั่วถึงการเผาไหม้และเกิดก๊าซขึ้นพร้อมๆกัน เนื่องจากระบบนี้ต้องการความเร็วอากาศสูงดังนั้นจึงเกิดการสูญเสียเชื้อเพลิงไปบางส่วนและก๊าซเชื้อเพลิงจะมีฝุ่นปะปนสูง
- 2) Fixed Bed Gasifier สามารถใช้ได้กับเชื้อเพลิงที่มีความชื้นสูง มีการแบ่งโซนการทำงานปฏิกิริยาชัดเจน ลักษณะการทำงานที่ซับซ้อนน้อยกว่าแบบระบบฟลูอิดไธด์เบด จำแนกชนิดของเตาได้ตามทิศทางการป้อนอากาศ แสดงดังรูปที่ 3.2 ได้แก่
  - Updraft Gasifier ป้อนอากาศจากด้านล่างขึ้นบน
  - Twin-Fire Gasifier ป้อนอากาศเข้าทั้งสองทาง
  - Crossdraft Gasifier ป้อนอากาศเข้าแนวขวาง
  - Downdraft Gasifier ป้อนอากาศโซนเผาไหม้แล้วไหลลงด้านล่าง

โดยงานวิจัยนี้ได้ใช้เตาเผาแก๊สซิไฟเออร์แบบไหลลง (Downdraft Gasifier) ในการทดสอบการเผาไหม้ เตาเผาชนิดนี้มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดทาร์ เนื่องจากอากาศที่ป้อนเข้าไปด้านข้างจะไหลลงด้านล่างของเตา ทาร์ที่เกิดขึ้นในโซนไพโรไลซิสจะไหลลงมาตามอากาศและถูกเผาไหม้จนหมดในโซนออกซิเดชัน ส่งผลให้ก๊าซที่เกิดขึ้นในเตาชนิดนี้สะอาดกว่าเตาชนิดอื่นๆ



ก)

ข)



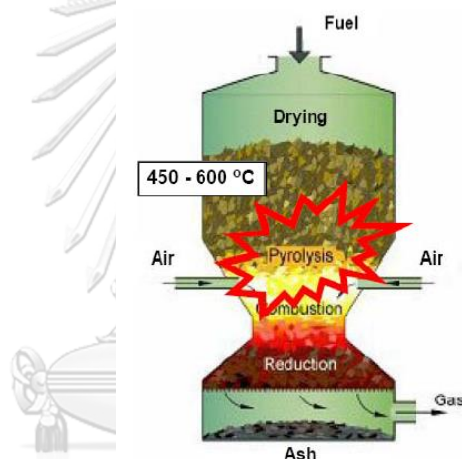
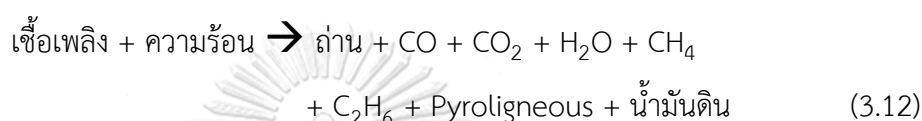
ค)

ง)

รูปที่ 3.2 เตาเผา Fixed Bed Gasifier ชนิดต่างๆ

- ก) Updraft Gasifier
  - ข) Downdraft Gasifier
  - ค) Twin-Fire Gasifier
  - ง) Crossdraft Gasifier
- (ทิพย์สุภินทร์ หินชูย, 2556)

3.3.3 การกลั่นสลาย (Pyrolysis) เป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องเนื่องมาจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันเป็นการให้ความร้อนแก่เชื้อเพลิงภายใต้สภาวะที่ปราศจากออกซิเจน อุณหภูมิในเขตนี้จะอยู่ในระหว่าง 450-600 องศาเซลเซียส โครงสร้างของเชื้อเพลิงจะถูกสลายโดยความร้อน ผลผลิตที่ได้เป็นอินทรีย์สารซึ่งส่วนใหญ่เป็นของเหลว เช่น น้ำมันดิน สารระเหยอื่นๆ และก๊าซเชื้อเพลิงบางชนิด ก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้สามารถนำมาผลิตเป็นพลังงานได้ 2 รูปแบบ คือ การนำมาผลิตไฟฟ้า หรือนำมาผลิตไอน้ำเพื่อนำความร้อนไปใช้ประโยชน์อย่างอื่น ตัวอย่างเตาเผาไหม้แบบการกลั่นสลาย ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการสามารถเขียนดังสมการที่ 3.12



รูปที่ 3.3 ตัวอย่างเตาเผาไหม้แบบการกลั่นสลาย  
(<http://www.boondeeworkshop.com/gasifier/thai.html>)

### 3.4 คำนิยามเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง

คำนิยามเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง (Refuse Derived Fuel : RDF) เป็นรูปแบบการจัดการขยะมูลฝอยเพื่อนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง โดยการปรับปรุงและแปลงสภาพของขยะมูลฝอยผ่านกระบวนการต่างๆ เช่น การคัดแยกวัสดุที่เผาไหม้ไม่ได้ ออก การฉีกหรือตัดขยะมูลฝอยออกเป็นชิ้นเล็กๆ เป็นต้น ทำให้เป็นเชื้อเพลิงแข็งที่มีสมบัติในด้านค่าความร้อน ความชื้น ขนาดและความหนาแน่นเหมาะสมในการใช้เป็นเชื้อเพลิงป้อนหม้อไอน้ำเพื่อผลิตไฟฟ้าหรือความร้อน มีองค์ประกอบทั้งทางเคมีและกายภาพสม่ำเสมอ ง่ายต่อการจัดเก็บ การขนส่ง การจัดการต่างๆ รวมทั้งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมต่ำ

ASTM, 2006 ให้คำนิยามเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง หมายถึง ขยะชุมชนที่ผ่านการคัดแยกเอาเหล็ก แก้ว และวัสดุอินทรีย์ออก และทำการลดขนาดจนทำให้ร้อยละ 95 ของขยะมูลฝอยที่คัดแยกก่อน ผ่านตะแกรงขนาด 2 นิ้ว

### 3.5 วัสดุที่สามารถนำมาผลิตเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง

3.5.1 วัสดุที่สามารถนำมาผลิตเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง ได้แก่

- 1) ขยะชีวมวล เศษพืชหรือวัสดุเหลือทิ้งจากการเก็บเกี่ยว เช่น ฟางข้าว เศษไม้ ใบไม้ ชี เลื่อย เป็นต้น ขยะประเภทนี้โดยทั่วไปจะมีค่าความร้อนต่ำและปัญหามลพิษจากการเผาไหม้ก็ต่ำด้วย สามารถนำไปใช้แทนไม้ฟืนได้ง่ายแต่ปริมาณของขยะชีวมวลกลุ่มนี้จะไม่แน่นอนขึ้นกับฤดูกาล
- 2) วัสดุที่เหลือทิ้งหรือกากของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมบางประเภท เช่น เยื่อกระดาษ เศษผ้าปนเปื้อนน้ำมัน กากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย เป็นต้น
- 3) ขยะมูลฝอยชุมชนที่ย่อยสลายยากและให้ค่าความร้อนสูง เช่น เศษกระดาษ กุ้งพลาสติก บรรจุภัณฑ์ต่างๆ โฟม เศษผ้า เป็นต้น ขยะประเภทนี้โดยทั่วไปจะมีค่าความร้อนสูง แต่ มักจะมีปัญหาจากก๊าซที่เผาไหม้หากไม่มีการควบคุมการเผาไหม้ที่ดีพอ

3.5.2 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เลือกใช้ขยะทั่วไปที่เป็นปัญหาในการจัดการมา 3 ชนิด ได้แก่ ขยะพลาสติก ขยะกระดาษ และกากกาแฟ

#### 3.5.2.1 ขยะพลาสติก

พลาสติกเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มนุษย์สังเคราะห์ขึ้น โดยการนำน้ำมันปิโตรเลียมมา แยกเป็นสารประกอบบริสุทธิ์ ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบระหว่างคาร์บอนกับไฮโดรเจน เมื่อนำเอาสารประกอบแต่ละชนิดมาทำปฏิกิริยาให้มีลักษณะต่อกันเป็นเส้นสายยาวมาก ๆ ก็จะได้ วัสดุที่มีสมบัติเป็นพลาสติกแตกต่างกันไป พลาสติกแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ เทอร์โม พลาสติก และ เทอร์โมเซตติงพลาสติก โดยงานวิจัยนี้ขอกกล่าวถึงเฉพาะเทอร์โมพลาสติก เนื่องจากเป็นพลาสติกที่ใช้กันแพร่หลายที่สุด

เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) เป็นพลาสติกที่สามารถเปลี่ยนรูปได้ เมื่อได้รับความ ร้อนจะอ่อนตัวและเมื่อเย็นลงจะแข็งตัว พลาสติกประเภทนี้โครงสร้างโมเลกุลเป็นโซ่ตรงยาว มี การเชื่อมต่อระหว่างโซ่พอลิเมอร์น้อยมาก จึงสามารถหลอมเหลวหรือเมื่อผ่านการอัดแรงมาก จะไม่ทำลายโครงสร้างเดิม

ผลิตภัณฑ์พลาสติกสามารถแบ่งตามชนิดของพลาสติกได้เป็น 7 ชนิด มีการแสดงไว้บน ผลิตภัณฑ์เพื่อช่วยในเรื่องการคัดแยกพลาสติกสำหรับการรีไซเคิล ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ชนิดของผลิตภัณฑ์พลาสติก

สัญลักษณ์	เรซิน	การใช้ประโยชน์	ผลิตภัณฑ์รีไซเคิล
	โพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene Terephthalate)	ภาชนะสำหรับใส่เครื่องดื่ม ใส่อาหารร้อน	ผลิตเส้นใยโพลี เอสเตอร์ เช่น พรม
	พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene)	ขวดใส่นม ขวดแชมพู ขวด น้ำยาซักผ้า	เฟอร์นิเจอร์ เช่น ศาลา ม้านั่ง
	ไวนิล (Vinyl) หรือโพลีไวนิลคลอไรด์ (Polyvinylchloride)	แผ่นฟิล์มถนอมอาหาร ฉนวนหุ้มสายไฟ สายยาง ใส ท่อน้ำประปา	กรวยจราจร ท่อน้ำประปาสำหรับ การเกษตร
	พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene)	ฟิล์มห่ออาหาร ถุงพลาสติก แผ่นฟิล์ม	ถุงดำใส่ขยะ ถังขยะ ตู้จดหมาย
	พอลิโพรไพลีน (Polypropylene)	ถุงใส่ของชำ กล่องบรรจุ อาหาร ภาชนะห่ออาหาร	กล่องแบตเตอรี่รถยนต์ กันชนรถยนต์
	โพลิสไตรีน (Polystyrene)	ช้อน โฟมกันกระแทก ถ้วย ไอศกรีม	ไม้แขวนเสื้อ ไม้บรรทัด
	อื่นๆ	ภาชนะบรรจุอาหาร เช่น ขวดน้ำมะเขือเทศ ขวด น้ำส้ม ขวดน้ำมะนาว	ท่อนไม้พลาสติก ผลิตภัณฑ์พลาสติกอื่นๆ

ที่มา : กิตติมา วัฒนากมลกุล, 2555

ชนิดของพลาสติกที่นำมาใช้ในการวิจัยได้แก่

- 1) โพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene Terephthalate: PET) สารตั้งต้นที่ใช้ในการผลิตโพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลตนั้นได้จากอุตสาหกรรมน้ำมัน คุณสมบัติของโพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต คือ กิ่งแข็งไปจนถึงเป็นของแข็งได้โดยการปรับความหนา มีน้ำหนักเบา กันก๊าซและแอลกอฮอล์ได้ดี นิยมใช้ในการผลิตขวดเครื่องดื่ม ขวดน้ำอัดลม ขวดน้ำผลไม้ ขวดน้ำมันพืช ขวดซอสปรุงรส เป็นต้น ส่วนแผ่นฟิล์มของโพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต นิยมใช้ในการผลิตบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหารแห้ง เช่น กาแฟ อาหารขบเคี้ยว บรรจุภัณฑ์อาหารแช่เยือกแข็ง เป็นต้น

2) พอลิเอทิลีน (Polyethylene : PE) แบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ พอลิเอทิลีน ความหนาแน่นต่ำและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง

- พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene : LDPE) มีความหนาแน่น 0.910 -0.925 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ชื่อสามัญเรียกว่าถุงเย็น เพราะไม่ทนความร้อน คุณสมบัติของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ คือ สามารถใช้ความร้อนเชื่อมติดผนึกได้ดี ยืดหยุ่นได้ดีทนต่อการทิ่มทะลุและการฉีกขาด เหนียว ไม่กรอบ โปรงใส ไม่ว่องไวต่อสารเคมี ทนต่อกรดและด่างได้ดีป้องกันการผ่านของความชื้นได้ดี ออกซิเจนและอากาศซึมผ่านได้ ไขมันซึมผ่านได้ นิยมใช้ในการผลิต ถุงข้าวสาร ถุงน้ำตาล ถุงบรรจุภัณฑ์ต่างๆ เป็นต้น

- พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene : HDPE) มีความหนาแน่น 0.941-0.965 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร คุณสมบัติของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง คือ ชุ่ม แสงผ่านได้น้อย สามารถใช้ได้กับผลิตภัณฑ์ที่เป็นกรดและด่าง ไม่ว่องไวต่อสารเคมี มีความเหนียว ค่อนข้างนิ่ม ยืดหยุ่น ความต้านทานแรงต่างๆ ได้ดี ทนทานต่อการแตกหรือการหักงอได้ดี ป้องกันการผ่านของอากาศได้ดี ทนความร้อนได้เล็กน้อย ควรบรรจุด้วยวิธีบรรจุแบบอ่อน (80-100 องศาเซลเซียส) ป้องกันการซึมผ่านของความชื้นได้สูงมาก นิยมใช้ในการผลิตบรรจุภัณฑ์พลาสติก เช่น ขวด ถัง ถาด ถุงที่ต้องการความแข็งแรงแต่ไม่ต้องการความใสมากนัก เป็นต้น

3) พอลิโพรไพลีน (Polypropylene: PP) มีความหนาแน่นในช่วง 0.89–0.90 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร คุณสมบัติของพอลิโพรไพลีนคล้ายกับพอลิเอทิลีน แต่มีลักษณะขาวขุ่น ทึบแสงกว่าพอลิเอทิลีน นิยมใช้ในการผลิต ปกแพ้ม เอกสาร กล่องและตลับเครื่องสำอางค์ อุปกรณ์ทางการแพทย์ กระจสบข้าว ถุงบรรจุปุ๋ย ถุงบรรจุอาหาร หลอดดูด เป็นต้น

4) โพลีสไตรีน (Polystyrene : PS) คุณสมบัติของโพลีสไตรีน คือ มีความแข็งแต่เปราะใส น้ำหนักเบา ไม่ดูดความชื้น นิยมใช้ในการผลิตภาชนะบรรจุของใช้หรือ ถาดโฟมสำหรับใส่อาหาร

5) พลาสติกอื่นๆ (Other) เช่น โพลีคาร์บอเนต (Polycarbonate : PC) คุณสมบัติของโพลีคาร์บอเนต คือ ลักษณะใส แข็งและทนความร้อน จึงนิยมใช้ในการผลิตภาชนะบรรจุอาหารที่สามารถเก็บในตู้เย็นและนำเข้าไมโครเวฟได้ด้วย เช่น เหยือกน้ำ ขวดนม ถ้วย ซ้อนส้อม มีดชนิดใส

ในปี พ.ศ. 2551 กรมควบคุมมลพิษได้สำรวจปริมาณขยะพลาสติกในประเทศไทยมีมากเป็นอันดับ 2 รองมาจากเศษอาหาร และปัจจุบันแนวโน้มการใช้งานพลาสติกยังคงเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ส่งผลให้เกิดขยะพลาสติกในปริมาณมากขึ้นตาม การจัดการขยะพลาสติกทำได้ยากเนื่องจากการสลายตัวของพลาสติกทางธรรมชาติโดยจุลินทรีย์เกิดขึ้นช้าจึงไม่เหมาะที่จะส่งไปจัดการโดยหลุมฝังกลบและการกำจัดโดยนำไปเผาทำลายก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศสูงถ้าไม่ได้รับการควบคุมอย่างดี

ขยะพลาสติก มีองค์ประกอบของคาร์บอนกับไฮโดรเจนเป็นหลักส่งผลให้มีค่าความร้อนสูง การนำขยะพลาสติกมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งเพื่อนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนในกระบวนการเผาไหม้จึงถือเป็นทางเลือกหนึ่งในการจัดการขยะพลาสติก แต่ก็ควรเลือกใช้เตาเผาไหม้ที่เหมาะสม เช่น เตาเผาของโรงงานปูนซีเมนต์ เป็นต้น เนื่องจากใช้อุณหภูมิในการเผาไหม้สูงส่งผลให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในระดับต่ำ

#### 3.5.2.2 ขยะกระดาษ

กระดาษเป็นวัสดุที่นำมาเป็นบรรจุภัณฑ์หลากหลายประเภท กระดาษทุกชนิดที่เราใช้กันในปัจจุบันส่วนใหญ่ผลิตจากเนื้อเยื่อของต้นไม้ เช่น ไม้ยูคาลิปตัส ต้นสน ไม้ เป็นต้นและมีการเติมสารเติมแต่งที่ช่วยทำให้เยื่อมีคุณภาพเหมาะกับการใช้งาน

ผลิตภัณฑ์กระดาษ ได้เข้ามามีบทบาทอย่างมากในชีวิตประจำวันในรูปแบบต่างๆ เช่น ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ ใช้พิมพ์เขียนและบันทึกข้อความ เป็นต้น ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่า ประเทศไทยมีการใช้กระดาษประมาณ 34 กิโลกรัมต่อคนต่อปี หรือ 2 ล้านตันต่อปี และมีอัตราการใช้เพิ่มขึ้นปีละ 15% ปี พ.ศ. 2551 กรมควบคุมมลพิษได้สำรวจปริมาณขยะกระดาษในประเทศไทยมีมากเป็นอันดับ 3 รองมาจากขยะพลาสติก ผลิตภัณฑ์กระดาษที่ผลิตออกมาเป็นจำนวนมากและในจำนวนที่ผลิตออกมานี้มีเพียงไม่ถึง 30 % ที่ได้มีการนำกระดาษที่ใช้แล้วกลับไปใช้อีกครั้ง จำนวนที่เหลือจึงกลายเป็นขยะอยู่ในแหล่งทิ้งขยะที่ต้องการการจัดการที่ถูกวิธี ขยะกระดาษมีองค์ประกอบของคาร์บอนกับไฮโดรเจนเป็นหลักส่งผลให้มีค่าความร้อนสูงในระดับปานกลาง การนำขยะกระดาษมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งเพื่อนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนในกระบวนการเผาไหม้จึงถือเป็นทางเลือกหนึ่งในการจัดการ แต่ขยะกระดาษมีข้อจำกัดคือการไวต่อความชื้นซึ่งส่งผลให้ค่าความร้อนลดลง จึงควรมีขั้นตอนในการทำกระดาษให้แห้งก่อนนำไปผลิต

#### 3.5.2.3 กาแฟ

ในปัจจุบันกาแฟเป็นหนึ่งในเครื่องดื่มที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย มีการปลูกต้นกาแฟมากกว่า 70 ประเทศทั่วโลก ในปี 2014 International Coffee Organisation ได้ระบุว่ากาแฟถูกบริโภคทั่วโลกมากกว่า 8 ล้านตัน โดยพันธุ์กาแฟที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจ



ได้แก่ อาราบิก้า และโรบัสต้า (Fernandesa และคณะ, 2017) ในแต่ละปีเศษเหลือจากกากกาแฟมีประมาณ 6 ล้านตันทั่วโลก (Mussatto และคณะ, 2011)

กาแฟเป็นหนึ่งในสินค้าทางการเกษตรซึ่งมีการซื้อขายกันมากที่สุดในโลก โดยในประเทศไทยมีการปลูกกาแฟหลายพันธุ์ มีการพัฒนาวิธีการนำกาแฟมาผลิตเป็นเครื่องดื่มในลักษณะต่างๆ ปัจจุบันธุรกิจร้านกาแฟเป็นธุรกิจที่มีอัตราการขยายตัวสูง ผู้ประกอบการขนาดย่อมมีการปรับปรุงธุรกิจของตนเอง รวมทั้งมีผู้ประกอบการรายใหม่เข้ามาอีกเป็นจำนวนมากไม่ว่าจะเป็นร้านกาแฟสดทั้งขนาดเล็กหรือใหญ่ จากแนวโน้มของผู้บริโภคนิยมดื่มกาแฟสดมากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณกากกาแฟซึ่งเป็นส่วนที่เหลือของกาแฟหลังการชงมากขึ้นตาม มีงานวิจัยมากมายค้นพบว่า กากกาแฟนั้นสามารถนำมาผลิตเป็นน้ำมันไบโอดีเซลได้ เนื่องจากในกากกาแฟนั้นมีน้ำมันเป็นส่วนประกอบ และได้ถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในหม้อไอน้ำอุตสาหกรรมเนื่องจากมีค่าความร้อนประมาณ 20.9 เมกะจูลต่อกิโลกรัม (Mussatto และคณะ, 2011) มีองค์ประกอบของคาร์บอนกับไฮโดรเจนในระดับปานกลาง นั้นแสดงให้เห็นว่ามีความเป็นไปได้ที่จะนำกากกาแฟมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงทดแทนในรูปของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง โดยการนำกากกาแฟมาใช้นั้นควรมีกระบวนการทำให้แห้งก่อนเพื่อป้องกันการเกิดเชื้อราเนื่องจากมีความชื้นสูง

### 3.6 ตัวประสาน

ตัวประสาน (Binder) หมายถึง วัสดุที่มีลักษณะเหนียวเกาะตัวกันได้เมื่อนำไปผสมกับวัสดุที่ไม่เกาะตัวกันจะสามารถทำให้วัสดุนั้นเกาะตัวกันได้ดีขึ้นและอุดช่องว่างระหว่างวัสดุ การอัดแท่งเชื้อเพลิงแบบไม่ใช้ความร้อน จำเป็นต้องมีตัวประสานเพื่อให้จับตัวกันเป็นแท่งได้ดีขึ้น ซึ่งตัวประสานควรมีคุณสมบัติดังนี้ (สุพัฒตรา ส่งเสริม, 2558)

- มีความสามารถในการประสานดี มีราคาถูก
- สามารถเผาไหม้ได้หรือลุกติดไฟได้ดี และไม่เกิดควัน
- เมื่อถูกอากาศภายนอกจะต้องไม่ทำให้แท่งเชื้อเพลิงแตกร่วนหรืออ่อนตัวเกินไป

3.6.1 ตัวประสานที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ที่ ดินสอพอง และไบจามจุรีที่ผ่านการหมักแล้ว เพื่อศึกษาประเภทของตัวประสานและสัดส่วนการใช้ที่เหมาะสมซึ่งส่งผลให้เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่ได้มีค่าความร้อนและความหนาแน่นต่อหน่วยน้ำหนักสูง

#### 3.6.1.1 โพลีไวนิลแอลกอฮอล์

โพลีไวนิลแอลกอฮอล์หรือแป้งสังเคราะห์ เป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่มีสมบัติพิเศษคือ การก่อฟิล์ม ยึดติดเป็นกาว ละลายในน้ำได้ อีกทั้งยังทนทานต่อการกัดกร่อนของน้ำมันหรือตัวทำละลายได้ดี สามารถย่อยสลายได้โดยทางชีวภาพ ติดไฟได้ จุดหลอมเหลว 200 องศา

เซลเซียส มีลักษณะเป็นผงสีขาวคล้ายแป้ง ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส โดยนิยมใช้โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ ในขั้นตอนการผลิตผ้าผืนของโรงงานฟอกย้อม เพื่อทำหน้าที่หล่อลื่นและลดแรงเสียดทาน ระหว่างกระบวนการทอและถัก

งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้โพลีไวนิลแอลกอฮอล์แบบผงเป็นตัวประสานในการผลิตเชื้อเพลิง ขยะอัดแท่ง ซึ่งในปัจจุบันตัวประสานที่นิยมใช้ ได้แก่ แป้งมัน เมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติของโพลีไวนิลแอลกอฮอล์กับแป้งมันแล้ว พบว่ามีคุณสมบัติในการช่วยยึดติดได้คล้ายกันจึงมีความเป็นไปได้ในการนำมาใช้แทนกัน

### 3.6.1.2 ดินสอพอง

ดินสอพองเป็นหินโคลนที่มีองค์ประกอบหลักคือแคลเซียมคาร์บอเนตผสมอยู่มากกว่าร้อยละ 80 และแร่ดินเหนียว หรือเรียกว่า หินปูนเนื้อดิน รวมถึงส่วนประกอบอื่นๆ เช่น แมกนีเซียม แคลเซียม ซิลิกา เหล็ก และอาราโกไนต์ เป็นต้น สามารถพบได้ในชั้นดินมีลักษณะเป็นกลุ่มดินสีขาวขุ่นแทรกตัวอยู่ในชั้นดิน ลักษณะทั่วไปคล้ายดินขาวหรือหินผุ โครงสร้างเป็นชั้นบางๆ มีรูพรุนเนื้อร่วนซุย ดินสอพองสดจะมีสีขาวและอาจพบสีเทา สีเทาอมฟ้า สีน้ำตาล หรือสีน้ำตาลแกมเหลือง ขึ้นอยู่กับปริมาณของสารประกอบอื่นที่ผสมอยู่

โดยเมื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบหลักระหว่างดินสอพองและปูนซีเมนต์ (Cement) พบว่าในปูนซีเมนต์มีองค์ประกอบหลักคือ หินปูนและดินเหนียว รวมถึงส่วนประกอบอื่นๆ เช่น ซิลิกา อลูมินา สินแร่เหล็ก ยิปซัม และสารเพิ่มพิเศษอื่นๆซึ่งคล้ายกับดินสอพองและจากการนำดินสอพองผสมกับน้ำ พบว่ามีความเหนียวเหมาะแก่การเป็นวัสดุเชื่อมประสาน มีลักษณะคล้ายปูนซีเมนต์ ซึ่งเป็นวัสดุประสานสำหรับผลิตคอนกรีต กล่าวคือการนำดินสอพองมาใช้เป็นตัวประสานในการผลิตเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งมีความเป็นไปได้สูง ประกอบกับดินสอพองเป็นวัสดุที่หาได้ง่ายและมีราคาถูก

### 3.6.1.3 ใบจามจรีที่ผ่านการหมักแล้ว

จามจรีเป็นพืชตระกูลถั่ว (Family Leguminosae) มีชื่อทางพฤกษศาสตร์ว่า *Samanea saman Jacq Merr.* ในภาษาอังกฤษชื่อที่เรียกกันแพร่หลาย คือ Rain Tree จามจรีเป็นไม้ผลัดใบและโตเร็ว โดยใบจามจรีมีลักษณะผสมแบบขนนกสองชั้น ทั้งใบยาวประมาณ 25-40 เซนติเมตร ใบประกอบด้วยช่อใบ 4 คู่ ใบย่อย 2-10 คู่ ต่อหนึ่งใบ ใบย่อยเกิดบนก้านใบซึ่งแยกจากก้านใหญ่ ใบย่อยรูปขนานเป็ยกปุ่นแต่เบี้ยว ใบย่อยด้านปลายใบใหญ่ที่สุด ใบย่อยหน้าปานกลาง ด้านหน้าใบสีเขียวเข้มเป็นมัน ด้านหลังใบสีเขียวจาง และมีขนเล็กน้อย

จามจรีเป็นต้นไม้ประจำจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยโดยบริเวณรอบๆมหาวิทยาลัยจึงมีการปลูกต้นจามจรี และด้วยจามจรีเป็นไม้ที่ผลัดใบและฝักในช่วงเวลาปลายปี ซึ่งส่งผลให้เศษใบจามจรีมีปริมาณค่อนข้างมากบริเวณถนนและคูข้างถนนภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทำลายทัศนียภาพ และเป็นปัญหาในการจัดการ ดังนั้นการจะช่วยลดปริมาณขยะอินทรีย์ประเภทเศษใบไม้ได้นั้น จำเป็นต้องมีการจัดการที่เหมาะสม ไม่ว่าจะเป็นการรีไซเคิล การฝังกลบขยะตามหลักสุขาภิบาลและการทำปุ๋ยหมักจากขยะอินทรีย์ เป็นต้น

งานวิจัยนี้เล็งเห็นถึงความสำคัญของปัญหา จึงทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ใบจามจรีที่ผ่านการหมักแล้วมาเป็นตัวประสานในการผลิตเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง เนื่องจากใบจามจรีมีเส้นใยเซลลูโลส และการหมักทำให้เกิดสารที่เป็นยางเหนียว โดยวิธีการหมักอ้างอิงจากโครงการ JICA ผลิตปุ๋ยสูตรใบจามจรีโดยใช้หัวเชื้อจากถังหมักขยะอินทรีย์ (ชวลิต รัตนธรรมสกุล, 2559) เพื่อใช้เป็นทางเลือกหนึ่งในการแก้ปัญหาขยะอินทรีย์ในชุมชน

### 3.7 ประเภทของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง

ตารางที่ 3.2 ประเภทของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งจำแนกตามมาตรฐาน ASTM E-75

ประเภท	กระบวนการจัดการ	การเผาไหม้
RDF1 : MSW	ขยะมูลฝอยที่เผาไหม้ได้ โดยยังมีขนาดตามสภาพเดิมของขยะ	Stoker
RDF2 : Coarse RDF	บดหรือตัดขยะมูลฝอยอย่างหยาบๆ	Fluidized Bed Combustor, Multi fuel Combustor
RDF3 : Fluff RDF	คัดแยกส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้ ออก เช่น โลหะ แก้วและอื่นๆ มีการบดหรือตัดจนทำให้ 95% ของขยะมูลฝอยที่คัดแยกแล้ว มีขนาดเล็กกว่า 2 นิ้ว	Stoker
RDF4 : Dust RDF	ขยะมูลฝอยส่วนที่เผาไหม้ได้ มาผ่านกระบวนการทำให้อยู่ในรูปของผงฝุ่น	Fluidized Bed Combustor, Pulverized Fuel Combustor
RDF5 : Densified RDF	ขยะมูลฝอยส่วนที่เผาไหม้ได้มาผ่านกระบวนการอัดแท่ง โดยให้มีความหนาแน่นมากกว่า 600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร	Fluidized Bed Combustor, Multi fuel Combustor

ตารางที่ 3.2 ประเภทของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งจำแนกตามมาตรฐาน ASTM E-75 (ต่อ)

ประเภท	กระบวนการจัดการ	การเผาไหม้
RDF6 : RDF Slurry	ขยะมูลฝอยส่วนที่เผาไหม้ได้มาผ่านกระบวนการให้อยู่ในรูปของ Slurry	Swirl Burner
RDF7 : RDF Syn Gas	ขยะมูลฝอยส่วนที่เผาไหม้ได้ มาผ่านกระบวนการ Gasification เพื่อผลิต Syn Gas ที่สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงก๊าซได้	Burner, Integrated Gasification-Combined Cycle

ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2551

RDF 1 : เป็นขยะส่วนที่เผาไหม้ได้ของขยะมูลฝอยชุมชน ทำการลดขนาดและปริมาณขยะโดยนำไปกำจัดในเตาเผาขยะแบบ Stoker ทั่วไปและส่วนขยะที่เผาไหม้ไม่ได้จะถูกส่งไปยังหลุมฝังกลบหรือนำกลับมาใช้ประโยชน์

RDF 2-3 : ใช้ในกรณีที่ระบบกำจัดขยะเป็นแบบ Fluidized Bed ซึ่งต้องการเชื้อเพลิงที่มีขนาดเล็ก จึงจำเป็นต้องมีการบด ย่อย หรือสับ RDF 1 ให้มีขนาดตามที่ต้องการ ทั้งนี้ขนาดของเชื้อเพลิง RDF จะขึ้นอยู่กับเตาเผาไหม้ เหมาะสำหรับการเตรียมเชื้อเพลิงเพื่อนำมาใช้ผลิตพลังงานในโรงงานเอง

RDF 4 : ใช้ในกรณีที่ระบบกำจัดไม่ใช่ 2 แบบที่กล่าวมาข้างต้น การย่อยขยะให้มีขนาดเล็กเท่ากับผงฝุ่นนั้นเหมาะสำหรับเทคโนโลยีที่นำขยะผงฝุ่นชนิดและเผาไหม้ในเตาเผาทันที

RDF 5 : เป็นการเพิ่มมวลและความหนาแน่น RDF 2-3 เพื่อความสะดวกต่อการขนส่ง หรือนำไปใช้งานนอกกระบวนการผลิต สามารถนำไปใช้ทดแทนหรือใช้งานร่วมกับเชื้อเพลิงประเภทถ่านหินได้

RDF 6-7 : เป็นการเปลี่ยนลักษณะทางกายภาพของขยะเชื้อเพลิงจากในรูปของแข็งให้อยู่ในรูปของเหลวหรือก๊าซ เพื่อเตรียมเชื้อเพลิงในการใช้งานให้เหมาะสมกับแต่ละเทคโนโลยี ส่วนมากจะเป็นขบวนการกำจัดขยะพร้อมทั้งผลิตพลังงาน เช่น พลังงานความร้อน เป็นต้น

### 3.8 สมบัติของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง

#### 3.8.1 สมบัติทางกายภาพ

3.8.1.1) ความหนาแน่น (Density) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างมวลต่อปริมาตรของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง

3.8.1.2) ค่ากำลังต้านทานแรงอัด (Compressive Strength) หมายถึง แรงต้านทานภายในเนื้อเชื้อเพลิงที่มีต่อแรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ซึ่งเชื้อเพลิงที่มีค่าความทนแรงกดต่ำจะส่งผลให้เชื้อเพลิงแตกร่วนง่าย ยากต่อการขนส่งและการนำไปใช้

### 3.8.2 สมบัติทางเคมี การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งมี 2 แนวทาง

#### 3.8.2.1 Proximate Analysis

- 1) ความชื้น (Moisture) หมายถึง ปริมาณน้ำที่มีอยู่ในเชื้อเพลิง ปริมาณความชื้นส่งผลต่อค่าความร้อนและการเผาไหม้ เชื้อเพลิงที่มีความชื้นสูงจะให้ค่าความร้อนลดลงและทำให้เชื้อเพลิงแตกร่วนได้ง่าย
- 2) ปริมาณเถ้า (Ash) หมายถึง ส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้หรือส่วนที่เหลือหลังจากที่ถูกเผาไหม้ในบรรยากาศที่อุณหภูมิและเวลาที่กำหนด ส่วนใหญ่เป็นอนินทรีย์ ซึ่งเชื้อเพลิงที่มีปริมาณเถ้าสูงจะส่งผลให้ค่าความร้อนลดลง
- 3) สารระเหย (Volatile Matter) หมายถึง องค์ประกอบในเชื้อเพลิงที่สามารถระเหยได้เมื่อได้รับความร้อน ซึ่งถ้าหากเชื้อเพลิงมีปริมาณสารระเหยสูงจะส่งผลให้เชื้อเพลิงสามารถติดไฟได้ง่าย
- 4) คาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) หมายถึง ส่วนที่เป็นของแข็งที่เหลืออยู่หลังจากที่ทำการวิเคราะห์หาปริมาณสารระเหยแล้ว เป็นส่วนที่เสถียรของโครงสร้าง ซึ่งเชื้อเพลิงที่มีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงจะส่งผลให้ค่าความร้อนสูงตาม

3.8.2.2 Elemental Analysis เป็นการวิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งในระดับโมเลกุลออกเป็นธาตุองค์ประกอบต่างๆ ดังนี้ คาร์บอน (Carbon) ออกซิเจน (Oxygen) ไฮโดรเจน (Hydrogen) ไนโตรเจน (Nitrogen) และ ซัลเฟอร์ (Sulfur) ซึ่งเชื้อเพลิงที่มีปริมาณคาร์บอนและไฮโดรเจนสูงจะส่งผลให้ค่าความร้อนสูงตาม ส่วนเชื้อเพลิงที่มีออกซิเจนสูงจะส่งผลให้ค่าความร้อนต่ำ

3.8.3 ค่าความร้อน (Heating Value) หมายถึง ปริมาณความร้อนที่ปล่อยออกมาจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงต่อหน่วยน้ำหนัก สามารถพิจารณาได้ 2 ลักษณะ ได้แก่

3.8.3.1 High Heating Value (HHV) หมายถึงค่าความร้อนที่พิจารณาว่าน้ำในเชื้อเพลิงอยู่ในรูปของของเหลว วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Bomb calorimeter ที่อุณหภูมิ 25 °C 1 atm

3.8.3.2 Low Heating Value (LHV) หมายถึง ค่าความร้อนที่พิจารณาว่าไอน้ำที่เกิดจากการเผาไหม้ไม่ได้ควบแน่นเป็นของเหลว จะมีค่าน้อยกว่า HHV สามารถคำนวณได้ถ้ารู้ค่าไฮโดรเจนจากสมการที่ 3.13

$$\text{LHV} = \text{HHV} - 23.96 (\% \text{ไฮโดรเจน} \times 9) \quad (\text{จูลต่อกรัม}) \quad (3.13)$$

3.8.4 โลหะหนัก (Heavy Metal) หมายถึง ปริมาณโลหะหนักที่พบในเชื้อเพลิง ถ้าเชื้อเพลิงที่ใช้ในกระบวนการเผาไหม้พบโลหะหนักในปริมาณสูงจะส่งต่อสุขภาพอนามัยและสิ่งแวดล้อมเนื่องจากควันหรือฝุ่นละอองที่ปล่อยออกจากปล่องและเถ้าที่เหลือจากการเผาไหม้มีการปนเปื้อนโลหะหนัก

3.8.5 คลอไรด์ (Chloride) หมายถึง ปริมาณคลอไรด์ที่พบในเชื้อเพลิง มักพบในเชื้อเพลิงที่มีพลาสติกประเภทโพลีไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl Chloride) เป็นองค์ประกอบ ถ้าเชื้อเพลิงที่ใช้ในกระบวนการเผาไหม้พบคลอไรด์ในปริมาณสูงจะส่งผลให้เกิดการกัดกร่อนในเตาเผาและถ้าเผาไหม้เชื้อเพลิงที่อุณหภูมิต่ำ (300-400 องศาเซลเซียส) หรือเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ทำให้เกิดสารประกอบในกลุ่มโพลีคลอริเนตเตทไดเบนโซพาราไดออกซิน (PCDDs) ซึ่งจะส่งต่อสุขภาพอนามัยและสิ่งแวดล้อม

### 3.9 เกณฑ์กำหนดสมบัติของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง

สมบัติของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้โดยทั่วไปจะขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีของเตาเผา ซึ่งการใช้เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งในประเทศไทยยังไม่เป็นที่แพร่หลายจึงยังไม่มีเกณฑ์กำหนดหลักที่ใช้เพียงแต่ระบุเป็นค่ากว้างๆเท่านั้น โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้เกณฑ์กำหนดจากแหล่งต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.3 และ 3.4

ตารางที่ 3.3 เกณฑ์กำหนดสมบัติด้านต่างๆของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งสำหรับใช้ในกระบวนการเผาไหม้

สมบัติ	หน่วย	เกณฑ์กำหนด					
		ASTM E-75 RDF-5 (Densified RDF)	มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนของถ่านอัดแท่ง (2547)	ส่วนต้นคว้าและพัฒนาพลังงาน (2544)	คุณภาพเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งในประเทศไทย	Kara และคณะ (2008)	คุณภาพเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งในประเทศไทย
สมบัติทางกายภาพ							
ความหนาแน่น (Density)	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร	ไม่น้อยกว่า 600	-	-	-	-	-
ค่ากำลังต้านทานแรงอัด (Compressive Strength)	เมกะปาสคาล	-	0.35	-	-	-	-
เส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter)	มิลลิเมตร	-	-	50-60	-	-	-
ความยาว (Length)	มิลลิเมตร	-	-	50-150	-	-	-

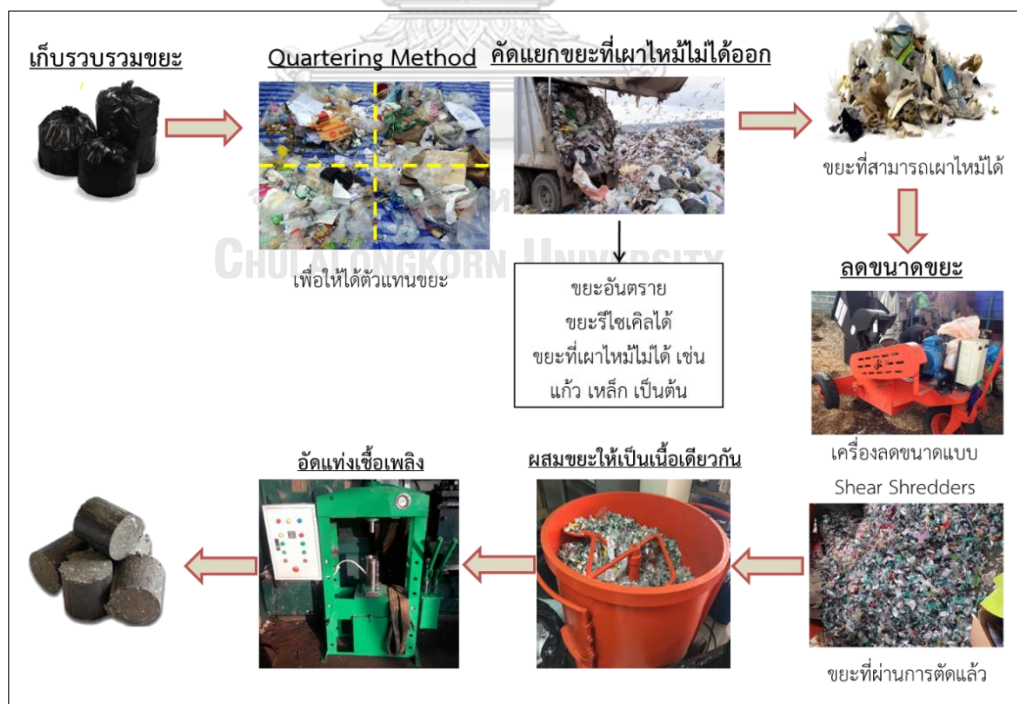
ตารางที่ 3.3 เกณฑ์กำหนดสมบัติด้านต่างๆของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งสำหรับใช้ในกระบวนการเผาไหม้ (ต่อ)

สมบัติ	หน่วย	เกณฑ์กำหนด					
		ASTM E-75 RDF-5 (Densified RDF)	มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนของถ่านอัดแท่ง (2547)	ส่วนคั้นค่าและพัฒนาพลังงาน (2544)	คุณภาพเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งในประเทศไทย	Kara และคณะ (2008)	คุณภาพเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งในประเทศไทย
สมบัติทางเคมี							
Proximate analysis							
• ความชื้น (Moisture)	ร้อยละโดยน้ำหนัก	-	-	-	7.0-8.0	20.0	<25.0
• เถ้า (Ash)	ร้อยละโดยน้ำหนัก	-	-	-	12.0	8.0-12.0	20.0
• สารระเหย (Volatile Matter)	ร้อยละโดยน้ำหนัก	-	-	-	68.0	50.0-80.0	-
• คาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon)	ร้อยละโดยน้ำหนัก	-	-	-	10.0	-	-
Elemental analysis							
• ไนโตรเจน (Nitrogen)	ร้อยละโดยน้ำหนัก	-	-	-	0.5-1.0	-	-
• ซัลเฟอร์ (Sulfur)	ร้อยละโดยน้ำหนัก	-	-	-	0.1-0.5	0.5	0.6
คลอไรด์ (Chloride)	ร้อยละโดยน้ำหนัก	-	-	-	0.3-1.2	1.0	0.9
ค่าความร้อน (Heating Value)	เมกะจูลต่อกิโลกรัม	-	-	-	18.7	-	15.0

ตารางที่ 3.4 เกณฑ์กำหนดปริมาณโลหะหนักในเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งสำหรับใช้ในกระบวนการเผาไหม้

โลหะหนัก (Heavy Metal)	เกณฑ์กำหนด		
	โรงงานปูนซีเมนต์ลำปาง (2554) (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	Paolo และคณะ (2015) (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	EURIT (2000) (Garces และคณะ, 2016) (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)
Cu	100,000	500	200
Zn	-	-	500
Mn	-	250	200
Ni	100,000	30	200
Co	-	18	200
Cr	100,000	100	200
Pb	100,000	240	200
Cd	100,000	4	10
Hg	100,000	-	2
As	100,000	5	10

### 3.10 ขั้นตอนการผลิตเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการผลิตเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง

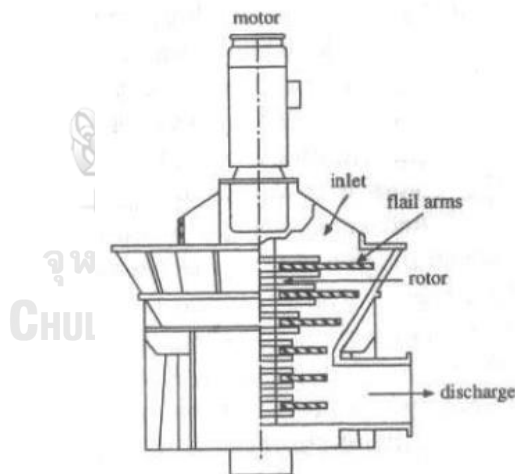


3.10.1 การรวบรวมขยะมูลฝอย เก็บรวบรวมขยะจากแหล่งต่างๆ จากนั้นทำการคัดแยกขยะที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้ (แก้ว เหล็ก อลูมิเนียม) ขยะอันตราย และขยะรีไซเคิลออก ในบางกรณีจะมีการใช้เครื่องคัดแยกแม่เหล็ก (Magnetic Separator) เพื่อคัดแยกมูลฝอยที่มีเหล็กเป็นส่วนประกอบ และใช้เครื่อง Eddy Current Separator เพื่อคัดแยกอลูมิเนียมออกจากมูลฝอย

3.10.2 การลดขนาดขยะเชื้อเพลิง เป็นขั้นตอนที่มีวัตถุประสงค์เพื่อลดปริมาตรและเป็นการเตรียมขยะให้มีประสิทธิภาพในการเผาไหม้ โดยเครื่องมือที่ใช้ในการลดขนาดขยะมีดังต่อไปนี้

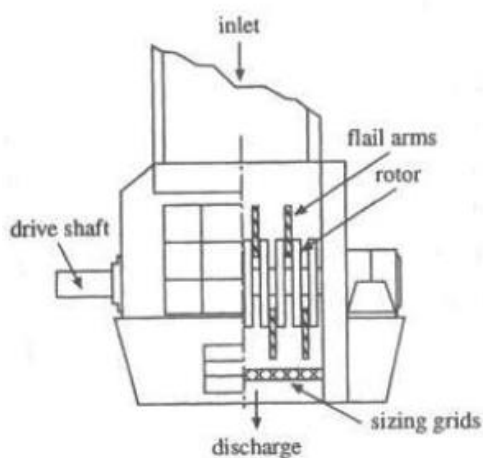
- 1) Hammer Mills เป็นเครื่องลดขนาดขยะที่สามารถออกแบบให้มีการหมุนทั้งชนิดที่มีใบตีอยู่ในแนวนอน (Horizontal-Shaft) และแนวตั้ง (Vertical-Shaft) เหมาะสำหรับขยะที่มีความแข็ง เช่น เศษกิ่งไม้ เปลือกและเมล็ดผลไม้

ข้อดีของใบตีแนวตั้ง คือ สามารถใส่วัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำได้โดยไม่ทำให้เกิดการไหลย้อนเนื่องจากการหมุนของใบพัดด้วยความเร็วรอบที่สูง (800-1200 rpm) จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอากาศอย่างรุนแรง อากาศจะถูกดูดเข้าทางด้านในใส่วัสดุ (Inlet) ไหลผ่านตัวเครื่องแล้วไหลออกทางด้านออก (Discharge) ของวัสดุ ดังแสดงในรูปที่ 3.5



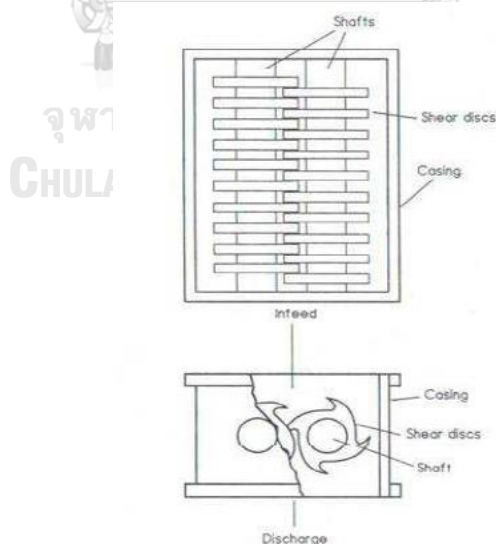
รูปที่ 3.5 เครื่องลดขนาดแบบ Hammer Mills ชนิดใบตีแนวตั้ง  
(กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2551)

ข้อดีของใบตีแนวนอน เนื่องจากการใส่วัสดุด้านบนและออกทางด้านล่างทำให้ใบตีแนวนอนนั้นมีความสะดวกในการใช้งาน และจากการที่มีตะแกรงรองรับอยู่ทางด้านออกของวัสดุ ทำให้ผู้ใช้สามารถเลือกความละเอียดที่ต้องการได้และควรใส่วัสดุเป็นครั้งๆ (Batch) เพื่อเพิ่มเวลาที่วัสดุจะถูกย่อยในเครื่อง ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 เครื่องลดขนาดแบบ Hammer Mills ชนิดใบตีแนวนอน  
(กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2551)

- 2) Shear Shredders ลักษณะการทำงานเหมือนการตัดด้วยกรรไกร โดยมีใบมีดตัดหรือฉีก เหมาะสำหรับขยะที่มีความเหนียว เช่น ถุงพลาสติก กล่องนม เชือก เป็นต้น เครื่องตัด Shear Shredders มักมีปัญหาในการฉีกขยะที่บาง ซึ่งขยะอาจจะหลุดเข้าไปในช่องว่างระหว่างใบมีดได้ ดังนั้นใบมีดต้องมีความคมและต้องตั้งระยะห่างของใบมีดให้เหมาะสม ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 เครื่องลดขนาดแบบ Shear Shredders  
(กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2551)

3.10.3 การกวนผสมขยะ เป็นขั้นตอนการผสมขยะให้เป็นเนื้อเดียวกัน มีองค์ประกอบทางกายภาพและเคมีสม่ำเสมอตามอัตราส่วนที่กำหนด

3.10.4 การอัดแท่งเชื้อเพลิง เป็นขั้นตอนการเพิ่มความหนาแน่นของขยะ ซึ่งความหนาแน่นและขนาดของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งจะขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์การนำไปใช้ เช่น ใช้ในการเก็บรวบรวมและขนย้ายเพื่อลดปริมาตร ลดจำนวนรอบของการขนย้าย ประหยัดพื้นที่ในการจัดเก็บ หรือเพื่อนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการเผาไหม้

#### 3.10.4.1 ประเภทการอัดเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง

การอัดเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่นิยมใช้ในปัจจุบันทำได้ 3 วิธี (สุพัฒตรา ส่งเสริม, 2554)

1) การอัดแท่งเชื้อเพลิงแบบใช้ความร้อน (อัดร้อน) เป็นการอัดที่ใช้แรงอัดและอุณหภูมิสูง มีการให้ความร้อนแก่กระบอกอัด วัสดุที่นิยมใช้กับการอัดร้อน ได้แก่ ชีวมวล เนื่องจากความร้อนขณะอัดจะหลอมละลายสารประกอบพวกเซลลูโลสและลิกนินออกมาซึ่งเป็นตัวประสานให้วัสดุที่นำมาอัดเกาะตัวกันเป็นแท่งได้ดี หรือนิยมใช้กับวัสดุที่ถูกความร้อนแล้วเกิดการหลอมละลาย เช่น พลาสติก เป็นต้น ทั้งนี้อุณหภูมิจึงเป็นส่วนสำคัญในการอัดแท่งเชื้อเพลิง ต้องมีอุณหภูมิที่เหมาะสมซึ่งก็ขึ้นอยู่กับวัสดุที่นำมาอัด และต้องมีการลดความชื้นไม่ให้เกินร้อยละ 5 และบดให้มีขนาดเล็กก่อน จึงนำมาเข้าเครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิง

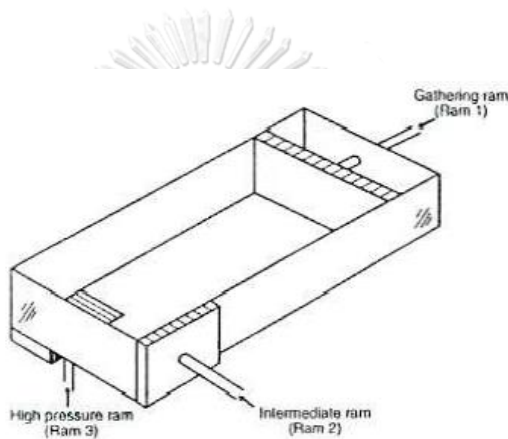
2) การอัดแท่งเชื้อเพลิงแบบไม่ใช้ความร้อน (อัดเย็น) เป็นการอัดที่ใช้อุณหภูมิต่ำ โดยอาศัยความเหนียวของยางหรือเส้นใยในวัสดุที่นำมาอัดเป็นตัวประสานให้เกาะตัวกันเป็นแท่ง ต้องบดวัสดุให้มีขนาดเล็กก่อนแล้วจึงนำเข้าสู่เครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิง หลังจากนั้นต้องทำการลดความชื้นด้วยการนำไปตากแดดหรืออบก่อนนำไปใช้งาน การอัดเย็นสามารถทำได้ 2 แบบ คือ แบบใช้ตัวประสานและไม่ใช้ตัวประสาน ดังนี้

- การอัดเย็นแบบใช้ตัวประสาน เหมาะสำหรับการอัดวัสดุที่ไม่มีเส้นใยหรือยางเหนียว จึงต้องเติมตัวประสานเข้าไปเพื่อช่วยให้วัสดุที่นำมาอัดเกาะกันเป็นแท่งได้
- การอัดเย็นแบบไม่ใช้ตัวประสาน เหมาะสำหรับการอัดแท่งชีวมวลที่มียางเหนียว เช่น เพคติน เจลาติน และลิกนิน โดยจะทำการตำหรือสับชีวมวลจนเกิดเป็นยางเหนียวๆ ทำให้เกาะกันเป็นแท่งได้ หรือชีวมวลที่เนาเปื่อยผ่านการหมักแล้ว เนื่องจากการหมักทำให้เกิดเส้นใยและสร้างสารที่เป็นยางเหนียว โดยปริมาณความชื้นที่เหมาะสมสำหรับการหมักอยู่ที่ร้อยละ 50-60 อย่างไรก็ตามการหมักชีวมวลจะทำได้ความสามารถการติดไฟของเชื้อเพลิงลดลงจึงมีค่าความร้อนต่ำ

3) การอัดแบบเอ็กซ์ทรูชัน (Extrusion) หรือการอัดผ่านเกลียว โดยใช้เครื่องที่เรียกว่า เอ็กซ์ทรูเดอร์ หลักการทำงานคือวัสดุที่ป้อนเข้าสู่เครื่องจะถูกลำเลียงผ่านสกรูลำเลียงตามแนวยาว ในระหว่างการลำเลียงจะมีการให้ความร้อนและกวนผสมวัสดุให้เป็นเนื้อเดียวกัน เมื่อวัสดุผ่านเข้าไปยังเกลียวอัดจึงได้เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งออกมา

3.10.4.2 เครื่องอัดแน่น (Densifier) ที่นิยมใช้ในปัจจุบันมีดังต่อไปนี้

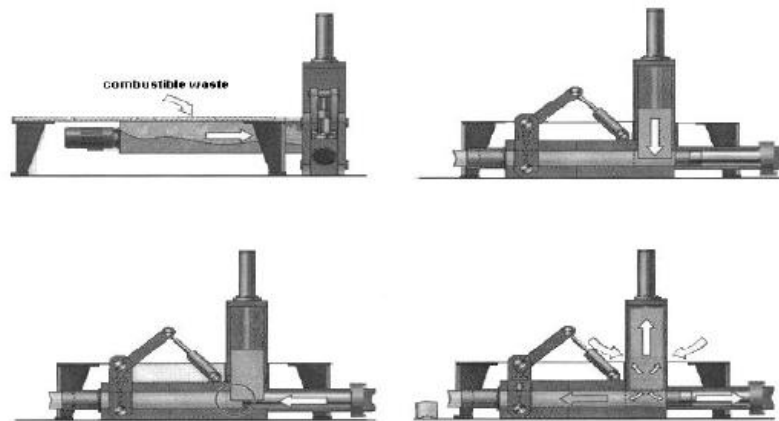
1) Baling Equipment เป็นเครื่องอัดแน่นขยะให้เป็นก้อนขนาดใหญ่ เพื่อนำไปใช้กับหลุมฝังกลบขยะประเภท Bafefill Landfill แท่งขยะที่อัดเป็นก้อนนี้สะดวกต่อการขนย้ายและประหยัดในการขนส่งเนื่องจากมีความหนาแน่นทั้งก้อนสูง ดังแสดงในรูปที่ 3.8



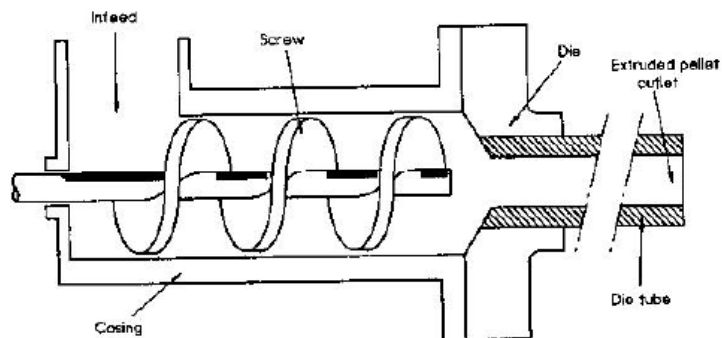
รูปที่ 3.8 ตัวอย่างการทำงานของเครื่องอัดแน่นแบบ Baling Equipment

(กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2551)

2) Extruder Equipment เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่ได้จะเป็นแท่งรูปทรงกระบอกหรือรูปเหลี่ยม กำหนดความยาวได้ โดยทั่วไปจะยาวประมาณ 50-100 เซนติเมตร เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่ผลิตได้มีรูปร่างใกล้เคียงกับไม้ฟืนซึ่งมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในระบบเตาเผาที่ใช้ไม้ฟืนได้ เครื่องอัดแน่นนี้มีทั้งแบบ Hydraulic และแบบ Screw ดังแสดงในรูปที่ 3.9-3.10

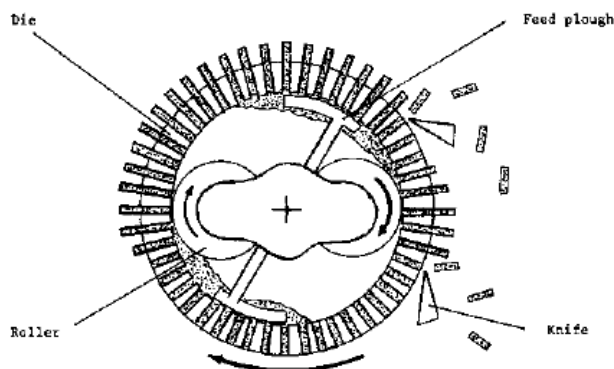


รูปที่ 3.9 ตัวอย่างการทำงานของเครื่องอัดแน่นแบบ Hydraulic  
(กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2551)



รูปที่ 3.10 ตัวอย่างการทำงานของเครื่องอัดแน่นแบบ Screw  
(กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2551)

3) Cubing and Pelleting Equipment เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่ได้จะมีลักษณะเป็นก้อน สำหรับเป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการเผาไหม้ แก๊สซิฟิเคชันหรือไพโรไลซิส ซึ่งรูปแบบหรือขนาดของก้อนเชื้อเพลิงจะผลิตตามความต้องการของเตาปฏิกรณ์หรือเตาเผา โดยปกติจะเป็นก้อนขนาดเล็กประมาณ 1-2 นิ้ว ดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 ตัวอย่างการทำงานของเครื่องอัดแน่นแบบ Pellet  
(กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2551)

3.10.5 การทำให้แห้ง เป็นขั้นตอนทำให้เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่ได้มีความชื้นต่ำ ป้องกันการเกิดเชื้อรา มีสมบัติที่ดี เหมาะสมในการเก็บรวบรวมและการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง จึงควรมีการลดความชื้นหลังจากการอัดแน่นแล้ว ซึ่งวิธีการที่สะดวกและประหยัดก็คือ การตากแดดโดยตรง หรืออาจใช้ฮีตเตอร์ ที่กระบอกทางออกของเครื่องอัดแน่น นอกจากนี้ก็มีวิธีการทำให้แห้งอีกหลายวิธี เช่น อบในตู้แสงอาทิตย์ หรืออบด้วยความร้อนที่เหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น

3.10.6 การเก็บรักษา หลังจากผ่านขั้นตอนทำให้แห้งเรียบร้อยแล้วควรมีการตัดเป็นแท่งเพื่อให้ดูสวยงามและสะดวกในการบรรจุหีบห่อ การเก็บรักษานั้นควรเก็บไว้ในที่แห้งเพื่อป้องกันการเกิดเชื้อรา การใส่ถุงพลาสติกแล้วปิดปากถุงจะช่วยให้ดีมาก

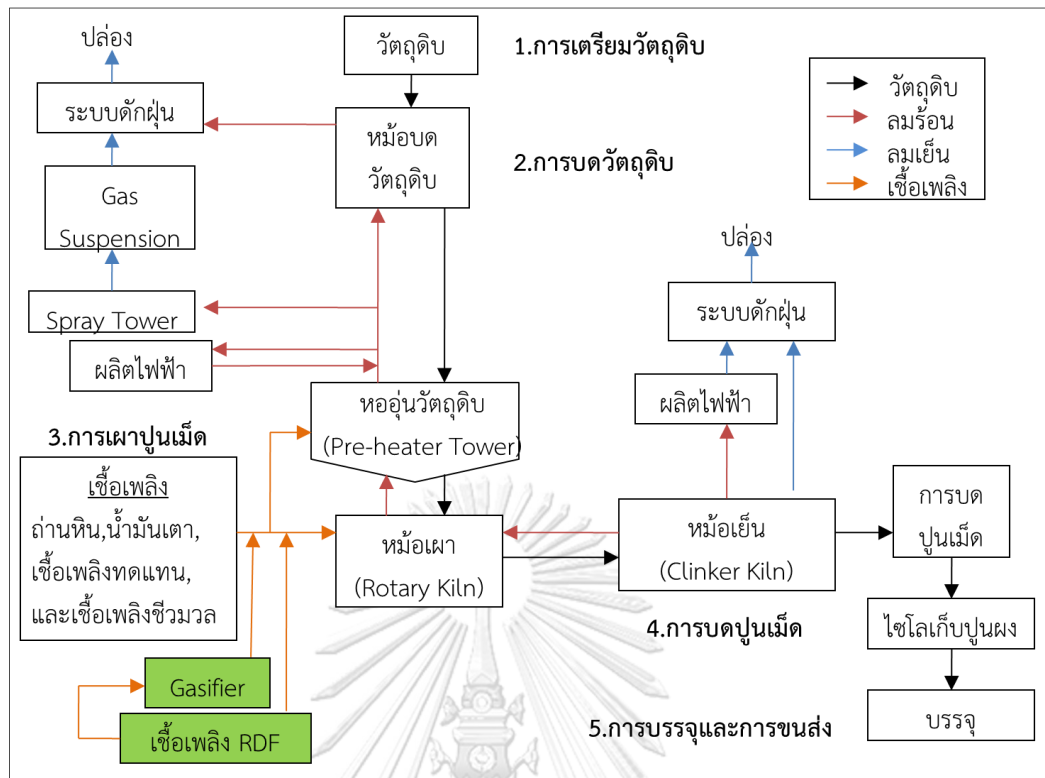
### 3.11 การใช้ประโยชน์จากเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง

การใช้ประโยชน์จากเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งสามารถใช้ได้ทั้งในรูปของการผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้าหรือความร้อน โดยที่อาจมีการนำไปใช้ประโยชน์ในสถานที่ผลิตเองหรือขนส่งไปใช้ในที่อื่นได้ นอกจากนี้ยังสามารถใช้เผาพร้อมกับถ่านหิน (Co-Firing) เพื่อลดปริมาณการใช้ถ่านหินลงในอุตสาหกรรมบางประเภท เช่น อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ การผลิตไฟฟ้า หรืออุตสาหกรรมที่ใช้หม้อไอน้ำ เป็นต้น โดยรูปแบบเตาเผาที่ใช้เปลี่ยนเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งให้เป็นพลังงานความร้อน ได้แก่ เตาเผาแบบตะกรับ (Stoker) เตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized Bed Combustor) เตาเผาแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) หรือไพโรไลซิส (Pyrolysis) การใช้เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบหลักๆ คือ

- 1) ใช้เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งเป็นเชื้อเพลิงโดยตรงหรือเผาพร้อมกับถ่านหิน โดยการใช้อัดแท่งเชื้อเพลิงเพื่อทดแทนการใช้อัดแท่งเชื้อเพลิงฟอสซิลโดยตรงนั้น จำเป็นต้องคำนึงถึงสมบัติของเชื้อเพลิงซึ่งจะมีผลต่อกระบวนการผลิต ดังนั้นควรมีการควบคุมปริมาณความชื้นโดยปกติไม่ควรเกิน 30% ปริมาณขยะพลาสติกจะต้องไม่มากเกินไป ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไหม้ด้วย จึงควรมีการตรวจสอบองค์ประกอบให้แน่ใจเพื่อไม่ให้ส่งผลกระทบต่อตัวเตาและทำให้เกิดมลพิษทางอากาศ นอกจากนี้ขนาดของเชื้อเพลิงก็มีส่วนสำคัญเนื่องจากเป็นตัวควบคุมระยะเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้ ซึ่งสมบัติของเชื้อเพลิงจะมีค่าต่างกันไปขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีที่ใช้ของเตาเผา
- 2) เปลี่ยนสภาพเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งให้อยู่ในรูปก๊าซเชื้อเพลิงโดยผ่านกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันเป็นการเผาที่อุณหภูมิสูง จึงสามารถใช้กับเชื้อเพลิงได้หลากหลายชนิด ทั้งที่เป็นพลาสติกหรือชีวมวลที่มีความชื้นโดยส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในระดับต่ำ นอกจากนี้ยังลดปัญหาเรื่องเถ้าและสารปนเปื้อนให้มีอยู่ในก๊าซเชื้อเพลิงน้อยลงได้

ตัวอย่างการใช้ประโยชน์จากเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งในกระบวนการผลิตของโรงงานปูนซีเมนต์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์เป็นอุตสาหกรรมที่มีความต้องการใช้พลังงานค่อนข้างสูงและสามารถแก้ปัญหามลพิษที่อยู่ในก๊าซและเถ้าจากกระบวนการเผาไหม้ได้ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2551) เนื่องจากใช้อุณหภูมิในการเผาไหม้สูงประกอบกับมีระบบบำบัดอากาศรองรับ โดยเชื้อเพลิงหลักที่ใช้ในกระบวนการเผาไหม้ของโรงงานปูนซีเมนต์ ได้แก่ ถ่านหิน ชีวมวล วัสดุที่ไม่ใช่แล้ว และมีการใช้น้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิงสำหรับให้ความร้อนแก่เตาเผาในช่วงเริ่มต้นและอุ่นเตาเผา ดังแสดงในรูปที่ 3.12

ดังนั้นอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์สามารถรองรับเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งได้ดี เนื่องจากใช้อุณหภูมิในการเผาไหม้สูงจึงสามารถแก้ปัญหาก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้ได้ ประกอบกับเตาเผาที่มีระบบบำบัดอากาศรองรับและเถ้าที่เหลือจากการเผาไหม้สามารถนำไปผสมในการผลิตปูนซีเมนต์ได้ จึงไม่มีปัญหาในเรื่องการกำจัดเถ้า หากนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอื่นก็ควรเป็นเตาเผาที่มีระบบป้องกันมลพิษอย่างดีเพื่อป้องกันการเกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม



รูปที่ 3.12 การนำเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งมาใช้ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ของโรงงานปูนซีเมนต์ (ทรงวุฒิ ศรีสว่าง, 2559)

### 3.12 มลพิษและแนวทางการลดและควบคุมมลพิษ

#### 3.12.1 ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และสารไฮโดรคาร์บอนที่เผาไหม้ไม่หมด

สาเหตุหลักมาจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์เนื่องจากเชื้อเพลิงมีความชื้นมากเกินไปทำให้อุณหภูมิที่ใช้เผาไหม้ต่ำ

แนวทางในการลดมลพิษ

- 1) การลดความชื้นของเชื้อเพลิงให้มากที่สุดก่อนเข้าสู่กระบวนการเผาไหม้
- 2) ใช้ขนาดของเชื้อเพลิงที่เหมาะสมกับเตาเผาเพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์

#### 3.12.2 ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์

ออกไซด์ทั้งหมดของไนโตรเจนมีเพียง 2 ชนิดเท่านั้น คือ ก๊าซไนโตรเจนมอนอกไซด์ (NO) และ ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO<sub>2</sub>) ซึ่งสาเหตุหลักเกิดจากการกระบวนการเผาไหม้ที่ตัวเชื้อเพลิงมีองค์ประกอบของไนโตรเจนหรือกระบวนการเผาไหม้ที่แรงดันสูง เช่น การเผาไหม้น้ำมันเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์หรือเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรม ก๊าซไนโตรเจนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นสามารถ



เกิดปฏิกิริยากับก๊าซออกซิเจน ( $O_2$ ) หรือก๊าซโอโซน ( $O_3$ ) ไปเป็นก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ ซึ่งรวมกับ ละอองน้ำในอากาศหรือน้ำฝนไปเป็นกรดไนตริก ( $HNO_3$ ) ซึ่งเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้น้ำฝนมีสมบัติ เป็นกรด จึงก่อให้เกิดมลภาวะกับสิ่งแวดล้อม ดินเปรี้ยว แหล่งน้ำมีสภาพเป็นกรด วัสดุและสิ่งก่อสร้าง สึกกร่อนเร็วขึ้น

แนวทางในการลดมลพิษ

- 1) การควบคุมปริมาณอากาศให้เกินพอ
- 2) การนำก๊าซร้อนที่เหลือจากกระบวนการเผาไหม้กลับมาใช้ในระบบ Flue Gas Recirculation

### 3.12.3 ซัลเฟอร์ไดออกไซด์

สาเหตุหลักเกิดจากการกระบวนการเผาไหม้ที่ตัวเชื้อเพลิงมีองค์ประกอบของซัลเฟอร์ ถ้า อากาศชั้นมากก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $SO_2$ ) อาจรวมกับน้ำซึ่งทำให้เกิดเป็นกรดกำมะถัน ( $H_2SO_4$ ) ได้ ถ้ากรดกำมะถันที่รวมกับน้ำกลายเป็นฝนและตกลงมาบนพื้นดินก็จะกลายเป็นฝนกรด ดินเปรี้ยว แหล่งน้ำมีสภาพเป็นกรด วัสดุและสิ่งก่อสร้างสึกกร่อนเร็วขึ้น

แนวทางในการลดมลพิษ

- 1) เติมน้ำเพื่อจับซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $SO_2$ ) ในระบบเผาไหม้แบบฟลูอิดไธด์เบด
- 2) การกำจัดซัลเฟอร์ไดออกไซด์จากก๊าซเผาไหม้ทิ้ง (Flue Gas) โดยใช้กระบวนการ Flue Gas Desulfurization หรือ FGD

### 3.13 มาตรฐานควบคุมการปล่อยทิ้งอากาศเสีย

3.13.1 มาตรฐานอากาศเสียที่ระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรม ดังแสดงในตารางที่ 3.5 ตารางที่ 3.5 มาตรฐานอากาศเสียที่ระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรม

แหล่งที่มาของสาร	มาตรฐานควบคุมการปล่อยทิ้งอากาศเสีย		
	ฝุ่นละออง (มีลิกิริ้มต่อ ลูกบาศก์เมตร)	ก๊าซซัลเฟอร์ ไดออกไซด์ (หนึ่งในล้านส่วน)	ก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน ซึ่งคำนวณผลในรูปของก๊าซ ไนโตรเจนออกไซด์ (หนึ่งในล้านส่วน)
1. หม้อไอน้ำหรือแหล่งกำเนิดที่ใช้ เชื้อเพลิง ดังนี้ <ul style="list-style-type: none"> <li>● น้ำมันเตา</li> <li>● ถ่านหิน</li> <li>● ชีวมวล</li> <li>● เชื้อเพลิงอื่นๆ</li> </ul>	ไม่เกิน 240	ไม่เกิน 950	ไม่เกิน 200
2. การถลุง หล่อหลอม รีดตีง และ/หรืออลูมิเนียม	ไม่เกิน 240	ไม่เกิน 700	ไม่เกิน 400
3. การผลิตทั่วไป	ไม่เกิน 320	ไม่เกิน 60	ไม่เกิน 200

ที่มา : กระทรวงอุตสาหกรรม, 2549

หมายเหตุ ให้คำนวณผลที่ความดัน 1 บรรยากาศ หรือ 760 มิลลิเมตรปรอท อุณหภูมิ 25 องศา  
เซลเซียส ที่สภาวะแห้ง (Dry Basis) โดยมีปริมาตรอากาศเสียที่ออกซิเจนร้อยละ 7

3.13.2 มาตรฐานควบคุมการปล่อยทิ้งอากาศเสียจากโรงไฟฟ้าใหม่ ดังแสดงในตารางที่ 3.6  
 ตารางที่ 3.6 มาตรฐานควบคุมการปล่อยทิ้งอากาศเสียจากโรงไฟฟ้าใหม่

ชนิดของเชื้อเพลิง	มาตรฐานควบคุมการปล่อยทิ้งอากาศเสีย		
	ฝุ่นละออง (มิลลิกรัมต่อ ลูกบาศก์เมตร)	ก๊าซซัลเฟอร์ ไดออกไซด์ (หนึ่งในล้านส่วน)	ก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน ซึ่งคำนวณผลในรูปของก๊าซ ไนโตรเจนออกไซด์ (หนึ่งในล้านส่วน)
1. โรงไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง			
• ที่มีกำลังการผลิตไฟฟ้าไม่เกิน 50 เมกะวัตต์	ไม่เกิน 80	ไม่เกิน 360	ไม่เกิน 200
• ที่มีกำลังการผลิตไฟฟ้าเกิน 50 เมกะวัตต์	ไม่เกิน 80	ไม่เกิน 180	ไม่เกิน 200
2. โรงไฟฟ้าที่ใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิง	ไม่เกิน 120	ไม่เกิน 260	ไม่เกิน 180
3. โรงไฟฟ้าที่ใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง	ไม่เกิน 60	ไม่เกิน 20	ไม่เกิน 120
4. โรงไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงชีวมวลเป็นเชื้อเพลิง	ไม่เกิน 120	ไม่เกิน 60	ไม่เกิน 200

ที่มา : กระทรวงอุตสาหกรรม, 2553

- หมายเหตุ 1. มาตรฐานนี้มีผลบังคับใช้กับโรงไฟฟ้าที่ได้รับอนุญาตประกอบกิจการโรงงาน หรือใบอนุญาตขยายโรงงานตั้งแต่วันที่ 15 มกราคม 2553
2. การคำนวณค่าอากาศเสียแต่ละชนิดที่ปล่อยทิ้งจากปล่องโรงไฟฟ้า ให้คำนวณผลที่ความดัน 1 บรรยากาศหรือที่ 760 มิลลิเมตรปรอท อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ที่สภาวะแห้ง (Dry Basis) โดยมีปริมาตรอากาศส่วนเกินในการเผาไหม้ (Excess Air) ร้อยละ 50 หรือที่ปริมาตรออกซิเจนส่วนเกิน (Excess Oxygen) ในการเผาไหม้ร้อยละ 7

3.13.3 มาตรฐานควบคุมการปล่อยทิ้งอากาศเสียจากโรงงานปูนซีเมนต์ดังแสดงในตารางที่ 3.7  
 ตารางที่ 3.7 มาตรฐานควบคุมการปล่อยทิ้งอากาศเสียจากโรงงานปูนซีเมนต์

ประเภทของ โรงงานปูนซีเมนต์	มาตรฐานควบคุมการปล่อยทิ้งอากาศเสีย		
	ฝุ่นละออง (มีลิกิริ้มต่อ ลูกบาศก์เมตร)	ก๊าซซัลเฟอร์ ไดออกไซด์ (หนึ่งในล้านส่วน)	ก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน ซึ่งคำนวณผลในรูปของก๊าซ ไนโตรเจนออกไซด์ (หนึ่งในล้านส่วน)
โรงงานปูนซีเมนต์เก่าที่ปล่อยทิ้งอากาศ เสียออกสู่สิ่งแวดล้อม ณ บริเวณ ดังต่อไปนี้ <ul style="list-style-type: none"> <li>● หม้อเผาปูนซีเมนต์ทั่วไป</li> <li>● หม้อเผาปูนซีเมนต์ขาว</li> <li>● หม้อเย็น หม้อบดปูนและหม้อ บดถ่านหิน</li> </ul>	ไม่เกิน 300	ไม่เกิน 50	ไม่เกิน 600
โรงงานปูนซีเมนต์เก่าที่ปล่อยทิ้งอากาศ เสียออกสู่สิ่งแวดล้อม ณ บริเวณ ดังต่อไปนี้ <ul style="list-style-type: none"> <li>● หม้อเผาปูนซีเมนต์ทั่วไป</li> <li>● หม้อเผาปูนซีเมนต์ขาว</li> <li>● หม้อเย็น หม้อบดปูนและหม้อ บดถ่านหิน</li> </ul>	ไม่เกิน 120	ไม่เกิน 50	ไม่เกิน 500

ที่มา : กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2547

- หมายเหตุ
1. โรงงานปูนซีเมนต์เก่า หมายความว่า โรงงานปูนซีเมนต์ที่ได้ยื่นขอรับหรือได้รับใบอนุญาตประกอบกิจการโรงงาน หรือใบอนุญาตขยายโรงงานตามกฎหมายว่าด้วยโรงงานก่อนวันที่ประกาศนี้มีผลใช้บังคับ
  2. โรงงานปูนซีเมนต์ใหม่ หมายความว่า โรงงานปูนซีเมนต์ที่ได้ยื่นขอรับหรือได้รับใบอนุญาตประกอบกิจการโรงงาน หรือใบอนุญาตขยายโรงงานตามกฎหมายว่าด้วยโรงงานตั้งแต่วันที่ถัดจากวันที่ประกาศนี้ประกาศในราชกิจจานุเบกษา
  3. ให้คำนวณความเข้มข้นสารมลพิษทางอากาศเทียบที่สภาวะอ้างอิง (Reference Condition) อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความดัน 760 มิลลิเมตรปรอท หรือ ความดัน 1 บรรยากาศ ที่สภาวะแห้ง (Dry Basis) ปริมาตรอากาศส่วนเกินในการเผาไหม้ (Excess Air)

ร้อยละ 50 หรือที่ออกซิเจนร้อยละ 7 เว้นแต่การตรวจวัดอากาศเสียที่ปล่อยทิ้งจากหม้อเย็น หม้ออบปูนและหม้ออบถ่านหินให้ใช้ค่าออกซิเจนตามสภาวะจริงในขณะตรวจวัด

### 3.14 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

นพพร สุตใจธรรม (2546) ได้ทำการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากกากกาแฟโดยใช้เครื่องอัดเย็น และมีตัวประสานที่ใช้ในการวิจัย 3 ชนิด ได้แก่ ผักตบชวาหมัก เศษมันสำปะหลัง และแป้งเปียก จากผลการทดลองพบว่ากากกาแฟมีค่าความร้อน 25.28 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งมีค่าสูงกว่าฟืน 18.57 เมกะจูลต่อกิโลกรัม เมื่อมีการใช้ตัวประสานพบว่าเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ได้มีค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้น แต่มีค่าความร้อนลดลงอยู่ที่ 19.68-23.87 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวประสาน

Boerigter และ Rauch (2005) กล่าวว่าองค์ประกอบของก๊าซที่เกิดขึ้นในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันจะขึ้นกับอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาและชนิดของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน การผลิตก๊าซเชื้อเพลิงที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1000 องศาเซลเซียส (Product gas) จะเกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนประมาณร้อยละ 50 ส่วนที่เหลือจะเป็นก๊าซมีเทน เบนซีน โทลูอิน ทาร์ และอื่นๆ ขณะที่การผลิตก๊าซเชื้อเพลิงที่อุณหภูมิสูงกว่า 1200 องศาเซลเซียส (Biosyngas) จะเกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และก๊าซไฮโดรเจน

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (2551) ได้ทำการศึกษาวิจัยและพัฒนากาผลิตเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง (RDF)

1) ในการอัดแท่งขยะอินทรีย์ที่ส่วนผสมได้แก่ ผลลูกตาล : ไม้ : กาบมะพร้าว ในสัดส่วน 7:3:1 ตามลำดับ ทำการทดลองด้วยเครื่องอัดแน่นแบบไฮดรอลิก โดยใช้ความร้อนในการอัดขยะแทนการใช้ตัวประสาน พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อความหนาแน่นในการอัดแท่งมากที่สุดคืออุณหภูมิ รองมาได้แก่ระยะเวลาในการอัด โดยที่ความดันของแรงอัดที่เปลี่ยนแปลงมีผลไม่มากนัก ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้ในการอัดต้องไม่น้อยกว่า 60 องศาเซลเซียส เมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่ 80 และ 100 องศาเซลเซียส เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่ได้จับตัวเป็นแท่งดีขึ้นเล็กน้อย แต่ที่อุณหภูมิ 228 องศาเซลเซียส เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่ได้มีการจับตัวเป็นแท่งได้ดีมากโดยใช้ระยะเวลาในการอัด 1 นาทีก็เพียงพอ

2) ในการอัดแท่งขยะอินทรีย์และพลาสติก (HDPE และ LDPE) ทำการทดลองด้วยเครื่องอัดแน่นแบบ Screw โดยใช้ความร้อนในการอัดขยะแทนการใช้ตัวประสาน พบว่าสัดส่วนที่ปริมาณพลาสติกสูงประกอบด้วยอุณหภูมิในการอัดสูง ส่งผลให้เชื้อเพลิงอัดแท่งที่ได้มีความหนาแน่นสูง

เนื่องจากพลาสติกละลายเข้าไประหว่างช่องว่างของเส้นใยขยะอินทรีย์จึงช่วยในการยึดเกาะกันได้ดีขึ้น โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมและประหยัดพลังงานอยู่ที่ 160 องศาเซลเซียสเพียงพอที่จะจับกันเป็นแท่งได้ แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการอัดขึ้นที่ 185 และ 285 องศาเซลเซียส พบว่าแท่งเชื้อเพลิงมีความหนาแน่นลดลง เนื่องจากพลาสติกได้รับความร้อนมากเกินไป เกินจุดที่จะประสานได้

Chiemchaisri และคณะ (2010) ได้นำขยะพลาสติกจากพื้นที่กำจัดขยะและรวมมันสำปะหลัง มาผลิตเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง พบว่าที่สัดส่วนพลาสติกต่อรวมมันสำปะหลัง 1:0.8 ตามลำดับ ให้ค่าความร้อนสูงที่สุดคือ 26 เมกะจูลต่อกิโลกรัม และนำไปทดสอบการเผาไหม้โดยใช้เตาเผาแก๊สซีไฟเออร์แบบไหลลง ปรับอัตราจ่ายอากาศ 50 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง พบว่าเกิดก๊าซคาร์บอนมอนออกไซด์ร้อยละ 10.77 ก๊าซมีเทนร้อยละ 1.38 ก๊าซไฮโดรเจนร้อยละ 0.07 ให้ค่าความร้อนก๊าซเชื้อเพลิง 1.76 เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร อุณหภูมิเฉลี่ยในการเผาไหม้คือ 604 องศาเซลเซียส

Komilis และคณะ (2012) ได้ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุและค่าความร้อนของขยะชุมชนพบว่ามีความต่างดังแสดงในตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.8 องค์ประกอบธาตุและค่าความร้อนของขยะชุมชน

วัสดุ	ความชื้น (ร้อยละ โดย น้ำหนัก)	คาร์บอน (ร้อยละโดย น้ำหนักแห้ง)	ไฮโดรเจน (ร้อยละโดย น้ำหนักแห้ง)	ออกซิเจน (ร้อยละโดย น้ำหนักแห้ง)	ไนโตรเจน (ร้อยละโดย น้ำหนักแห้ง)	ซัลเฟอร์ (ร้อยละโดย น้ำหนักแห้ง)	ค่าความร้อน (กิโลแคลอรีต่อ กิโลกรัม)
● กระดาษ							
กระดาษลัง	4.3	36.9 ± 2.3	5.41 ± 2.2	41.1 ± 0.8	0.17 ± 2	nd	4188 ± 1.1
กระดาษทิชชู	5.0	41.8 ± 4.6	6.31 ± 4.0	47.8 ± 2.1	0.083 ± 40	nd	3805 ± 0.67
กระดาษหนังสือพิมพ์	7.5	43.7 ± 3.0	6.43 ± 4.5	39.3 ± 6.1	0.16 ± 31	nd	4029 ± 0.82
กระดาษบรรจุภัณฑ์ สำหรับใส่อาหาร	6.0	42.2 ± 2.8	6.61 ± 5.0	47.7 ± 2.2	0.073 ± 29	nd	3882 ± 1.8
กระดาษสำนักงาน	5.5	35.5 ± 3.7	5.67 ± 1.5	44.0 ± 2.0	0.089 ± 29	nd	3022 ± 4.0
● พลาสติก							
โพลีเอทิลีนเทรฟทาเลต	0.23	61.4 ± 2.4	4.32 ± 3.1	32.7 ± 0.4	0.052 ± 47	0.17 ± 31	5461 ± 1.0
โพลีเอทิลีนความหนาแน่น สูง	0.21	82.4 ± 3.6	15.2 ± 6.2	0.3 ± 8.6	0.063 ± 49	nd	11750 ± 0.11
โพลีเอทิลีนความหนาแน่น ต่ำ	0.54	87.3 ± 4.6	15.2 ± 7.1	0.2 ± 12.4	0.060 ± 46	nd	11210 ± 0.79
โพลีโพรพิลีน	0.30	79.1 ± 3.7	14.4 ± 11	1.7 ± 15	0.42 ± 60	0.15 ± 25	11800 ± 1.2
โพลีสไตรีน	0.57	93.5 ± 4.5	8.49 ± 7.0	0.2 ± 32	0.06 ± 46	nd	10,060 ± 1.2
พลาสติกอื่นๆ	0.80	85.0 ± 4.4	15.0 ± 8.3	1.2 ± 4.7	0.064 ± 44	nd	10,950 ± 0.22

Othman และคณะ (2013) ได้ทำการศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง เตรียมจากขยะพลาสติกและกระดาษที่สัดส่วน 1:1 ตามลำดับ โดยใช้ใบไม้แห้งเป็นตัวประสาน ทำการอัดแท่งเชื้อเพลิงที่แรงดัน 150 บาร์ แท่งเชื้อเพลิงหนัก 500 กรัม พบว่าที่สัดส่วนขยะและตัวประสาน 3:1.5 ตามลำดับ ให้ค่าความร้อนสูงสุดที่ 25.9 เมกะจูลต่อกิโลกรัม

สุธินี หิรัญประเสริฐศรี และสุเทพ บุตรดี (2557) ได้นำขยะจากหลุมฝังกลบมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง และทำการทดสอบการเผาไหม้ด้วยเตาเผาแก๊สซิไฟเออร์แบบไหลลงในระดับห้องปฏิบัติการ โดยปรับการจ่ายอากาศที่สภาวะต่างกัน พบว่าเชื้อเพลิงมีค่าความร้อน 20.58 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ที่อัตราจ่ายอากาศ 300 ลิตรต่อนาที เกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ร้อยละ 2.59 ก๊าซมีเทนร้อยละ 1.95 ก๊าซไฮโดรเจนร้อยละ 4.00 ให้ค่าความร้อนก๊าซเชื้อเพลิง 1.46 เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตรมาตรฐาน

นฤภัทร ตั้งมันคงวรกุล และพัชรี ปริดาสุริยะชัย (2558) ได้ศึกษาการนำกากกาแฟและกากชามาใช้ประโยชน์ในรูปเชื้อเพลิงอัดแท่งโดยใช้กาวแปงเปียกที่ได้จากมันสำปะหลังมาเป็นตัวประสานผสมกันในอัตราส่วน 9:1 พบว่าเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ได้จากกากกาแฟและกากชามีค่าความร้อน 5,517 แคลอรีต่อกรัม และ 4,482 แคลอรีต่อกรัม และทำการศึกษาช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการคาร์บอนไนซ์ของกากกาแฟและกากชา พบว่า ควรทำในช่วงอุณหภูมิ ประมาณ 250-500 องศาเซลเซียส เนื่องจากอุณหภูมิ 25-200 องศาเซลเซียส เป็นช่วงอุณหภูมิในการสูญเสียความชื้น ที่อุณหภูมิสูงกว่า 200 องศาเซลเซียส น้ำหนักของกากกาแฟและกากชาลดลงอย่างรวดเร็วซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่สารระเหยมีการสลายตัวออกมาและที่อุณหภูมิเพิ่มสูงกว่า 500 องศาเซลเซียส พบว่าค่าน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก หลังจากการทำคาร์บอนไนซ์ของกากกาแฟและกากชาแล้วนำไปอัดแท่ง พบว่าเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ได้มีค่าความร้อนสูงขึ้นเป็น 7,460 แคลอรีต่อกรัม และ 5,600 แคลอรีต่อกรัม ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบค่าความร้อนกับฟืน ไม้ทั่วไปมีค่าความร้อนใกล้เคียงกันคือประมาณ 4,390 แคลอรีต่อกรัม แต่มีค่าต่ำกว่าถ่านไม้ทั่วไปที่มีค่าความร้อน 7,034 แคลอรีต่อกรัม

อธิภัทร และคณะ (2558) ได้ทำการศึกษาการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากขยะพลาสติกร่วมกับไม้สับโดยใช้เตาเผาแก๊สซิไฟเออร์แบบไหลลง พบว่าที่อัตราส่วนพลาสติกประเภทพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) สูงขึ้นคือร้อยละ 15 ให้ประสิทธิภาพเตาสูงที่สุด เกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ร้อยละ 4.3-4.8 ก๊าซมีเทนร้อยละ 6.5-7.5 และก๊าซไฮโดรเจนร้อยละ 14.7-17.9 โดยเชื้อเพลิงที่มีอัตราส่วนพลาสติกประเภทพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) ในการเผาไหม้มีแนวโน้มเกิดก๊าซ

มีเทน ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และก๊าซไนโตรเจนสูงขึ้น แต่มีแนวโน้มเกิดก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง

Jamradloedluk และคณะ (2015) ได้ทำการศึกษาการผลิตและคุณลักษณะของ RDF 5 (Densified-Refuse Derived Fuel) ขยะที่นำมาใช้ในการผลิตเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง ประกอบด้วย ขี้เลื่อย กระจาดขลัง ถูพลาสติก และข้าวเปลือก โดยใช้กลีเซอรินเป็นตัวประสาน จากการศึกษาพบว่า ถูพลาสติกโพลีเอทิลีนมีค่าความร้อนสูง เนื่องจากเป็นผลิตภัณฑ์จากปิโตรเลียมมีคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบหลักและมีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูง ในการอัดแท่งเชื้อเพลิง ความหนาแน่นของแท่งขยะเชื้อเพลิงจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการอัดเป็น 260 องศาเซลเซียสและมีการใช้กลีเซอรินเป็นตัวประสาน ค่าความทนแรงกดจะเพิ่มขึ้นที่อัตราส่วนของขี้เลื่อย กระจาดขลัง ถูพลาสติก และข้าวเปลือก โดยมีค่า 7:1:1:1 ตามลำดับโดยไม่มีการใช้กลีเซอรินเป็นตัวประสาน เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่มีค่าความแข็งแรงทางแรงกดต่ำจะส่งผลให้มีความเปราะ ไม่จับตัวกันเป็นแท่ง ส่วนค่าความร้อนของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการใช้กลีเซอรินเป็นตัวประสานและลดปริมาณของข้าวเปลือก

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (2559) ได้จัดทำคู่มือด้านพลังงานทดแทน แก๊สซิฟิเคชันจากชีวมวล กล่าวว่าความหนาแน่นของเชื้อเพลิงส่งผลโดยตรงต่อปฏิบัติการการเกิดก๊าซเชื้อเพลิง ซึ่งเชื้อเพลิงที่มีความหนาแน่นสูงจะมีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงน้อยกว่าเชื้อเพลิงที่มีความหนาแน่นต่ำ แต่จะใช้ระยะเวลาในการจุดเตานานกว่า

วสันต์ ปินะเต และดวงกลม ดั่งโพหนอง (2559) ได้ทำการศึกษาและดำเนินการนำขยะชุมชนมาแปลงเป็นเชื้อเพลิงแข็งในรูป RDF-5 เพื่อนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงแทนถ่านหินในอุตสาหกรรม โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างต้นแบบสาธิตการผลิตเชื้อเพลิง RDF-5 จากขยะที่เกิดขึ้นในมหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม รวมทั้งศึกษาด้านทุนการผลิต ซึ่งขยะที่นำมาใช้ในการผลิต ประกอบด้วย พลาสติก ใบไม้ และกระจาดขลัง โดยใช้แป้งมันและปูนขาวเป็นตัวประสาน พบว่า ที่อัตราส่วน 1:1:1/0.1:0.1 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากมีค่าความร้อนสูงสุดที่ 26.35 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ค่าความหนาแน่น 1,035 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ความชื้นร้อยละ 1.81 เถ้าร้อยละ 1.72 และเวลาที่จุดติดไฟ 159 นาที ซึ่งคุณสมบัติทางกายภาพและความร้อนของเชื้อเพลิงเป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐาน มก. ๖.ก.๘ และมาตรฐานชุมชน ด้านทุนการผลิตต่อหน่วยของเชื้อเพลิง RDF-5 อยู่ที่ 2.645 บาท/กิโลกรัม และจุดคุ้มทุนเบื้องต้นคือ 200 วัน



Garces และคณะ (2016) ได้ทำการศึกษาประเมินศักยภาพในการผลิตเชื้อเพลิงแข็ง (Solid Recovered Fuels) โดยมีวัตถุประสงค์หลักคือการศึกษาความเหมาะสมและศึกษาคุณลักษณะทางเคมีของของเสียที่แตกต่างกัน 3 กลุ่มได้แก่ ขยะกลุ่มอุตสาหกรรมยานยนต์ ขยะกลุ่มบรรจุภัณฑ์ และขยะที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งได้จากหลุมฝังกลบในพื้นที่และนำเชื้อเพลิงแข็งที่ได้ไปใช้ในเตาเผาปูนซีเมนต์ที่อยู่บริเวณใกล้เคียง พบว่าขยะที่มีค่าความร้อนสูงสุด ได้แก่ พลาสติก รองลงมาคือ โฟมและสิ่งทอตามลำดับ ขยะที่มีองค์ประกอบของคาร์บอนและไฮโดรเจนสูงส่งผลให้มีค่าความร้อนสูง ส่วนขยะที่มีองค์ประกอบของออกซิเจนและกำมะถันสูงส่งผลให้มีค่าความร้อนต่ำ ขยะกลุ่มบรรจุภัณฑ์พบปริมาณคลอไรด์สูงเนื่องจากมีพอลิไวนิลคลอไรด์เป็นองค์ประกอบ เมื่อนำมาเผาไหม้ที่อุณหภูมิต่ำ (300-400 องศาเซลเซียส) ส่งผลให้เกิด โพลีคลอริเนตเตทไดเบนโซพาราไดออกซิน (PCDDs) ซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพอนามัย ถ้าพบคลอไรด์ในปริมาณน้อยกว่าร้อยละ 1 โดยน้ำหนักเหมาะสำหรับการเผาไหม้ที่อุณหภูมิปานกลาง (850 องศาเซลเซียส) ถ้ามีปริมาณสูงขึ้นไปจะต้องเพิ่มอุณหภูมิในการเผาไหม้ ขยะกลุ่มอุตสาหกรรมยานยนต์มีค่าความร้อนสูงแต่มีค่าปริมาณโลหะหนักเกินมาตรฐาน EURITS โดยเชื้อเพลิงแข็งที่ได้มีค่าความร้อนต่ำ (LHV) ที่ 28.15 เมกะจูลต่อกิโลกรัม คลอไรด์ร้อยละ 0.68 โดยน้ำหนัก พรอท  $3.33 \times 10^{-2}$  มิลลิกรัมต่อเมกะจูล

Zhang และคณะ (2018) ได้ทบทวนวรรณกรรมจากแหล่งต่างๆเกี่ยวกับตัวประสานซึ่งใช้ในการผลิตเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง โดยสรุปว่าตัวประสานที่ใช้สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ ตัวประสานอนินทรีย์ (Inorganic Binder) ตัวประสานอินทรีย์ (Organic Binder) และตัวประสานสารประกอบ (Compound Binder) โดยตัวประสานที่ดีควรมีคุณสมบัติ เช่น มีแรงยึดเกาะที่แข็งแรง ไม่เป็นมลพิษ ไม่ส่งผลกระทบต่อความร้อนที่ปล่อยออกมาและการเผาไหม้ เป็นต้น

ดินสอพองจัดเป็นตัวประสานอนินทรีย์ เช่นเดียวกับ ดินเหนียว ปูนขาว และซีเมนต์ เป็นต้น โดยตัวประสานประเภทนี้หาง่าย ไม่เป็นมลพิษ มีแรงยึดเกาะที่แข็งแรงและมีราคาถูก แต่ปริมาณกำมะถันในเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งจะสูงขึ้น

โพลีไวนิลแอลกอฮอล์และไบจามจุรีที่ผ่านการหมักแล้วเป็นตัวประสานประเภทอินทรีย์ โดยตัวประสานประเภทนี้มีพันธะยึดเกาะที่ดี แต่จะส่งผลให้เชื้อเพลิงมีความแข็งแรงลดลงและสลายตัวได้ง่ายที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นควรอัดที่แรงดันสูงแต่ใช้อุณหภูมิต่ำ

## บทที่ 4

### วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลองในระดับปฏิบัติการทำการวิจัย ณ ดึงสี่ภาคคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อศึกษาหาสภาวะและประเภทของตัวประสานที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่คุณภาพดี มีสมบัติทางกายภาพและเคมีเหมาะสมในการเป็นเชื้อเพลิงสำหรับใช้ในโรงงานปูนซีเมนต์ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในระดับที่ต่ำ โดยงานวิจัยนี้ใช้ขยะมูลฝอยภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเป็นกรณีศึกษา มีรายละเอียดและขั้นตอนการดำเนินการวิจัยดังนี้

#### 4.1 วัสดุ อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

4.1.1 วัสดุสำหรับการวิจัย ขยะที่ใช้ในการวิจัยเป็นขยะทั่วไปที่เก็บรวบรวมภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยเน้นขยะที่รีไซเคิลไม่ได้ ได้แก่

- 1) ขยะพลาสติกประเภทต่างๆ ซึ่งผ่านการคัดแยกขยะพลาสติกที่รีไซเคิลได้และพลาสติกประเภทโพลีไวนิลคลอไรด์ออก เช่น กุ้งพลาสติก กุ้งขนมขบเคี้ยว บรรจุภัณฑ์พลาสติก หลอดดูดพลาสติก เป็นต้น
- 2) ขยะกระดาษประเภทต่างๆ ซึ่งผ่านการคัดแยกขยะกระดาษที่รีไซเคิลได้ออก เช่น กล่องขนม กล่องนม กระดาษทิชชู งานกระดาษ แก้วกระดาษ เป็นต้น
- 3) กากกาแฟ

#### 4.1.2 ตัวประสานสำหรับการวิจัย

- 1) โพลีไวนิลแอลกอฮอล์
- 2) ดินสอพอง
- 3) ไบจามจรีที่ผ่านการหมักแล้ว วิธีการเตรียมอ้างอิงจากโครงการ JICA ผลิตปุ๋ยสูตรไบจามจรีโดยใช้หัวเชื้อจากถังหมักขยะอินทรีย์ (ชวลิต รัตนธรรมสกุล, 2559)

#### 4.1.3 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

##### 1) เครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิงแบบใช้กระบอกระบบไฮดรอลิก (Hydraulic Press Densifier)

งานวิจัยนี้ได้สั่งทำเครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิง เป็นเครื่องอัดแน่นด้วยกระบอกระบบไฮดรอลิก ทำการอัดที่ละแท่ง อัดแท่งด้วยแรงดันและความร้อน สามารถควบคุมอุณหภูมิและเวลา ในการอัดแท่งเชื้อเพลิงได้ ซึ่งมีรายละเอียดของผลิตภัณฑ์ ดังนี้

- ใช้ฮีตเตอร์ในการให้ความร้อน สามารถสร้างอุณหภูมิได้สูงสุด 350 องศาเซลเซียส
- ชุดอัดไฮดรอลิกสามารถสร้างแรงดันได้สูงสุด 200 บาร์
- กระบอกแม่แบบขยอะอัดแท่งทำจากสแตนเลสสตีล ความยาว 15 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 6 เซนติเมตร



รูปที่ 4.1 เครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิงแบบใช้กระบอกระบบไฮดรอลิก

##### 2) เครื่องผสมขยอะ (Mixer)

งานวิจัยนี้ใช้โมผสมขยอะประเภทของบรชษ่นำเฮงคอนสตัคชั่นอีควิปเมนท์ จำกัด จำนวน 1 เครื่อง ซึ่งมีรายละเอียดของผลิตภัณฑ์ ดังนี้

- ถังผสมขนาด : 100 ลิตร
- ขนาด : กว้าง 80 x ยาว 135 x สูง 95 เซนติเมตร
- ขนาดมอเตอร์ : 3 แรงม้า 220 โวลต์/380 โวลต์



รูปที่ 4.2 โม่ผสมอเนกประสงค์

### 3) เครื่องลดขนาดขยะ (Shear Shredder)

งานวิจัยนี้ใช้เครื่องย่อยขยะและวัสดุเหลือใช้ของบริษัทนิมูทเอ็นจิเนียริง จำกัด ซึ่งมีรายละเอียดของผลิตภัณฑ์ ดังนี้

- เครื่องยนต์ดีเซล
- อัตราการสับย่อย : 1000 กิโลกรัมต่อชั่วโมง
- มอเตอร์ไฟฟ้าขนาด : 10 แรงม้า



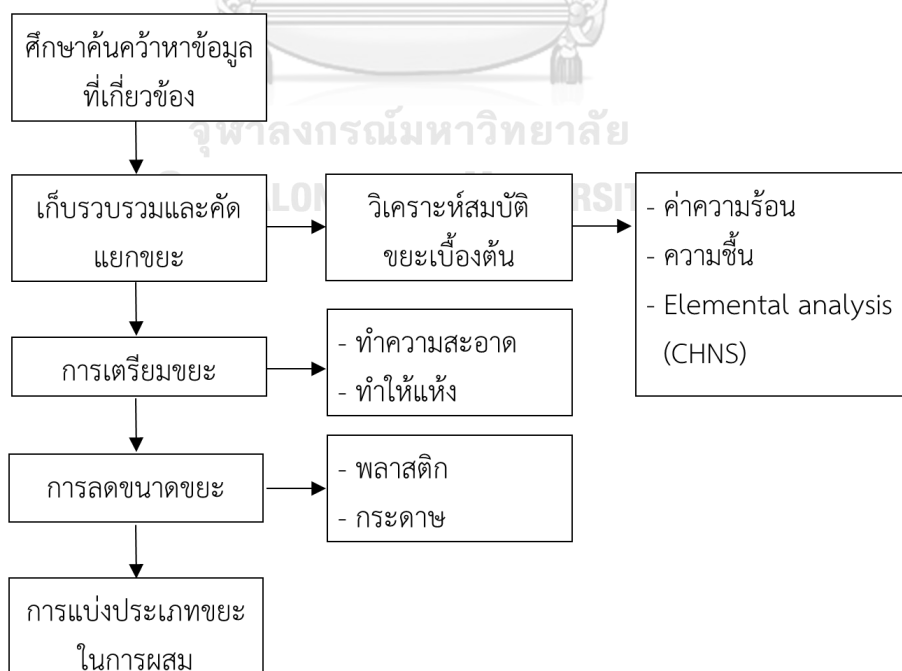
รูปที่ 4.3 เครื่องย่อยขยะและวัสดุเหลือใช้

- 4) เตาเผาแก๊สซีฟเอร์แบบไหลลงระดับห้องปฏิบัติการ (Downdraft Gasifier)
- 5) เครื่องวัดความร้อน (Bomb Calorimeter)
- 6) ตู้อบ (Oven)
- 7) โถดูดความชื้น (Desiccator)
- 8) เครื่องชั่งน้ำหนัก
- 9) Inductively Coupled Plasma
- 10) Elemental Analyzer
- 11) Microwave Digester
- 12) X-Ray Fluorescence Spectrometer
- 13) Universal Testing Machine
- 14) ถูขยชะ
- 15) ถ้วยทนไฟพร้อมฝาปิด
- 16) เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography)

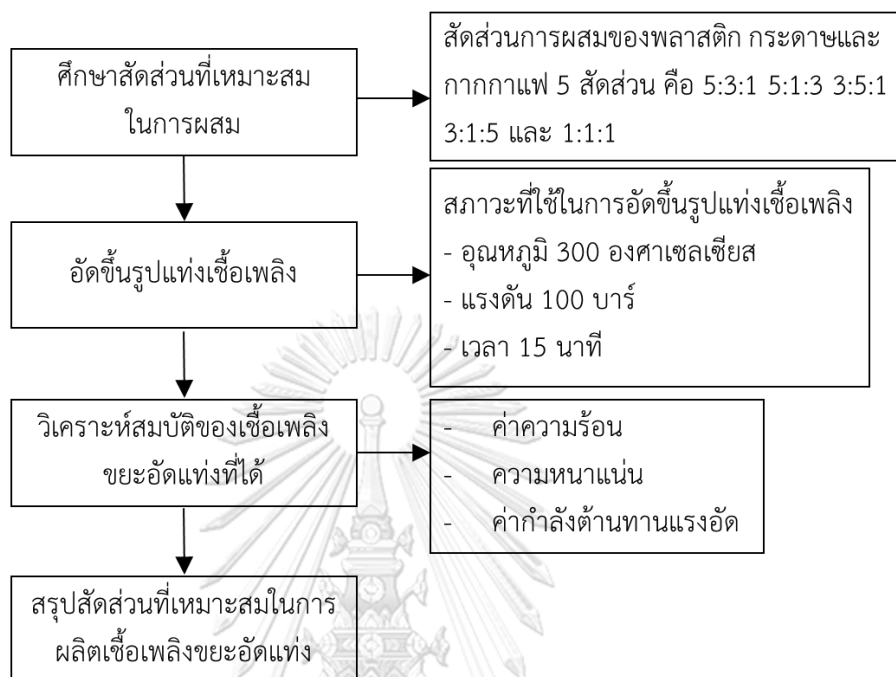
#### 4.2 แผนการวิจัย

การวิจัยนี้ได้แบ่งขั้นตอนการดำเนินการวิจัยออกเป็น 3 ช่วงดังนี้

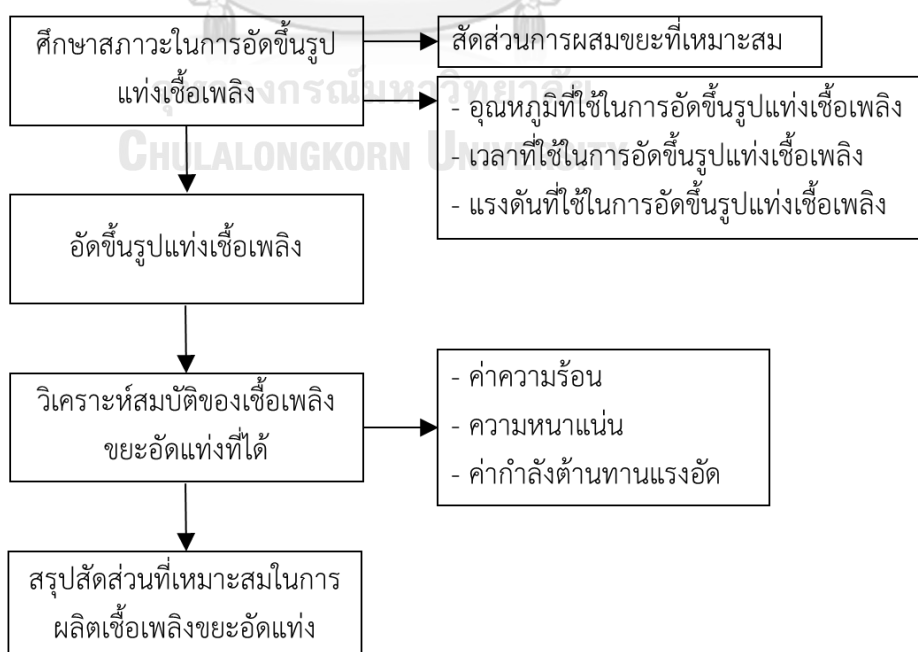
ช่วงที่ 1 การเตรียมการวิจัย



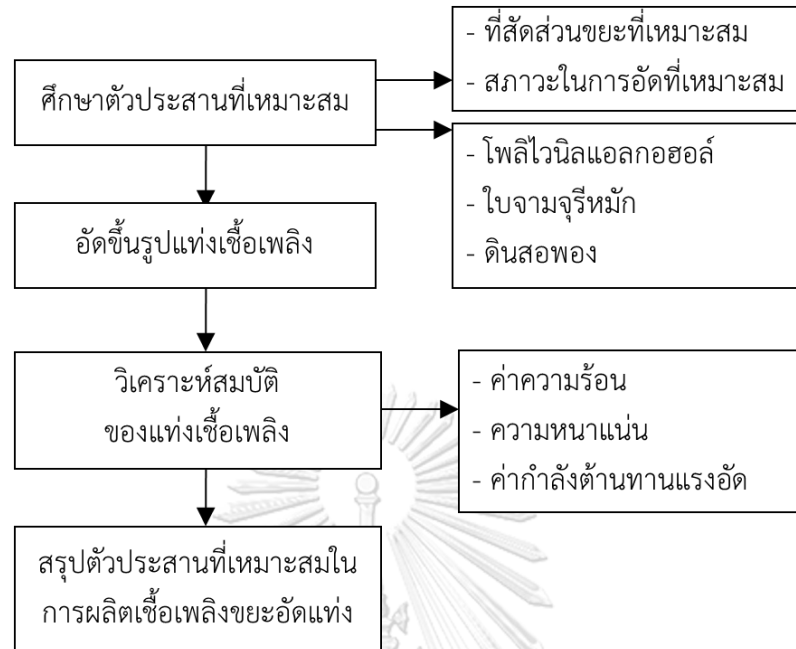
ช่วงที่ 2 ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในขั้นตอนการผลิตเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง  
การทดลองที่ 1 ศึกษาสัดส่วนขยะที่เหมาะสมในการผสม



การทดลองที่ 2 ศึกษาสภาวะในการอัดขึ้นรูปแท่งเชื้อเพลิงที่เหมาะสม

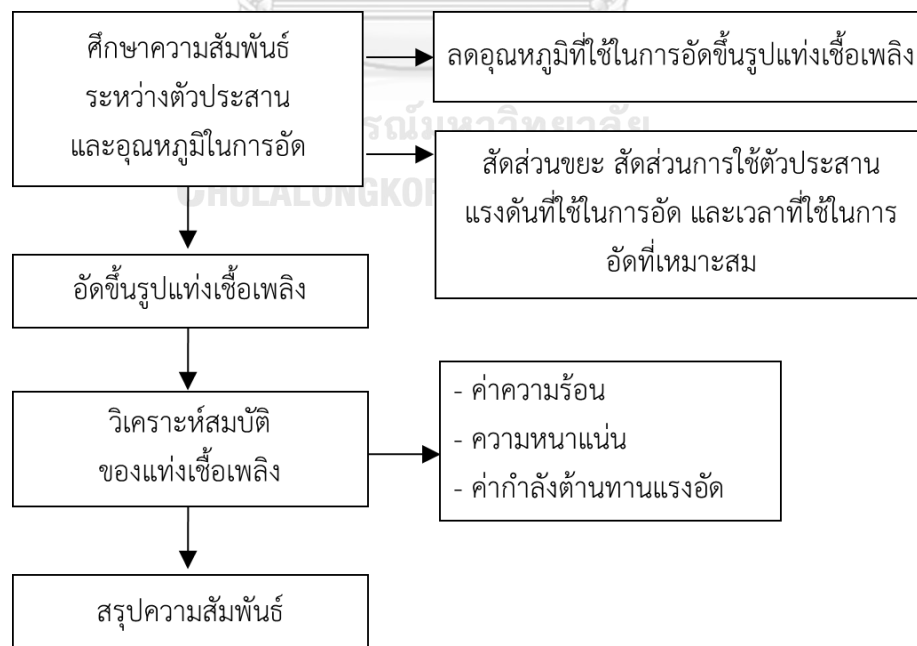


การทดลองที่ 3 ศึกษาประเภทของตัวประสานและสัดส่วนการใช้ที่เหมาะสม

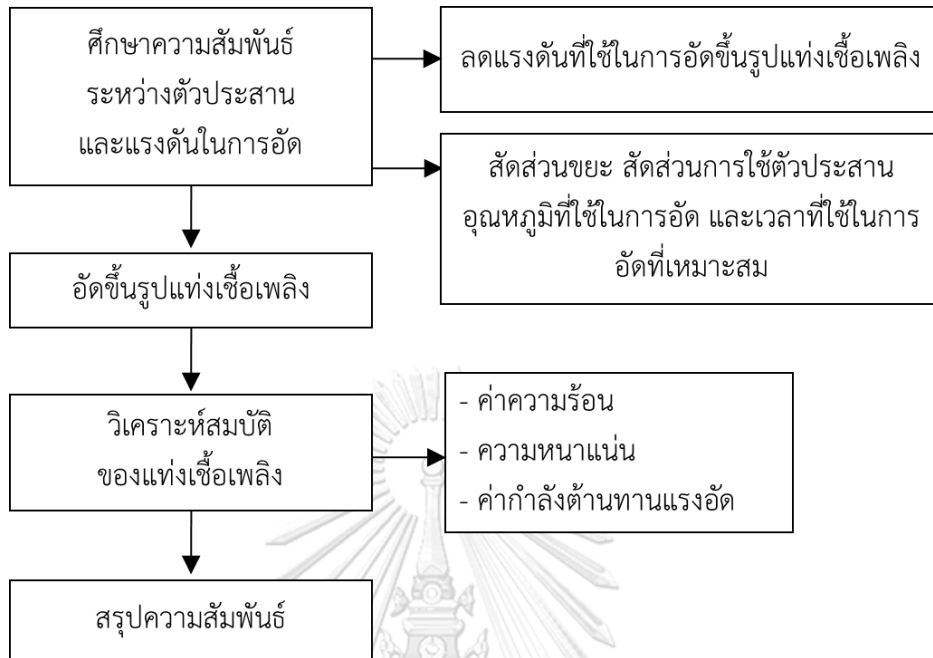


การทดลองที่ 4 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวประสานประเภทต่างๆและสภาพในการอัด

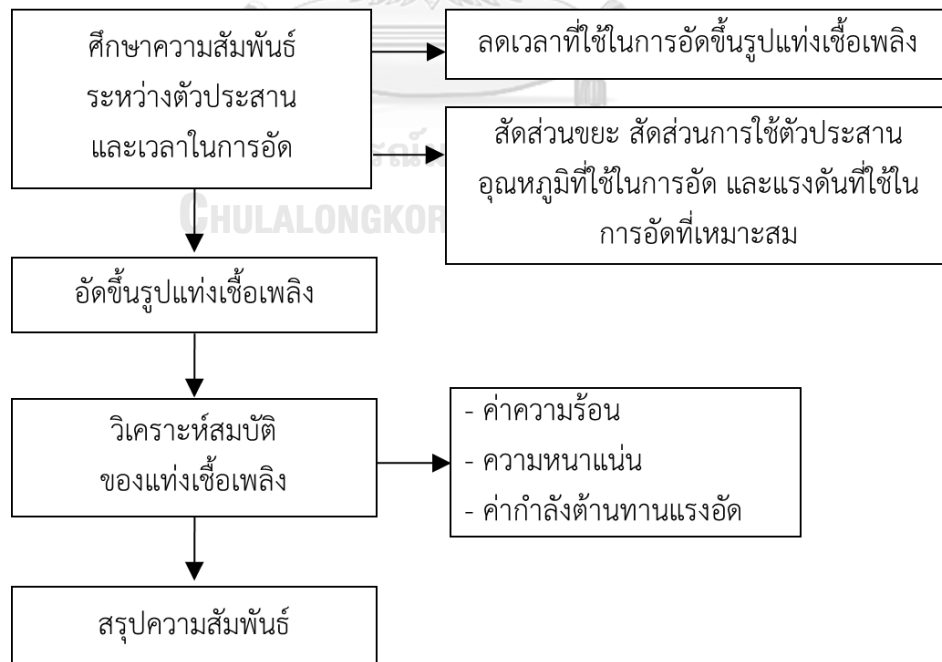
การทดลองที่ 4.1 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวประสานประเภทต่างๆและอุณหภูมิที่ใช้ในการอัด



การทดลองที่ 4.2 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวประสานประเภทต่างๆและแรงดันที่ใช้ในการอัด

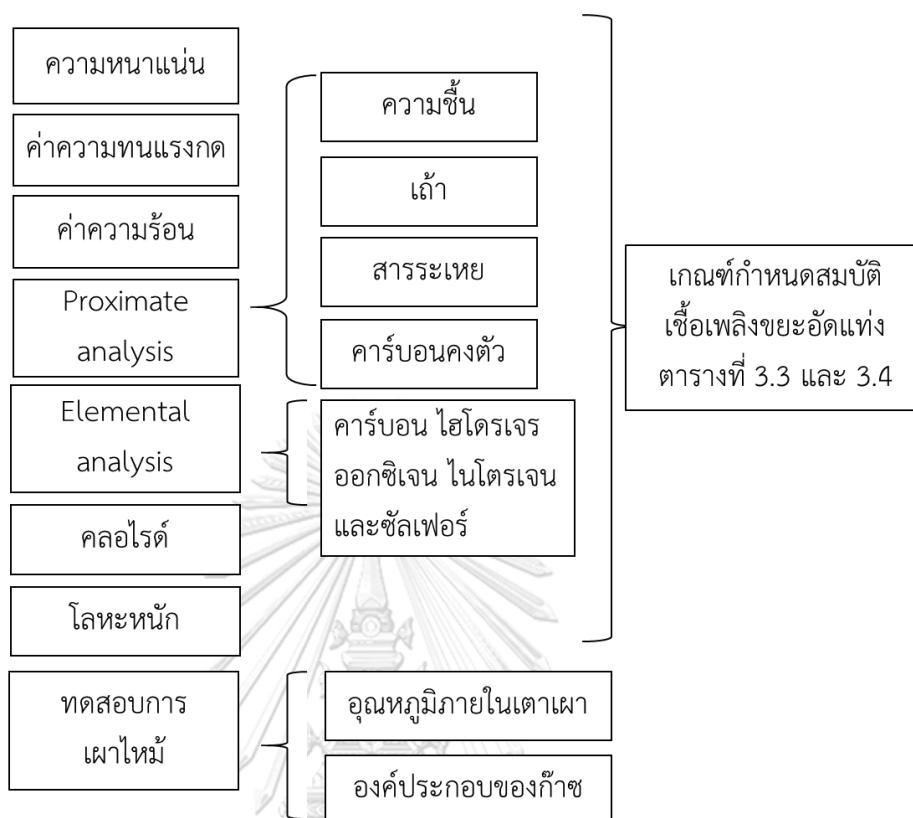


การทดลองที่ 4.3 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวประสานประเภทต่างๆและเวลาที่ใช้ในการอัด





### ช่วงที่ 3 วิเคราะห์สมบัติของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่ได้



### 4.3 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการวิจัย

#### 4.3.1 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องในช่วงที่ 2 การทดลองที่ 1 ตารางที่ 4.1 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องในช่วงที่ 2 การทดลองที่ 1

ตัวแปรอิสระ	- สัดส่วนการผสมของพลาสติก, กระดาษและกากกาแฟ 5 สัดส่วน คือ 5:3:1 5:1:3 3:5:1 3:1:5 และ 1:1:1
ตัวแปรควบคุม	สภาวะที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปแท่งเชื้อเพลิง - อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส - แรงดัน 100 บาร์ - เวลา 15 นาที
ตัวแปรตาม	- ค่าความร้อน - ความหนาแน่น - ค่ากำลังต้านทานแรงอัด

## 4.3.2 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องในช่วงที่ 2 การทดลองที่ 2

## ตารางที่ 4.2 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องในช่วงที่ 2 การทดลองที่ 2

ตัวแปรอิสระ	<ul style="list-style-type: none"> <li>- อุณหภูมิที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปแท่งเชื้อเพลิง คือ 180 200 250 300 และ 350 องศาเซลเซียส</li> <li>- เวลาที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปแท่งเชื้อเพลิง คือ 5 10 และ 15 นาที</li> <li>- แรงดันที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปแท่งเชื้อเพลิง คือ 100 และ 150 บาร์</li> </ul>
ตัวแปรควบคุม	<ul style="list-style-type: none"> <li>- สัดส่วนการผสมของพลาสติก กระจกและกากกาแฟที่เหมาะสมซึ่งได้จากการทดลองที่ 1</li> </ul>
ตัวแปรตาม	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ค่าความร้อน</li> <li>- ความหนาแน่น</li> <li>- ค่ากำลังต้านทานแรงอัด</li> </ul>

## 4.3.3 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องในช่วงที่ 2 การทดลองที่ 3

## ตารางที่ 4.3 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องในช่วงที่ 2 การทดลองที่ 3

ตัวแปรอิสระ	<p>ตัวประสานและสัดส่วนที่ใช้</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- PVA ที่สัดส่วน 0.1 0.2 0.3 และ 0.4</li> <li>- ดินสอพอง ที่สัดส่วน 0.1 0.2 0.3 และ 0.4</li> <li>- ไบจามจूरिหมัก ที่สัดส่วน 0.1 0.2 0.3 และ 0.4</li> </ul>
ตัวแปรควบคุม	<ul style="list-style-type: none"> <li>- อุณหภูมิ เวลา และแรงดันในการอัดขึ้นรูปแท่งเชื้อเพลิงที่เหมาะสมซึ่งได้จากการทดลองที่ 2</li> <li>- สัดส่วนการผสมของพลาสติก กระจกและกากกาแฟที่เหมาะสมซึ่งได้จากการทดลองที่ 1</li> </ul>
ตัวแปรตาม	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ค่าความร้อน</li> <li>- ความหนาแน่น</li> <li>- ค่ากำลังต้านทานแรงอัด</li> </ul>

## 4.3.4 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องในช่วงที่ 2 การทดลองที่ 4

## ตารางที่ 4.4 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องในช่วงที่ 2 การทดลองที่ 4.1

ตัวแปรอิสระ	- อุณหภูมิที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปแท่งเชื้อเพลิง (อุณหภูมิที่เหมาะสม - 20 องศาเซลเซียส )
ตัวแปรควบคุม	- สัดส่วนขยะ สัดส่วนการใช้ตัวประสาน แรงดันที่ใช้ในการอัด และ เวลาที่ใช้ในการอัดที่เหมาะสม ซึ่งได้จากการทดลองที่ 3
ตัวแปรตาม	- ค่าความร้อน - ความหนาแน่น - ค่ากำลังต้านทานแรงอัด

## ตารางที่ 4.5 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องในช่วงที่ 2 การทดลองที่ 4.2

ตัวแปรอิสระ	- แรงดันที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปแท่งเชื้อเพลิง (แรงดันที่เหมาะสม - 50 บาร์)
ตัวแปรควบคุม	- สัดส่วนขยะ สัดส่วนการใช้ตัวประสาน อุณหภูมิที่ใช้ในการอัด และ เวลาที่ใช้ในการอัดที่เหมาะสม
ตัวแปรตาม	- ค่าความร้อน - ความหนาแน่น - ค่ากำลังต้านทานแรงอัด

## ตารางที่ 4.6 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องในช่วงที่ 2 การทดลองที่ 4.3

ตัวแปรอิสระ	- เวลาที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปแท่งเชื้อเพลิง (เวลาที่เหมาะสม - 2 นาที)
ตัวแปรควบคุม	- สัดส่วนขยะ สัดส่วนการใช้ตัวประสาน แรงดันที่ใช้ในการอัด และ อุณหภูมิที่ใช้ในการอัดที่เหมาะสม ซึ่งได้จากการทดลองที่ 3
ตัวแปรตาม	- ค่าความร้อน - ความหนาแน่น - ค่ากำลังต้านทานแรงอัด

#### 4.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย แบ่งออกเป็น 3 ช่วง ดังนี้

##### 4.4.1 ช่วงที่ 1 การเตรียมการวิจัย

- 1) ศึกษาและค้นคว้าหาข้อมูลต่างๆที่เกี่ยวข้องในการวิจัย
- 2) เก็บรวบรวมขยะเพื่อนำมาใช้ในการวิจัย โดยทำการสุ่มเก็บขยะ ณ จุดต่างๆมากรวมกัน คลุกเคล้าให้เป็นเนื้อเดียวกันให้มากที่สุด แบ่งขยะออกเป็น 4 กองเท่าๆกัน (Quartering Method) เลือกกองขยะ 2 กองที่อยู่ตรงข้ามกันมาคลุกเคล้าให้เป็นเนื้อเดียวกันอีกครั้ง ส่วนกองที่เหลือให้นำไปทิ้ง ทำการ Quartering Method ซ้ำจนได้ปริมาณขยะที่ต้องการ



รูปที่ 4.4 การเก็บรวบรวมขยะด้วยวิธีการ Quartering

- 3) การทำความสะอาดและทำให้แห้ง หลังจากเก็บรวบรวมขยะจากแหล่งต่างๆนำขยะพลาสติกและกระดาษที่มีการปนเปื้อนมมาล้างทำความสะอาด จากนั้นทิ้งไว้ให้แห้งหรือนำไปตากแดด ส่วนกากกาแฟนำมารีดน้ำออกเพื่อกำจัดความชื้นให้เหลืออย่างน้อยร้อยละ 30 โดยน้ำหนักก่อนนำมาอัดแท่ง
- 4) วิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของขยะและตัวประสานที่ใช้ในงานวิจัย
- 5) การลดขนาดขยะ นำขยะพลาสติกและกระดาษมาลดขนาดด้วยเครื่องย่อยขยะและวัสดุเหลือใช้ ให้มีขนาดประมาณ 2-3 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.5 และ 4.6



รูปที่ 4.5 การลดขนาดขยะ



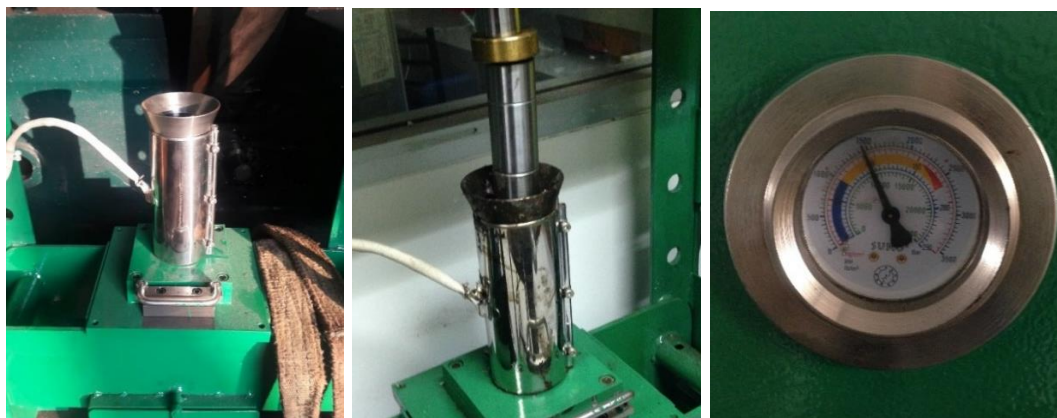
รูปที่ 4.6 ขยะกระดาษและพลาสติกหลังผ่านการลดขนาดแล้ว

- 6) การอัดแท่งเชื้อเพลิง ทำการกวนผสมขยะตามสัดส่วนต่างๆ ด้วยไม้มผสมเนกประสงค์ดังรูปที่ 4.7 นำขยะที่กวนผสมแล้วใส่ในกระบอกอัดและใส่แท่งอัด กดอัดให้ได้แรงดันตามที่ต้องการ ดังรูปที่ 4.8 และ 4.9 แล้วทำการตั้งเวลาและอุณหภูมิที่ตู้คอนโทรลไฟฟ้า ดังรูปที่ 4.10

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 4.7 กวนผสมขยะด้วยไม้มผสมเนกประสงค์



รูปที่ 4.8 กระบอกรัดแท่งเชื้อเพลิงและการควบคุมแรงดันในการอัด



รูปที่ 4.9 ตู้คอนโทรลไฟฟ้าสำหรับตั้งเวลาและอุณหภูมิ

#### 4.4.2 ช่วงที่ 2 ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในขั้นตอนการผลิตเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง

- 1) การทดลองที่ 1 ศึกษาหาสัดส่วนของพลาสติก กระจดาชและกากกาแพที่เหมาะสมในการผสมซึ่งส่งผลให้เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งมีค่าความร้อน ค่ากำลังต้านทานแรงอัดและความหนาแน่นผ่านเกณฑ์กำหนดสมบัติของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง (ตารางที่ 3.3)

ทำการศึกษาสัดส่วนการผสมของพลาสติก กระจดาชและกากกาแพ 5 สัดส่วน ได้แก่ 1:1:1 5:3:1 5:1:3 3:5:1 และ 3:1:5 โดยสภาวะที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปแท่งเชื้อเพลิง ได้แก่

- อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส
- แรงดัน 100 บาร์
- เวลา 15 นาที

รายละเอียดการอัดขึ้นรูปแท่งเชื้อเพลิงที่เงื่อนไขต่างๆแสดงในตารางที่ 4.7 ผสมขยะให้เป็นเนื้อเดียวกัน อัดขึ้นรูปแท่งเชื้อเพลิง จากนั้นนำเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่ได้วิเคราะห์หาค่าความร้อน ค่ากำลังต้านทานแรงอัดและความหนาแน่น ทำการทดลองตัวอย่างละ 3 ซ้ำ โดยสัดส่วนใดให้ค่าที่เหมาะสมเป็นอันดับแรกจะใช้เป็นสัดส่วนที่เหมาะสมเพื่อทำการทดลองที่ 2 ต่อไป

ตารางที่ 4.7 รายละเอียดสัดส่วนในการอัดขึ้นรูปแท่งเชื้อเพลิง

ชุดการทดลอง	เศษพลาสติก	เศษกระดาษ	กากกาแฟ
A1	1	1	1
A2	5	3	1
A3	5	1	3
A4	3	5	1
A5	3	1	5

2) การทดลองที่ 2 ศึกษาสภาวะในการอัดขึ้นรูปแท่งเชื้อเพลิง เพื่อหาอุณหภูมิ เวลา และแรงดันที่เหมาะสมซึ่งส่งผลให้เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งมีค่าความร้อน ค่ากำลังต้านทานแรงอัดและความหนาแน่นผ่านเกณฑ์กำหนดสมบัติของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง (ตารางที่ 3.3)

ทำการผสมขยะให้เป็นเนื้อเดียวกันที่สัดส่วนขยะที่เหมาะสม ซึ่งได้จากการทดลองที่ 1 อัดขึ้นรูปแท่งเชื้อเพลิงโดยกำหนดช่วงปัจจัยที่ศึกษา ดังนี้

- อุณหภูมิที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปแท่งเชื้อเพลิง คือ 180 200 250 300 และ 350 องศาเซลเซียส
- แรงดันที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปแท่งเชื้อเพลิง คือ 100 และ 150 บาร์
- เวลาที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปแท่งเชื้อเพลิง คือ 5 10 และ 15 นาที

รายละเอียดการอัดขึ้นรูปแท่งเชื้อเพลิงที่เงื่อนไขต่างๆแสดงในตารางที่ 4.8 ผสมขยะให้เป็นเนื้อเดียวกัน อัดขึ้นรูปแท่งเชื้อเพลิง จากนั้นนำเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่ได้วิเคราะห์หาค่าความร้อน ค่ากำลังต้านทานแรงอัดและความหนาแน่น ทำการทดลองตัวอย่างละ 3 ซ้ำ โดยสภาวะใดให้ค่าที่เหมาะสมเป็นอันดับแรกจะใช้เป็นสภาวะที่เหมาะสมเพื่อทำการทดลองที่ 3 ต่อไป

ตารางที่ 4.8 รายละเอียดการอัดขึ้นรูปแท่งเชื้อเพลิงที่สภาวะต่างๆ

ชุดการทดลอง	แรงดันที่ใช้ในการอัด	อุณหภูมิที่ใช้ในการอัด	เวลาที่ใช้ในการอัด
B1	100 บาร์	180 องศาเซลเซียส	5 นาที
B2			10 นาที
B3			15 นาที
B4		200 องศาเซลเซียส	5 นาที
B5			10 นาที
B6			15 นาที
B7		250 องศาเซลเซียส	5 นาที
B8			10 นาที
B9			15 นาที
B10		300 องศาเซลเซียส	5 นาที
B11			10 นาที
B12			15 นาที
B13		350 องศาเซลเซียส	5 นาที
B14			10 นาที
B15			15 นาที
B16	150 บาร์	180 องศาเซลเซียส	5 นาที
B17			10 นาที
B18			15 นาที
B19		200 องศาเซลเซียส	5 นาที
B20			10 นาที
B21			15 นาที
B22		250 องศาเซลเซียส	5 นาที
B23			10 นาที
B24			15 นาที
B25		300 องศาเซลเซียส	5 นาที
B26			10 นาที
B27			15 นาที
B28		350 องศาเซลเซียส	5 นาที
B29			10 นาที
B30			15 นาที



3) การทดลองที่ 3 ศึกษาประเภทของตัวประสานและสัดส่วนการใช้ที่เหมาะสมซึ่งส่งผลให้เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งมีค่าความร้อน ค่ากำลังต้านทานแรงอัด และความหนาแน่นผ่านเกณฑ์กำหนดสมบัติของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง (ตารางที่ 3.3)

ทำการผสมขยะและเติมตัวประสานในสัดส่วนต่างๆ โดยกำหนดตัวประสานและช่วงสัดส่วนการใช้ที่ศึกษา ดังนี้

- โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ ที่สัดส่วน 0.1 0.2 0.3 และ 0.4
- ดินสอพอง ที่สัดส่วน 0.1 0.2 0.3 และ 0.4
- ไบจามจूरหมัก ที่สัดส่วน 0.1 0.2 0.3 และ 0.4

อัดขึ้นรูปแท่งเชื้อเพลิงโดยใช้สภาวะที่เหมาะสมซึ่งได้จากการทดลองที่ 2 และสัดส่วนขยะที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 1 รายละเอียดการอัดขึ้นรูปแท่งเชื้อเพลิงที่เงื่อนไขต่างๆแสดงในตารางที่ 4.9 จากนั้นนำเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่ได้วิเคราะห์หาค่าความร้อน ค่ากำลังต้านทานแรงอัด และความหนาแน่น ทำการทดลองตัวอย่างละ 3 ซ้ำ โดยสัดส่วนการใช้ตัวประสานใดให้ค่าที่เหมาะสมเป็นอันดับแรกของแต่ละตัวประสาน จะใช้เป็นสภาวะที่เหมาะสมเพื่อทำการทดลองที่ 4 ต่อไป

ตารางที่ 4.9 รายละเอียดการอัดขึ้นรูปแท่งเชื้อเพลิงของตัวประสานแต่ละประเภทและสัดส่วนการใช้

ชุดการทดลอง	ตัวประสาน	สัดส่วนการใช้
C1	โพลีไวนิลแอลกอฮอล์	0.1
C2		0.2
C3		0.3
C4		0.4
C5	ดินสอพอง	0.1
C6		0.2
C7		0.3
C8		0.4
C9	ไบจามจूरหมัก	0.1
C10		0.2
C11		0.3
C12		0.4

4) การทดลองที่ 4 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวประสานและสถานะต่างๆในการผลิตเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการช่วยประหยัดพลังงาน ทำการทดลองอัดแท่งเชื้อเพลิงที่เงื่อนไขต่างๆโดยลดอุณหภูมิที่ใช้ในการอัด แรงดันที่ใช้ในการอัดและเวลาที่ใช้ในการอัด รายละเอียดดังแสดงด้านล่างนี้

4.1) ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประสานประเภทต่างๆและอุณหภูมิที่ใช้ในการอัด

ทำการอัดแท่งเชื้อเพลิงที่สัดส่วนขยะ สัดส่วนการใช้ตัวประสาน แรงดันที่ใช้ในการอัด และเวลาที่ใช้ในการอัดที่เหมาะสม ส่วนอุณหภูมิที่ใช้ในการอัดทำการลดค่าลงครั้งละ 20 องศาเซลเซียสจากอุณหภูมิที่เหมาะสม รายละเอียดการอัดขึ้นรูปแท่งเชื้อเพลิงแสดงในตารางที่ 4.10 จากนั้นนำเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่ได้วิเคราะห์หาค่าความร้อน ค่ากำลังต้านทานแรงอัดและความหนาแน่น ทำการทดลองตัวอย่างละ 3 ซ้ำ

ตารางที่ 4.10 รายละเอียดการอัดขึ้นรูปแท่งเชื้อเพลิงโดยลดอุณหภูมิที่ใช้ในการอัด

ชุดการทดลอง	ประเภทตัวประสาน	อุณหภูมิที่ใช้ในการอัด
D1	โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (เงื่อนไขที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3)	อุณหภูมิที่เหมาะสม - 20 องศาเซลเซียส
D2	ดินสอพอง (เงื่อนไขที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3)	อุณหภูมิที่เหมาะสม - 20 องศาเซลเซียส
D3	ไบจามจूरหมัก (เงื่อนไขที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3)	อุณหภูมิที่เหมาะสม - 20 องศาเซลเซียส

4.2) ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประสานประเภทต่างๆและแรงดันที่ใช้ในการอัด

ทำการอัดแท่งเชื้อเพลิงที่สัดส่วนขยะ สัดส่วนการใช้ตัวประสาน อุณหภูมิที่ใช้ในการอัด และเวลาที่ใช้ในการอัดที่เหมาะสม ส่วนแรงดันที่ใช้ในการอัดทำการลดค่าลงครั้งละ 50 บาร์ จากแรงดันที่เหมาะสม รายละเอียดการอัดขึ้นรูปแท่งเชื้อเพลิงแสดงในตารางที่ 4.11 จากนั้นนำเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่ได้วิเคราะห์หาค่าความร้อน ค่ากำลังต้านทานแรงอัดและความหนาแน่น ทำการทดลองตัวอย่างละ 3 ซ้ำ

ตารางที่ 4.11 รายละเอียดการอัดขึ้นรูปแท่งเชื้อเพลิงโดยลดแรงดันในการอัด

ชุดการทดลอง	ประเภทตัวประสาน	แรงดันที่ใช้ในการอัด
D4	โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (เงื่อนไขที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3)	แรงดันที่เหมาะสม – 50 บาร์
D5	ดินสอพอง (เงื่อนไขที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3)	แรงดันที่เหมาะสม – 50 บาร์
D6	ไบจามจूरหมัก (เงื่อนไขที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3)	แรงดันที่เหมาะสม – 50 บาร์

#### 4.3) ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประสานประเภทต่างๆและเวลาที่ใช้ในการอัด

ทำการอัดแท่งเชื้อเพลิงโดยที่สัดส่วนขยะ สัดส่วนการใช้ตัวประสาน แรงดันที่ใช้ในการอัด และอุณหภูมิที่ใช้ในการอัดที่เหมาะสม ส่วนเวลาที่ใช้ในการอัดทำการลดค่าลงครึ่งละ 2 นาที จากเวลาที่เหมาะสม รายละเอียดการอัดขึ้นรูปแท่งเชื้อเพลิงแสดงในตารางที่ 4.12 จากนั้นนำเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่ได้วิเคราะห์หาค่าความร้อน ค่ากำลังต้านทานแรงอัดและความหนาแน่น ทำการทดลองตัวอย่างละ 3 ซ้ำ

ตารางที่ 4.12 รายละเอียดการอัดขึ้นรูปแท่งเชื้อเพลิงโดยลดเวลาในการอัด

ชุดการทดลอง	ประเภทตัวประสาน	เวลาที่ใช้ในการอัด
D7	โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (เงื่อนไขที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3)	เวลาที่เหมาะสม – 2 นาที
D8	ดินสอพอง (เงื่อนไขที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3)	เวลาที่เหมาะสม – 2 นาที
D9	ไบจามจूरหมัก (เงื่อนไขที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3)	เวลาที่เหมาะสม – 2 นาที

#### 4.4.3 ช่วงที่ 3 การวิเคราะห์สมบัติของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง

นำเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่ให้ค่าความร้อน ค่ากำลังต้านทานแรงอัด และความหนาแน่นที่เหมาะสมของแต่ละตัวประสานซึ่งได้จากการช่วงที่ 2 การทดลองที่ 3 มาทำการวิเคราะห์สมบัติของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งตามรายละเอียดด้านล่างดังนี้

4.4.3.1 วิเคราะห์สมบัติด้านต่างๆของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่ได้และนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับเกณฑ์กำหนดเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งแหล่งอื่นๆ (ตารางที่ 3.3 และ 3.4)

ตารางที่ 4.13 สมบัติที่วิเคราะห์และวิธีการที่ใช้ในการวิเคราะห์

สมบัติที่วิเคราะห์	วิธีการวิเคราะห์/เครื่องมือวิเคราะห์
ความหนาแน่น	คำนวณได้จากสูตร
ค่ากำลังต้านทานแรงอัด	Universal Testing Machine
ค่าความร้อน	Bomb Calorimeter
ปริมาณความชื้น	ASTM E 790-87 (2004)
ปริมาณเถ้า	ASTM E 830-87 (2004)
ปริมาณสารระเหย	ASTM E897-88 (2004)
ปริมาณคาร์บอนคงตัว	คำนวณได้จากสูตร
Elemental analysis	Elemental Analyzer
ปริมาณคลอไรด์	X-Ray Fluorescence Spectrometer
ปริมาณโลหะหนัก	Inductively Coupled Plasma

- 1) ความหนาแน่น (Density) การวิเคราะห์หาค่าความหนาแน่นของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง ทำได้โดยชั่งน้ำหนักและคำนวณปริมาตร สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.1

$$D = M/V \quad (4.1)$$

โดยที่ D = ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

M = น้ำหนักของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง (กิโลกรัม)

V = ปริมาตรของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง (ลูกบาศก์เมตร)

- 2) ค่ากำลังต้านทานแรงอัด (Compressive Strength) การวิเคราะห์หาค่าความทนแรงอัดของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง มีขั้นตอนดังนี้

- นำแท่งเชื้อเพลิงวางบนเครื่อง Universal Testing Machine
- ทำการกดอัดแท่งเชื้อเพลิงจนเริ่มเสียหาย บันทึกค่าแรงที่ทำให้เสียหาย

โดยสามารถคำนวณหาค่ากำลังต้านทานแรงอัด ได้จากสมการที่ 4.2

$$\sigma_c = F/A \quad (4.2)$$

เมื่อ  $\sigma_c$  = ค่ากำลังต้านทานแรงอัดของแท่งเชื้อเพลิง (เมกะปาสคาล)

F = แรงอัดที่ทำให้แท่งเชื้อเพลิงเริ่มเสียหาย

A = พื้นที่หน้าตัดของแท่งเชื้อเพลิง

3) การวิเคราะห์หาค่าความร้อน (Heating Value) การวิเคราะห์หาค่าความร้อนของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง ทำการวิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐานของ American Society for Testing and Materials (ASTM) E 711-87 (2004) โดยใช้ Bomb Calorimeter เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์

4) Proximate analysis

4.1) ปริมาณความชื้น (Moisture Content) การวิเคราะห์หาปริมาณความชื้นของตัวอย่างขยะ ทำการวิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐานของ American Society for Testing and Materials (ASTM) E 790-87 (2004) มีขั้นตอนดังนี้

- นำถ้วยทนไฟเปล่าและฝาปิดอบที่อุณหภูมิ  $107 \pm 3$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เพื่อกำจัดความชื้น ทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น
- นำตัวอย่างประมาณ 1 กรัม ใส่ในถ้วยทนไฟไปพร้อมปิดฝา จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนัก
- นำตัวอย่างเข้าตู้อบ อบที่อุณหภูมิ  $107 \pm 3$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำถ้วยทนไฟออกจากตู้อบ เปิดฝาดูแล้วทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น นำมาชั่งน้ำหนัก

โดยสามารถคำนวณปริมาณความชื้น (ร้อยละโดยน้ำหนัก) ได้จากสมการที่ 4.3

$$\text{ค่าความชื้น} = \frac{\text{น้ำหนักขยะก่อนอบ} - \text{น้ำหนักขยะหลังอบ}}{\text{น้ำหนักขยะก่อนอบ}} \times 100 \quad (4.3)$$

4.2) ปริมาณเถ้า (Ash Content) การวิเคราะห์หาปริมาณเถ้าของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง ทำการวิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐานของ American Society for Testing and Materials (ASTM) E 830-87 (2004) มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- นำถ้วยทนไฟเปล่าและฝาปิดอบที่อุณหภูมิ  $575 \pm 25$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เพื่อกำจัดความชื้น ทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้นแล้วนำมาชั่งน้ำหนัก
- นำตัวอย่างประมาณ 1 กรัม ( $\pm 0.001$  มิลลิกรัม) ใส่ในถ้วยทนไฟพร้อมปิดฝานำมาชั่งน้ำหนัก
- นำไปเผาในเตาเผา ค่อยๆเพิ่มอุณหภูมิเตาเผาให้สูงขึ้น ไปที่อุณหภูมิ  $575 \pm 25$  องศาเซลเซียส จนได้น้ำหนักที่คงที่ นำถ้วยทนไฟออกจากเตาเผา เปิดฝาทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้นแล้วนำออกมาชั่งน้ำหนัก

โดยสามารถคำนวณปริมาณเถ้า (ร้อยละโดยน้ำหนัก) ได้จากสมการที่ 4.4

$$\text{ปริมาณเถ้า} = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างรวมถ้อยถนไฟหลังเผา} - \text{น้ำหนักถ้อยถนไฟ}}{\text{น้ำหนักของตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์}} \times 100 \quad (4.4)$$

4.3) ปริมาณสารระเหย (Volatile Matter) การวิเคราะห์หาปริมาณสารระเหยของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง ทำการวิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐานของ American Society for Testing and Materials (ASTM) E897-88 (2004) มีขั้นตอนดังนี้

- ชั่งตัวอย่างประมาณ 1 กรัม ( $\pm 0.001$  มิลลิกรัม) ใส่ในถ้อยถนไฟ นำมาชั่งน้ำหนัก
- นำไปเผาที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 นาที นำถ้อยถนไฟออกจากเตาเผา เปิดฝา ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้นแล้วนำออกมาชั่งน้ำหนัก โดยสามารถคำนวณปริมาณสารระเหย (ร้อยละโดยน้ำหนัก) ได้จากสมการที่ 4.5-4.6

$$\text{น้ำหนักที่หายไป} = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนเผา} - \text{น้ำหนักตัวอย่างหลังเผา}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนเผา}} \times 100 \quad (4.5)$$

$$\text{ปริมาณสารระเหย} = \text{น้ำหนักที่หายไป} - \text{ปริมาณความชื้น} \quad (4.6)$$

4.4) ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) การหาปริมาณคาร์บอนคงตัว (ร้อยละโดยน้ำหนัก) ของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.7

$$\text{ปริมาณคาร์บอนคงตัว} = 100 - (\text{ความชื้น} + \text{เถ้า} + \text{สารระเหย}) \quad (4.7)$$

5) Elemental Analysis การวิเคราะห์หาองค์ประกอบของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งในระดับโมเลกุลออกเป็นธาตุองค์ประกอบ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจนและซัลเฟอร์ ในตัวอย่าง โดยการเผาด้วยอุณหภูมิสูงภายใต้บรรยากาศออกซิเจน โดยใช้ Elemental Analyzer เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ และปริมาณออกซิเจนคำนวณได้จากสมการที่ 4.8

$$\text{O (\%wt)} = 100 - \text{H (\%wt)} - \text{C (\%wt)} - \text{N (\%wt)} - \text{S (\%wt)} - \text{Ash (\%wt)} \quad (4.8)$$

6) ปริมาณคลอไรด์ (Cl Content) การวิเคราะห์หาปริมาณคลอไรด์ในเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง โดยใช้เครื่อง X-Ray Fluorescence Spectrometer เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์

7) ปริมาณโลหะหนัก (Heavy Metal) การวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง มีขั้นตอนดังนี้

- นำตัวอย่างใส่ถ้วยทนไฟอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น ในกรณีที่วิเคราะห์หาปริมาณปรอทให้อบที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อป้องกันการสูญเสียของปรอท
- นำตัวอย่าง 0.5 กรัม มาย่อยด้วยกรดไนตริก 10 มิลลิลิตร ด้วยเครื่อง Microwave Digester
- นำตัวอย่างที่ถูกย่อยด้วยกรดแล้วมาทำการวิเคราะห์ต่อด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma Spectroscopy เพื่อวัดปริมาณโลหะหนัก

4.4.3.2 การทดสอบการเผาไหม้ วิเคราะห์หองศ์ประกอบของก๊าซที่เกิดขณะเผาไหม้ เช่น ก๊าซมีเทน ก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ เป็นต้น เพื่อนำก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้ไปใช้ประโยชน์ในกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรม โดยทำการทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งด้วยเตาแก๊สซีฟเฮอร์แบบไหลลง(ระดับห้องปฏิบัติการ) ของศูนย์วิจัยการเผาไหม้กากของเสีย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือมีจุดวัดอุณหภูมิ 8 จุด โดยใช้เทอร์มोकัปเปิลชนิดเค (Thermocouple type K) เป็นตัววัดอุณหภูมิ ต่อสายเข้า Data logger แปลงสัญญาณส่งเข้าบันทึกค่าในคอมพิวเตอร์ ปรับอัตราการจ่ายอากาศ 300 ลิตรต่อ นาที และทำการเก็บตัวอย่างก๊าซเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ได้ในช่วงเวลาที่อุณหภูมิในเตาเผาเริ่มคงที่ เก็บตัวอย่างจำนวน 3 ตัวอย่างห่างกันตัวอย่างละ 3 นาที แล้วนำมาวัดองค์ประกอบของก๊าซโดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography) ค่าความร้อนก๊าซเชื้อเพลิงคำนวณได้จากสมการที่ 4.9

$$\text{ค่าความร้อนก๊าซเชื้อเพลิง} = \frac{(\text{CO}\% \times 12.63) + (\text{CH}_4\% \times 35.88) + (\text{H}_2\% \times 10.78)}{100} \quad (4.9)$$

## บทที่ 5

### ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการนำขยะทั่วไปมาแปลงเป็นพลังงานทดแทนในรูปของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง โดยใช้ขยะภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเป็นกรณีศึกษา ทำการศึกษาเพื่อหาสภาวะในการอัดและประเภทของตัวประสานที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง ซึ่งส่งผลให้เชื้อเพลิงที่ได้มีความเหมาะสมสำหรับนำไปใช้ในกระบวนการเผาไหม้ของโรงงานปูนซีเมนต์และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด โดยแบ่งการวิจัยออกเป็น 3 ช่วง ดังนี้

ช่วงที่ 1 การเตรียมการวิจัย

ช่วงที่ 2 ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในขั้นตอนการผลิตเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง

ช่วงที่ 3 การวิเคราะห์สมบัติและการทดสอบการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง

#### 5.1 ช่วงที่ 1 ผลการเตรียมการวิจัย

##### 5.1.1 องค์ประกอบทางกายภาพของขยะ

ทำการสุ่มเก็บขยะโดยตรงจากอาคารต่างๆภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยไม่รวมขยะที่มาจากโรงอาหารและคัดแยกตัวอย่างขยะด้วยวิธี Quartering ตั้งแต่เดือนกรกฎาคมถึงกันยายน พ.ศ. 2560 เพื่อให้ได้ตัวแทนขยะและทราบถึงองค์ประกอบทางกายภาพของขยะโดยเฉลี่ย พบว่าขยะประเภทพลาสติกมีปริมาณมากที่สุดคือคิดเป็นร้อยละ 32.70 ของขยะทั้งหมด รองลงมาคือขยะประเภทกระดาษคือคิดเป็นร้อยละ 31.37 ของขยะทั้งหมด เศษอาหารและสารอินทรีย์คิดเป็นร้อยละ 27.57 ของขยะทั้งหมด ตามลำดับ และองค์ประกอบอื่นๆ แสดงดังตารางที่ 5.1

จากการสำรวจปริมาณกากกาแฟภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยพบว่ากากกาแฟที่เกิดขึ้นมีปริมาณโดยเฉลี่ยประมาณ 10 กิโลกรัมต่อร้านต่อวัน โดยอัตราการเกิดสูงสุดโดยเฉลี่ยประมาณ 15 กิโลกรัมต่อร้านต่อวัน ทั้งนี้ปริมาณกากกาแฟที่เกิดขึ้นจะขึ้นกับช่วงการเปิดปิดภาคเรียนของมหาวิทยาลัยด้วย จำนวนร้านกาแฟภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยมีทั้งหมด 12 ร้าน ดังนั้นปริมาณกากกาแฟที่เกิดขึ้นทั้งหมดเฉลี่ยคิดเป็น 120 กิโลกรัมต่อวัน

องค์ประกอบทางกายภาพของขยะมูลฝอยประเทศไทยมีปริมาณเศษอาหารและสารอินทรีย์ประมาณ ร้อยละ 60 ของขยะทั้งหมด ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับองค์ประกอบทางกายภาพของขยะภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยกับองค์ประกอบทางกายภาพของขยะมูลฝอยประเทศไทยจะเห็นว่าปริมาณ



เศษอาหารและสารอินทรีย์ของขยะภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยมีปริมาณน้อยกว่าขยะมูลฝอยประเทศไทยอยู่มาก เนื่องจากงานวิจัยนี้ทำการสุ่มเก็บตัวอย่างขยะที่เกิดจากอาคารเท่านั้นไม่รวมขยะที่เกิดจากโรงอาหาร

ตารางที่ 5.1 องค์ประกอบทางกายภาพของขยะภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยโดยเฉลี่ยตั้งแต่เดือนกรกฎาคมถึงกันยายน พ.ศ. 2560

องค์ประกอบ	ค่าองค์ประกอบ	
	ค่าเฉลี่ยโดยน้ำหนัก	สัดส่วนร้อยละของขยะทั้งหมด (%)
เศษอาหารและสารอินทรีย์	2.42	27.57
พลาสติก	2.87	32.70
กระดาษ	2.75	31.37
แก้ว	0.32	3.61
โลหะ	0.42	4.75
รวม	8.78	100.00

ตารางที่ 5.2 องค์ประกอบขยะประเภทกระดาษโดยเฉลี่ย

องค์ประกอบขยะประเภทกระดาษ	ค่าองค์ประกอบ		
	ค่าเฉลี่ยโดยน้ำหนัก	สัดส่วนของขยะกระดาษทั้งหมด (%)	สัดส่วนของขยะทั้งหมด (%)
กล่องกระดาษน้ำตาล	0.52	18.80	5.93
กระดาษสี*	0.08	3.00	0.91
กระดาษอาร์ตมัน*	0.03	1.20	0.34
กระดาษสำนักงาน	0.15	5.50	1.71
กระดาษหนังสือพิมพ์	0.18	6.70	2.05
กระดาษบรรจุภัณฑ์*	0.37	13.30	4.22
กระดาษชำระ*	1.42	51.50	16.20
รวม	2.75	100.00	31.37
*ส่วนที่รีไซเคิลไม่ได้	1.90	69.09	21.64

หมายเหตุ \* คือขยะกระดาษส่วนที่รีไซเคิลไม่ได้

จากตารางที่ 5.2 แสดงองค์ประกอบของขยะประเภทกระดาษโดยเฉลี่ย พบว่ากระดาษชำระมีสัดส่วนสูงที่สุดคือคิดเป็นร้อยละ 51.50 ของขยะกระดาษทั้งหมดและคิดเป็นร้อยละ 16.20 ของขยะทั้งหมด อันดับรองมาคือกล่องกระดาษน้ำตาลคิดเป็นร้อยละ 18.80 ของขยะกระดาษทั้งหมดและคิดเป็นร้อยละ 5.93 ของขยะทั้งหมด ขยะประเภทกระดาษบางส่วนสามารถนำกลับไปใช้ใหม่ได้และบางส่วนจะถูกส่งไปกำจัด โดยขยะกระดาษประเภท กระดาษสี กระดาษอาร์ตมัน กระดาษบรรจุภัณฑ์ กระดาษชำระ จัดเป็นขยะส่วนที่ไม่สามารถรีไซเคิลได้คิดเป็นร้อยละ 69.09 ของขยะกระดาษทั้งหมดและคิดเป็นร้อยละ 21.64 ของขยะทั้งหมด

ตารางที่ 5.3 องค์ประกอบขยะประเภทพลาสติกโดยเฉลี่ย

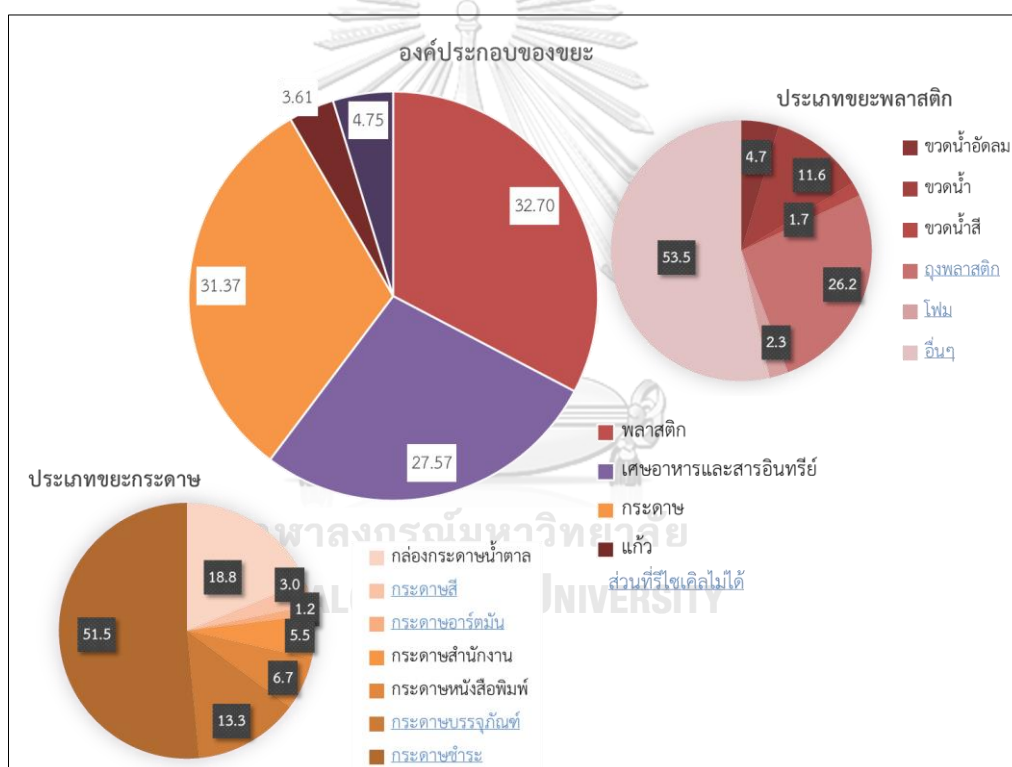
องค์ประกอบขยะ ประเภทพลาสติก	ค่าองค์ประกอบ		
	ค่าเฉลี่ยโดย น้ำหนัก	สัดส่วนของขยะพลาสติก ทั้งหมด (%)	สัดส่วนของขยะทั้งหมด (%)
ขวดน้ำอ่อน	0.13	4.70	1.49
ขวดน้ำดื่ม	0.33	11.60	3.77
ขวดน้ำสี	0.05	1.70	0.57
ถุงพลาสติก*	0.75	26.20	8.58
โฟม*	0.07	2.30	0.80
อื่นๆ*	1.53	53.30	17.49
รวม	2.87	100	32.7
*ส่วนที่รีไซเคิลไม่ได้	2.35	82.17	26.77

หมายเหตุ \* คือขยะพลาสติกส่วนที่รีไซเคิลไม่ได้

จากตารางที่ 5.3 แสดงองค์ประกอบของขยะประเภทพลาสติกโดยเฉลี่ย พบว่าขยะพลาสติกประเภทอื่นๆ เช่น แก้วน้ำพลาสติก ถุงขนมพลาสติก บรรจุภัณฑ์พลาสติก เป็นต้น มีสัดส่วนสูงที่สุดคือคิดเป็นร้อยละ 53.30 ของขยะพลาสติกทั้งหมดและคิดเป็นร้อยละ 17.49 ของขยะทั้งหมด อันดับรองมาคือถุงพลาสติกคิดเป็นร้อยละ 26.20 ของขยะพลาสติกทั้งหมดและคิดเป็นร้อยละ 8.58 ของขยะทั้งหมด ขยะพลาสติกบางส่วนสามารถนำไปขายเพื่อนำกลับไปหลอมใช้ใหม่ได้และบางส่วนที่ไม่สามารถนำกลับไปใช้ใหม่ได้จะถูกส่งไปกำจัดหรือตกค้างตามพื้นที่ โดยขยะพลาสติกประเภท ถุงพลาสติก โฟม และพลาสติกประเภทอื่นๆ จัดเป็นขยะส่วนที่ไม่สามารถรีไซเคิลได้คิดเป็นร้อยละ

82.17 ของขยะพลาสติกทั้งหมดและคิดเป็นร้อยละ 26.77 ของขยะทั้งหมด ซึ่งจะเห็นได้ว่าขยะพลาสติกส่วนที่รีไซเคิลไม่ได้มีปริมาณค่อนข้างสูงมาก

จากรูปที่ 5.1 สรุปลองค์ประกอบของขยะรวม จะเห็นว่าเมื่อพิจารณาแยกประเภทของขยะกระดาษและพลาสติก มีส่วนที่รีไซเคิลไม่ได้คิดเป็นร้อยละ 21.64 และ 26.77 ของขยะทั้งหมดตามลำดับ ซึ่งขยะส่วนนี้มีค่าความร้อนที่สูงเพียงพอสำหรับนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงเพื่อใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม หากนำขยะส่วนนี้มาผลิตเป็นเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งจะสามารถลดปริมาณขยะที่จะถูกส่งไปกำจัดได้ร้อยละ 48.41 ของขยะทั้งหมด ถือเป็นความช่วยเหลือในการลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดขยะ ลดปริมาณขยะที่จะถูกส่งไปยังหลุมฝังกลบและยังช่วยลดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงถ่านหินในกระบวนการเผาไหม้ของโรงงานอุตสาหกรรม



รูปที่ 5.1 องค์ประกอบของขยะ

#### 5.1.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย

ตารางที่ 5.4 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนเบื้องต้นของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย พบว่าพลาสติกมีค่าความร้อนสูงที่สุดคืออยู่ในช่วง 38.0-45.4 เมกะจูลต่อกิโลกรัม เนื่องจากเป็นผลิตภัณฑ์จากปิโตรเลียมมีคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบหลัก (Hydrocarbon compound) รongมา

คือกากกาแฟและกระดาษคืออยู่ในช่วง 21.1-21.8 เมกะจูลต่อกิโลกรัม และ 13.6-22.2 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ตัวประสานที่ใช้ในการวิจัยโพลีไวนิลแอลกอฮอล์มีค่าความร้อนสูงที่สุดคือ 22.9 เมกะจูลต่อกิโลกรัม รองมาคือไบจามจูรีที่ผ่านการหมักแล้วคือ 8.3 เมกะจูลต่อกิโลกรัม และดินสอพองที่จุดไฟไม่ติด

ตารางที่ 5.4 ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนเบื้องต้นของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย

วัสดุที่ใช้	ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)
<b>กระดาษ</b>	
กล่องกระดาษบรรจุภัณฑ์ กล่องขนม	13.6
กล่องนมที่มีลูมิเนียม	22.2
กระดาษทั่วไป	16.1
<b>พลาสติก</b>	
ถุงพลาสติกใส ถุงร้อน ถุงหูหิ้ว	45.4
ถุงพลาสติกสีที่มีลูมิเนียม ถุงขนมขบเคี้ยว	38.0
ถุงพลาสติกสีที่ไม่มีลูมิเนียม	41.5
<b>กากกาแฟ</b>	
อินทนิล	21.6
ทูรู	21.1
อเมซอล	21.8
<b>ตัวประสานที่ใช้ในงานวิจัย</b>	
ดินสอพอง	จุดไม่ติด
ไบจามจูรีหมัก	8.3
โพลีไวนิลแอลกอฮอล์	22.9

ตารางที่ 5.5 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุและความชื้นเบื้องต้นของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย ค่าความร้อนของวัสดุจะขึ้นกับองค์ประกอบของธาตุและความชื้นเป็นหลัก วัสดุที่มีปริมาณคาร์บอนและไฮโดรเจนสูงจะส่งผลให้มีค่าความร้อนสูง ขณะที่วัสดุที่มีปริมาณความชื้นสูงจะส่งผลให้มีค่าความร้อนต่ำ ซึ่งปริมาณความชื้นของขยะสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามฤดูกาล กากกาแฟมีปริมาณความชื้นสูงที่สุดคือร้อยละ 35.96 โดยน้ำหนัก โดยเกณฑ์กำหนดของ EURITS (2000) กำหนดให้เชื้อเพลิงที่ใช้สำหรับเผาไหม้ในเตาเผาปูนซีเมนต์ต้องมีปริมาณความชื้นไม่เกินร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก (Garces และคณะ, 2016)

ใบจามจรีที่ผ่านการหมักแล้วมีปริมาณความชื้นและไนโตรเจนสูงที่สุดคือร้อยละ 20.23 และ 1.08 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ โดยมาตรฐานคุณภาพเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งในประเทศอังกฤษกำหนดเชื้อเพลิงต้องมีปริมาณของไนโตรเจนไม่เกินร้อยละ 0.5-1.0 โดยน้ำหนัก ซึ่งในกระบวนการเผาไหม้ที่ใช้แรงดันสูงหรือกระบวนการเผาไหม้ที่เชื้อเพลิงมีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบจะเป็นสาเหตุหลักให้เกิดก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน (NO<sub>x</sub>) ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดฝนกรด มลภาวะกับสิ่งแวดล้อม ดินเปรี้ยว แหล่งน้ำมีสภาพเป็นกรด เป็นต้น ดังนั้นการใช้ใบจามจรีที่ผ่านการหมักแล้วเป็นตัวประสานควรใช้ในปริมาณที่เหมาะสม

ตารางที่ 5.5 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุและความชื้นเบื้องต้นของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย

วัสดุ	คาร์บอน (ร้อยละโดย น้ำหนัก)	ไฮโดรเจน (ร้อยละโดย น้ำหนัก)	ไนโตรเจน (ร้อยละโดย น้ำหนัก)	ซัลเฟอร์ (ร้อยละโดย น้ำหนัก)	ความชื้น (ร้อยละโดย น้ำหนัก)
ขยะที่ใช้ในงานวิจัย					
พลาสติก	80.29	15.39	0.39	0.00	0.18
กระดาษ	41.15	8.83	0.00	0.03	5.53
กากกาแฟ	23.38	9.24	0.88	0.07	35.96
ตัวประสานที่ใช้ในงานวิจัย					
ดินสอพอง	9.97	0.50	0.00	0.00	0.70
ใบจามจรีหมัก	18.69	6.68	1.08	0.24	20.23
โพลีไวนิลแอลกอฮอล์	50.03	9.26	0.00	0.05	6.18

### 5.1.3 ผลการลดขนาดขยะ

หลังจากเก็บรวบรวมขยะและคัดแยกประเภทแล้วจึงนำขยะที่มีการปนเปื้อนมาทำความสะอาดตากแห้งและลดขนาดขยะโดยใช้เครื่อง Shear Shredder ขยะที่ผ่านตัดแล้วจะมีขนาดประมาณ 2 เซนติเมตร ขนาดของขยะก่อนที่จะนำมาอัดถือว่าเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญในการอัดแท่งเชื้อเพลิง ขยะที่มีขนาดใหญ่เกินไปจะส่งผลให้การกวนผสมไม่ดีขยะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน องค์ประกอบทางกายภาพไม่สม่ำเสมอ แท่งเชื้อเพลิงเกาะตัวเป็นก้อนได้ไม่ดีและต้องใช้แรงดันในการอัดสูงขึ้น

## 5.2 ช่วงที่ 2 ผลการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในขั้นตอนการผลิตเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง

5.2.1 การทดลองที่ 1 ผลการทดลองหาสัดส่วนของพลาสติก กระจาดและกากกาแพที่เหมาะสม

ทำการทดลองหาสัดส่วนของพลาสติก กระจาดและกากกาแพที่เหมาะสม โดยการอัดแท่งเชื้อเพลิงแบบใช้ความร้อนและไม่ใช้ตัวประสาน ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส แรงดัน 100 บาร์ และเวลา 15 นาที ณ สัดส่วนต่างๆ จากนั้นนำเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่ได้มาวิเคราะห์หาค่าความร้อน ค่ากำลังต้านทานแรงอัดและความหนาแน่น โดยค่าที่วิเคราะห์ได้แสดงดังตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.6 ผลการวิเคราะห์สมบัติเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่สัดส่วนต่างๆของขยะ

ชุดการทดลอง	สัดส่วนโดยน้ำหนัก			ผลการวิเคราะห์		
	พลาสติก	กระจาด	กากกาแพ	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	ค่ากำลังต้านทานแรงอัด (เมกะปาสคาล)	ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)
เกณฑ์กำหนดสมบัติเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง				มากกว่า 600	มากกว่า 0.35	มากกว่า 15.0
A1	1	1	1	749.9	15.0	28.2
A2	5	3	1	757.4	21.4	25.8
A3	5	1	3	737.0	16.3	32.9
A4	3	5	1	811.9	25.6	21.9
A5	3	1	5	679.7	8.9	24.9

จากตารางที่ 5.6 พบว่าการทดลองทั้ง 5 สัดส่วน ให้ค่าความหนาแน่น ค่ากำลังต้านทานแรงอัด และค่าความร้อนผ่านเกณฑ์กำหนดสมบัติของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง (ตารางที่ 3.3) ค่าความหนาแน่น และค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงจะขึ้นอยู่กับค่าความหนาแน่นและค่าความร้อนเบื้องต้นของวัสดุที่ใช้ ความหนาแน่นใช้บอกถึงการขนส่งและการจัดเก็บ เชื้อเพลิงที่มีความหนาแน่นสูงจะมีค่าความร้อนต่อหน่วยสูงขึ้น จากการทดลองพบว่าที่สัดส่วน 3:5:1 (A4) มีค่าความหนาแน่นและค่ากำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดคือ 811.9 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และ 25.6 เมกะปาสคาล ตามลำดับ ซึ่งสัดส่วนที่มีกระจาดสูงจะมีค่าความหนาแน่นและค่ากำลังต้านทานแรงอัดสูงขึ้นด้วย เนื่องจากกระจาดมีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบ เมื่ออัดที่อุณหภูมิและแรงดันสูงจะทำให้ปล่อยลิกนินออกมาเป็นตัวประสานเพื่อช่วยในการยึดเกาะ ขณะที่สัดส่วน 5:1:3 (A3) มีค่าความร้อนสูงที่สุดคือ 32.9 เมกะจูลต่อกิโลกรัม เนื่องจากปริมาณของพลาสติกมีผลต่อค่าความร้อน เชื้อเพลิงที่มีสัดส่วนของพลาสติกสูงจะส่งผลให้ค่าความร้อนสูง ปริมาณของกากกาแพส่งผลต่อค่ากำลังต้านทานแรงอัด เชื้อเพลิงที่มีสัดส่วนของกากกาแพสูงจะส่งผลให้ค่ากำลังต้านทานแรงอัดต่ำ เนื่องจากกากกาแพมีลักษณะร่วนและมีขนาดเล็กกว่า

ขยะอื่นๆ ส่งผลให้ในขณะกวนผสมกากกาแพตตกอยู่ส่วนล่างของโม่ผสม ขยะไม่เป็นเนื้อเดียวกันยากต่อการเกาะตัวกันเป็นแท่ง เมื่อโดนแรงกดจึงแตกตัวได้ง่ายกว่าสัดส่วนอื่นๆ โดยที่สัดส่วน 3:1:5 (A5) มีค่ากำลังต้านทานแรงอัด ที่สุดคือ 8.9 เมกะปาสคาล ซึ่งค่ากำลังต้านทานแรงอัดบอกลถึงความเปราะและแตกร่วนของเชื้อเพลิง ที่สัดส่วน 5:3:1 (A2) มีปริมาณปริมาณพลาสติกสูงที่สุด ขณะที่สัดส่วน 3:5:1 (A4) มีปริมาณกระดาษสูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นของแท่งเชื้อเพลิงพบว่า ที่สัดส่วน 3:5:1 มีค่าความหนาแน่นสูงกว่าที่สัดส่วน 5:3:1 เนื่องจากขยะกระดาษมีความหนาแน่นเบื้องต้นสูงกว่าขยะพลาสติกคือขยะกระดาษมีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 76-152 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรขึ้นอยู่กับชนิดของกระดาษ ขณะที่พลาสติกมีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 39-78 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรขึ้นอยู่กับชนิดของพลาสติก (EPA, 2017)

โดยผู้วิจัยได้เลือกใช้สัดส่วนขยะ 5:1:3 เป็นสัดส่วนที่เหมาะสมเพื่อใช้ทำการทดลองขั้นต่อไป เนื่องจากเป็นสัดส่วนที่ให้ค่าความร้อนสูงที่สุด

#### 5.2.2 การทดลองที่ 2 ผลการทดลองหาสภาวะในการอัดขึ้นรูปแท่งเชื้อเพลิงที่เหมาะสม

ทำการอัดแท่งเชื้อเพลิงโดยใช้ความร้อนและไม่ใช้ตัวประสานในการอัด ณ สภาวะต่างๆ โดยใช้สัดส่วนขยะที่ให้ค่าความร้อนสูงสุดจากการทดลองที่ 5.2.1 คือ 5:1:3 จากนั้นนำเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่ได้มาวิเคราะห์หาค่าความร้อน ค่ากำลังต้านทานแรงอัดและความหนาแน่น โดยค่าที่วิเคราะห์ได้แสดงดังตารางที่ 5.7

ตารางที่ 5.7 ผลการวิเคราะห์สมบัติเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่สภาวะต่างๆ ในการอัดขึ้นรูปแท่งเชื้อเพลิง

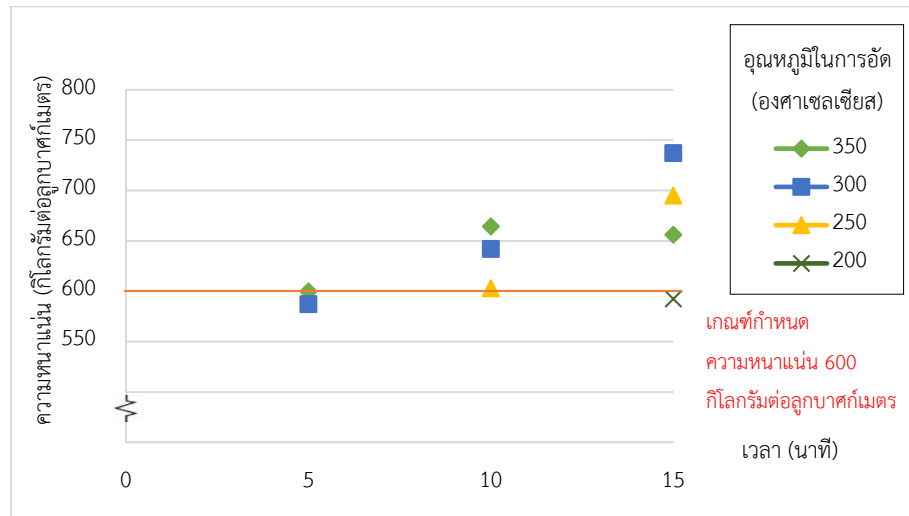
ชุดการทดลอง	สภาวะที่ใช้ในการอัด			ผลการวิเคราะห์		
	แรงดัน (บาร์)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	ค่ากำลังต้านทานแรงอัด (เมกะปาสคาล)	ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)
เกณฑ์กำหนดสมบัติเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง				มากกว่า 600	มากกว่า 0.35	มากกว่า 15.0
B1	100	180	5	ไม่เกาะเป็นแท่ง	N/A	35.2
B2			10	อัดได้เล็กน้อย	N/A	34.9
B3			15	อัดได้ปานกลาง	N/A	33.9
B4		200	5	อัดได้เล็กน้อย	N/A	33.0
B5			10	อัดได้ปานกลาง	N/A	33.7
B6			15	592.3	17.6	34.5

ตารางที่ 5.7 ผลการวิเคราะห์สมบัติเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่สภาวะต่างๆ ในการอัดขึ้นรูปแท่งเชื้อเพลิง (ต่อ)

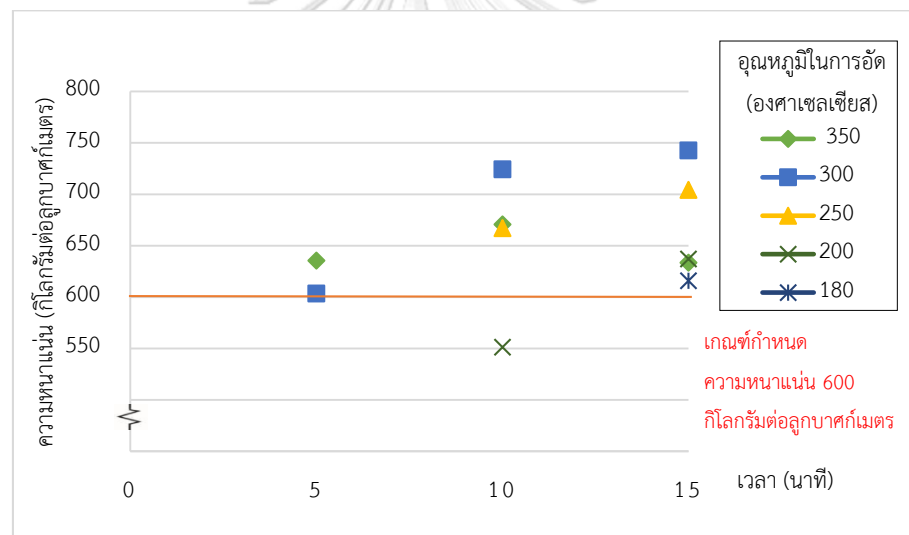
ชุดการทดลอง	สภาวะที่ใช้ในการอัด			ผลการวิเคราะห์			
	แรงดัน (บาร์)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	ค่ากำลังต้านทานแรงอัด (เมกะปาสคาล)	ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	
เกณฑ์กำหนดสมบัติเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง				มากกว่า 600	มากกว่า 0.35	มากกว่า 15.0	
B7	100	250	5	อัดได้เล็กน้อย	N/A	34.8	
B8			10	603.0	21.2	35.7	
B9			15	695.0	13.5	34.4	
B10		300	5	587.0	15.7	36.7	
B11			10	641.9	16.7	34.4	
B12			15	737.0	16.3	34.1	
B13		350	5	599.8	20.4	35.2	
B14			10	664.4	15.3	32.5	
B15			15	656.1	14.8	34.8	
B16		150	180	5	ไม่เกาะเป็นแท่ง	N/A	35.1
B17				10	อัดได้เล็กน้อย	N/A	36.5
B18				15	616.0	16.3	35.1
B19			200	5	อัดได้เล็กน้อย	N/A	36.3
B20				10	551.4	19.4	33.0
B21				15	637.1	13.2	36.4
B22	250		5	อัดได้ปานกลาง	N/A	33.5	
B23			10	667.2	13.0	33.3	
B24			15	704.4	16.6	35.6	
B25	300		5	603.5	17.5	34.6	
B26			10	724.4	15.0	32.1	
B27			15	742.7	15.1	36.2	
B28	350		5	635.6	16.2	32.4	
B29			10	670.8	14.8	36.1	
B30			15	633.5	18.4	36.7	

หมายเหตุ N/A หมายถึง ไม่ทำการวิเคราะห์เนื่องจากแท่งเชื้อเพลิงเกาะตัวกันเป็นแท่งได้ไม่ดี มีค่าความหนาแน่นต่ำกว่า 600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร





รูปที่ 5.2 ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่แรงดัน 100 บาร์ ในสถานะต่างๆ



รูปที่ 5.3 ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่แรงดัน 150 บาร์ ในสถานะต่างๆ

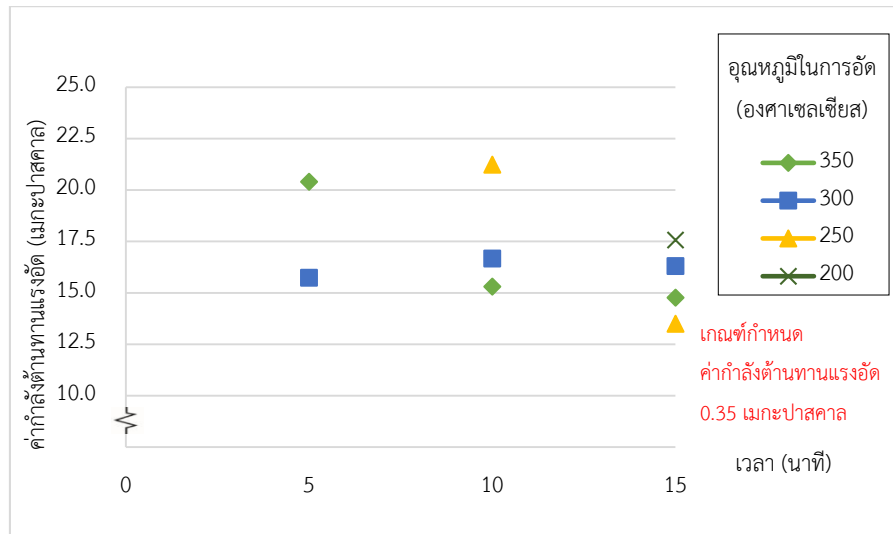
ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่สภาวะการอัดอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เวลา 15 นาที และแรงดัน 150 บาร์ (B27) ให้ความหนาแน่นสูงสุดคือ 742.7 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ลำดับรองมาคือที่สภาวะการอัดอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เวลา 15 นาที และแรงดัน 100 บาร์ (B12) ให้ความหนาแน่น 737.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งจะเห็นว่าการเพิ่มแรงดันในการอัดแท่งเชื้อเพลิงมีค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเล็กน้อยทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเวลาในการอัดด้วย โดยที่แรงดัน 100 บาร์เพียงพอสำหรับการอัดแท่งเชื้อเพลิงถ้ามีอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสม

จากรูปที่ 5.2 และ 5.3 แสดงความหนาแน่นของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่สภาวะต่างๆ พบว่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ เวลา และแรงดันในการอัด อุณหภูมิที่ต่ำกว่า 180 องศา

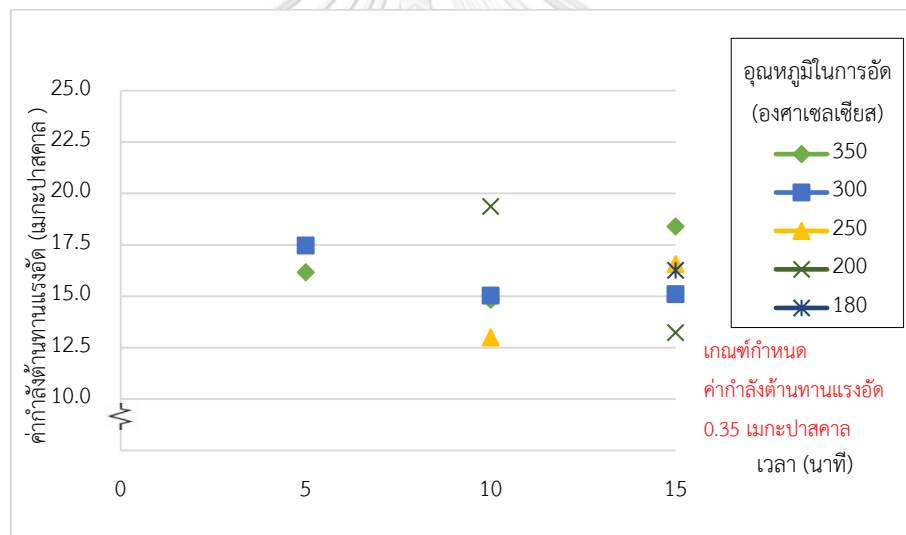
เซลเซียส จะทำให้เชื้อเพลิงรวมตัวเป็นแท่งได้ไม่ดีต้องใช้เวลานานในการอัดแท่งเพื่อให้ได้ค่าความหนาแน่นผ่านเกณฑ์กำหนด ASTM E-75 RDF-5 (มากกว่า 600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) ซึ่งเชื้อเพลิงที่มีความหนาแน่นต่ำจะส่งผลให้เชื้อเพลิงเผาไหม้เร็ว ไม่ทนไฟและค่าความร้อนต่ำ ส่วนอุณหภูมิในการอัดที่สูงกว่า 300 องศาเซลเซียส จะทำให้แท่งเชื้อเพลิงหนาแน่นน้อยลงเนื่องจากพลาสติกหลอมละลายเกินความสามารถในการช่วยประสาน พลาสติกเป็นปัจจัยร่วมให้แท่งเชื้อเพลิงมีค่าความหนาแน่นสูงขึ้นเมื่อใช้อุณหภูมิและเวลาในการอัดที่เหมาะสม โดยพลาสติกที่ใช้ในงานวิจัยนี้ส่วนใหญ่เป็นพลาสติกประเภทพอลิเอทิลีนและพอลิโพรพิลีนมีจุดหลอมเหลวอยู่ในช่วง 135-170 องศาเซลเซียสและจุดสลายตัวอยู่ในช่วง 328-450 องศาเซลเซียส (Hilado, 1998) จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิในการอัดที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 250-300 องศาเซลเซียส กล่าวคืออุณหภูมิที่ใช้ในการอัดควรมีค่าสูงกว่าจุดหลอมเหลวแต่ต้องไม่เกินจุดสลายตัว ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อเปรียบเทียบความหนาแน่นที่อุณหภูมิในการอัด 300 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิในการอัด 350 องศาเซลเซียส เวลาในการอัด 10-15 นาที แท่งเชื้อเพลิงมีแนวโน้มค่าความหนาแน่นลดลง เนื่องจากพลาสติกได้รับความร้อนสูงเกินไปการเพิ่มเวลาและแรงดันในการอัดไม่ส่งผลต่อความหนาแน่น

โดยอุณหภูมิในการอัดเป็นปัจจัยที่เป็นข้อจำกัดของการขึ้นรูป เนื่องจากสมบัติเฉพาะของพลาสติก ส่วนเวลาในการอัดจะขึ้นกับอุณหภูมิในการอัด การใช้อุณหภูมิในการอัดที่สูงขึ้นสามารถช่วยลดเวลาในการอัดได้ เมื่อเปรียบเทียบความหนาแน่นที่อุณหภูมิในการอัดเดียวกัน ความหนาแน่นจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาและแรงดันในการอัด ดังนั้นอุณหภูมิ เวลา และแรงดันในการอัดต่างส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความหนาแน่นของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง

การอัดแท่งเชื้อเพลิงต้องมีสภาวะในการอัดที่เหมาะสมจึงจะสามารถอัดแท่งได้ ซึ่งสภาวะในการอัดที่เหมาะสมนั้นจะขึ้นกับชนิดของวัสดุที่นำมาอัดแท่งเชื้อเพลิง เช่นเดียวกับงานของ Chiemchaisri และคณะ (2010) กล่าวว่าไม่จำเป็นต้องใช้อุณหภูมิในการอัดสูงแต่ควรใช้ให้เหมาะสม การอัดที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมส่งผลให้แท่งเชื้อเพลิงไม่เกาะกันเป็นก้อน ส่วนการอัดที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมส่งผลให้เชื้อเพลิงมีปริมาณสารระเหยต่ำ



รูปที่ 5.4 ค่ากำลังต้านทานแรงอัดของเชื้อเพลิงขยะอัดแห้งที่แรงดัน 100 บาร์ ในสภาวะต่างๆ



รูปที่ 5.5 ค่ากำลังต้านทานแรงอัดของเชื้อเพลิงขยะอัดแห้งที่แรงดัน 150 บาร์ ในสภาวะต่างๆ

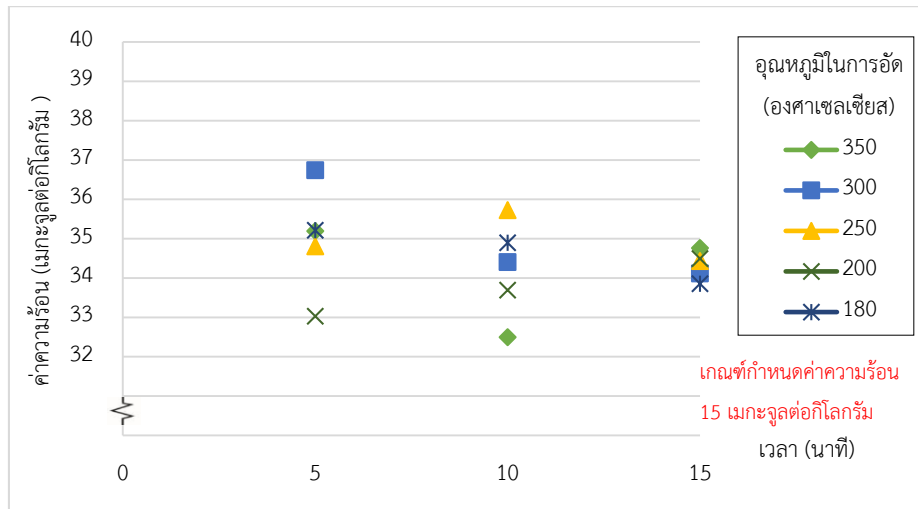
ค่ากำลังต้านทานแรงอัดของเชื้อเพลิงขยะอัดแห้งที่สภาวะการอัดอุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เวลา 10 นาที และแรงดัน 100 บาร์ ให้ค่ากำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดคือ 21.2 เมกะปาสคาล (ความหนาแน่น 603.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) รองมาคือที่สภาวะการอัดอุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เวลา 5 นาที และแรงดัน 100 บาร์ ให้ค่ากำลังต้านทานแรงอัด 20.4 เมกะปาสคาล (ความหนาแน่น 599.8 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

จากรูปที่ 5.4 และ 5.5 แสดงค่ากำลังต้านทานแรงอัดของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่สภาวะต่างๆ พบว่าทุกสภาวะที่สามารถอัดแท่งเชื้อเพลิงได้ในการทดลองนี้มีค่ากำลังต้านทานแรงอัดผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนของถ่านอัดแท่งทั้งหมด (มากกว่า 0.35 เมกะปาสคาล)

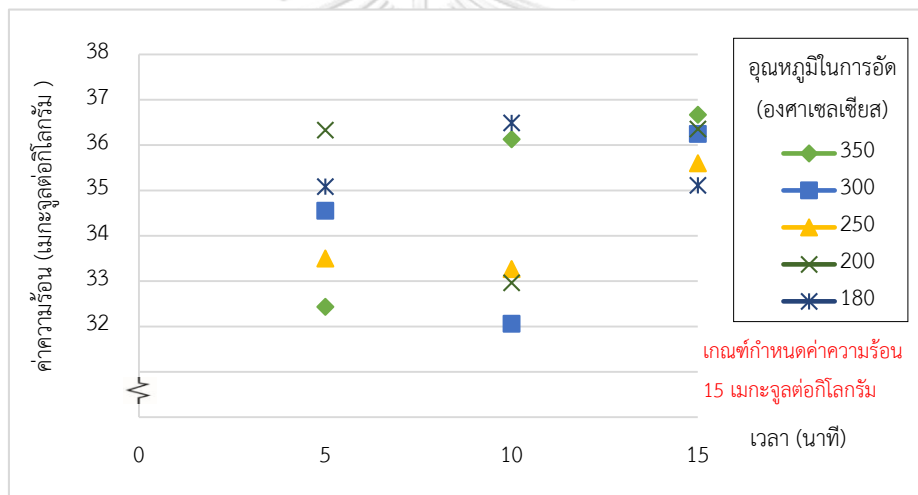
การวิเคราะห์ค่ากำลังต้านทานแรงอัดเพื่อทดสอบความต้านทานต่อแรงกดอัดภายในเนื้อวัสดุทำได้โดยกดเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งด้วยแรงและเวลาที่สม่ำเสมอแล้วบันทึกค่าแรงอัดสูงสุดที่ทำให้เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งแตกหรือมีความสูงลดลงเหลือเพียงหนึ่งในสามของความสูงเดิม (Sukangkana Lee) จากการวิเคราะห์เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่มีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 550-600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีแนวโน้มให้ค่ากำลังต้านทานแรงอัดสูงเนื่องจากองค์ประกอบหลักของแท่งเชื้อเพลิงคือพลาสติก ซึ่งพลาสติกเป็นวัสดุที่มีความเหนียว เมื่อเจอแรงอัดส่งผลให้แท่งเชื้อเพลิงมีความแน่นขึ้น หลังจากนั้นจึงค่อยแตกออก ต่างจากเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่มีความหนาแน่นสูงกว่า 600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เมื่อเจอแรงอัดส่งผลให้แท่งเชื้อเพลิงแตกออกเลยเนื่องจากมีความแน่นอยู่แล้ว

การอัดเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่สภาวะต่างกันจะให้รูปทรงและพื้นผิวหน้าตัดที่ต่างกัน ซึ่งส่งผลต่อการกดอัดแท่งเชื้อเพลิง แท่งเชื้อเพลิงที่มีพื้นผิวหน้าตัดไม่เรียบหรือมีรูปทรงเอียง แรงอัดของเครื่องทดสอบไม่กระทำตามแนวแกนส่งผลให้แท่งเชื้อเพลิงรับแรงกดไม่ทั่วทั้งพื้นผิวหน้าตัด โดยเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งจะต้องมีพื้นผิวหน้าตัดที่รับแรงอัดเรียบและตั้งฉากกับแกนขึ้นทดสอบ

ค่ากำลังต้านทานแรงอัดนิยมใช้ทดสอบวัสดุที่มีสมบัติเปราะจะให้ผลถูกต้องแม่นยำกว่าการทดสอบกับวัสดุที่มีความเหนียว (Sukangkana Lee) กล่าวคือเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่ผลิตจากวัสดุที่มีความเหนียวไม่แนะนำให้วิเคราะห์ค่ากำลังต้านทานแรงอัด เนื่องจากผลการวิเคราะห์อาจจะไม่ได้ค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่แท้จริง ดังนั้นปัจจัยที่มีผลต่อค่ากำลังต้านทานแรงอัดของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งคือชนิดของวัสดุที่นำมาอัดแท่ง รูปทรงและพื้นผิวหน้าตัดของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งมากกว่าสภาวะในการอัด Jamradloedluk และ Lertsatitthanakorn (2014) กล่าวว่าสัดส่วนของวัสดุและตัวประสานที่นำมาผลิตเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งมีผลต่อสมบัติของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งมากกว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการอัด



รูปที่ 5.6 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงขยะอัดแห้งที่แรงดัน 100 บาร์ ในสภาวะต่างๆ



รูปที่ 5.7 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงขยะอัดแห้งที่แรงดัน 150 บาร์ ในสภาวะต่างๆ

ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงขยะอัดแห้งที่สภาวะการอัดอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เวลา 5 นาที และแรงดัน 100 บาร์ (B10) และสภาวะการอัดอุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เวลา 15 นาที และแรงดัน 150 บาร์ (B30) ให้ค่าความร้อนสูงสุดคือ 36.7 เมกะจูลต่อกิโลกรัม

จากรูปที่ 5.6 และ 5.7 แสดงค่าความร้อนของเชื้อเพลิงขยะอัดแห้งที่สภาวะต่างๆ พบว่าค่าความร้อนของเชื้อเพลิงขยะอัดแห้งของทุกสภาวะมีค่าใกล้เคียงกันคืออยู่ในช่วง 32-36 เมกะจูลต่อกิโลกรัม กล่าวคือเชื้อเพลิงที่มีสัดส่วนเดียวกันจะให้ค่าความร้อนใกล้เคียงกัน ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงจะขึ้นกับวัสดุที่นำมาอัดและความชื้นซึ่งโดยทั่วไปอุณหภูมิและเวลาในการอัดมีผลต่อค่าความร้อนแต่เนื่องจากวัสดุที่นำมาอัดแห้งในงานวิจัยนี้หลังจากล้างทำความสะอาดได้ทำการตากแห้ง

ก่อนที่จะนำไปลดขนาดและหลังจากอัดแห้งแล้วได้นำไปตากแดดเพื่อป้องกันการเกิดเชื้อราจึงส่งผลให้ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงขยะอัดแห้งที่ได้มีค่าความร้อนที่ใกล้เคียงกัน

จากการทดลองที่ 2 (ข้อ 5.2.2) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการอัดแห้งเชื้อเพลิงขยะ พบว่าที่แรงดัน 100 บาร์เพียงพอในการอัด อุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 250-300 องศาเซลเซียสและเวลาจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในการอัด โดยผู้วิจัยเลือกสภาวะการอัดอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เวลา 10 นาที และแรงดัน 150 บาร์ ซึ่งให้ความหนาแน่น 724.4 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่ากำลังต้านทานแรงอัด 15.0 เมกะปาสคาล และค่าความร้อน 32.1 เมกะจูลต่อกิโลกรัม (B26) เป็นสภาวะที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการทดลองขั้นต่อไป เนื่องจากให้ค่าความหนาแน่นสูงเป็นอันดับ 3 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความหนาแน่นอันดับ 1 (B27) และ 2 (B12) มีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยแต่ใช้เวลาในการอัดนานกว่าถึง 5 นาที ผู้วิจัยจึงเลือกที่จะเพิ่มแรงดันในการอัดเพื่อลดเวลาในการอัดซึ่งช่วยให้ประหยัดพลังงานในระหว่างอัดมากกว่า

5.2.3 การทดลองที่ 3 ผลการทดลองหาประเภทของตัวประสานและสัดส่วนการใช้ที่เหมาะสมทำการอัดแห้งเชื้อเพลิงโดยใช้ความร้อนและตัวประสานในการอัด โดยใช้สัดส่วนขยะที่ให้ค่าความร้อนสูงสุดจากการทดลองที่ 1 (ข้อ 5.2.1) คือ 5:1:3 ทำการผสมตัวประสานในสัดส่วนการใช้ต่างๆ แล้วอัดแห้งเชื้อเพลิงในสภาวะที่เหมาะสมซึ่งได้จากผลการทดลองที่ 2 (ข้อ 5.2.2) คือ สภาวะแรงดัน 150 บาร์ อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส และเวลา 10 นาที จากนั้นนำเชื้อเพลิงขยะอัดแห้งที่ได้มาวิเคราะห์หาค่าความร้อน ค่ากำลังต้านทานแรงอัดและความหนาแน่น โดยค่าที่วิเคราะห์ได้แสดงดังตารางที่ 5.8

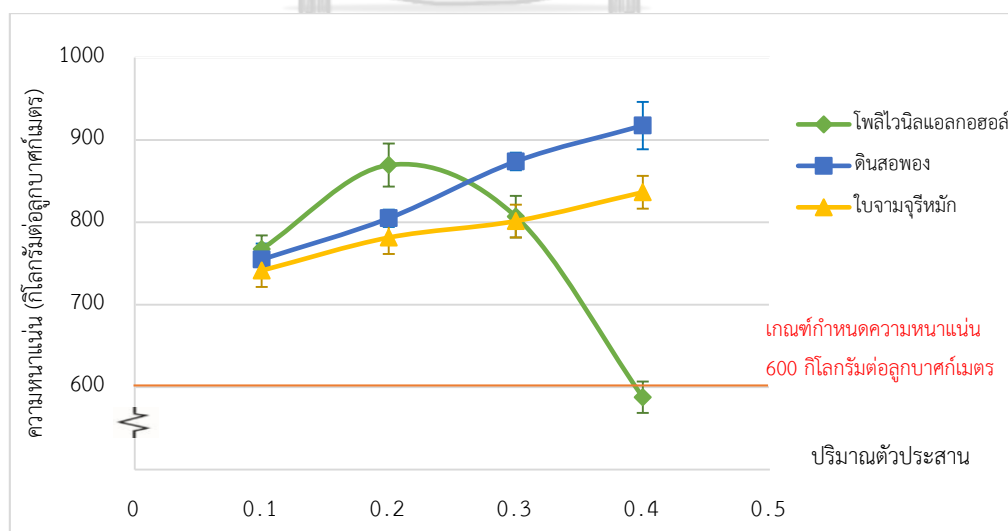
ตารางที่ 5.8 ผลการวิเคราะห์สมบัติเชื้อเพลิงขยะอัดแห้งที่ประเภทของตัวประสานและสัดส่วนการใช้ต่างๆในการอัดขึ้นรูปแห้งเชื้อเพลิง

ชุดการทดลอง	ตัวประสาน	สัดส่วนการใช้	ผลการวิเคราะห์		
			ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	ค่ากำลังต้านทานแรงอัด(เมกะปาสคาล)	ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)
เกณฑ์กำหนดสมบัติเชื้อเพลิงขยะอัดแห้ง			มากกว่า 600	มากกว่า 0.35	มากกว่า 15.0
B26	-	-	724.4	15.0	32.1
C1	โพลีไวนิลแอลกอฮอล์	0.1	767.5	3.8	34.2
C2		0.2	869.5	3.8	33.3
C3		0.3	806.9	3.3	30.9
C4		0.4	587.8	N/A	30.9

ตารางที่ 5.8 ผลการวิเคราะห์สมบัติเชิงกลของตัวประสานและสัดส่วนการใช้ต่างๆในการอัดขึ้นรูปแท่งเชื้อเพลิง (ต่อ)

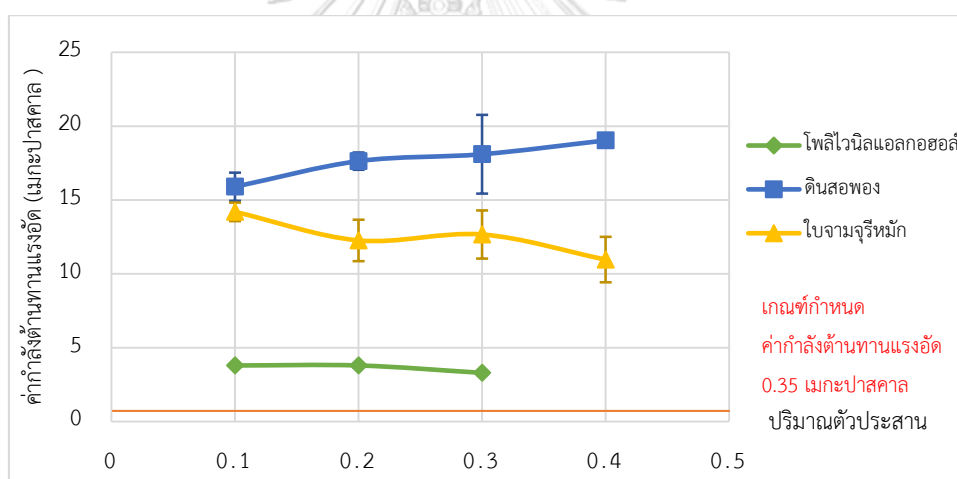
ชุดการทดลอง	ตัวประสาน	สัดส่วนการใช้	ผลการวิเคราะห์		
			ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	ค่ากำลังต้านทานแรงอัด(เมกะปาสคาล)	ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)
เกณฑ์กำหนดสมบัติเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง			มากกว่า 600	มากกว่า 0.35	มากกว่า 15.0
B26	-	-	724.4	15.0	32.1
C5	ดินสอพอง	0.1	754.9	15.9	31.0
C6		0.2	804.9	17.6	28.0
C7		0.3	873.9	18.1	26.1
C8		0.4	917.5	19.0	25.2
C9	ไบจามจรีหมัก	0.1	741.5	14.2	29.6
C10		0.2	781.5	12.3	29.1
C11		0.3	801.6	12.7	27.0
C12		0.4	836.5	11.0	27.0

หมายเหตุ N/A หมายถึง ไม่ทำการวิเคราะห์เนื่องจากแท่งเชื้อเพลิงเกาะตัวกันเป็นแท่งได้ไม่ดี มีค่าความหนาแน่นต่ำกว่า 600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร



รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการใช้ตัวประสานและความหนาแน่น

จากรูปที่ 5.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการใช้ตัวประสานแต่ละประเภทและความหนาแน่น พบว่าค่าความหนาแน่นของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณการใช้ดินสอพองและไบจามจรีที่ผ่านการหมักแล้ว มีค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง 754.9-917.5 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และ 741.5-836.5 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ ส่วนโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ที่ปริมาณการใช้ 0.2 ให้ค่าความหนาแน่นสูงที่สุดคือ 869.5 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณการใช้ ซึ่งที่การใช้ตัวประสานแต่ละประเภท ให้ค่าความหนาแน่นเพิ่มสูงขึ้นจากการอัดแท่งเชื้อเพลิงโดยไม่ใช้ตัวประสานและมีค่าความหนาแน่นผ่านเกณฑ์กำหนด ASTM E-75 RDF-5 (มากกว่า 600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) ยกเว้นการใช้โพลีไวนิลแอลกอฮอล์เป็นตัวประสานที่ปริมาณ 0.4 ให้ค่าความหนาแน่นไม่ผ่านเกณฑ์กำหนด เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการอัดสูงกว่าจุดหลอมเหลวของโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (200 องศาเซลเซียส) ส่งผลให้โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ยึดตัวออก ในขณะที่น้ำหนักของแท่งเชื้อเพลิงเท่าเดิมแต่มีปริมาตรเพิ่มขึ้น ประกอบกับเป็นสัดส่วนที่ใช้โพลีไวนิลแอลกอฮอล์สูงเกินไปจึงเป็นเหตุให้แท่งเชื้อเพลิงมีค่าความหนาแน่นต่ำและหักระหว่างกลางของแท่ง

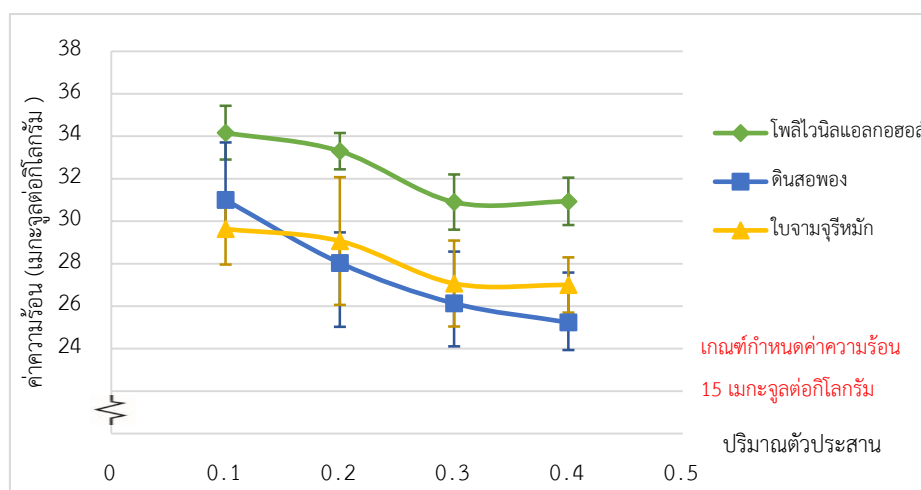


รูปที่ 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการใช้ตัวประสานและค่ากำลังต้านทานแรงอัด

จากรูปที่ 5.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการใช้ตัวประสานประเภทต่างๆ และค่ากำลังต้านทานแรงอัด เมื่อเปรียบเทียบค่ากำลังต้านทานแรงอัดของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่ปริมาณการใช้ตัวประสานเท่ากันพบว่าดินสอพองมีแนวโน้มให้ค่ากำลังต้านทานแรงอัดสูงที่สุดจากตัวประสานอื่นๆ คืออยู่ในช่วง 15.9-19.0 เมกะปาสคาล ซึ่งให้ค่าสูงขึ้นจากการอัดแท่งเชื้อเพลิงโดยไม่ใช้ตัวประสาน ขณะที่การใช้ไบจามจรีที่ผ่านการหมักแล้วและโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ให้ค่ากำลังต้านทานแรงอัดลดลงจากการอัดแท่งเชื้อเพลิงโดยไม่ใช้ตัวประสานและโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ให้ค่ากำลังต้านทานแรงอัดน้อยที่สุดคืออยู่ในช่วง 3.3-3.8 เมกะปาสคาล ซึ่งจะเห็นได้ว่าสัดส่วนของวัสดุและตัวประสานที่ใช้ในการอัดส่งผลต่อค่ากำลังต้านทานแรงอัดของแท่งเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง



ที่การใช้ตัวประสานแต่ละประเภทและปริมาณต่างๆ ที่สามารถอัดแท่งเชื้อเพลิงได้ในการทดลองนี้มีค่ากำลังต้านทานแรงอัดผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนของถ่านอัดแท่งทั้งหมด (มากกว่า 0.35 เมกะปาสคาล)



รูปที่ 5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการใช้ตัวประสานและค่าความร้อน

จากรูปที่ 5.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการใช้ตัวประสานประเภทต่างๆ และค่าความร้อน พบว่าการใช้ตัวประสานทุกประเภทในงานวิจัยนี้ส่งผลให้ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งลดลงจากการอัดแท่งเชื้อเพลิงโดยไม่ใช้ตัวประสาน เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งซึ่งใช้โพลีไวนิลแอลกอฮอล์เป็นตัวประสานให้ค่าความร้อนสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณการใช้ของตัวประสานอื่นๆ ในงานวิจัยนี้ เนื่องจากโพลีไวนิลแอลกอฮอล์มีค่าความร้อนเบื้องต้นสูงที่สุด โดยเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งซึ่งใช้โพลีไวนิลแอลกอฮอล์เป็นตัวประสานมีค่าความร้อนอยู่ในช่วง 30.9-34.2 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งค่าความร้อนของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งจะขึ้นกับค่าความร้อนของตัวประสานและวัสดุเบื้องต้นก่อนนำมาอัดแท่ง ที่การใช้ตัวประสานแต่ละประเภทและปริมาณต่างๆ มีค่าความร้อนผ่านเกณฑ์กำหนดคุณภาพเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งในประเทศอังกฤษ (มากกว่า 18.7 เมกะจูลต่อกิโลกรัม) และเกณฑ์กำหนดคุณภาพเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งในประเทศอิตาลี (มากกว่า 15.0 เมกะจูลต่อกิโลกรัม)

โดยทั่วไปตัวประสานมี 3 ประเภท (Zhang และคณะ, 2018) ได้แก่ ตัวประสานอนินทรีย์ (Inorganic Binder) ตัวประสานอินทรีย์ (Organic Binder) และตัวประสานสารประกอบ (Compound Binder) คุณสมบัติของตัวประสานที่ดี เช่น มีพันธะยึดเกาะที่แข็งแรง ไม่มีมลพิษ ไม่มีผลกระทบต่อสภาพแวดล้อม เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม หาได้ง่ายและราคาไม่แพง จากการทดลองตัวประสานที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้แก่

โพลีไวนิลแอลกอฮอล์หรือแป้งสังเคราะห์ จัดเป็นตัวประสานประเภทตัวประสานอินทรีย์ เป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่มีสมบัติพิเศษคือ การก่อฟิล์ม ยึดติดเป็นกาว ละลายในน้ำได้ อีกทั้งยังทนทานต่อการกัดกร่อนของน้ำมันหรือตัวทำละลายได้ดี สามารถย่อยสลายได้โดยทางชีวภาพ ติดไฟได้ โพลีไวนิลแอลกอฮอล์มีจุดหลอมเหลว 200 องศาเซลเซียส จากการทดลองพบว่าความหนาแน่นและค่ากำลังต้านทานแรงอัดของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งจะเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ปริมาณของโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ที่เหมาะสมคือที่การใช้โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ปริมาณ 0.2 มีค่าความหนาแน่นและค่ากำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดคือ 869.5 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และ 3.8 เมกะปาสคาล ตามลำดับ (ค่ากำลังต้านทานแรงอัดเท่ากับการใช้ที่ปริมาณ 0.1) ปริมาณการใช้โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ที่สูงขึ้นส่งผลให้เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งมีค่าความหนาแน่นและค่ากำลังต้านทานแรงอัดลดลง เนื่องจากโพลีไวนิลแอลกอฮอล์สามารถเกิดเป็นผลึกได้เมื่อถูกความร้อนของเครื่องอัดส่งผลให้โพลีไวนิลแอลกอฮอล์หลอมละลายและพองตัวออก ความสามารถในการต้านทานแรงกดและแรงดึงลดลงแต่ความสามารถในการยึดตัวจะเพิ่มขึ้น เมื่อทิ้งให้เย็นตัวลงจะมีลักษณะแข็งเปราะจึงส่งผลให้เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งมีค่าความหนาแน่นลดลง ขณะที่ปริมาณการใช้ต่างๆให้ค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ใกล้เคียงกัน โดยที่ปริมาณการใช้ 0.4 ไม่สามารถอัดแท่งเชื้อเพลิงได้เนื่องจากโพลีไวนิลแอลกอฮอล์สลายตัวได้ง่ายที่อุณหภูมิสูง เมื่อใช้ในปริมาณที่มากเกินไปและอัดที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดเดือดส่งผลให้เกิดการพองตัวออกและหลอมละลายเกินจุดช่วยประสาน ค่าความร้อนลดลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มปริมาณการใช้โพลีไวนิลแอลกอฮอล์และที่ปริมาณ 0.1 มีค่าความร้อนสูงสุดคือ 34.2 เมกะจูลต่อกิโลกรัม เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความร้อนเบื้องต้นของตัวประสานที่ใช้ในงานวิจัย พบว่าโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ให้ค่าความร้อนสูงกว่าตัวประสานอื่นๆ เนื่องจากโพลีไวนิลแอลกอฮอล์เป็นเทอร์โมพลาสติกประเภทพอลิโอเลฟิน มีองค์ประกอบหลักทางเคมีประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน (สูตรโมเลกุล  $[CH_2CHOH]_n$ ) จึงสามารถเผาไหม้ได้และให้ความร้อนสูงคล้ายพลาสติก ซึ่งวัสดุที่มีปริมาณคาร์บอนและไฮโดรเจนสูงจะส่งผลให้มีค่าความร้อนสูง โดยผู้วิจัยเลือกการใช้โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ปริมาณ 0.2 เป็นสภาวะที่เหมาะสมเพื่อทำการทดลองขั้นต่อไป เนื่องจากเป็นสภาวะที่ใช้โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ในปริมาณไม่สูงแต่ให้ค่าความหนาแน่นและค่ากำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดและยังให้ค่าความร้อนมากเป็นอันดับสอง

ดินสอพอง จัดเป็นตัวประสานประเภทอนินทรีย์เช่นเดียวกับดินเหนียว ปูนขาว ปูนซีเมนต์ เป็นต้น องค์ประกอบหลักของดินสอพองคือแคลเซียมคาร์บอเนต ( $CaCO_3$ ) เมื่อเปรียบเทียบกับองค์ประกอบหลักระหว่างดินสอพองและปูนซีเมนต์พบว่ามีองค์ประกอบหลักและคุณสมบัติที่คล้ายกัน ปูนซีเมนต์เมื่อผสมน้ำจะมีความเหนียวช่วยในการยึดเกาะ มีพันธะในการยึดเกาะที่แข็งแรง ดังนั้นในการอัดแท่งเชื้อเพลิงจึงมีการผสมน้ำเล็กน้อยเพื่อให้ดินสอพองยึดติดกับวัสดุที่นำมาอัด จากการทดลองพบว่าปริมาณดินสอพองมีผลต่อความหนาแน่นและค่ากำลังต้านทานแรงอัดคือค่าจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณการใช้ดินสอพอง เนื่องจากดินสอพองมีความหนาแน่นเบื้องต้นสูงจึงช่วยในการอุดรูพรุนได้ดี

ที่การใช้ดินสองฟองปริมาณ 0.4 มีค่าความหนาแน่นและค่ากำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดคือ 917.5 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และ 19.0 เมกะปาสคาล ตามลำดับ แต่ไม่ควรใช้ดินสองฟองในปริมาณสูงเกินไปเนื่องจากส่งผลให้เชื้อเพลิงมีค่าความร้อนลดลง ขณะที่การใช้ดินสองฟองปริมาณ 0.1 มีค่าความร้อนสูงสุดคือ 31.0 เมกะจูลต่อกิโลกรัม จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุเบื้องต้นของดินสองฟอง พบว่าดินสองฟองที่ใช้มีปริมาณคาร์บอนและไฮโดรเจนในระดับต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวประสานอื่นๆที่ใช้ในงานวิจัยและทำการวิเคราะห์หาค่าความร้อนพบว่าดินสองฟองจุดไฟไม่ติด กล่าวคือเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งซึ่งใช้ดินสองฟองเป็นตัวประสานส่งผลให้เชื้อเพลิงมีค่าความหนาแน่นและค่ากำลังต้านทานแรงอัดเพิ่มขึ้น เชื้อเพลิงมีความแข็ง มีค่าความร้อนลดลงและมีปริมาณเถ้าสูง ดังนั้นการใช้ดินสองฟองเป็นตัวประสานจึงถือเป็นการปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งเท่านั้น การใช้ดินสองฟองเป็นตัวประสานสามารถอัดได้ทั้งที่อุณหภูมิสูงและต่ำขึ้นกับวัสดุที่นำมา โดยผู้วิจัยเลือกการใช้ดินสองฟองปริมาณ 0.3 เป็นสภาวะที่เหมาะสมเพื่อทำการทดลองขั้นต่อไป เนื่องจากให้ค่ากำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดและให้ค่าความหนาแน่นมากเป็นอันดับสอง

ไบจามจรีที่ผ่านการหมักแล้ว จัดเป็นตัวประสานประเภทอินทรีย์-ชีวมวล ทำการหมักไบจามจรีวิธีการหมักอ้างอิงจากโครงการ JICA ผลิตปุ๋ยหมักสูตรไบจามจรีโดยใช้หัวเชื้อจากถังหมักขยะอินทรีย์ (ขวลิต รัตนธรรมสกุล, 2559) เนื่องจากไบจามจรีมีเส้นใยเซลลูโลสจำนวนมาก การย่อยสลายของชีวมวลทำให้เกิดสารที่เป็นยางเหนียวธรรมชาติ เช่น น้ำตาล เพกทิน และอื่นๆ ปล่อยออกมาเพื่อช่วยในการยึดเกาะ จากการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุเบื้องต้นไบจามจรีที่ผ่านการหมักแล้วมีคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบในระดับปานกลาง มีปริมาณไนโตรเจนและปริมาณความชื้นสูง ก่อนการนำมาใช้เป็นตัวประสานจึงควรนำไปตากแห้งเพื่อให้ความชื้นลดลง สามารถเผาไหม้ได้แต่ให้ค่าความร้อนในระดับต่ำ จากการทดลองพบว่าความหนาแน่นของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งจะสูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อเพิ่มปริมาณการใช้ไบจามจรีที่ผ่านการหมักแล้ว ค่ากำลังต้านทานแรงอัดและค่าความร้อนลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณการใช้ไบจามจรีที่ผ่านการหมักแล้ว การใช้ไบจามจรีที่ผ่านการหมักแล้วที่ปริมาณ 0.1 มีค่าความร้อนและค่ากำลังต้านทานแรงอัดสูงสุด คือ 29.6 เมกะจูลต่อกิโลกรัม และ 14.2 เมกะปาสคาล ตามลำดับ การใช้ไบจามจรีเป็นตัวประสานควรใช้อุณหภูมิต่ำแต่แรงดันสูงในการอัด จะส่งผลให้แท่งเชื้อเพลิงมีความแข็งแรงสูงขึ้น (Zhang และคณะ, 2018) เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่ใช้ไบจามจรีเป็นตัวประสานควรใช้ในกระบวนการเผาไหม้ที่อุณหภูมิไม่สูงมากเนื่องจากตัวประสานประเภทอินทรีย์สลายตัวได้ง่ายในอุณหภูมิที่สูง ที่การใช้ไบจามจรีที่ผ่านการหมักแล้วปริมาณ 0.4 มีค่าความหนาแน่นสูงสุดคือ 836.5 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยผู้วิจัยเลือกการใช้ไบจามจรีที่ผ่านการหมักแล้วปริมาณ 0.1 เป็นสภาวะที่เหมาะสมเพื่อทำการทดลองขั้นต่อไปเนื่องจาก มีค่ากำลังต้านทานแรงอัดและค่าความร้อนสูงสุด

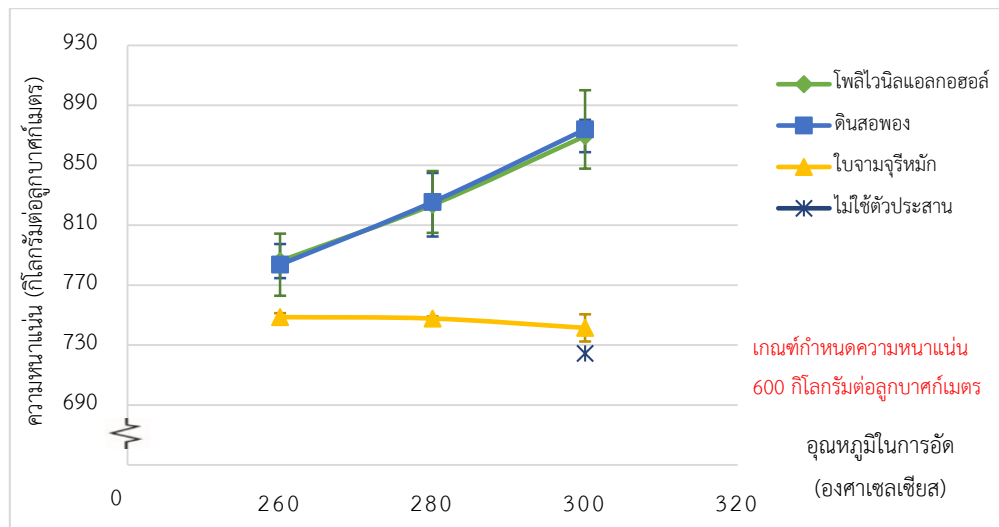
#### 5.2.4 การทดลองที่ 4 ผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวประสานและสถานะต่างๆในการผลิตเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง

1) การทดลองที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประสานประเภทต่างๆและอุณหภูมิที่ใช้ในการอัด

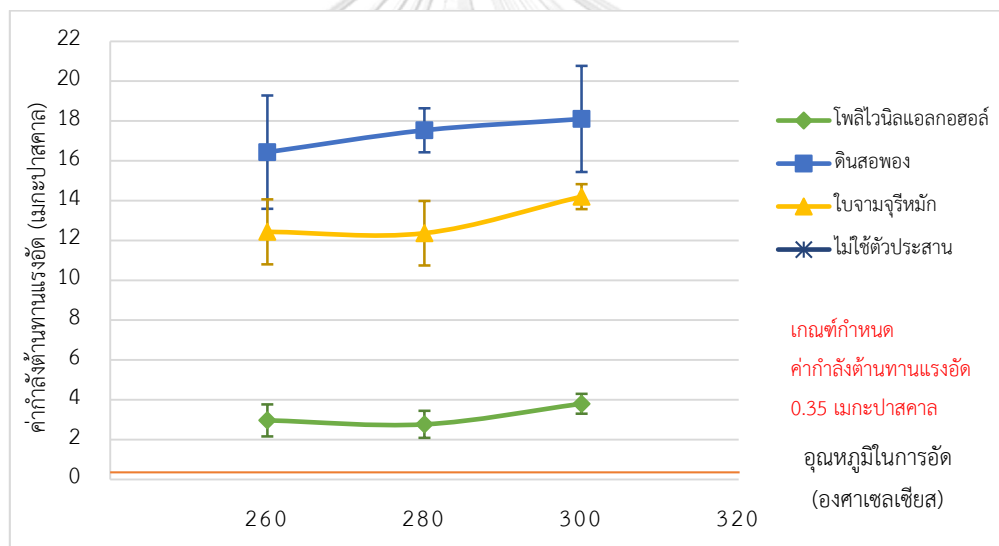
ทำการอัดแท่งเชื้อเพลิงโดยใช้ความร้อนและตัวประสานในการอัด ที่สัดส่วนขยะที่เหมาะสมซึ่งได้จากการทดลองที่ 1 (ข้อ 5.2.1) คือ 5:1:3 ผสมตัวประสานแต่ละประเภทในปริมาณที่เหมาะสมซึ่งได้จากการทดลองที่ 3 (ข้อ 5.2.3) อัดเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่สถานะการอัดที่เหมาะสมแรงดัน 150 บาร์ เวลาในการอัด 10 นาที และลดอุณหภูมิในการอัดจาก 300 องศาเซลเซียสลงครั้งละ 20 องศาเซลเซียส จากนั้นนำเชื้อเพลิงที่ได้มาวิเคราะห์หาความหนาแน่น ค่ากำลังต้านทานแรงอัดและค่าความร้อน ดังแสดงในตารางที่ 5.9

ตารางที่ 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประสานประเภทต่างๆและอุณหภูมิที่ใช้ในการอัด

ชุดการทดลอง	ตัวประสาน	แรงดันในการอัด (บาร์)	เวลาในการอัด (นาที)	อุณหภูมิในการอัด (องศาเซลเซียส)	ผลการวิเคราะห์		
					ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	ค่ากำลังต้านทานแรงอัด (เมกะปาสคาล)	ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)
เกณฑ์กำหนดสมบัติเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง					มากกว่า 600	มากกว่า 0.35	มากกว่า 15.0
B26	-	150	10	300	724.4	15.0	32.1
C2	โพลีไวนิล	150	10	300	869.5	3.8	33.3
D1/1	แอลกอฮอล์			280	823.6	2.8	32.4
D1/2	ปริมาณ 0.2			260	786.0	3.0	32.5
C7	ดินสองฟอง ปริมาณ 0.3	150	10	300	873.9	18.0	26.1
D2/1				280	825.5	17.5	27.1
D2/2				260	783.6	16.4	28.6
C9	ไบจามจูรี หมักปริมาณ 0.1	150	10	300	741.5	14.2	29.6
D3/1				280	747.7	12.4	29.2
D3/2				260	748.7	12.4	30.9



รูปที่ 5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประสานประเภทต่างๆกับความหนาแน่นเมื่อลดอุณหภูมิในการอัด



รูปที่ 5.12 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประสานประเภทต่างๆกับค่ากำลังต้านทานแรงอัดเมื่อลดอุณหภูมิในการอัด

จากการทดลองอัดแท่งเชื้อเพลิงโดยใช้โพลีไวนิลแอลกอฮอล์เป็นตัวประสาน พบว่าการลดอุณหภูมิในการอัดส่งผลให้เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งมีค่าความหนาแน่นลดลง ค่ากำลังต้านทานแรงอัดมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ขณะที่ค่าความร้อนมีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจากใช้สัดส่วนในการอัดเดียวกัน กล่าวคือการลดอุณหภูมิในการอัดไม่ส่งผลต่อค่าความร้อน

จากการทดลองอัดแท่งเชื้อเพลิงโดยใช้ดินสอพองเป็นตัวประสาน พบว่าการลดอุณหภูมิในการอัดส่งผลให้เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งมีค่าความหนาแน่นและค่ากำลังต้านทานแรงอัด

ลดลง ขณะที่ค่าความร้อนมีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจากใช้สัดส่วนในการอัดเดียวกัน กล่าวคือ การลดอุณหภูมิในการอัดไม่ส่งผลต่อค่าความร้อน

จากการทดลองอัดแท่งเชื้อเพลิงโดยใช้ไบจามจูลีที่ผ่านการหมักแล้วเป็นตัวประสาน พบว่าการลดอุณหภูมิในการอัดไม่ส่งผลต่อค่าความหนาแน่นของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง ค่ากำลังต้านทานแรงอัดมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ขณะที่ค่าความร้อนมีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจากใช้สัดส่วนเดียวกัน กล่าวคือ การลดอุณหภูมิในการอัดไม่ส่งผลต่อค่าความร้อนและค่าความหนาแน่น

เมื่อเปรียบเทียบการลดอุณหภูมิในการอัดแท่งเชื้อเพลิงโดยใช้โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ และไบจามจูลีที่ผ่านการหมักแล้วเป็นตัวประสานกับการอัดแท่งเชื้อเพลิงโดยไม่ใช้ตัวประสาน พบว่าแท่งเชื้อเพลิงมีค่าความหนาแน่นสูงกว่าการอัดโดยไม่ใช้ตัวประสานแต่มีค่ากำลังต้านทานแรงอัดน้อยกว่า ขณะที่การอัดแท่งเชื้อเพลิงโดยใช้ดินสอพองเป็นตัวประสานมีค่าความหนาแน่นและค่ากำลังต้านทานแรงอัดสูงกว่าการอัดแท่งเชื้อเพลิงโดยไม่ใช้ตัวประสาน กล่าวคือ ตัวประสานที่ใช้ในงานวิจัยนี้สามารถช่วยลดอุณหภูมิในการอัดได้

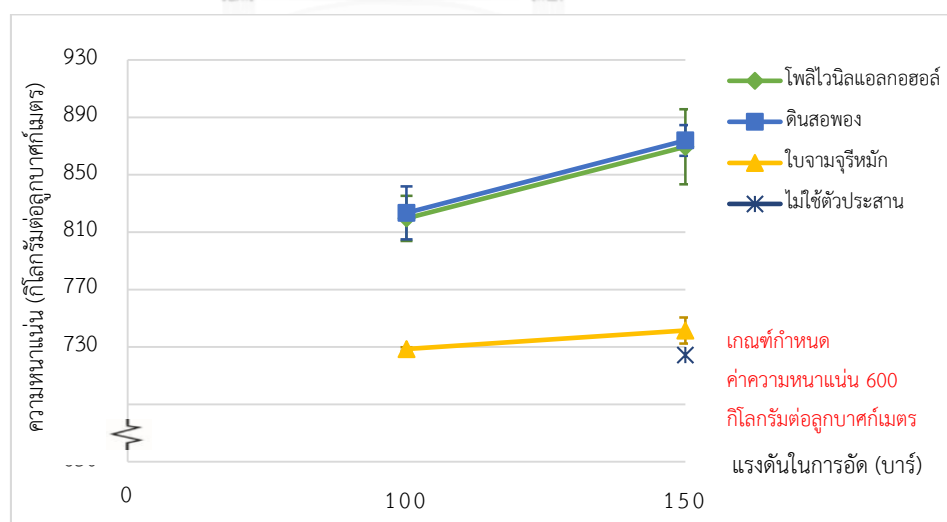
## 2) การทดลองที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประสานประเภทต่างๆและแรงดันที่ใช้ในการอัด

ทำการอัดแท่งเชื้อเพลิงโดยใช้ความร้อนและตัวประสานในการอัด ที่สัดส่วนขยะที่เหมาะสมซึ่งได้จากการทดลองที่ 1 (ข้อ 5.2.1) คือ 5:1:3 ผสมตัวประสานแต่ละประเภทในปริมาณที่เหมาะสมซึ่งได้จากการทดลองที่ 3 (ข้อ 5.2.3) อัดเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เวลาในการอัด 10 นาที และลดแรงดันในการอัดจาก 150 บาร์ลงครั้งละ 50 บาร์ จากนั้นนำเชื้อเพลิงที่ได้มาวิเคราะห์หาความหนาแน่น ค่ากำลังต้านทานแรงอัดและค่าความร้อน ดังแสดงในตารางที่ 5.10

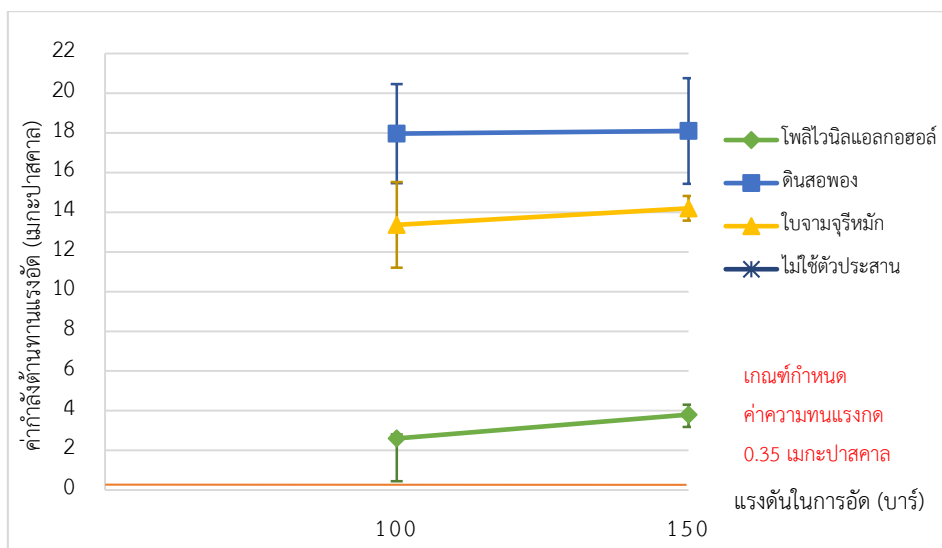
ตารางที่ 5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประสานประเภทต่างๆและแรงดันที่ใช้ในการอัด

ชุดการทดลอง	ตัวประสาน	อุณหภูมิในการอัด (องศาเซลเซียส)	เวลาในการอัด (นาที)	แรงดันในการอัด (บาร์)	ผลการวิเคราะห์		
					ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	ค่ากำลังต้านทานแรงอัด (เมกะปาสคาล)	ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)
เกณฑ์กำหนดสมบัติเชื้อเพลิงขยยะอัดแห้ง					มากกว่า 600	มากกว่า 0.35	มากกว่า 15.0
B26	-	300	10	150	724.4	15.0	32.1
C2	โพลีไวนิล	300	10	150	869.5	3.8	33.3
D4/1	แอลกอฮอล์			100	819.6	2.6	N/A
D4/2	ปริมาณ 0.2			50	>500	N/A	N/A
C7	ดินสองพอง	300	10	150	873.9	18.1	26.1
D5/1				100	823.4	18.0	N/A
D5/2				50	>500	N/A	N/A
C9	ไบจามจู้รี	300	10	150	741.5	14.2	29.6
D6/1	หมักปริมาณ			100	728.6	13.4	N/A
D6/2	0.1			50	>500	N/A	N/A

หมายเหตุ N/A หมายถึง ไม่ทำการวิเคราะห์เนื่องจากแห้งเชื้อเพลิงเกาะตัวกันเป็นแห้งได้ไม่ดี มีค่าความหนาแน่นต่ำกว่า 600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร



รูปที่ 5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประสานประเภทต่างๆกับความหนาแน่นเมื่อลดแรงดันในการอัด



รูปที่ 5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประสานประเภทต่างๆกับค่ากำลังต้านทานแรงอัดเมื่อลดแรงดันในการอัด

จากการทดลองอัดแท่งเชื้อเพลิงที่ทุกตัวประสานในงานวิจัยนี้ พบว่าการลดแรงดันในการอัดส่งผลให้เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งมีแนวโน้มให้ค่าความหนาแน่นและค่ากำลังต้านทานแรงอัดลดลง ไม่ทำการวิเคราะห์หาค่าความร้อนเนื่องจากค่าความร้อนของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งจะขึ้นกับสัดส่วนในการผสมขยะและตัวประสาน ซึ่งในการทดลองนี้ใช้สัดส่วนขยะและตัวประสานเดียวกันกับการทดลองที่ 5.2.3 กล่าวคือค่าความร้อนของการทดลองนี้มีค่าใกล้เคียงกับการทดลองที่ 5.2.3 ขณะที่ทุกตัวประสานการอัดแท่งเชื้อเพลิงที่แรงดัน 50 บาร์ เชื้อเพลิงเกาะตัวกันเป็นแท่งบางส่วนเท่านั้นส่งผลให้เชื้อเพลิงมีค่าความหนาแน่นน้อยกว่าเกณฑ์กำหนดมาก กล่าวคือที่แรงดันในการอัด 50 บาร์ ไม่เพียงพอสำหรับอัดแท่งเชื้อเพลิงถึงแม้ว่าจะมีอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสม

เมื่อเปรียบเทียบการลดแรงดันในการอัดแท่งเชื้อเพลิงโดยใช้โพลีไวนิลแอลกอฮอล์และไบจามจู้รีที่ผ่านการหมักแล้วเป็นตัวประสานกับการอัดแท่งเชื้อเพลิงโดยไม่ใช้ตัวประสานพบว่าแท่งเชื้อเพลิงมีค่าความหนาแน่นสูงกว่าการอัดโดยไม่ใช้ตัวประสานแต่มีค่ากำลังต้านทานแรงอัดน้อยกว่า ขณะที่การอัดแท่งเชื้อเพลิงโดยใช้ดินสอพองเป็นตัวประสานมีค่าความหนาแน่นและค่ากำลังต้านทานแรงอัดสูงกว่าการอัดแท่งเชื้อเพลิงโดยไม่ใช้ตัวประสาน กล่าวคือตัวประสานที่ใช้ในงานวิจัยนี้สามารถช่วยลดแรงดันในการอัดได้



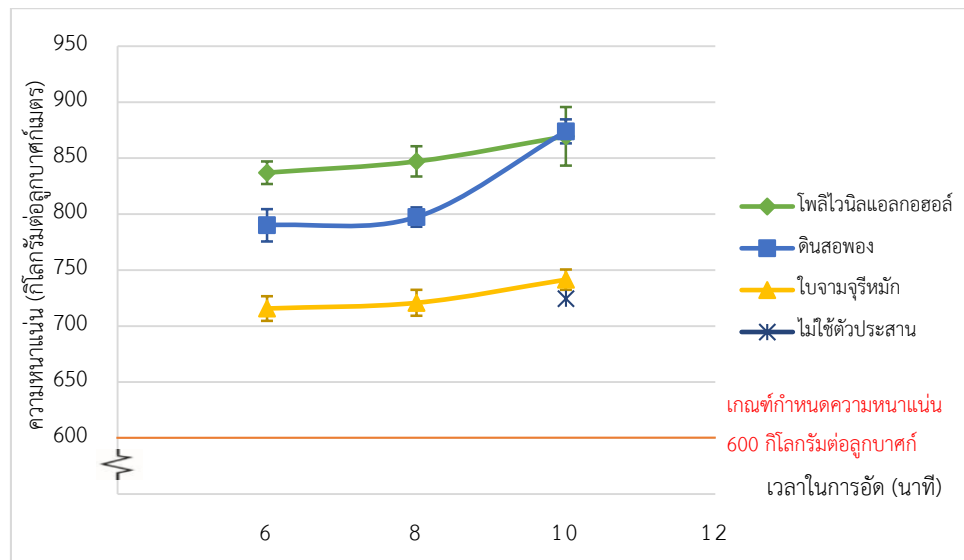
3) การทดลองที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประสานประเภทต่างๆและเวลาที่ใช้ในการอัด

ทำการอัดแท่งเชื้อเพลิงโดยใช้ความร้อนและตัวประสานในการอัด ที่สัดส่วนขยยะที่เหมาะสมซึ่งได้จากการทดลองที่ 1 (ข้อ 5.2.1) คือ 5:1:3 ผสมตัวประสานแต่ละประเภทในปริมาณที่เหมาะสมซึ่งได้จากการทดลองที่ 3 (ข้อ 5.2.3) อัดเชื้อเพลิงขยยะอัดแท่งที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส แรงดันในการอัด 150 บาร์ และลดเวลาในการอัดจาก 10 นาทีลงครึ่งละ 2 นาที จากนั้นนำเชื้อเพลิงที่ได้มาวิเคราะห์หาความหนาแน่น ค่ากำลังต้านทานแรงอัดและค่าความร้อน ดังแสดงในตารางที่ 5.11

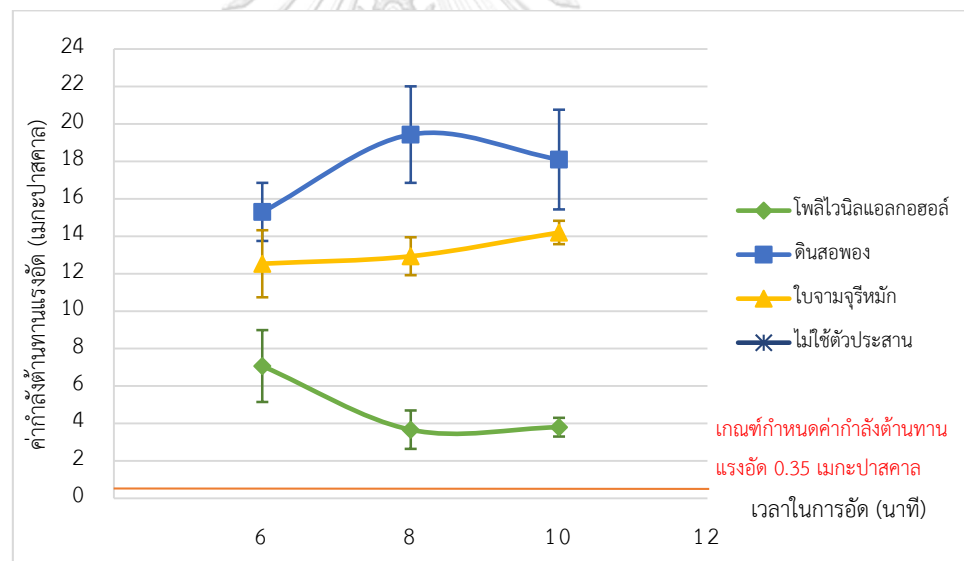
ตารางที่ 5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประสานประเภทต่างๆและเวลาที่ใช้ในการอัด

ชุดการทดลอง	ตัวประสาน	แรงดันในการอัด (บาร์)	อุณหภูมิในการอัด (องศาเซลเซียส)	เวลาในการอัด (นาที)	ผลการวิเคราะห์		
					ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	ค่ากำลังต้านทานแรงอัด (เมกะปาสคาล)	ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)
เกณฑ์กำหนดสมบัติเชื้อเพลิงขยยะอัดแท่ง					มากกว่า 600	มากกว่า 0.35	มากกว่า 15.0
B26	-	150	300	10	724.4	15.0	32.1
C2	โพลีไวนิล	150	300	10	869.5	3.8	33.3
D7/1	แอลกอฮอล์			8	847.1	3.7	N/A
D7/2	ปริมาณ 0.2			6	837.0	7.1	N/A
C7	ดินสองพอง ปริมาณ 0.3	150	300	10	873.9	18.1	26.1
D8/1				8	797.4	19.4	N/A
D8/2				6	790.0	15.3	N/A
C9	ไบจามจูรี หมักปริมาณ 0.1	150	300	10	741.5	14.2	29.6
D9/1				8	720.8	12.9	N/A
D9/2				6	715.7	12.5	N/A

หมายเหตุ N/A หมายถึง ไม่ทำการวิเคราะห์เนื่องจากแท่งเชื้อเพลิงเกาะตัวกันเป็นแท่งได้ไม่เต็ม มีค่าความหนาแน่นต่ำกว่า 600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร



รูปที่ 5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประสานประเภทต่างๆกับความหนาแน่นเมื่อลดเวลาในการอัด



รูปที่ 5.16 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประสานประเภทต่างๆกับค่ากำลังต้านทานแรงอัดเมื่อลดเวลาในการอัด

จากการทดลองอัดแท่งเชื้อเพลิงโดยใช้โพลีไวนิลแอลกอฮอล์เป็นตัวประสาน พบว่าการลดเวลาในการอัดส่งผลให้เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งมีค่าความหนาแน่นลดลง ค่ากำลังต้านทานแรงอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

จากการทดลองอัดแท่งเชื้อเพลิงโดยใช้ดินสอพองเป็นตัวประสาน พบว่าการลดเวลาในการอัดส่งผลให้เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งมีค่าความหนาแน่นและค่ากำลังต้านทานแรงอัดลดลง

จากการทดลองอัดแท่งเชื้อเพลิงโดยใช้ไบจามจุรีที่ผ่านการหมักแล้วเป็นตัวประสาน พบว่าการลดอุณหภูมิในการอัดส่งผลให้เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งมีแนวโน้มค่าความหนาแน่นและค่ากำลังต้านทานแรงอัดลดลงเล็กน้อยเท่านั้น

ไม่ทำการวิเคราะห์หาค่าความร้อนเนื่องจากค่าความร้อนของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งจะขึ้นกับสัดส่วนในการผสมขยะและตัวประสาน ซึ่งในการทดลองนี้ใช้สัดส่วนขยะและตัวประสานเดียวกันกับการทดลองที่ 5.2.3 กล่าวคือค่าความร้อนของการทดลองนี้มีค่าใกล้เคียงกับการทดลองที่ 5.2.3

เมื่อเปรียบเทียบการลดเวลาในการอัดแท่งเชื้อเพลิงโดยใช้โพลีไวนิลแอลกอฮอล์เป็นตัวประสานกับการอัดแท่งเชื้อเพลิงโดยไม่ใช้ตัวประสาน พบว่าแท่งเชื้อเพลิงมีค่าความหนาแน่นสูงกว่าการอัดโดยไม่ใช้ตัวประสานแต่มีค่ากำลังต้านทานแรงอัดน้อยกว่า และการอัดแท่งเชื้อเพลิงโดยใช้ดินสอพองเป็นตัวประสานมีค่าความหนาแน่นและค่ากำลังต้านทานแรงอัดสูงกว่าการอัดแท่งเชื้อเพลิงโดยไม่ใช้ตัวประสาน กล่าวคือการใช้โพลีไวนิลแอลกอฮอล์และดินสอพองเป็นตัวประสานสามารถช่วยลดเวลาในการอัดได้ ส่วนการอัดแท่งเชื้อเพลิงโดยใช้ไบจามจุรีที่ผ่านการหมักแล้วเป็นตัวประสาน พบว่าแท่งเชื้อเพลิงมีค่าความหนาแน่นและค่ากำลังต้านทานแรงอัดน้อยกว่าการอัดโดยไม่ใช้ตัวประสาน กล่าวคือการใช้ไบจามจุรีที่ผ่านการหมักแล้วเป็นตัวประสานไม่สามารถช่วยลดเวลาในการอัดได้

ตารางที่ 5.12 เปรียบเทียบสมบัติเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งระหว่างการใช้และไม่ใช้ตัวประสานในสถานะต่างๆ

ตัวประสาน	สถานะในการอัด	ใช้ตัวประสาน		ไม่ใช้ตัวประสาน	
		ความหนาแน่น	ค่ากำลังต้านทานแรงอัด	ความหนาแน่น	ค่ากำลังต้านทานแรงอัด
โพลีไวนิลแอลกอฮอล์	ลดอุณหภูมิ	ลดลง	ลดลง	เพิ่มขึ้น	ลดลง
	ลดแรงดัน	ลดลง	ลดลงเล็กน้อย	เพิ่มขึ้น	ลดลง
	ลดเวลา	ลดลง	เพิ่มขึ้น	เพิ่มขึ้น	ลดลง
ดินสอพอง	ลดอุณหภูมิ	ลดลง	ลดลงเล็กน้อย	เพิ่มขึ้น	เพิ่มขึ้น
	ลดแรงดัน	ลดลง	เท่าเดิม	เพิ่มขึ้น	เพิ่มขึ้น
	ลดเวลา	ลดลง	ลดลง	เพิ่มขึ้น	เพิ่มขึ้น
ไบจามจุรีหมัก	ลดอุณหภูมิ	เท่าเดิม	ลดลงเล็กน้อย	เพิ่มขึ้นเล็กน้อย	ลดลงเล็กน้อย
	ลดแรงดัน	ลดลงเล็กน้อย	ลดลงเล็กน้อย	เท่าเดิม	ลดลง
	ลดเวลา	ลดลง	ลดลง	ลดลงเล็กน้อย	ลดลง

### 5.2.5 การเปรียบเทียบตัวประสานที่ใช้ในงานวิจัยนี้และงานวิจัยอื่น

ตารางที่ 5.13 แสดงผลการทดลองใช้ตัวประสานประเภทต่างๆในงานวิจัยนี้เปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นๆ พบว่าคุณภาพของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งจะขึ้นอยู่กับประเภทของตัวประสานที่ใช้ ชนิดของวัสดุที่นำมาผลิตเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่แตกต่างกันก็ต้องการตัวประสานที่ต่างกัน ดังนั้นการเลือกใช้ตัวประสานและปริมาณในการใช้ที่เหมาะสมเป็นปัจจัยหนึ่งซึ่งส่งผลให้เชื้อเพลิงมีคุณภาพสูงขึ้นและควรเลือกใช้สภาวะในการอัดที่เหมาะสมของแต่ละตัวประสาน โดยตัวประสานส่วนใหญ่จะช่วยเพิ่มสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิง เช่น ค่าความหนาแน่น ค่ากำลังต้านทานแรงอัด เป็นต้น แต่จะส่งผลให้เชื้อเพลิงมีค่าความร้อนลดลง

ตารางที่ 5.13 เปรียบเทียบผลการทดลองการใช้ตัวประสานของงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่นๆ

ขยะที่ใช้	ตัวประสาน	สัดส่วนขยะ/ ตัวประสาน	ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อ กิโลกรัม)	ความ หนาแน่น (กิโลกรัมต่อ ลูกบาศก์ เมตร)	ค่ากำลัง ต้านทาน แรงอัด (เมกะ ปาสคาล)	งานวิจัย
พลาสติก:กระดาษ	ใบไม้แห้ง	3:1/5	25.9	-	-	Othman และ คณะ (2013)
พลาสติก:ใบไม้: กระดาษ	แป้งมัน:ปูน ขาว	1:1:1/0.1:0.1	26.4	1035	-	วสันต์ ปินะเต และคณะ (2559)
ซีล้อย:กระดาษ: ถุงพลาสติก:ข้าว ตากแห้ง	กลีเซอริน	7:1:1:1/0.025	-	1700	4.5	Jamradloedluk และคณะ (2015)
กากกาแฟ	กาวแป้ง เปียก	9/1	23.1	-	-	นฤภัทร ตั้งมันคง วรกุล และคณะ (2558)
พลาสติก:กระดาษ: กากกาแฟ	โพลีไวนิล แอลกอฮอล์	5:1:3/0.2	33.3	869.5	3.8	งานวิจัยนี้
พลาสติก:กระดาษ: กากกาแฟ	ดินสอพอง	5:1:3/0.3	26.1	873.9	18.0	งานวิจัยนี้
พลาสติก:กระดาษ: กากกาแฟ	ไบจามจูรี หมัก	5:1:3/0.1	29.6	741.5	14.2	งานวิจัยนี้

### 5.3 ช่วงที่ 3 ผลการวิเคราะห์สมบัติด้านต่างๆและการทดสอบการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง

นำเชื้อเพลิงที่ได้จากการทดลองที่ 5.2.3 คือ เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งซึ่งใช้โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ที่ 0.2 ดินสอพองที่ 0.3 และไบจามจู้รีที่ผ่านการหมักแล้วที่ 0.1 มาทำการวิเคราะห์สมบัติด้านต่างๆและทำการทดสอบการเผาไหม้

#### 5.3.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติด้านต่างๆของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง

##### 1) ผลการวิเคราะห์ Proximate Analysis ค่าความร้อนและปริมาณคลอไรด์

ตารางที่ 5.14 แสดงผลการวิเคราะห์ Proximate Analysis และค่าความร้อนของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งซึ่งใช้ตัวประสานประเภทต่างๆเปรียบเทียบกับเกณฑ์กำหนดต่างๆ

ตารางที่ 5.14 ผลการวิเคราะห์สมบัติของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งเปรียบเทียบกับเกณฑ์กำหนด

สมบัติ	ผลการวิเคราะห์			เกณฑ์กำหนด		
	โพลีไวนิลแอลกอฮอล์	ดินสอพอง	ไบจามจู้รีหมัก	คุณภาพเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งในประเทศไทย	Kara และคณะ (2008)	คุณภาพเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งในประเทศอิตาลี
Proximate analysis						
• ความชื้น (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	2.7	1.5	2.9	7.0-8.0	20.0	25.0
• เถ้า (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	5.3	11.2	11.0	12.0	8.0-12.0	20.0
• สารระเหย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	89.2	86.0	80.5	68.0	50.0-80.0	-
• คาร์บอนคงตัว (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	2.8	1.3	5.6	10.0	-	-
ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	33.3	26.1	29.6	18.7	-	15.0
คลอไรด์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	0.2	0.8	0.4	0.3-1.2	1.0	0.90

##### • ปริมาณความชื้น

ทำการวิเคราะห์หาค่าความชื้นของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งทุกตัวประสานโดยนำเชื้อเพลิงที่ได้มาอบที่อุณหภูมิ  $107 \pm 3$  องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าค่าความชื้นของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งแต่ละตัวประสานมีค่าใกล้เคียงกันคืออยู่ในช่วงร้อยละ 1.5-2.9 โดยน้ำหนัก ซึ่งผ่านเกณฑ์กำหนดของ Kara และคณะ (2008) และคุณภาพเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งในประเทศอิตาลีแต่ต่ำกว่าเกณฑ์กำหนดคุณภาพเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งในประเทศไทย

เนื่องจากในขณะอัดแท่งเชื้อเพลิงได้ใช้ความร้อนและหลังจากการอัดได้นำแท่งเชื้อเพลิงไปตากแดดเพื่อป้องกันเชื้อราในขณะเก็บรักษา ซึ่งเชื้อเพลิงที่มีค่าความชื้นต่ำไม่ส่งผลกระทบต่อ การเผาไหม้ ส่วนเชื้อเพลิงที่มีค่าความชื้นสูงจะส่งผลกระทบต่อในกระบวนการเผาไหม้ คือมีผลกระทบต่อปริมาณความร้อนที่ได้และปริมาณของก๊าซที่เกิดขึ้น (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2551)

- ปริมาณเถ้า

ทำการวิเคราะห์หาปริมาณเถ้าของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งทุกตัวประสานโดยนำเชื้อเพลิงที่ได้มาอบที่อุณหภูมิ  $575 \pm 25$  องศาเซลเซียส จนตัวอย่างน้ำหนักคงที่ เถ้าคือส่วนที่เหลือจากการเผาไหม้ พบว่าปริมาณเถ้าของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งซึ่งใช้โพลีไวนิลแอลกอฮอล์เป็นตัวประสานมีปริมาณเถ้าที่น้อยที่สุดคือร้อยละ 5.3 โดยน้ำหนัก ซึ่งผ่านเกณฑ์กำหนดของคุณภาพเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งในประเทศอังกฤษและอิตาลี แต่มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์กำหนดของ Kara และคณะ (2008) ส่วนเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งซึ่งใช้ดินสอพองและไบจามจูรีที่ผ่านการหมักแล้วเป็นตัวประสานมีปริมาณเถ้าใกล้เคียงกันคืออยู่ในช่วงร้อยละ 11.0-11.2 โดยน้ำหนักซึ่งผ่านเกณฑ์กำหนดทั้งหมด ดินสอพองเป็นตัวประสานประเภทอินทรีย์และจุดไฟไม่ติด ส่วนไบจามจูรีที่ผ่านการหมักแล้วเป็นตัวประสานประเภทอินทรีย์-ชีวมวล กล่าวคือปริมาณเถ้าจะขึ้นกับวัสดุที่นำมาอัด ซึ่งถ้าวัสดุที่นำมาอัดเป็นสารอนินทรีย์หรือชีวมวลจะมีแนวโน้มส่งผลให้เชื้อเพลิงมีปริมาณเถ้าสูง โดยเชื้อเพลิงที่มีปริมาณเถ้าสูงจะส่งผลให้เชื้อเพลิงมีค่าความร้อนต่ำ

- ปริมาณสารระเหย

ทำการวิเคราะห์หาปริมาณสารระเหยของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งทุกตัวประสานโดยนำเชื้อเพลิงที่ได้ไปเผาที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 นาที พบว่าปริมาณสารระเหยของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่ทุกตัวประสานมีค่าใกล้เคียงกันคืออยู่ในช่วงร้อยละ 80.5-89.2 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีค่าสูงกว่าเกณฑ์กำหนดของคุณภาพเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งในประเทศอังกฤษและ Kara และคณะ (2008) เชื้อเพลิงที่มีปริมาณสารระเหยสูงจะส่งผลให้เชื้อเพลิงติดไฟได้ง่ายซึ่งส่วนที่ระเหยได้เป็นสารประกอบที่มีคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ กล่าวคือเชื้อเพลิงที่มีปริมาณคาร์บอนและไฮโดรเจนสูงจึงมีแนวโน้มมีปริมาณสารระเหยสูง จากการทดลองจะเห็นได้ว่าเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งซึ่งใช้โพลีไวนิลแอลกอฮอล์เป็นตัวประสานจึงมีปริมาณสารระเหยสูงที่สุดคือร้อยละ 89.2 โดยน้ำหนัก เนื่องจากโพลีไวนิลแอลกอฮอล์มีปริมาณคาร์บอนและไฮโดรเจนสูงกว่าตัวประสานอื่นในงานวิจัย

- ปริมาณคาร์บอนคงตัว

ทำการคำนวณหาปริมาณคาร์บอนคงตัวของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งทุกตัวประสานโดยใช้สมการที่ 4.7 พบว่าเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งทุกตัวประสานผ่านเกณฑ์กำหนดคุณภาพเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งในประเทศอังกฤษ ซึ่งเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งซึ่งใช้ไบจามจู้รีที่ผ่านการหมักแล้วเป็นตัวประสานมีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงที่สุดคือร้อยละ 5.6 โดยน้ำหนัก รองมาคือเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งซึ่งใช้โพลีไวนิลแอลกอฮอล์และดินสอพองเป็นตัวประสานคือร้อยละ 2.8 และ 1.3 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ปริมาณคาร์บอนคงตัวเป็นส่วนที่เสถียรของโครงสร้างเชื้อเพลิงหลังให้ความร้อน เชื้อเพลิงที่มีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงจึงส่งผลให้ทนต่อการเผาไหม้ การเพิ่มปริมาณชีวมวลถือเป็นการเพิ่มปริมาณคาร์บอนคงตัว

- ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อน

ทำการวิเคราะห์หาค่าความร้อนของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งทุกตัวประสาน โดยใช้เครื่อง Bomb calorimeter พบว่าเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งทุกตัวประสานผ่านเกณฑ์กำหนดของคุณภาพเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งประเทศอังกฤษและอิตาลี โดยเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งซึ่งใช้โพลีไวนิลแอลกอฮอล์เป็นตัวประสานมีค่าความร้อนสูงที่สุดคือ 33.3 เมกะจูลต่อกิโลกรัม

- ผลการวิเคราะห์ปริมาณคลอไรด์

ทำการวิเคราะห์หาปริมาณคลอไรด์ในเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งทุกตัวประสาน โดยใช้เครื่อง X-Ray Fluorescence Spectrometer พบว่าเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งซึ่งใช้ดินสอพองเป็นตัวประสานมีปริมาณคลอไรด์สูงที่สุดคือร้อยละ 0.8 โดยน้ำหนัก รองมาคือเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งซึ่งใช้ไบจามจู้รีที่ผ่านการหมักแล้วเป็นตัวประสานมีปริมาณคลอไรด์ร้อยละ 0.4 โดยน้ำหนัก ซึ่งผ่านเกณฑ์กำหนดของ Kara และคณะ (2008) และคุณภาพเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งประเทศอังกฤษและอิตาลี ส่วนเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งซึ่งใช้โพลีไวนิลแอลกอฮอล์เป็นตัวประสานมีปริมาณคลอไรด์ต่ำที่สุดคือร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก ผ่านเกณฑ์กำหนดของ Kara และคณะ (2008) และคุณภาพเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งประเทศอิตาลี แต่มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์กำหนดของคุณภาพเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งประเทศอังกฤษ งานวิจัยนี้ได้ทำการคัดแยกขยะพลาสติกประเภทโพลีไวนิลคลอไรด์ออกก่อนเนื่องจากเป็นพลาสติกที่มีคลอไรด์เป็นองค์ประกอบ เชื้อเพลิงที่มีปริมาณคลอไรด์น้อยกว่าร้อยละ 1 โดยน้ำหนักเหมาะสำหรับเผาไหม้ที่อุณหภูมิปานกลาง (850 องศาเซลเซียส) ส่วนเชื้อเพลิงที่มีปริมาณคลอไรด์มากกว่าร้อยละ 1 โดยน้ำหนักควรเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูง (มากกว่า 1100 องศาเซลเซียส) เพื่อป้องกันการ

กีดกร่อนในเตาเผาและเกิดก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์และไดออกซิน (Garce และคณะ, 2016) ซึ่งเป็นก๊าซที่ก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ มีผลต่อระบบประสาท ภูมิคุ้มกันและสิ่งแวดล้อม

## 2) ผลการวิเคราะห์ Elemental Analysis

ทำการวิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ในเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง โดยใช้เครื่อง Elemental Analyzer-XRD และปริมาณออกซิเจนได้จากการคำนวณดังสมการที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 5.15

ตารางที่ 5.15 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งเปรียบเทียบกับเกณฑ์กำหนด

สมบัติ	ผลการวิเคราะห์			เกณฑ์กำหนด		
	โพลีไวนิลแอลกอฮอล์	ดินสอพอง	ใบจามรีหมัก	คุณภาพเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง ในประเทศไทย	Kara และคณะ (2008)	คุณภาพเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง ในประเทศไทย
<b>Elemental analysis</b>						
• คาร์บอน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	67.23	50.77	61.45	-	-	-
• ไฮโดรเจน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	11.01	8.00	10.07	-	-	-
• ออกซิเจน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	16.42	29.88	17.08	-	-	-
• ไนโตรเจน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	0.05	0.10	0.20	0.50-1.00	-	-
• ซัลเฟอร์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	0.01	>0.01	0.15	0.10-0.50	0.50	0.60

- ปริมาณของคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน

จากการวิเคราะห์พบว่าเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งซึ่งใช้โพลีไวนิลแอลกอฮอล์เป็นตัวประสานมีปริมาณคาร์บอนและไฮโดรเจนสูงที่สุดคือร้อยละ 67.23 และ 11.01 โดยน้ำหนักตามลำดับ ซึ่งปริมาณของคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนไม่มีเกณฑ์กำหนด เชื้อเพลิงที่มีปริมาณคาร์บอนและไฮโดรเจนสูงจะส่งผลให้มีค่าความร้อนที่สูง ส่วนเชื้อเพลิงที่มีปริมาณออกซิเจนสูงจะส่งผลให้มีค่าความร้อนต่ำ เนื่องจากออกซิเจนเป็นองค์ประกอบของน้ำ ซึ่ง



เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งซึ่งใช้โพลีไวนิลแอลกอฮอล์เป็นตัวประสานให้ค่าความร้อนสูงที่สุดเมื่อเทียบกับการใช้ตัวประสานอื่นๆ

- ปริมาณไนโตรเจน

จากการวิเคราะห์พบว่าเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งซึ่งใช้ไบจามจูรีที่ผ่านการหมักแล้วเป็นตัวประสานมีปริมาณไนโตรเจนสูงที่สุดคือร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก รองมาคือเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งซึ่งใช้ดินสอพองเป็นตัวประสานมีปริมาณไนโตรเจนคือร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก และเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่ทุกตัวประสานมีปริมาณไนโตรเจนผ่านเกณฑ์กำหนดทั้งหมด เชื้อเพลิงที่มีปริมาณไนโตรเจนสูงเมื่อนำมาใช้ในกระบวนการเผาไหม้จะส่งผลให้เกิดก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน (NO<sub>x</sub>) ซึ่งเป็นมลพิษทางอากาศ น้ำฝนมีสมบัติเป็นกรด จึงก่อให้เกิดมลภาวะกับสิ่งแวดล้อม ดินเปรี้ยว แหล่งน้ำมีสภาพเป็นกรด วัสดุและสิ่งก่อสร้างสึกกร่อนเร็วขึ้น

- ปริมาณซัลเฟอร์

จากการวิเคราะห์พบว่าเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งซึ่งใช้ไบจามจูรีที่ผ่านการหมักแล้วเป็นตัวประสานมีปริมาณซัลเฟอร์สูงที่สุดคือร้อยละ 0.15 โดยน้ำหนัก รองมาคือเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งซึ่งใช้โพลีไวนิลแอลกอฮอล์เป็นตัวประสานมีปริมาณซัลเฟอร์คือร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนัก และเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่ทุกตัวประสานมีปริมาณซัลเฟอร์ผ่านเกณฑ์กำหนดทั้งหมด เชื้อเพลิงที่มีปริมาณซัลเฟอร์สูงเมื่อนำมาใช้ในกระบวนการเผาไหม้ ถ้าอากาศชั้นมากก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์อาจรวมกับน้ำซึ่งทำให้เกิดเป็นกรดกำมะถัน (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) ได้ ถ้ากรดกำมะถันที่รวมกับน้ำกลายเป็นฝนและตกลงมาบนพื้นดินก็จะกลายเป็นฝนกรด ดินเปรี้ยว แหล่งน้ำมีสภาพเป็นกรด วัสดุและสิ่งก่อสร้างสึกกร่อนเร็วขึ้น

### 3) ผลการวิเคราะห์โลหะหนัก

ทำการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักในเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งทุกตัวประสาน โดยทำการย่อยตัวอย่างเชื้อเพลิงด้วยเครื่องไมโครเวฟ และวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง Inductively Coupled Plasma ตารางที่ 5.16 แสดงผลการวิเคราะห์โลหะหนักของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งเปรียบเทียบเกณฑ์กำหนดต่างๆ

ตารางที่ 5.16 ผลการวิเคราะห์โลหะหนักของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งเปรียบเทียบกับเกณฑ์กำหนด

โลหะหนัก	ผลการวิเคราะห์			เกณฑ์กำหนด		
	PVA (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ดินสอพอง (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ไบจามจรีหมัก (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	โรงงานปูนซีเมนต์ลำปาง (2554) (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	Paolo และคณะ (2015) (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	EURIT (2000) (Garces และคณะ, 2016) (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)
Cu	16.8	19.5	17.8	100,000	500	200
Zn	45.3	53.1	44.9	-	-	500
Mn	15.0	40.8	58.5	-	250	200
Ni	7.6	12.9	7.6	100,000	30	200
Co	<0.5	<0.5	0.8	-	18	200
Cr	9.2	22.4	8.8	100,000	100	200
Pb	3.1	6.6	1.8	100,000	240	200
Cd	0.8	<0.5	<0.5	100,000	4	10
Hg	<0.5	<0.5	<0.5	100,000	-	2
As	<0.5	<0.5	<0.5	100,000	5	10

จากการผลวิเคราะห์พบว่าเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งทุกตัวประสานมีโลหะหนักในปริมาณต่ำมาก ซึ่งผ่านเกณฑ์กำหนดของโรงงานปูนซีเมนต์ลำปาง (2554) Paolo และคณะ (2015) และ EURIT (2000) เนื่องจากขยะที่นำมาผลิตเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งเป็นขยะทั่วไปที่เกิดจากสถานศึกษาจึงไม่มีสารปนเปื้อนอันตรายและมีการคัดแยกขยะก่อนนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง

จากการนำขยะทั่วไปภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยมาเป็นกรณีศึกษาเพื่อเป็นแนวทางในการผลิตเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งและทำการวิเคราะห์สมบัติด้านต่างๆ พบว่าเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งมีสมบัติด้านต่างๆผ่านเกณฑ์กำหนด ยกเว้นปริมาณสารระเหยที่สูงกว่าเกณฑ์กำหนด ดังนั้นการนำขยะมูลฝอยชุมชนภายในประเทศไทยมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งจึงมีความเป็นไปได้ โดยปัจจัยที่สำคัญซึ่งส่งผลในการผลิตเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งคือพฤติกรรมกาทิ้งขยะของประชากรและขั้นตอนคัดแยกขยะที่จะนำมาผลิตเชื้อเพลิง กล่าวคือประชาชนควรทิ้งขยะให้ถูกต้องตามประเภทของถังขยะ ซึ่งถือว่าเป็นการแยกประเภทของขยะตั้งแต่ต้นทางเพื่อช่วยลดขั้นตอนการเตรียมวัสดุในการผลิตเชื้อเพลิงและส่งผลให้ขยะไม่ปนเปื้อน เนื่องจากขยะมูลฝอยในประเทศไทยมีปริมาณเศษอาหารและสารอินทรีย์สูงส่งผลให้เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่ได้มี

ปริมาณความชื้นสูง มีค่าความร้อนต่ำ ซึ่งสมบัติทางเคมีของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งจะขึ้นอยู่กับวัสดุที่นำมาอัดแท่งเป็นหลัก ซึ่งสมบัติทางเคมีนี้จะส่งผลต่อคุณภาพของเชื้อเพลิงและการเผาไหม้ ทั้งนี้ต้องคำนึงถึงเตาเผาที่นำไปใช้ด้วย เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่มีองค์ประกอบของขยะพลาสติกสูงเหมาะสำหรับใช้ในกระบวนการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงเท่านั้น

จากเกณฑ์กำหนดสมบัติเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งข้างต้น จะเห็นได้ว่าในแต่ละแหล่งที่มาของเกณฑ์มีค่ากำหนดที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ค่าที่กำหนดก็ขึ้นกับเทคโนโลยีของเตาเผาและกฎหมายด้านสิ่งแวดล้อมของประเทศนั้นๆเป็นหลัก โดยประเทศไทยยังไม่มีเกณฑ์กำหนดสมบัติของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่เป็นมาตรฐานหรือกฎหมาย เนื่องจากยังไม่มีการใช้เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งอย่างแพร่หลาย

### 5.3.2 การจัดประเภทของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง

การจัดประเภทเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งตามมาตรฐาน ASTM E-75 พบว่าเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งซึ่งได้จากงานวิจัยนี้เป็นเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งประเภทที่ 5 (RDF5 : Densified RDF) คือเกิดจากขยะมูลฝอยส่วนที่เผาไหม้ได้มาผ่านกระบวนการอัดแท่ง โดยให้ความหนาแน่นมากกว่า 600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เหมาะสำหรับนำไปใช้ในเตาเผาไหม้แบบฟลูอิดไคซ์เบด (Fluidized Bed Combustor) หรือ Multi Fuel Combustor และยังสามารถจัดเป็นเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งประเภทที่ 7 (RDF7 : RDF Syn-gas) คือเกิดจากขยะมูลฝอยส่วนที่เผาไหม้ได้มาผ่านกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันเพื่อผลิตเป็นก๊าซเชื้อเพลิงที่สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงก๊าซได้ เหมาะสำหรับนำไปใช้ในเตาเผาแบบ Burner หรือ Integrated Gasification-Combined Cycle : IGCC

### 5.3.3 ผลการทดสอบการเผาไหม้

การเปลี่ยนเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งให้อยู่ในรูปของก๊าซเชื้อเพลิงโดยผ่านกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันเป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถช่วยลดปัญหามลพิษอากาศในกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีพลาสติกเป็นองค์ประกอบ ช่วยลดปริมาณเถ้าที่จะเกิดขึ้น และยังสามารถรองรับเชื้อเพลิงที่มีความหลากหลายทางองค์ประกอบได้มากกว่าการเผาไหม้โดยตรง

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่ตัวประสานต่างๆ 6 กิโลกรัม เฝาร่วมกับถ่านไม้ 6 กิโลกรัม โดยใช้เตาเผาเตาแก๊สซิฟิเคชันแบบไหลลง (Downdraft Gasifier) เตาเผา มีจุดวัดอุณหภูมิ 8 จุด ดังแสดงในรูปที่ 5.17 โดยใช้เทอร์มอคัปเปิลชนิดเค เป็นตัววัดอุณหภูมิ ต่อสายเข้า Data logger แปลงสัญญาณส่งเข้าบันทึกค่าในคอมพิวเตอร์ อัตราการจ่ายอากาศ 300 ลิตรต่อ นาที อุณหภูมิที่นำมาวิเคราะห์เป็นค่าอุณหภูมิเฉลี่ยในช่วงเวลานั้นๆ โดยเตาแก๊สซิฟิเคชันแบบไหลลง

จะมีการเผาไหม้เชื้อเพลิงอยู่ด้านบนบนก๊าซที่เกิดขึ้นจะถูกเผาไหม้ก่อนปล่อยออก ส่งผลให้ก๊าซที่ได้มีความสะอาดมากขึ้น



รูปที่ 5.17 จุดเก็บอุณหภูมิในเตาแก๊สซีฟเออร์แบบไหลลง

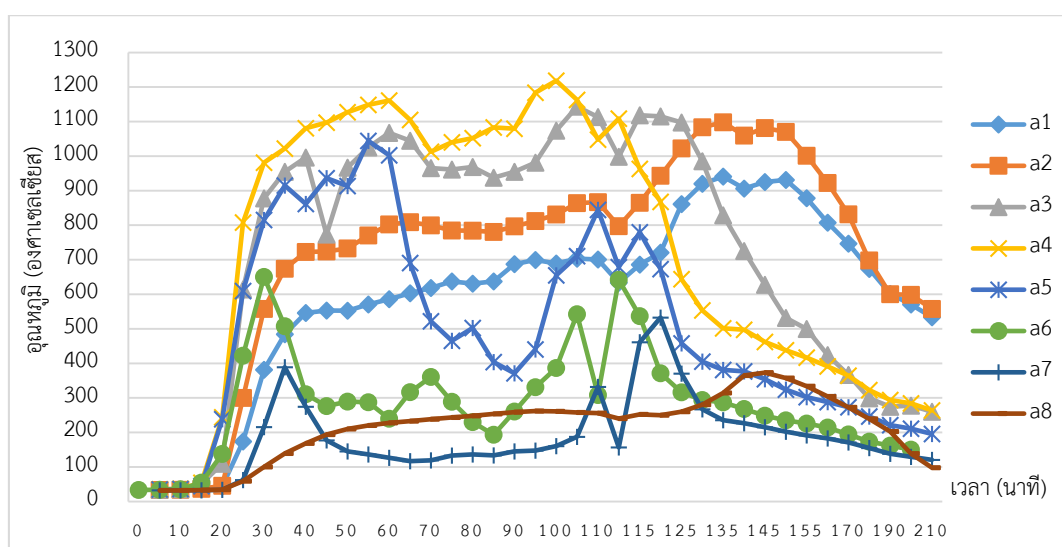
โดยมีจุดเก็บอุณหภูมิดังนี้

- a1 คือ อุณหภูมิในช่องเก็บเถ้า (Ash Pit)
- a2 คือ อุณหภูมิในช่องเก็บเถ้า (Ash Pit)
- a3 คือ อุณหภูมิในช่วงที่เกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction Reaction)
- a4 คือ อุณหภูมิในช่วงที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation Reaction)
- a5 คือ อุณหภูมิในช่วงที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation Reaction)
- a6 คือ อุณหภูมิในช่วงที่เกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิส (Pyrolysis Reaction)
- a7 คือ อุณหภูมิในช่วงการอบแห้ง (Drying)
- a8 คือ อุณหภูมิของก๊าซเชื้อเพลิงที่เกิดขึ้น

### 1) อุณหภูมิภายในเตาเผาไหม้

- ผลการทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งซึ่งใช้โพลีไวนิลแอลกอฮอล์เป็นตัวประสาน

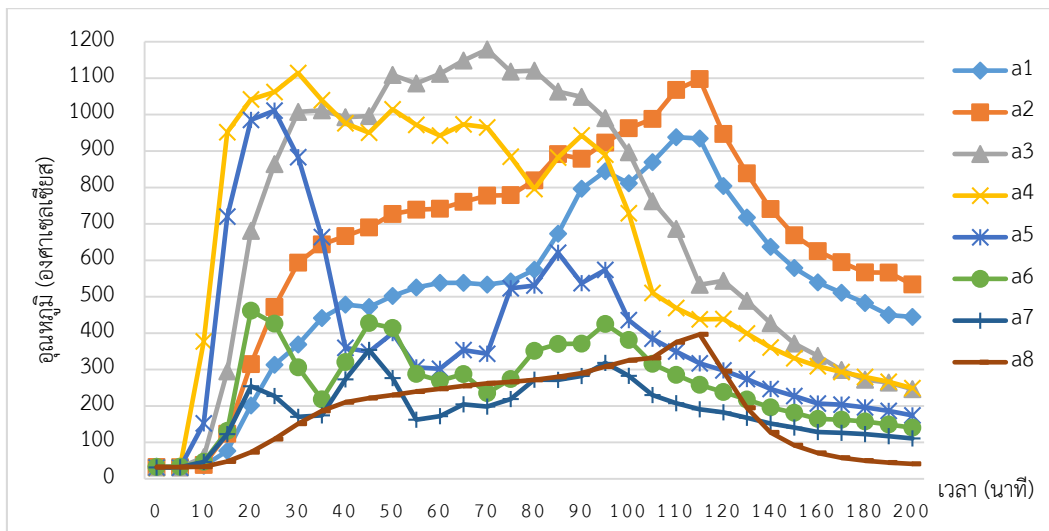
รูปที่ 5.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการเผาไหม้และอุณหภูมิในเตาเผาของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งซึ่งใช้โพลีไวนิลแอลกอฮอล์เป็นตัวประสาน พบว่าเกิดก๊าซเชื้อเพลิงในช่วง 10-110 นาทีของการเผาไหม้จากนั้นอุณหภูมิจึงค่อยๆลดลง อุณหภูมิสูงสุดของการเผาไหม้คือ 1184-1218 องศาเซลเซียส เกิดเถ้า 0.8 กิโลกรัม คิดเป็นร้อยละ 6.7 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 5.18 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการเผาไหม้และอุณหภูมิในเตาเผาของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งซึ่งใช้โพลีไวนิลแอลกอฮอล์เป็นตัวประสาน

- ผลการทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งซึ่งใช้ดินสอพองเป็นตัวประสาน

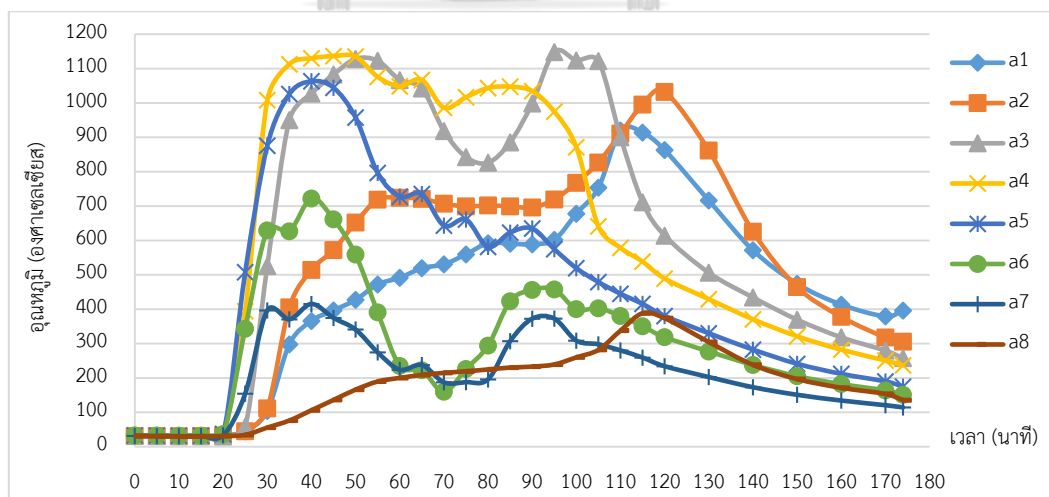
รูปที่ 5.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการเผาไหม้และอุณหภูมิในเตาเผาของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งซึ่งใช้โพลีไวนิลแอลกอฮอล์เป็นตัวประสาน พบว่าเกิดก๊าซเชื้อเพลิงในช่วง 10-90 นาทีของการเผาไหม้จากนั้นอุณหภูมิจึงค่อยๆลดลง อุณหภูมิสูงสุดของการเผาไหม้คือ 1148-1179 องศาเซลเซียส เกิดเถ้า 1.5 กิโลกรัม คิดเป็นร้อยละ 12.5 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 5.19 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการเผาไหม้และอุณหภูมิในเตาเผาของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง ซึ่งใช้ดินสอพองเป็นตัวประสาน

- ผลการทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งซึ่งใช้ไบจามจूरีหมักเป็นตัวประสาน

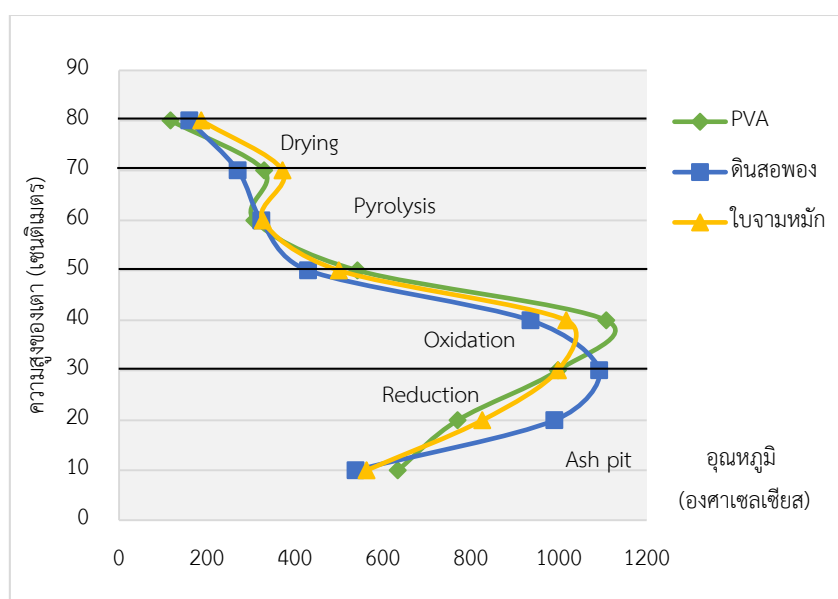
รูปที่ 5.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการเผาไหม้และอุณหภูมิในเตาเผาของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งซึ่งใช้ไบจามจूरีหมักเป็นตัวประสาน พบว่าเกิดก๊าซเชื้อเพลิงในช่วง 20-90 นาทีของการเผาไหม้ จากนั้นอุณหภูมิจึงค่อยๆลดลง อุณหภูมิสูงสุดของการเผาไหม้คือ 1124-1148 องศาเซลเซียส เกิดเถ้า 1.4 กิโลกรัม คิดเป็นร้อยละ 11.7 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 5.20 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการเผาไหม้และอุณหภูมิในเตาเผาของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง ซึ่งใช้ไบจามจूरีที่ผ่านการหมักแล้วเป็นตัวประสาน

## 2) ปฏิกริยาในเตาเผาไหม้

ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นภายในเตาเผาจะแบ่งออกเป็น 4 โซน ได้แก่ โซนอบแห้ง โซนไพโรไลซิส โซนเผาไหม้ และโซนรีดักชัน อ้างอิงจากความสูงของเตาเผาและอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาเผา ณ ช่วงเวลาหนึ่งที่เกิดปฏิกริยา อุณหภูมิของช่วงปฏิกริยาการเผาไหม้ อ้างอิงจากระดับความสูงของเตาเผาแสดงดังรูปที่ 5.21



รูปที่ 5.21 อุณหภูมิของช่วงปฏิกริยาการเผาไหม้ อ้างอิงจากระดับความสูงของเตาเผา

ตารางที่ 5.17 อุณหภูมิของช่วงปฏิกริยาการเผาไหม้ในระหว่างผลิตก๊าซเชื้อเพลิง

ตำแหน่ง	ช่วงปฏิกริยา	อุณหภูมิ ตามทฤษฎี (องศา เซลเซียส)	อุณหภูมิจากการทดลอง (องศาเซลเซียส)		
			โพลีไวนิล แอลกอฮอล์	ดินสอพอง	ใบจามจรีหมัก
a1, a2	ช่องเก็บถ่าน	-	634-797	538-759	563-715
a3	รีดักชัน	400-900	998	1092	998
a4, a5	ออกซิเดชัน	1000-1200	679-1108	409-936	650-1017
a6	ไพโรไลซิส	300-900	308	324	327
a7	การอบแห้ง	100-300	157	240	267
a8	ก๊าซเชื้อเพลิง	-	240	249	222

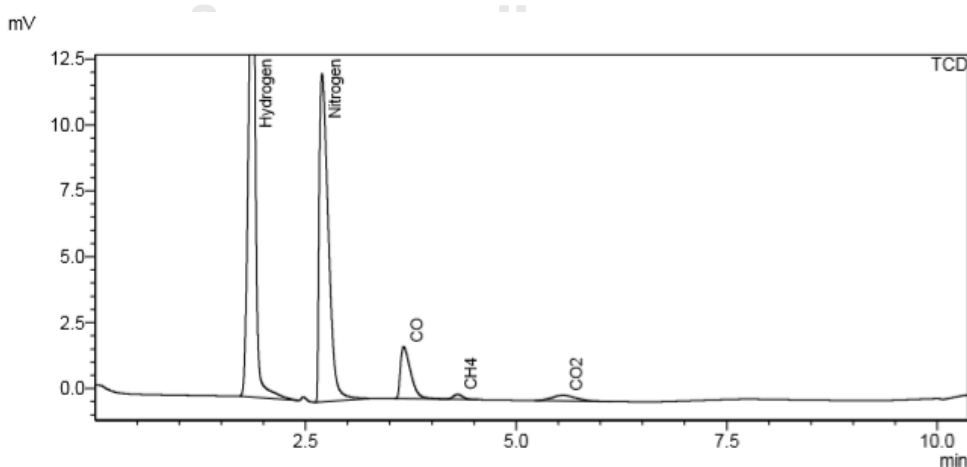
จากตารางที่ 5.17 แสดงอุณหภูมิของช่วงปฏิกิริยาการเผาไหม้ในระหว่างผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเปรียบเทียบกับอุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยาตามทฤษฎี จะเห็นได้ว่าช่วงการอบแห้งเป็นการไล่ความชื้นออกจากเชื้อเพลิงจะมีอุณหภูมิอยู่ที่ประมาณ 200 องศาเซลเซียส อุณหภูมิการเผาไหม้สูงที่สุดควรอยู่ในช่วงปฏิกิริยาออกซิเดชันเนื่องจากเป็นช่วงเผาไหม้เชื้อเพลิงซึ่งมีการจ่ายอากาศเข้าไปเพื่อทำปฏิกิริยา จะมีอุณหภูมิอยู่ที่ประมาณ 1000-1200 องศาเซลเซียส จากนั้นอุณหภูมิจึงค่อยๆลดลงเนื่องจากปฏิกิริยาคูดความร้อนที่เกิดขึ้นในโซนลดลง (สุธินิ ทิรัณ ประเสริฐศรี และสุเทพ บุตรดี, 2557) ซึ่งการเผาไหม้เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งซึ่งใช้โพลีไวนิลแอลกอฮอล์และไบจามจรีที่ผ่านการหมักแล้วเป็นตัวประสานมีอุณหภูมิการเผาไหม้เฉลี่ยสูงที่สุดอยู่ในช่วงปฏิกิริยาออกซิเดชันส่วนการเผาไหม้เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งซึ่งใช้ดินสอพองเป็นตัวประสานมีอุณหภูมิการเผาไหม้เฉลี่ยสูงที่สุดในช่วงปฏิกิริยารีดักชัน ทั้งนี้อุณหภูมิจากการทดลองเป็นเพียงแค่ค่าเฉลี่ยในช่วงเวลาหนึ่งเท่านั้น โดยปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้คือ ประสิทธิภาพของเตาเผา อัตราการจ่ายอากาศ และเชื้อเพลิงที่นำมาเผาไหม้

### 3) ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซเชื้อเพลิง

ทำการเก็บตัวอย่างก๊าซเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ได้ในเวลาที่อุณหภูมิในเตาเผาเริ่มคงที่ เก็บตัวอย่างจำนวน 3 ตัวอย่างห่างกันตัวอย่างละ 3 นาที แล้วนำมาวัดองค์ประกอบของก๊าซโดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

- ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซเชื้อเพลิงจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งซึ่งใช้โพลีไวนิลแอลกอฮอล์เป็นตัวประสาน

เก็บก๊าซตัวอย่างครั้งที่ 1

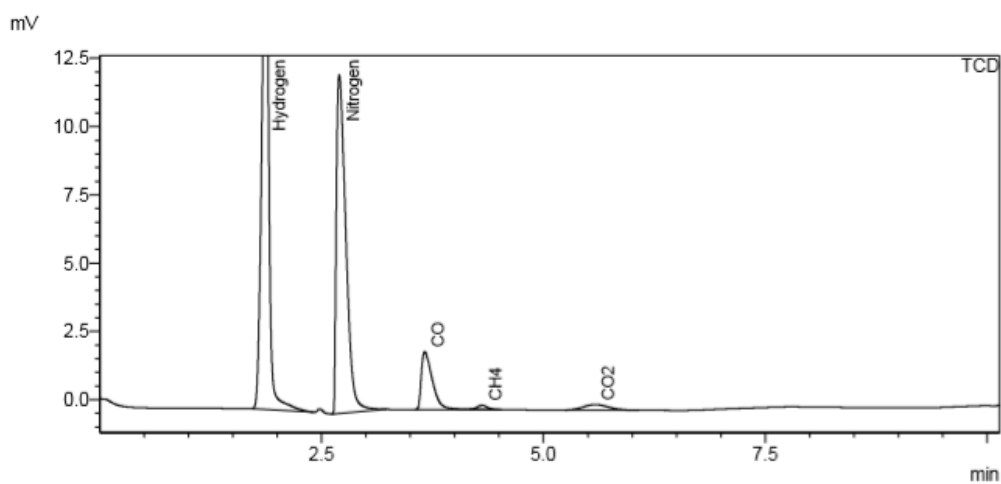


รูปที่ 5.22 องค์ประกอบก๊าซเชื้อเพลิงจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง

ซึ่งใช้โพลีไวนิลแอลกอฮอล์เป็นตัวประสานตัวอย่างครั้งที่ 1

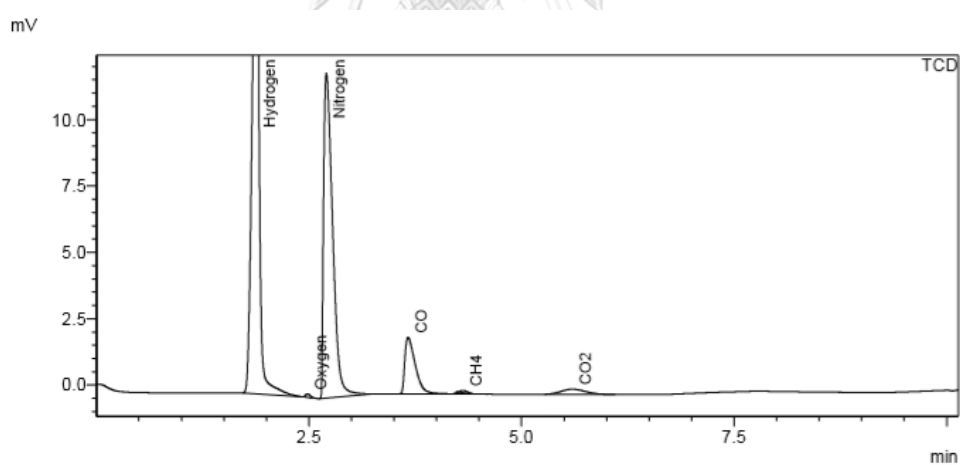


เก็บก๊าซตัวอย่างครั้งที่ 2



รูปที่ 5.23 องค์ประกอบก๊าซเชื้อเพลิงจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง  
ซึ่งใช้โพลีไวนิลแอลกอฮอล์เป็นตัวประสานตัวอย่างครั้งที่ 2

เก็บก๊าซตัวอย่างครั้งที่ 3



รูปที่ 5.24 องค์ประกอบก๊าซเชื้อเพลิงจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง  
ซึ่งใช้โพลีไวนิลแอลกอฮอล์เป็นตัวประสานตัวอย่างครั้งที่ 3

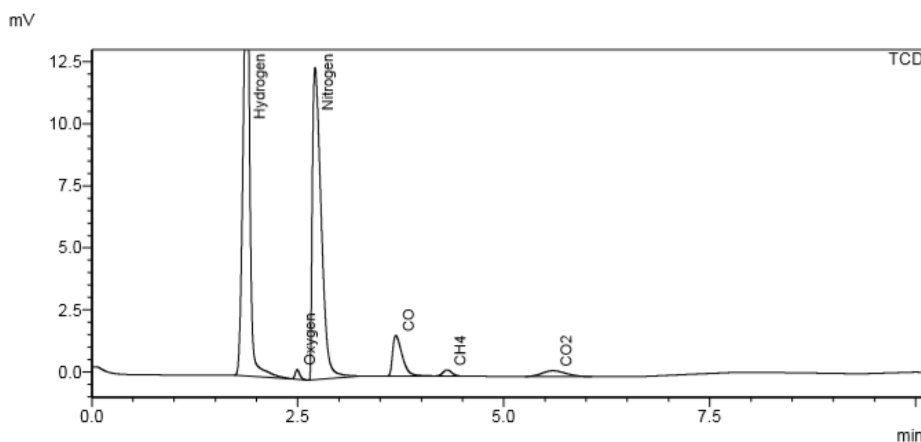
ตารางที่ 5.18 สรุปลองค์ประกอบของก๊าซเชื้อเพลิงจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งซึ่งใช้โพลีไวนิลแอลกอฮอล์เป็นตัวประสาน

องค์ประกอบก๊าซ	ก๊าซตัวอย่าง			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
ไฮโดรเจน (%)	8.02	7.51	8.45	7.99
ออกซิเจน (%)	0.00	0.00	0.00	0.00
ไนโตรเจน (%)	64.45	63.59	62.00	63.34
คาร์บอนมอนอกไซด์ (%)	14.91	16.52	17.15	16.19
มีเทน (%)	0.53	0.44	0.17	0.38
คาร์บอนไดออกไซด์ (%)	9.42	9.09	8.58	9.03
ค่าความร้อนก๊าซเชื้อเพลิง (เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตรมาตรฐาน)	2.94	3.05	3.14	3.04

จากตารางที่ 5.18 พบว่ามีองค์ประกอบของก๊าซเชื้อเพลิงเฉลี่ยที่เกิดขึ้นคือ ไฮโดรเจนร้อยละ 7.99 คาร์บอนมอนอกไซด์ร้อยละ 16.19 และมีเทนร้อยละ 0.38 โดยคิดเป็นร้อยละ 24.57 ของปริมาณก๊าซทั้งหมดที่ผลิตได้ มีค่าความร้อนก๊าซเชื้อเพลิงเฉลี่ย 3.04 เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตรมาตรฐาน

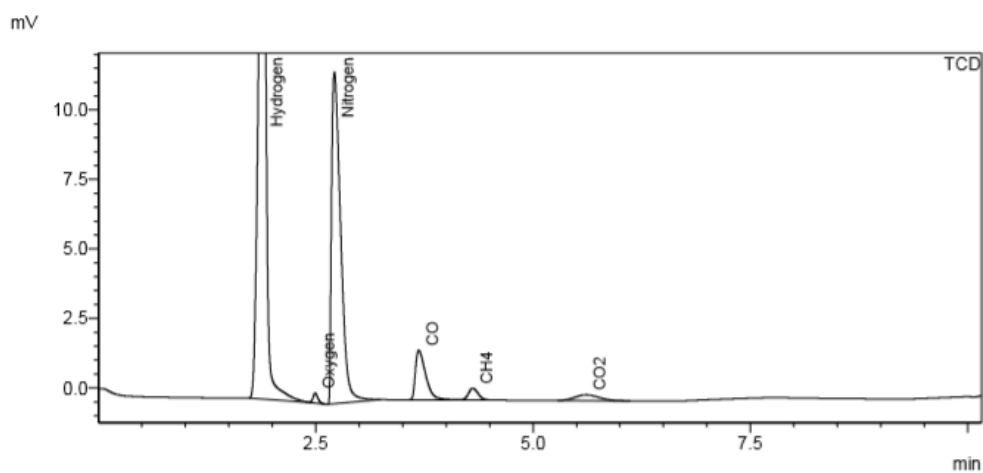
- ผลการทดสอบองค์ประกอบก๊าซจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งซึ่งใช้ดินสอพองเป็นตัวประสาน

เก็บก๊าซตัวอย่างครั้งที่ 1



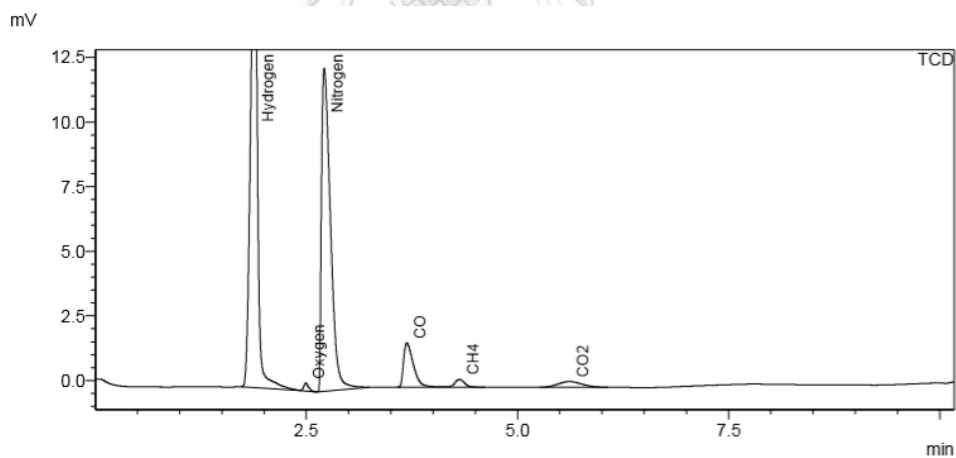
รูปที่ 5.25 องค์ประกอบก๊าซเชื้อเพลิงจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งซึ่งใช้ดินสอพองเป็นตัวประสานตัวอย่างครั้งที่ 1

เก็บก๊าซตัวอย่างครั้งที่ 2



รูปที่ 5.26 องค์ประกอบก๊าซเชื้อเพลิงจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง  
ซึ่งใช้ดินสอพองเป็นตัวประสานตัวอย่างครั้งที่ 2

เก็บก๊าซตัวอย่างครั้งที่ 3



รูปที่ 5.27 องค์ประกอบก๊าซเชื้อเพลิงจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง  
ซึ่งใช้ดินสอพองเป็นตัวประสานตัวอย่างครั้งที่ 3

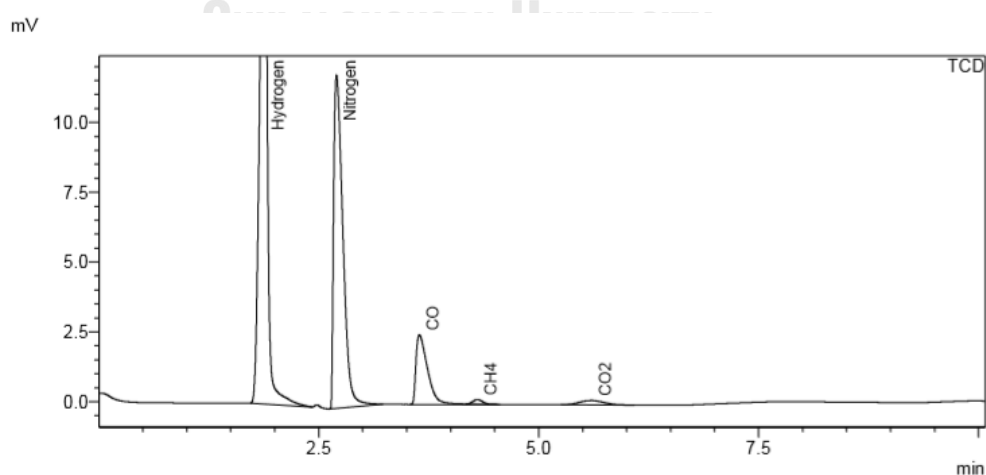
ตารางที่ 5.19 สรุปองค์ประกอบของก๊าซเชื้อเพลิงจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งซึ่งใช้ดินสอพองเป็นตัวประสาน

องค์ประกอบก๊าซ	ก๊าซตัวอย่าง			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
ไฮโดรเจน (%)	7.25	10.30	7.88	8.48
ออกซิเจน (%)	0.00	0.00	0.00	0.00
ไนโตรเจน (%)	64.41	59.66	63.71	62.60
คาร์บอนมอนอกไซด์ (%)	11.98	13.28	12.59	12.62
มีเทน (%)	0.78	1.31	0.94	1.01
คาร์บอนไดออกไซด์ (%)	10.41	9.39	9.88	9.89
ค่าความร้อนก๊าซเชื้อเพลิง (เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตรมาตรฐาน)	2.57	3.26	2.78	2.87

จากตารางที่ 5.18 พบว่ามีองค์ประกอบของก๊าซเชื้อเพลิงเฉลี่ยที่เกิดขึ้นคือ ไฮโดรเจนร้อยละ 8.48 คาร์บอนมอนอกไซด์ร้อยละ 12.62 และ มีเทนร้อยละ 1.01 โดยคิดเป็นร้อยละ 22.10 ของปริมาณก๊าซทั้งหมดที่ผลิตได้ มีค่าความร้อนก๊าซเชื้อเพลิงเฉลี่ย 2.87 เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตรมาตรฐาน

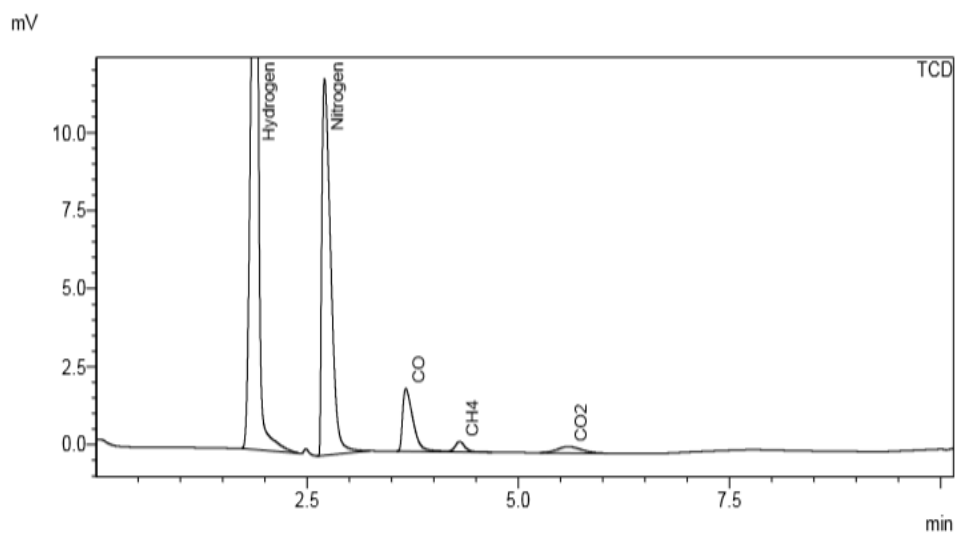
- ผลการทดสอบองค์ประกอบก๊าซจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งซึ่งใช้ไบจามจูลรีที่ผ่านการหมักแล้วเป็นตัวประสาน

เก็บก๊าซตัวอย่างครั้งที่ 1



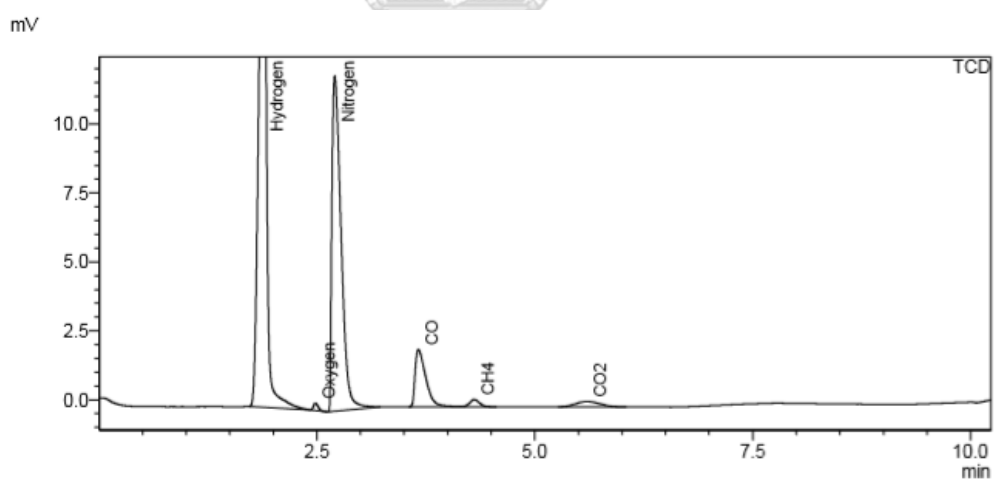
รูปที่ 5.28 องค์ประกอบก๊าซเชื้อเพลิงจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งซึ่งใช้ไบจามจูลรีที่ผ่านการหมักแล้วเป็นตัวประสานตัวอย่างครั้งที่ 1

เก็บก๊าซตัวอย่างครั้งที่ 2



รูปที่ 5.29 องค์ประกอบก๊าซเชื้อเพลิงจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง  
ซึ่งใช้ไบโแกมจูลีที่ผ่านการหมักแล้วเป็นตัวอย่างครั้งที่ 2

เก็บก๊าซตัวอย่างครั้งที่ 3



รูปที่ 5.30 องค์ประกอบก๊าซเชื้อเพลิงจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง  
ซึ่งใช้ไบโแกมจูลีที่ผ่านการหมักแล้วเป็นตัวอย่างครั้งที่ 3

ตารางที่ 5.20 สรุปลองค์ประกอบของก๊าซเชื้อเพลิงจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งซึ่งใช้ไบจามจรี ที่ผ่านการหมักแล้วเป็นตัวประสาน

องค์ประกอบก๊าซ	ก๊าซตัวอย่าง			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
ไฮโดรเจน (%)	9.64	10.57	9.96	10.06
ออกซิเจน (%)	0.00	0.00	0.00	0.00
ไนโตรเจน (%)	60.02	60.82	61.23	60.69
คาร์บอนมอนอกไซด์ (%)	20.50	15.30	16.00	17.27
มีเทน (%)	0.48	1.02	0.81	0.77
คาร์บอนไดออกไซด์ (%)	7.11	8.89	8.66	8.22
ค่าความร้อนก๊าซเชื้อเพลิง (เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตรมาตรฐาน)	3.80	3.44	3.38	3.54

จากตารางที่ 5.19 พบว่ามีองค์ประกอบของก๊าซเชื้อเพลิงเฉลี่ยที่เกิดขึ้นคือ ไฮโดรเจนร้อยละ 10.06 คาร์บอนมอนอกไซด์ร้อยละ 17.27 และมีเทนร้อยละ 0.77 โดยคิดเป็นร้อยละ 28.10 ของปริมาณก๊าซทั้งหมดที่ผลิตได้ มีค่าความร้อนก๊าซเชื้อเพลิงเฉลี่ย 3.54 เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตรมาตรฐาน

#### 4) ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประสานกับการเผาไหม้

- เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งซึ่งใช้โพลีไวนิลแอลกอฮอล์เป็นตัวประสาน

จากการทดสอบการเผาไหม้และวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซ พบว่าเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งซึ่งใช้โพลีไวนิลแอลกอฮอล์เป็นตัวประสานมีค่าความร้อนก๊าซเชื้อเพลิงเฉลี่ยสูงเป็นอันดับสองรองจากเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งซึ่งใช้ไบจามจรีที่ผ่านการหมักแล้วเป็นตัวประสานคือ 3.04 เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตรมาตรฐาน และเกิดก๊าซเชื้อเพลิงเป็นเวลานานที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวประสานอื่นในงานวิจัยคือประมาณ 100 นาทีของการเผาไหม้อุณหภูมิภายในเตาเผาเริ่มสูงขึ้นเมื่อเผาไหม้ไปประมาณ 20 นาที โดยเชื้อเพลิงเผาไหม้เป็นเวลาทั้งหมดประมาณ 155 นาที หลังจากนั้นอุณหภูมิจึงค่อยๆลดลง อุณหภูมิในการเผาไหม้ที่สูงที่สุดคือ 1184-1218 องศาเซลเซียส ซึ่งให้อุณหภูมิในการเผาไหม้ที่สูงที่สุด เชื้อเพลิงติดไฟและให้ความร้อนเร็ว และมีเวลาเผาไหม้นานที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวประสานอื่นในงานวิจัย ทั้งนี้เนื่องจากเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งซึ่งใช้โพลีไวนิลแอลกอฮอล์เป็นตัวประสานมีค่าความร้อนและค่าความหนาแน่นสูงที่สุด ปริมาณเถ้าที่เกิดจากการเผาไหม้คิดเป็นร้อยละ 6.7 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าที่

วิเคราะห์ปริมาณเถ้าเพียงเล็กน้อยเนื่องจากเป็นการเผาไหม้เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งร่วมกับถ่านไม้

- เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งซึ่งใช้ดินสอพองเป็นตัวประสาน

จากการทดสอบการเผาไหม้และวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซ พบว่าเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งซึ่งใช้ดินสอพองเป็นตัวประสานมีค่าความร้อนก๊าซเชื้อเพลิงเฉลี่ยน้อยที่สุดคือ 2.87 เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตรมาตรฐาน เกิดก๊าซเชื้อเพลิงเป็นเวลาประมาณ 80 นาทีของการเผาไหม้ อุณหภูมิภายในเตาเผาเริ่มสูงขึ้นเมื่อเผาไหม้ไปประมาณ 10 นาที เชื้อเพลิงติดไฟได้เร็วเนื่องจากมีปริมาณสารระเหยสูง โดยเชื้อเพลิงเผาไหม้เป็นเวลาทั้งหมดประมาณ 115 นาที หลังจากนั้นอุณหภูมิจึงค่อยๆลดลง อุณหภูมิในการเผาไหม้ที่สูงที่สุดคือ 1148-1179 องศาเซลเซียส ซึ่งให้อุณหภูมิสูงเป็นอันดับสอง ทั้งนี้เนื่องจากเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งซึ่งใช้ดินสอพองเป็นตัวประสานจะมีปริมาณค่าความร้อนน้อยที่สุดแต่มีค่าความหนาแน่นสูงที่สุด มีปริมาณเถ้าสูง ปริมาณเถ้าที่เกิดจากการเผาไหม้คิดเป็นร้อยละ 12.5 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าที่วิเคราะห์ปริมาณเถ้าเพียงเล็กน้อยเนื่องจากเป็นการเผาไหม้เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งร่วมกับถ่านไม้

- เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งซึ่งใช้ใบจามจรีที่ผ่านการหมักแล้วเป็นตัวประสาน

จากการทดสอบการเผาไหม้และวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซ พบว่าเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งซึ่งใช้ใบจามจรีที่ผ่านการหมักแล้วเป็นตัวประสานมีค่าความร้อนก๊าซเชื้อเพลิงเฉลี่ยสูงที่สุดคือ 3.54 เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตรมาตรฐาน แต่เกิดก๊าซเชื้อเพลิงเป็นเวลานานที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวประสานอื่นในงานวิจัยคือประมาณ 70 นาทีของการเผาไหม้ เชื้อเพลิงเริ่มติดไฟและอุณหภูมิในเตาเริ่มสูงขึ้นเมื่อเผาไหม้ไปประมาณ 25 นาที ซึ่งเป็นเวลานานที่สุดเมื่อเทียบกับตัวประสานอื่นในงานวิจัย ทั้งนี้เนื่องจากเชื้อเพลิงมีปริมาณสารระเหยน้อยที่สุด โดยเชื้อเพลิงเผาไหม้เป็นเวลาทั้งหมดประมาณ 120 นาที หลังจากนั้นอุณหภูมิจึงค่อยๆลดลง และอุณหภูมิในการเผาไหม้ช่วงที่สูงสุดมีค่าน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับตัวประสานอื่นในงานวิจัยคือ 1148 องศาเซลเซียส ทั้งนี้เนื่องจากเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งซึ่งใช้ใบจามจรีที่ผ่านการหมักแล้วเป็นตัวประสานมีค่าความหนาแน่นน้อยที่สุดถึงแม้จะมีค่าคาร์บอนคงตัวสูงที่สุดก็ตาม ปริมาณเถ้าที่เกิดจากการเผาไหม้คิดเป็นร้อยละ 11.6 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการวิเคราะห์เล็กน้อย

### 5.3.4 การเปรียบเทียบองค์ประกอบก๊าซจากการทดสอบการเผาไหม้ในงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่น

จากตารางที่ 5.21 แสดงการเปรียบเทียบองค์ประกอบของก๊าซจากการทดสอบการเผาไหม้ระหว่างงานวิจัยนี้และงานวิจัยอื่น จะเห็นได้ว่าก๊าซที่เกิดขึ้นมีค่าความร้อนก๊าซเชื้อเพลิงสูงเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น ดังนั้นการนำขยะจากสถานศึกษามาผลิตเป็นเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งเพื่อใช้เผาพร้อมกับถ่านหินในกระบวนการเผาไหม้ของอุตสาหกรรมจึงมีความเป็นไปได้สูง

ตารางที่ 5.21 การเปรียบเทียบองค์ประกอบก๊าซจากการทดสอบการเผาไหม้ในงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่น

ขยะ	ตัวประสาน	อัตราการ จ่ายอากาศ	ไฮโดรเจน (%)	คาร์บอน มอน ออกไซด์ (%)	มีเทน (%)	ค่าความร้อน ก๊าซเชื้อเพลิง (เมกะจูลต่อ ลูกบาศก์เมตร มาตรฐาน)	งานวิจัย
พลาสติก : กระดาษ : กากกาแฟ	โพลีไวนิล แอลกอฮอล์	300 ลิตรต่อ นาที่	7.99	16.19	0.38	3.04	งานวิจัยนี้
พลาสติก : กระดาษ : กากกาแฟ	ดินสอพอง	300 ลิตรต่อ นาที่	8.48	12.62	1.01	2.87	งานวิจัยนี้
พลาสติก : กระดาษ : กากกาแฟ	ใบจามจู้ หมัก	300 ลิตรต่อ นาที่	10.06	17.27	0.77	3.54	งานวิจัยนี้
ขยะจาก open dump site	-	500 ลิตรต่อ นาที่	0.02	9.86	0.96	1.59	Chiemchaisri และคณะ (2010)
ขยะจาก หลุมฝังกลบ	-	300 ลิตรต่อ นาที่	4.00	2.59	1.95	1.46	สุธินี ธีรัญ ประเสริฐศรี และ สุเทพ บุตรดี (2557)

ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงส่งผลต่อปฏิกิริยาการเผาไหม้และการเกิดก๊าซเชื้อเพลิง เชื้อเพลิงที่มีความหนาแน่นสูงจะมีอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงต่ำ เนื่องจากเชื้อเพลิงมีความหนาแน่นสูง เผาไหม้ได้นาน ซึ่งส่งผลต่อระยะเวลาที่เชื้อเพลิงใช้ในการทำปฏิกิริยาในเตาเผา เชื้อเพลิงที่อยู่ในเตานานเกินไปส่งผลให้เกิดเถ้าหลอมภายในเตา แต่ถ้าเชื้อเพลิงอยู่ในเตาสั้นเกินไปจะทำให้เกิดคาร์บอนส่วนที่ไม่เผาไหม้



สูงขึ้น ดังนั้นความหนาแน่นของเชื้อเพลิงควรมีค่าที่เหมาะสมคือไม่ต่ำและสูงเกินไป ปริมาณสารระเหยส่งผลต่อการติดไฟของเชื้อเพลิงคือเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งหรือของเหลวจะไม่สามารถถูกติดไฟได้ถ้าโมเลกุลที่ผิวของเชื้อเพลิงไม่อยู่ในสถานะก๊าซ ดังนั้นการติดไฟของเชื้อเพลิงจะขึ้นกับปริมาณไอของสารที่เป็นเชื้อเพลิงในอากาศที่มีสมบัติพร้อมจะติดไฟ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2560) กล่าวคือปัจจัยที่มีผลต่อการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงคือ ค่าความร้อน ความหนาแน่น และปริมาณสารระเหย ซึ่งเชื้อเพลิงที่มีค่าเหล่านี้สูงจะส่งผลให้เชื้อเพลิงให้อุณหภูมิในเตาเผาที่สูง ทนต่อการเผาไหม้และติดไฟได้เร็วกว่าเชื้อเพลิงที่มีค่าเหล่านี้ต่ำ ขณะที่องค์ประกอบของก๊าซเชื้อเพลิงที่เกิดขึ้นจะขึ้นกับวัสดุที่นำมาผลิตเป็นแท่งเชื้อเพลิงและสภาวะภายในเตาเผาเป็นหลัก Chiemchaisri และคณะ (2010) กล่าวว่าปริมาณการเกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจนจะขึ้นอยู่กับอัตราการจ่ายอากาศ งานของ Boerrigter และ Rauch (2005) กล่าวว่าองค์ประกอบของก๊าซที่เกิดขึ้นในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันจะขึ้นกับชนิดของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน อุณหภูมิในเตาเผา และวัสดุที่นำมาใช้



## บทที่ 6

### สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

#### 6.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาหาสัดส่วนขยะ สภาวะในการอัด และการใช้ตัวประสานที่เหมาะสมโดยใช้ขยะภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเป็นกรณีศึกษาเพื่อเป็นแนวทางในการนำขยะชุมชนส่วนที่รีไซเคิลไม่ได้กลับมาใช้ใหม่ในรูปของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งให้มีคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีที่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมในกระบวนการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงของโรงงานปูนซีเมนต์โดยส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด จากนั้นทำการทดสอบการเผาไหม้และเก็บก๊าซเชื้อเพลิงที่เกิดขึ้นเพื่อมาวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซ ผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า

1. จากการสำรวจปริมาณขยะมูลฝอยตั้งแต่เดือนกรกฎาคมถึงกันยายน ปีพ.ศ. 2560 ภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยโดยไม่รวมขยะส่วนที่มาจากโรงอาหาร เมื่อแยกประเภทของขยะกระดาษและพลาสติก พบว่ามีส่วนที่รีไซเคิลไม่ได้คิดเป็นร้อยละ 48.41 โดยน้ำหนักของขยะทั้งหมด ซึ่งขยะส่วนนี้สามารถนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งได้ ถือเป็นความช่วยเหลือในการลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดขยะ ลดปริมาณขยะที่จะถูกส่งไปยังหลุมฝังกลบและยังช่วยลดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงถ่านหินในกระบวนการเผาไหม้ของโรงงานปูนซีเมนต์

2. สรุปผลการวิเคราะห์หาสัดส่วนขยะที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง

ที่สัดส่วนขยะ 3:5:1 (พลาสติก : กระดาษ : กากกาแฟ) มีค่าความหนาแน่นและค่ากำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดคือ 811.9 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และ 25.6 เมกะปาสคาล ตามลำดับ ขณะที่สัดส่วน 5:1:3 มีค่าความร้อนสูงสุดคือ 32.9 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งทุกสัดส่วนขยะให้ค่าความหนาแน่น ค่ากำลังต้านทานแรงอัดและค่าความร้อนผ่านเกณฑ์กำหนดสมบัติของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง (ตารางที่ 3.3)

3. สรุปผลการวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง

สภาวะการอัดอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เวลา 15 นาที และแรงดัน 150 บาร์ ให้ความหนาแน่นสูงที่สุดคือ 742.7 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ปัจจัยที่มีผลต่อความหนาแน่นของแท่งเชื้อเพลิงมากคืออุณหภูมิในการอัดและชนิดของวัสดุที่นำมาอัด

สภาวะการอัดอุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เวลา 10 นาที และแรงดัน 100 บาร์ ให้ค่ากำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดคือ 21.2 เมกะปาสคาล ค่ากำลังต้านทานแรงอัดเหมาะสมสำหรับวิเคราะห์ใน

วัสดุที่มีความแข็งแต่เปราะเพื่อหาความคงทนภายในชิ้นงาน ดังนั้นปัจจัยที่มีผลต่อค่ากำลังต้านทานแรงอัดมากที่สุดคือชนิดของวัสดุที่นำมาอัดแห้งเชื้อเพลิงมากกว่าสภาวะในการอัด

ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงขยะอัดแห้งของทุกๆสภาวะมีค่าใกล้เคียงกันคืออยู่ในช่วง 32-36 เมกะจูลต่อกิโลกรัม กล่าวคือเชื้อเพลิงที่มีสัดส่วนเดียวกันจะให้ค่าความร้อนใกล้เคียงกัน

สภาวะที่เหมาะสมในการอัดแห้งเชื้อเพลิงที่ผลิตจากพลาสติก กระดาษ และกากกาแฟ คือแรงดันที่ใช้ในการอัดไม่ควรต่ำกว่า 100 บาร์ เนื่องจากการอัดที่แรงดันต่ำกว่า 100 บาร์ส่งผลให้เชื้อเพลิงเกาะตัวเป็นแท่งได้ไม่ดี มีค่าความหนาแน่นต่ำกว่าเกณฑ์กำหนด (600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) ต้องใช้เวลาและอุณหภูมิสูงขึ้นจึงจะสามารถอัดเป็นแท่งได้ อุณหภูมิที่ใช้ในการอัดควรอยู่ในช่วง 250-300 องศาเซลเซียสและเวลาที่ใช้ในการอัดจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ในการอัด ซึ่งสภาวะในการอัดที่เหมาะสมนั้นจะขึ้นกับชนิดของวัสดุที่นำมาอัดแห้งเชื้อเพลิง

4. สรุปผลการวิเคราะห์ตัวประสานประเภทต่างๆซึ่งใช้ในการผลิตเชื้อเพลิงขยะอัดแห้งและผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวประสานและสภาวะต่างๆในการผลิตเชื้อเพลิงขยะอัดแห้ง

คุณภาพของเชื้อเพลิงขยะอัดแห้งจะขึ้นอยู่กับประเภทของตัวประสานที่ใช้ การใช้ตัวประสานจะช่วยเพิ่มสมบัติทางกายภาพให้เชื้อเพลิง ชนิดของวัสดุที่นำมาผลิตเชื้อเพลิงขยะอัดแห้งที่แตกต่างกันก็ต้องการตัวประสานที่ต่างกัน ดังนั้นการเลือกใช้ตัวประสานและปริมาณในการใช้ที่เหมาะสมเป็นปัจจัยหนึ่งซึ่งส่งผลให้เชื้อเพลิงมีคุณภาพสูงขึ้นและควรเลือกใช้สภาวะในการอัดที่เหมาะสมของแต่ละตัวประสาน สรุปประเภทและข้อดีข้อเสียของตัวประสานที่ใช้ในงานวิจัยดังแสดงในตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 สรุปประเภทและข้อดีข้อเสียของตัวประสานที่ใช้ในงานวิจัย

ตัวประสาน	ประเภท	การใช้งาน	ข้อดี	ข้อเสีย
โพลีไวนิลแอลกอฮอล์	Organic Binder-Polymer	ช่วยลดเวลา อุณหภูมิ และแรงดันในการอัดได้	<ul style="list-style-type: none"> <li>ยึดเกาะได้ดี</li> <li>ค่าความร้อนสูง</li> <li>ทนต่อการเผาไหม้</li> <li>เพิ่มความหนาแน่นเมื่อใช้ในปริมาณที่เหมาะสม</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ราคาสูง</li> <li>กำลังต้านทานแรงอัดต่ำ</li> </ul>
ดินสอพอง	Inorganic Binder	ช่วยลดเวลา อุณหภูมิ และแรงดันในการอัดได้	<ul style="list-style-type: none"> <li>ราคาถูก</li> <li>หาง่าย</li> <li>เพิ่มความหนาแน่น</li> <li>การยึดเกาะแข็งแรง</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ปริมาณเถ้าสูง</li> <li>ความร้อนต่ำ</li> </ul>

ตารางที่ 6.1 สรุปประเภทและข้อดีข้อเสียของตัวประสานที่ใช้ในงานวิจัย (ต่อ)

ตัวประสาน	ประเภท	การใช้งาน	ข้อดี	ข้อเสีย
ไบจามจูรีที่ผ่านการหมักแล้ว	Organic Binder-Biomass	ช่วยลดอุณหภูมิในการอัดได้เล็กน้อย ไม่สามารถช่วยลดเวลาและแรงดันในการอัดได้	<ul style="list-style-type: none"> <li>• หาง่าย</li> <li>• ราคาถูก</li> <li>• เพิ่มความหนาแน่น</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ค่าความร้อนต่ำ</li> <li>• สลายตัวง่ายในอุณหภูมิสูง</li> <li>• การยึดเกาะไม่แข็งแรง</li> </ul>

#### 5. ผลการวิเคราะห์สมบัติเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง

เมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์กำหนดต่างๆ พบว่าสมบัติของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งส่วนใหญ่มีค่าผ่านเกณฑ์กำหนด (ตารางที่ 3.3 และ 3.4) ซึ่งค่าที่ไม่ผ่านเกณฑ์กำหนดเป็นค่าที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในระดับต่ำ ทั้งนี้เกณฑ์กำหนดของแต่ละแหล่งที่มาที่มีค่ากำหนดที่แตกต่างกัน เนื่องจากเทคโนโลยีของเตาเผาและกฎหมายด้านสิ่งแวดล้อมของประเทศนั้นๆ

#### 6. ผลการทดสอบการเผาไหม้

ทำการทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งโดยใช้เตาแก๊สซิไฟเออร์แบบไหลลงเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งซึ่งใช้ไบจามจูรีที่ผ่านการหมักแล้วเป็นตัวประสานมีค่าความร้อนก๊าซเชื้อเพลิงเฉลี่ยสูงสุดคือ 3.54 เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตรมาตรฐาน อันดับรองมาคือเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งซึ่งใช้โพลีไวนิลแอลกอฮอล์เป็นตัวประสานมีค่าความร้อนก๊าซเชื้อเพลิงเฉลี่ยคือ 3.04 เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตรมาตรฐาน โดยที่เวลาการเกิดก๊าซเชื้อเพลิงของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งซึ่งใช้โพลีไวนิลแอลกอฮอล์เป็นตัวประสานมีเวลานานที่สุดคือ 100 นาที

ปัจจัยที่มีผลต่ออุณหภูมิและเวลาในการเผาไหม้ คือ ค่าความร้อน ความหนาแน่น และปริมาณสารระเหย เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่มีค่าเหล่านี้สูงจะส่งผลให้เชื้อเพลิงมีอุณหภูมิการเผาไหม้สูง ทนต่อการเผาไหม้ และติดไฟได้เร็ว ส่วนปัจจัยที่มีผลต่อองค์ประกอบของก๊าซเชื้อเพลิง คือ วัสดุที่นำมาอัด สภาวะในเตาเผา และตัวทำปฏิกิริยาในระหว่างการเผาไหม้

7. จากการทดลองนำขยะส่วนที่รีไซเคิลไม่ได้ภายในสถานศึกษาผลิตเป็นเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งพบว่ามีความเป็นไปได้ สามารถปรับใช้เป็นแนวทางในการนำขยะมูลฝอยชุมชนภายในประเทศไทยมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งได้ โดยเลือกสัดส่วนการผสมขยะพลาสติก กระจาด และกากกาแฟที่เหมาะสมคือ 5:1:3 ตามลำดับ และใช้โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ปริมาณ 0.2 เป็นตัวประสาน เนื่องจากเชื้อเพลิงมีค่าความร้อน ความหนาแน่น และปริมาณสารระเหยสูงส่งผลให้มีอุณหภูมิในระหว่างการเผาไหม้สูง เชื้อเพลิงติดไฟได้เร็ว ทนต่อการเผาไหม้ มีค่าความร้อนก๊าซเชื้อเพลิงสูงใน

ระดับปานกลางและสมบัติทางกายภาพและเคมีผ่านเกณฑ์กำหนดเหมาะสำหรับนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมในกระบวนการเผาไหม้ของโรงงานปูนซีเมนต์

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

1. สมบัติของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งส่วนใหญ่จะขึ้นกับวัสดุที่นำมาอัดแท่ง ดังนั้นการคัดแยกขยะถือเป็นขั้นตอนที่สำคัญเนื่องจากขยะมูลฝอยในประเทศไทยมีปริมาณเศษอาหารและสารอินทรีย์สูงส่งผลให้เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่ได้มีปริมาณความชื้นสูง มีค่าความร้อนต่ำ ดังนั้นควรมีการจัดทำถังขยะเพื่อแยกประเภทของขยะพลาสติกและกระดาษส่วนที่รีไซเคิลไม่ได้ออกจากขยะอื่นๆ ถือเป็น การช่วยลดขั้นตอนการเตรียมขยะและขยะที่ได้จะมีความชื้นต่ำและไม่ปนเปื้อนขยะอันตราย ส่งผลให้เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งมีสมบัติทางกายภาพและเคมีดีขึ้น

2. ควรมีการคัดแยกขยะพลาสติกประเภทโพลีไวนิลคลอไรด์ออกเนื่องจากส่งผลให้เชื้อเพลิงมีปริมาณคลอไรด์สูง เมื่อนำมาเผาไหม้จะก่อให้เกิดสารกลุ่มไดออกซินซึ่งส่งผลต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพอนามัยมนุษย์

3. ชนิดของวัสดุที่นำมาอัดแท่งที่แตกต่างกันก็ต้องการสถานะและตัวประสานในการอัดที่แตกต่างกันควรเลือกสถานะที่เหมาะสมจึงจะส่งผลให้เชื้อเพลิงที่ได้มีสมบัติที่เหมาะสม

4. เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่มีองค์ประกอบของพลาสติกสูงไม่สามารถนำไปใช้ในกระบวนการเผาไหม้โดยตรงได้ ควรนำเชื้อเพลิงไปเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของก๊าซเชื้อเพลิงโดยใช้กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันหรือใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมในกระบวนการเผาไหม้ของโรงงานปูนซีเมนต์ เนื่องจากเป็นการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูง (สูงกว่า 1100 องศาเซลเซียส) รวมทั้งเตาเผามีระบบบำบัดอากาศจึงส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในระดับต่ำ



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

**ภาคผนวก ก** วิธีการหมักใบจามจุรี วิธีการเตรียมอ้างอิงจากโครงการ JICA ผลิตปุ๋ยหมักสูตรใบจามจุรี โดยใช้หัวเชื้อจากถังหมักขยะอินทรีย์ (ชวลิต รัตนธรรมสกุล, 2559)

วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้

1. ใบจามจุรีแห้ง
2. ถ่านแกลบ
3. ปุ๋ยขี้วัว
4. น้ำจุลินทรีย์
5. ใบตอง
6. ผ้าใบ
7. กะละมัง

วิธีการหมักใบจามจุรี

1. นำใบจามจุรีแห้งมาลดขนาดให้ละเอียด
2. ผสมวัสดุทำปุ๋ยหมักในภาชนะโดยใช้ใบจามจุรี 0.2 กิโลกรัม ถ่านแกลบ 1 กิโลกรัม ปุ๋ยขี้วัว 1 กิโลกรัม น้ำจุลินทรีย์ที่ได้จากการหมักขยะอินทรีย์ 2.5 ลิตร เป็นส่วนผสม
3. ผสมส่วนผสมให้เข้ากันแล้วปิดด้วยใบตองเพื่อรักษาความชื้นและคลุมด้วยผ้าใบอีกชั้นหนึ่ง เพื่อควบคุมให้ความชื้นในกองปุ๋ยหมักมีค่าประมาณร้อยละ 60-70
4. ทำการพลิกกองปุ๋ยเพื่อผสมปุ๋ยให้เข้ากันและรดน้ำจุลินทรีย์เพิ่ม 1 ลิตรต่อสัปดาห์
5. หมักจนปุ๋ยหมักสมบูรณ์เป็นเวลาประมาณ 6-7 สัปดาห์

**ภาคผนวก ข ผลการวิเคราะห์ช่วงที่ 1 การเตรียมการวิจัย**

ตารางที่ ข.1 องค์ประกอบทางกายภาพของขยะโดยเฉลี่ยตั้งแต่เดือนกรกฎาคมถึงกันยายนปี พ.ศ. 2560

องค์ประกอบ	น้ำหนักตัวอย่าง (กิโลกรัม)			ค่าองค์ประกอบ		
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	SD	สัดส่วน (%)
เศษอาหารและสารอินทรีย์	3.45	0.70	3.10	2.42	1.50	27.57
พลาสติก	2.80	3.20	2.60	2.87	0.31	32.70
กระดาษ	2.15	4.20	1.90	2.75	1.26	31.37
แก้ว	0.00	0.20	0.75	0.32	0.39	3.61
โลหะ	0.60	0.15	0.50	0.42	0.24	4.75
รวม	9.00	8.45	8.85	8.77		100.00

ตารางที่ ข.2 องค์ประกอบขยะประเภทกระดาษโดยเฉลี่ย

องค์ประกอบ	น้ำหนักตัวอย่าง (กิโลกรัม)			ค่าองค์ประกอบ		
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	SD	สัดส่วน (%)
กล่องกระดาษน้ำตาล	0.00	1.55	0.00	0.52	0.89	18.79
กระดาษสี	0.15	0.05	0.05	0.08	0.06	3.03
กระดาษอาร์ตมัน	0.05	0.05	0.00	0.03	0.03	1.21
กระดาษสำนักงาน	0.20	0.20	0.05	0.15	0.09	5.45
กระดาษหนังสือพิมพ์	0.20	0.00	0.35	0.18	0.18	6.67
กระดาษบรรจุภัณฑ์	0.50	0.25	0.35	0.37	0.13	13.33
กระดาษชำระ	1.05	2.10	1.10	1.42	0.59	51.52
รวมกระดาษ	2.15	4.20	1.90	2.75		100.0

ตารางที่ ข.3 องค์ประกอบขยะประเภทพลาสติกโดยเฉลี่ย

องค์ประกอบ	น้ำหนักตัวอย่าง (กิโลกรัม)			ค่าองค์ประกอบ		
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	SD	สัดส่วน (%)
ขวดน้ำอัดลม	0.05	0.10	0.25	0.13	0.10	4.65
ขวดน้ำ	0.15	0.65	0.20	0.33	0.28	11.3
ขวดน้ำสี	0.05	0.05	0.05	0.05	0.00	1.74
ถุงพลาสติก	1.05	1.20	0.00	0.75	0.65	26.16
โฟม	0.05	0.15	0.00	0.07	0.08	2.33
อื่นๆ	1.45	1.05	2.10	1.53	0.53	53.49
รวมพลาสติก	2.80	3.20	2.60	2.87		100.00



ตารางที่ ข.4 ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนเบื้องต้นของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย

วัสดุที่ใช้	ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อน			ค่าเฉลี่ย	SD
	1	2	3		
<b>กระดาษ</b>					
กล่องกระดาษบรรจุภัณฑ์ กล่องขนม	13.5	13.5	13.8	13.6	0.2
กล่องนมที่มีอลูมิเนียม	22.2	22.1	22.4	22.2	0.1
กระดาษทั่วไป	16.3	15.9	16.1	16.1	0.2
<b>พลาสติก</b>					
ถุงพลาสติกใส ถุงร้อน ถุงหิ้ว	45.7	45.5	44.8	45.4	0.5
ถุงพลาสติกสีที่มีอลูมิเนียม ถุงขนมขบเคี้ยว	37.8	38.3	37.9	38.0	0.2
ถุงพลาสติกสีที่ไม่มีอลูมิเนียม	41.8	41.9	40.8	41.5	0.6
<b>กากกาแฟ</b>					
อินทนิล	21.6	21.6	21.7	21.6	0.1
ทาร์	21.0	21.0	21.3	21.1	0.2
อเมซอล	21.8	21.7	21.8	21.8	0.0
<b>ตัวประสาน</b>					
ดินสอพอง	จุดไม่ติด	จุดไม่ติด	จุดไม่ติด	จุดไม่ติด	-
ใบจามจุรีที่ผ่านการหมักแล้ว	7.8	8.7	8.4	8.3	0.5
โพลีไวนิลแอลกอฮอล์	22.9	22.8	22.9	22.9	0.1






ตารางที่ ข.5 ผลการวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบธาตุและความชื้นเบื้องต้นของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย

วัสดุ		คาร์บอน (ร้อยละโดย น้ำหนัก)	ไฮโดรเจน (ร้อยละโดย น้ำหนัก)	ไนโตรเจน (ร้อยละโดย น้ำหนัก)	ซัลเฟอร์ (ร้อยละโดย น้ำหนัก)	ความชื้น (ร้อยละโดย น้ำหนัก)
พลาสติก	1	80.10	15.75	0.40	0.00	0.24
	2	80.44	15.00	0.37	0.00	0.14
	3	80.32	15.42	0.39	0.00	0.17
	<b>ค่าเฉลี่ย</b>	<b>80.29</b>	<b>15.39</b>	<b>0.39</b>	<b>0.00</b>	<b>0.18</b>
	<b>SD</b>	<b>0.17</b>	<b>0.38</b>	<b>0.02</b>	<b>0.00</b>	<b>0.05</b>
กระดาษ	1	41.25	8.97	0.00	0.04	5.80
	2	41.00	8.68	0.00	0.02	5.18
	3	41.20	8.85	0.00	0.03	5.60
	<b>ค่าเฉลี่ย</b>	<b>41.15</b>	<b>8.83</b>	<b>0.00</b>	<b>0.03</b>	<b>5.53</b>
	<b>SD</b>	<b>0.13</b>	<b>0.15</b>	<b>0.00</b>	<b>0.01</b>	<b>0.32</b>
กากกาแฟ	1	23.69	9.21	0.92	0.06	39.68
	2	23.04	9.21	0.86	0.08	32.71
	3	23.40	9.30	0.87	0.07	35.48
	<b>ค่าเฉลี่ย</b>	<b>23.38</b>	<b>9.24</b>	<b>0.88</b>	<b>0.07</b>	<b>35.96</b>
	<b>SD</b>	<b>0.33</b>	<b>0.05</b>	<b>0.03</b>	<b>0.01</b>	<b>3.51</b>
ดินสอพอง	1	10.03	0.49	0.00	0.00	0.73
	2	9.98	0.51	0.00	0.00	0.66
	3	9.90	0.50	0.00	0.00	0.71
	<b>ค่าเฉลี่ย</b>	<b>9.97</b>	<b>0.50</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.70</b>
	<b>SD</b>	<b>0.07</b>	<b>0.01</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.04</b>
ใบจามจรีที่ผ่าน การหมักแล้ว	1	18.60	6.40	1.11	0.23	20.36
	2	18.81	6.92	1.03	0.25	20.14
	3	18.65	6.72	1.10	0.24	20.20
	<b>ค่าเฉลี่ย</b>	<b>18.69</b>	<b>6.68</b>	<b>1.08</b>	<b>0.24</b>	<b>20.23</b>
	<b>SD</b>	<b>0.11</b>	<b>0.26</b>	<b>0.04</b>	<b>0.01</b>	<b>0.11</b>
โพลีไวนิล แอลกอฮอล์	1	49.90	9.38	0.00	0.10	6.60
	2	50.13	9.00	0.00	0.00	5.83
	3	50.05	9.40	0.00	0.05	6.10
	<b>ค่าเฉลี่ย</b>	<b>50.03</b>	<b>9.26</b>	<b>0.00</b>	<b>0.05</b>	<b>6.18</b>
	<b>SD</b>	<b>0.12</b>	<b>0.23</b>	<b>0.00</b>	<b>0.05</b>	<b>0.39</b>

**ภาคผนวก ค ผลการวิเคราะห์ช่วงที่ 2 ผลการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการอัดขึ้นรูป**  
**ตารางที่ ค.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่สัดส่วนต่างๆของขยะ**

การทดลอง	สัดส่วนโดยน้ำหนัก	สมบัติ	ผลการวิเคราะห์			ค่าเฉลี่ย	SD
			1	2	3		
A1	1 : 1 : 1	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	775.6	712.3	761.8	749.9	33.3
		ค่ากำลังต้านทานแรงอัด (เมกะปาสคาล)	14.5	14.9	15.7	15.0	0.6
		ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	30.0	26.6	27.8	28.2	1.7
		เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่ได้					
A2	5 : 3 : 1	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	737.2	780.6	754.5	757.4	21.8
		ค่ากำลังต้านทานแรงอัด (เมกะปาสคาล)	23.2	18.0	23.0	21.4	2.9
		ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	26.1	28.4	22.9	25.8	2.8
		เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่ได้					
A3	5 : 1 : 3	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	734.9	728.5	747.6	737.0	9.7
		ค่ากำลังต้านทานแรงอัด (เมกะปาสคาล)	14.1	18.2	16.6	16.3	2.1
		ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	33.4	32.9	32.5	32.9	0.4
		เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่ได้					

ตารางที่ ค.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติเชิงกลของคอนกรีตที่สัดส่วนต่างๆของขยะ (ต่อ)

การทดลอง	สัดส่วนโดยน้ำหนัก	สมบัติ	ผลการวิเคราะห์			ค่าเฉลี่ย	SD
			1	2	3		
A4	3 : 5 : 1	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	835.5	783.5	816.6	811.9	26.3
		ค่ากำลังต้านทานแรงอัด (เมกะปาสคาล)	22.9	25.9	28.1	25.6	2.6
		ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	21.4	23.5	20.7	21.9	1.4
		เชื้อเพลิงขยะอัดแห้งที่ได้					
A5	3 : 1 : 5	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	688.1	643.4	707.7	679.7	33.0
		ค่ากำลังต้านทานแรงอัด (เมกะปาสคาล)	8.7	8.6	9.3	8.9	0.4
		ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	26.6	22.2	25.9	24.9	2.4
		เชื้อเพลิงขยะอัดแห้งที่ได้					

ตารางที่ ค.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่สภาวะต่างๆ ในการอัดขึ้นรูป

การทดลอง	สภาวะในการอัด	สมบัติ	ผลการวิเคราะห์			ค่าเฉลี่ย	SD
			1	2	3		
B1	แรงดัน 100 บาร์ อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เวลา 5 นาที	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	ไม่เกาะเป็นแท่ง	ไม่เกาะเป็นแท่ง	ไม่เกาะเป็นแท่ง	-	-
		ค่ากำลังต้านทานแรงอัด (เมกะปาสคาล)	ไม่เกาะเป็นแท่ง	ไม่เกาะเป็นแท่ง	ไม่เกาะเป็นแท่ง	-	-
		ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	34.3	35.2	36.1	35.2	0.9
		เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่ได้				แตก	
B2	แรงดัน 100 บาร์ อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เวลา 10 นาที	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	อัดได้เล็กน้อย	อัดได้เล็กน้อย	อัดได้เล็กน้อย	-	-
		ค่ากำลังต้านทานแรงอัด (เมกะปาสคาล)	อัดได้เล็กน้อย	อัดได้เล็กน้อย	อัดได้เล็กน้อย	-	-
		ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	36.0	34.3	34.5	34.9	0.9
		เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่ได้				แตก	
B3	แรงดัน 100 บาร์ อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เวลา 15 นาที	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	อัดได้ปานกลาง	อัดได้ปานกลาง	อัดได้ปานกลาง	>500	-
		ค่ากำลังต้านทานแรงอัด (เมกะปาสคาล)	อัดได้ปานกลาง	อัดได้ปานกลาง	อัดได้ปานกลาง	-	-
		ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	33.8	34.6	33.2	33.9	0.7
		เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่ได้				หัก	

ตารางที่ ค.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่สภาวะต่างๆ ในการอัดขึ้นรูป (ต่อ)

การทดลอง	สภาวะในการอัด	สมบัติ	ผลการวิเคราะห์			ค่าเฉลี่ย	SD
			1	2	3		
B4	แรงดัน 100 บาร์ อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	อัดได้เล็กน้อย	อัดได้เล็กน้อย	อัดได้เล็กน้อย	>500	-
		ค่ากำลังต้านทานแรงอัด (เมกะปาสคาล)	อัดได้เล็กน้อย	อัดได้เล็กน้อย	อัดได้เล็กน้อย	-	-
		ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	33.9	29.9	35.4	33.0	2.8
	เวลา 5 นาที	เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่ได้				แตก	
B5	แรงดัน 100 บาร์ อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เวลา 10 นาที	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	อัดได้ปานกลาง	อัดได้ปานกลาง	อัดได้ปานกลาง	>500	-
		ค่ากำลังต้านทานแรงอัด (เมกะปาสคาล)	อัดได้ปานกลาง	อัดได้ปานกลาง	อัดได้ปานกลาง	-	-
		ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	34.6	31.9	34.6	33.7	1.6
	เวลา 10 นาที	เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่ได้				ปลายแตก	
B6	แรงดัน 100 บาร์ อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เวลา 15 นาที	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	596.9	582.8	597.1	592.3	8.2
		ค่ากำลังต้านทานแรงอัด (เมกะปาสคาล)	17.0	16.3	19.4	17.6	1.6
		ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	33.9	33.0	36.6	34.5	1.9
	เวลา 15 นาที	เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่ได้				ปลายแตก	

ตารางที่ ค.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติเชิงกลของขยะอัดแท่งที่สภาวะต่างๆ ในการอัดขึ้นรูป (ต่อ)

การทดลอง	สภาวะในการอัด	สมบัติ	ผลการวิเคราะห์			ค่าเฉลี่ย	SD
			1	2	3		
B7	แรงดัน 100 บาร์ อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เวลา 5 นาที	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	อัดได้ปานกลาง	อัดได้ปานกลาง	อัดได้ปานกลาง	>500	-
		ค่ากำลังต้านทานแรงอัด (เมกะปาสคาล)	อัดได้ปานกลาง	อัดได้ปานกลาง	อัดได้ปานกลาง	-	-
		ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	34.8	36.5	33.2	34.8	1.7
		เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่ได้				ปลายแตก	
B8	แรงดัน 100 บาร์ อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เวลา 10 นาที	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	597.1	605.3	606.6	603.0	5.1
		ค่ากำลังต้านทานแรงอัด (เมกะปาสคาล)	19.5	21.2	23.0	21.2	1.8
		ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	36.1	35.6	35.4	35.7	0.4
		เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่ได้					
B9	แรงดัน 100 บาร์ อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เวลา 15 นาที	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	674.0	707.7	703.2	695.0	18.3
		ค่ากำลังต้านทานแรงอัด (เมกะปาสคาล)	12.7	13.1	14.7	13.5	1.1
		ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	36.5	31.6	35.2	34.4	2.5
		เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่ได้					

ตารางที่ ค.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติเชิงกลของขยะอัดแท่งที่สภาวะต่างๆ ในการอัดขึ้นรูป (ต่อ)

การทดลอง	สภาวะในการอัด	สมบัติ	ผลการวิเคราะห์			ค่าเฉลี่ย	SD
			1	2	3		
B10	แรงดัน 100 บาร์ อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เวลา 5 นาที	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	589.8	596.9	574.4	587.0	11.5
		ค่ากำลังต้านทานแรงอัด (เมกะปาสคาล)	17.3	16.3	13.6	15.7	1.9
		ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	37.7	35.5	37.0	36.7	1.1
		เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่ได้					
B11	แรงดัน 100 บาร์ อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เวลา 10 นาที	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	653.3	653.3	619.2	641.9	19.6
		ค่ากำลังต้านทานแรงอัด (เมกะปาสคาล)	18.6	15.1	16.3	16.7	1.8
		ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	34.6	32.4	36.2	34.4	1.9
		เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่ได้					
B12	แรงดัน 100 บาร์ อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เวลา 15 นาที	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	734.9	728.5	747.6	737.0	9.7
		ค่ากำลังต้านทานแรงอัด (เมกะปาสคาล)	14.1	18.2	16.6	16.3	2.1
		ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	32.2	33.2	37.0	34.1	2.5
		เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่ได้					



ตารางที่ ค.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่สภาวะต่างๆ ในการอัดขึ้นรูป (ต่อ)

การทดลอง	สภาวะในการอัด	สมบัติ	ผลการวิเคราะห์			ค่าเฉลี่ย	SD
			1	2	3		
B13	แรงดัน 100 บาร์ อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เวลา 5 นาที	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	589.8	605.9	603.6	599.8	8.7
		ค่ากำลังต้านทานแรงอัด (เมกะปาสคาล)	22.6	19.3	19.3	20.4	1.9
		ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	35.5	31.9	38.1	35.2	3.1
		เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่ได้					
B14	แรงดัน 100 บาร์ อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เวลา 10 นาที	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	651.8	660.8	680.5	664.4	14.7
		ค่ากำลังต้านทานแรงอัด (เมกะปาสคาล)	15.7	15.8	14.4	15.3	0.8
		ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	33.0	31.6	32.9	32.5	0.8
		เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่ได้					
B15	แรงดัน 100 บาร์ อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เวลา 15 นาที	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	660.5	657.2	650.5	668.5	5.1
		ค่ากำลังต้านทานแรงอัด (เมกะปาสคาล)	14.1	15.7	14.5	14.8	0.8
		ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	34.5	34.9	34.9	34.8	0.2
		เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่ได้					

ตารางที่ ค.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่สภาวะต่างๆ ในการอัดขึ้นรูป (ต่อ)

การทดลอง	สภาวะในการอัด	สมบัติ	ผลการวิเคราะห์			ค่าเฉลี่ย	SD
			1	2	3		
B16	แรงดัน 150 บาร์ อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เวลา 5 นาที	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	ไม่เกาะเป็นแท่ง	ไม่เกาะเป็นแท่ง	ไม่เกาะเป็นแท่ง	-	-
		ค่ากำลังต้านทานแรงอัด (เมกะปาสคาล)	ไม่เกาะเป็นแท่ง	ไม่เกาะเป็นแท่ง	ไม่เกาะเป็นแท่ง	-	-
		ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	33.5	36.0	35.8	35.1	1.4
		เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่ได้				แตก	
B17	แรงดัน 150 บาร์ อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เวลา 10 นาที	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	อัดได้เล็กน้อย	อัดได้เล็กน้อย	อัดได้เล็กน้อย	-	-
		ค่ากำลังต้านทานแรงอัด (เมกะปาสคาล)	อัดได้เล็กน้อย	อัดได้เล็กน้อย	อัดได้เล็กน้อย	-	-
		ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	36.2	37.5	35.8	36.5	0.9
		เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่ได้				แตก	
B18	แรงดัน 150 บาร์ อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เวลา 15 นาที	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	630.2	612.5	605.3	616.0	12.8
		ค่ากำลังต้านทานแรงอัด (เมกะปาสคาล)	15.2	18.4	15.2	16.3	1.8
		ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	34.8	35.8	34.7	35.1	0.6
		เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่ได้				หัก ปลาย แตก	

ตารางที่ ค.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่สภาวะต่างๆ ในการอัดขึ้นรูป (ต่อ)

การทดลอง	สภาวะในการอัด	สมบัติ	ผลการวิเคราะห์			ค่าเฉลี่ย	SD
			1	2	3		
B19	แรงดัน 150 บาร์ อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เวลา 5 นาที	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	อัดได้เล็กน้อย	อัดได้เล็กน้อย	อัดได้เล็กน้อย	-	-
		ค่ากำลังต้านทานแรงอัด (เมกะปาสคาล)	อัดได้เล็กน้อย	อัดได้เล็กน้อย	อัดได้เล็กน้อย	-	-
		ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	36.2	36.2	36.7	36.3	0.3
		เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่ได้				แตก	
B20	แรงดัน 150 บาร์ อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เวลา 10 นาที	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	566.2	566.2	521.7	551.4	25.7
		ค่ากำลังต้านทานแรงอัด (เมกะปาสคาล)	20.5	17.7	19.9	19.4	1.5
		ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	34.1	31.4	33.4	33.0	1.4
		เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่ได้				ปลายแตก	
B21	แรงดัน 150 บาร์ อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เวลา 15 นาที	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	651.8	618.2	641.4	637.1	17.2
		ค่ากำลังต้านทานแรงอัด (เมกะปาสคาล)	10.1	14.4	15.2	13.2	2.7
		ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	36.8	35.4	36.9	36.4	0.8
		เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่ได้					

ตารางที่ ค.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่สภาวะต่างๆ ในการอัดขึ้นรูป (ต่อ)

การทดลอง	สภาวะในการอัด	สมบัติ	ผลการวิเคราะห์			ค่าเฉลี่ย	SD
			1	2	3		
B22	แรงดัน 150 บาร์ อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เวลา 5 นาที	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	อัดได้ปานกลาง	อัดได้ปานกลาง	อัดได้ปานกลาง	ต่ำกว่า 500	-
		ค่ากำลังต้านทานแรงอัด (เมกะปาสคาล)	อัดได้ปานกลาง	อัดได้ปานกลาง	อัดได้ปานกลาง	-	-
		ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	32.4	33.9	34.2	33.5	0.9
		เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่ได้				แตก	
B23	แรงดัน 150 บาร์ อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เวลา 10 นาที	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	682.4	682.1	639.9	667.2	26.2
		ค่ากำลังต้านทานแรงอัด (เมกะปาสคาล)	13.8	12.1	13.1	13.0	0.9
		ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	30.2	33.2	36.4	33.3	3.1
		เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่ได้					
B24	แรงดัน 150 บาร์ อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เวลา 15 นาที	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	723.8	702.9	686.6	704.4	18.7
		ค่ากำลังต้านทานแรงอัด (เมกะปาสคาล)	14.0	16.1	19.6	16.6	2.8
		ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	37.6	35.9	33.3	35.6	2.1
		เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่ได้					

ตารางที่ ค.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่สภาวะต่างๆ ในการอัดขึ้นรูป (ต่อ)

การทดลอง	สภาวะในการอัด	สมบัติ	ผลการวิเคราะห์			ค่าเฉลี่ย	SD
			1	2	3		
B25	แรงดัน 150 บาร์ อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เวลา 5 นาที	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	597.1	606.6	606.6	603.5	5.5
		ค่ากำลังต้านทานแรงอัด (เมกะปาสคาล)	16.6	18.8	17.0	17.5	1.2
		ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	32.2	37.2	34.3	34.6	2.5
		เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่ได้					
B26	แรงดัน 150 บาร์ อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เวลา 10 นาที	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	733.0	713.0	727.1	724.4	10.3
		ค่ากำลังต้านทานแรงอัด (เมกะปาสคาล)	12.7	16.6	15.8	15.0	2.1
		ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	32.1	32.6	31.4	32.1	0.6
		เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่ได้					
B27	แรงดัน 150 บาร์ อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เวลา 15 นาที	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	731.3	766.7	730.2	742.7	20.8
		ค่ากำลังต้านทานแรงอัด (เมกะปาสคาล)	18.0	14.2	13.1	15.1	2.6
		ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	35.9	35.2	37.6	36.2	1.2
		เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่ได้					

ตารางที่ ค.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่สภาวะต่างๆ ในการอัดขึ้นรูป (ต่อ)

การทดลอง	สภาวะในการอัด	สมบัติ	ผลการวิเคราะห์			ค่าเฉลี่ย	SD
			1	2	3		
B28	แรงดัน 150 บาร์ อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เวลา 5 นาที	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	638.9	613.4	654.4	635.6	20.7
		ค่ากำลังต้านทานแรงอัด (เมกะปาสคาล)	16.3	16.3	15.9	16.2	0.2
		ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	30.7	29.4	37.1	32.4	4.1
		เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่ได้					
B29	แรงดัน 150 บาร์ อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เวลา 10 นาที	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	678.6	657.2	676.5	670.8	11.8
		ค่ากำลังต้านทานแรงอัด (เมกะปาสคาล)	14.5	15.8	14.2	14.8	0.9
		ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	34.6	36.0	37.8	36.1	1.6
		เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่ได้					
B30	แรงดัน 150 บาร์ อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เวลา 15 นาที	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	636.9	635.1	628.6	633.5	4.4
		ค่ากำลังต้านทานแรงอัด (เมกะปาสคาล)	17.4	20.2	17.6	18.4	1.6
		ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	37.1	36.7	36.2	36.7	0.4
		เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่ได้					

ตารางที่ ค.3 ผลการวิเคราะห์สมบัติเชิงกลของตัวอย่างที่ประเภทของตัวประสานและสัดส่วนการใช้  
ต่างๆในการอัดขึ้นรูป

การทดลอง	ตัวประสาน	สมบัติ	ผลการวิเคราะห์			ค่าเฉลี่ย	SD
			1	2	3		
C1	PVA 0.1	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	748.5	778.5	775.6	767.5	16.5
		ค่ากำลังต้านทานแรงอัด (เมกะปาสคาล)	5.0	2.8	3.6	3.8	1.1
		ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	35.3	32.8	34.4	34.2	1.3
		เชื้อเพลิงขยะอัดแห้งที่ได้					
C2	PVA 0.2	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	884.6	884.6	839.3	869.5	26.2
		ค่ากำลังต้านทานแรงอัด (เมกะปาสคาล)	3.3	4.3	3.8	3.8	0.5
		ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	32.5	34.2	33.2	33.3	0.9
		เชื้อเพลิงขยะอัดแห้งที่ได้					
C3	PVA 0.3	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	806.0	832.6	782.2	806.9	25.2
		ค่ากำลังต้านทานแรงอัด (เมกะปาสคาล)	3.0	3.7	3.2	3.3	0.4
		ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	31.6	29.4	31.7	30.9	1.3
		เชื้อเพลิงขยะอัดแห้งที่ได้					

ตารางที่ ค.3 ผลการวิเคราะห์สมบัติเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่ประเภทของตัวประสานและสัดส่วนการใช้  
ต่างๆในการอัดขึ้นรูป (ต่อ)

การทดลอง	ตัวประสาน	สมบัติ	ผลการวิเคราะห์			ค่าเฉลี่ย	SD
			1	2	3		
C4	PVA 0.4	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อ ลูกบาศก์เมตร)	594.4	602.5	566.2	587.8	19.1
		ค่ากำลังต้านทานแรงอัด (เมกะปาสคาล)	-	-	-	-	-
		ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	30.5	32.2	30.1	30.9	1.1
		เชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง ที่ได้				แตก	
C5	ดิน สอพอง 0.1	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อ ลูกบาศก์เมตร)	737.2	775.6	751.9	754.9	19.4
		ค่ากำลังต้านทานแรงอัด (เมกะปาสคาล)	15.8	15.0	16.9	15.9	1.0
		ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	32.9	32.2	27.9	31.0	2.7
		เชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง ที่ได้					
C6	ดิน สอพอง 0.2	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อ ลูกบาศก์เมตร)	816.6	796.2	802.1	804.9	10.5
		ค่ากำลังต้านทานแรงอัด (เมกะปาสคาล)	17.4	18.3	17.2	17.6	0.6
		ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	29.7	27.2	27.2	28.0	1.4
		เชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง ที่ได้					






ตารางที่ ค.3 ผลการวิเคราะห์สมบัติเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่ประเภทของตัวประสานและสัดส่วนการใช้  
ต่างๆในการอัดขึ้นรูป (ต่อ)

การทดลอง	ตัวประสาน	สมบัติ	ผลการวิเคราะห์			ค่าเฉลี่ย	SD
			1	2	3		
C7	ดิน สอพอง 0.3	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อ ลูกบาศก์เมตร)	874.0	884.6	863.1	873.9	10.8
		ค่ากำลังต้านทานแรงอัด (เมกะปาสคาล)	20.6	15.3	18.4	18.1	2.7
		ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	25.2	28.9	24.3	26.1	2.4
		เชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง ที่ได้					
C8	ดิน สอพอง 0.4	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อ ลูกบาศก์เมตร)	937.9	930.0	884.6	917.5	28.8
		ค่ากำลังต้านทานแรงอัด (เมกะปาสคาล)	19.4	18.8	18.9	19.0	0.3
		ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	22.6	27.1	26.0	25.2	2.3
		เชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง ที่ได้					
C9	ใบจามจรี หมัก 0.1	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อ ลูกบาศก์เมตร)	751.9	737.2	735.3	741.5	9.1
		ค่ากำลังต้านทานแรงอัด (เมกะปาสคาล)	14.7	13.5	14.4	14.2	0.6
		ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	30.5	30.7	27.7	29.6	1.7
		เชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง ที่ได้					


ตารางที่ ค.3 ผลการวิเคราะห์สมบัติเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่ประเภทของตัวประสานและสัดส่วนการใช้  
ต่างๆในการอัดขึ้นรูป (ต่อ)

การทดลอง	ตัวประสาน	สมบัติ	ผลการวิเคราะห์			ค่าเฉลี่ย	SD
			1	2	3		
C10	ไบจามจูรี หมัก 0.2	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อ ลูกบาศก์เมตร)	791.0	776.8	776.8	781.5	8.2
		ค่ากำลังต้านทานแรงอัด (เมกะปาสคาล)	10.7	12.7	13.4	12.3	1.4
		ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	30.7	25.6	30.9	29.1	3.0
		เชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง ที่ได้					
C11	ไบจามจูรี หมัก 0.3	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อ ลูกบาศก์เมตร)	807.7	791.0	806	801.6	9.2
		ค่ากำลังต้านทานแรงอัด (เมกะปาสคาล)	13.4	10.8	13.8	12.7	1.6
		ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	28.7	27.7	24.8	27.0	2.0
		เชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง ที่ได้					
C12	ไบจามจูรี หมัก 0.4	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อ ลูกบาศก์เมตร)	832.6	844.4	832.6	836.5	6.8
		ค่ากำลังต้านทานแรงอัด (เมกะปาสคาล)	12.0	9.2	11.7	11.0	1.5
		ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	27.7	27.8	25.5	27.0	1.3
		เชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง ที่ได้					

ตารางที่ ค.4 การทดลองที่ 4 ผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวประสานและสถานะต่างๆในการอัดขึ้นรูป

การทดลอง	ตัวประสาน	สมบัติ	ผลการวิเคราะห์			ค่าเฉลี่ย	SD
			1	2	3		
การทดลองที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประสานประเภทต่างๆและอุณหภูมิที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป							
D1/1	PVA 0.2 แรงดัน 150 บาร์ เวลา 10 นาที อุณหภูมิ 280 องศา เซลเซียส	ความหนาแน่น (กิโลกรัม ต่อลูกบาศก์เมตร)	799.8	835.5	835.5	823.6	20.6
		ค่ากำลังต้านทานแรงอัด (เมกะปาสคาล)	2.0	3.0	3.3	2.8	0.7
		ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	32.0	32.6	32.4	32.4	0.3
		เชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง ที่ได้					
D1/2	PVA 0.2 แรงดัน 150 บาร์ เวลา 10 นาที อุณหภูมิ 260 องศา เซลเซียส	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อ ลูกบาศก์เมตร)	796.2	799.8	762.2	786.0	20.7
		ค่ากำลังต้านทานแรงอัด (เมกะปาสคาล)	2.2	2.9	3.8	3.0	0.8
		ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	33.1	32.1	32.2	32.5	0.6
		เชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง ที่ได้					
D2/1	ดินสอพอง 0.3 แรงดัน 150 บาร์ เวลา 10 นาที อุณหภูมิ 280 องศา เซลเซียส	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อ ลูกบาศก์เมตร)	849.3	818.3	808.8	825.5	21.2
		ค่ากำลังต้านทานแรงอัด (เมกะปาสคาล)	16.5	18.7	17.4	17.5	1.1
		ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	26.0	27.4	27.7	27.1	0.9
		เชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง ที่ได้					

ตารางที่ ค.4 การทดลองที่ 4 ผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวประสานและสถานะต่างๆในการอัดขึ้นรูป (ต่อ)

การทดลอง	ตัวประสาน	สมบัติ	ผลการวิเคราะห์			ค่าเฉลี่ย	SD
			1	2	3		
การทดลองที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประสานประเภทต่างๆและอุณหภูมิที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป							
D2/2	ดินสอพอง 0.3 แรงดัน 150 บาร์ เวลา 10 นาที อุณหภูมิ 260 องศา เซลเซียส	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อ ลูกบาศก์เมตร)	796.2	780.6	774.1	783.6	11.4
		ค่ากำลังต้านทานแรงอัด (เมกะปาสคาล)	14.1	19.6	15.6	16.4	2.8
		ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	29.8	26.7	29.4	28.6	1.7
		เชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง ที่ได้					
D3/1	ไบจามหมัก 0.1 แรงดัน 150 บาร์ เวลา 10 นาที อุณหภูมิ 280 องศา เซลเซียส	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อ ลูกบาศก์เมตร)	748.5	746.1	748.5	747.7	1.4
		ค่ากำลังต้านทานแรงอัด (เมกะปาสคาล)	13.4	10.5	13.2	12.4	1.6
		ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	28.8	29.4	29.3	29.2	0.3
		เชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง ที่ได้					
D3/2	ไบจามหมัก 0.1 แรงดัน 150 บาร์ เวลา 10 นาที อุณหภูมิ 260 องศา เซลเซียส	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อ ลูกบาศก์เมตร)	746.1	748.5	751.3	748.7	2.6
		ค่ากำลังต้านทานแรงอัด (เมกะปาสคาล)	11.3	11.7	14.3	12.4	1.6
		ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	30.9	30.8	31.1	30.9	0.2
		เชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง ที่ได้					

ตารางที่ ค.4 การทดลองที่ 4 ผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวประสานและสถานะต่างๆในการอัดขึ้นรูป (ต่อ)

การทดลอง	ตัวประสาน	สมบัติ	ผลการวิเคราะห์			ค่าเฉลี่ย	SD
			1	2	3		
การทดลองที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประสานประเภทต่างๆและแรงดันที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป							
D4/1	PVA 0.2 เวลา 10 นาที อุณหภูมิ 300 องศา เซลเซียส แรงดัน 100 บาร์	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อ ลูกบาศก์เมตร)	824.1	802.1	832.6	819.6	15.7
		ค่ากำลังต้านทานแรงอัด (เมกะปาสคาล)	2.4	2.8	2.6	2.6	0.2
		เชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง ที่ได้					
D4/2	PVA 0.2 เวลา 10 นาที อุณหภูมิ 300 องศา เซลเซียส แรงดัน 50 บาร์	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อ ลูกบาศก์เมตร)	อัดไม่ได้	อัดไม่ได้	อัดไม่ได้	>500	-
		ค่ากำลังต้านทานแรงอัด (เมกะปาสคาล)	อัดไม่ได้	อัดไม่ได้	อัดไม่ได้	-	-
		เชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง ที่ได้					
D5/1	ดินสอพอง 0.3 เวลา 10 นาที อุณหภูมิ 300 องศา เซลเซียส แรงดัน 100 บาร์	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อ ลูกบาศก์เมตร)	834.1	802.1	834.1	823.4	18.5
		ค่ากำลังต้านทานแรงอัด (เมกะปาสคาล)	15.8	20.7	17.4	18.0	2.5
		เชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง ที่ได้					
D5/2	ดินสอพอง 0.3 เวลา 10 นาที อุณหภูมิ 300 องศา เซลเซียส แรงดัน 50 บาร์	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อ ลูกบาศก์เมตร)	อัดไม่ได้	อัดไม่ได้	อัดไม่ได้	-	-
		ค่ากำลังต้านทานแรงอัด (เมกะปาสคาล)	อัดไม่ได้	อัดไม่ได้	อัดไม่ได้	-	-
		เชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง ที่ได้					

ตารางที่ ค.4 การทดลองที่ 4 ผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวประสานและสถานะต่างๆในการอัดขึ้นรูป (ต่อ)

การทดลอง	ตัวประสาน	สมบัติ	ผลการวิเคราะห์			ค่าเฉลี่ย	SD
			1	2	3		
D6/1	ไบจามหมัก 0.1 เวลา 10 นาที อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส แรงดัน 100 บาร์	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	729.8	727.4	728.5	728.6	1.2
		ค่ากำลังต้านทานแรงอัด (เมกะปาสคาล)	10.9	14.3	14.9	13.4	2.2
		เชื้อเพลิงขยะอัดแห้งที่ได้					
D6/2	ไบจามหมัก 0.1 เวลา 10 นาที อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส แรงดัน 50 บาร์	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	อัดไม่ได้	อัดไม่ได้	อัดไม่ได้	-	-
		ค่ากำลังต้านทานแรงอัด (เมกะปาสคาล)	อัดไม่ได้	อัดไม่ได้	อัดไม่ได้	-	-
		เชื้อเพลิงขยะอัดแห้งที่ได้					
การทดลองที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประสานประเภทต่างๆและเวลาที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป							
D7/1	PVA 0.2 อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส แรงดัน 150 บาร์ เวลา 8 นาที	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	849.3	832.6	859.4	847.1	13.5
		ค่ากำลังต้านทานแรงอัด (เมกะปาสคาล)	4.8	2.8	3.4	3.7	1.0
		เชื้อเพลิงขยะอัดแห้งที่ได้					

ตารางที่ ค.4 การทดลองที่ 4 ผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวประสานและสถานะต่างๆในการอัดขึ้นรูป (ต่อ)

การทดลอง	ตัวประสาน	สมบัติ	ผลการวิเคราะห์			ค่าเฉลี่ย	SD
			1	2	3		
D7/2	PVA 0.2 อุณหภูมิตั้ง 300 องศา เซลเซียส แรงดัน 150 บาร์ เวลา 6 นาที	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อ ลูกบาศก์เมตร)	845.0	825.7	840.4	837.0	10.1
		ค่ากำลังต้านทานแรงอัด (เมกะปาสคาล)	7.4	5.0	8.8	7.1	1.9
		เชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง ที่ได้					
D8/1	ดินสอพอง 0.3 อุณหภูมิตั้ง 300 องศา เซลเซียส แรงดัน 150 บาร์ เวลา 8 นาที	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อ ลูกบาศก์เมตร)	806.6	796.2	789.4	797.4	8.7
		ค่ากำลังต้านทานแรงอัด (เมกะปาสคาล)	17.3	18.7	22.3	19.4	2.6
		เชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง ที่ได้					
D8/2	ดินสอพอง 0.3 อุณหภูมิตั้ง 300 องศา เซลเซียส แรงดัน 150 บาร์ เวลา 6 นาที	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อ ลูกบาศก์เมตร)	793.9	774.1	802.1	790.0	14.4
		ค่ากำลังต้านทานแรงอัด (เมกะปาสคาล)	16.9	15.2	13.8	15.3	1.6
		เชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง ที่ได้					
D9/1	ไบจามหมัก 0.1 อุณหภูมิตั้ง 300 องศา เซลเซียส แรงดัน 150 บาร์ เวลา 8 นาที	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อ ลูกบาศก์เมตร)	707.7	724.8	729.8	720.8	11.6
		ค่ากำลังต้านทานแรงอัด (เมกะปาสคาล)	14.1	12.3	12.4	12.9	1.0
		เชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง ที่ได้					

ตารางที่ ค.4 การทดลองที่ 4 ผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวประสานและสถานะต่างๆในการอัดขึ้นรูป (ต่อ)

การทดลอง	ตัวประสาน	สมบัติ	ผลการวิเคราะห์			ค่าเฉลี่ย	SD
			1	2	3		
D9/2	ไบจามหมัก 0.1 อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส แรงดัน 150 บาร์ เวลา 6 นาที	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	703.2	723.8	720.2	715.7	11.0
		ความทนแรงกด (เมกะปาสคาล)	14.6	11.6	11.4	12.5	1.8
		เชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่ได้					





ภาคผนวก ง ผลการวิเคราะห์สมบัติด้านต่างๆของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง

ตารางที่ ง.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติด้าน Proximate analysis และปริมาณคลอไรด์ ของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่ตัวประสานต่างๆ

ตัวประสาน		ความชื้น (ร้อยละโดย น้ำหนัก)	สารระเหย (ร้อยละโดย น้ำหนัก)	คาร์บอนคงตัว (ร้อยละโดย น้ำหนัก)	เถ้า (ร้อยละโดย น้ำหนัก)	คลอไรด์ (ร้อยละโดย น้ำหนัก)
โพลีไวนิล แอลกอฮอล์	1	3.1	89.7	2.0	5.2	0.2
	2	2.3	89.6	3.6	4.6	0.1
	3	2.9	88.2	2.9	6.0	0.2
	<b>ค่าเฉลี่ย</b>	<b>2.7</b>	<b>89.2</b>	<b>2.8</b>	<b>5.3</b>	<b>0.2</b>
	<b>SD</b>	<b>0.4</b>	<b>0.8</b>	<b>0.8</b>	<b>0.8</b>	<b>0.0</b>
ดินสอพอง	1	1.5	84.5	1.2	12.8	0.6
	2	1.5	86.9	1.7	10.0	0.9
	3	1.5	86.5	1.0	11.0	0.8
	<b>ค่าเฉลี่ย</b>	<b>1.5</b>	<b>86.0</b>	<b>1.3</b>	<b>11.2</b>	<b>0.8</b>
	<b>SD</b>	<b>0.0</b>	<b>1.3</b>	<b>0.3</b>	<b>1.4</b>	<b>0.1</b>
ไบจามจური ที่ผ่านการหมัก แล้ว	1	3.0	79.2	6.1	11.7	0.5
	2	2.6	81.3	5.0	11.1	0.4
	3	3.2	81.0	5.4	10.4	0.4
	<b>ค่าเฉลี่ย</b>	<b>2.9</b>	<b>80.5</b>	<b>5.5</b>	<b>11.0</b>	<b>0.4</b>
	<b>SD</b>	<b>0.3</b>	<b>1.1</b>	<b>0.6</b>	<b>0.7</b>	<b>0.0</b>

ตารางที่ ง.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติด้าน Elemental analysis ของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่ตัวประสานต่างๆ

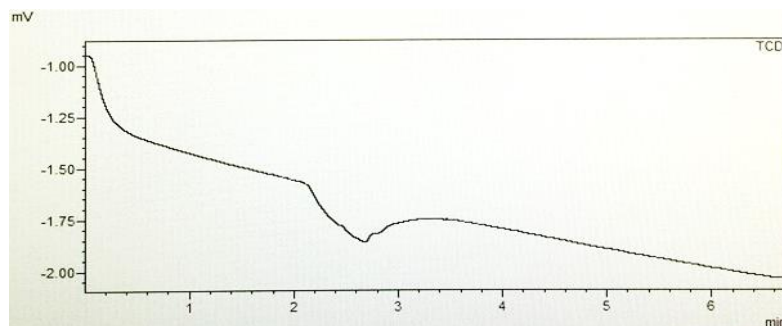
ตัวประสาน		คาร์บอน (ร้อยละโดย น้ำหนัก)	ไฮโดรเจน (ร้อยละโดย น้ำหนัก)	ไนโตรเจน (ร้อยละโดย น้ำหนัก)	ซัลเฟอร์ (ร้อยละโดย น้ำหนัก)
โพลีไวนิล แอลกอฮอล์	1	67.38	11.00	0.06	0.01
	2	67.10	11.03	0.04	0.01
	3	67.20	11.00	0.05	0.01
	<b>ค่าเฉลี่ย</b>	<b>67.23</b>	<b>11.01</b>	<b>0.05</b>	<b>0.01</b>
	<b>SD</b>	<b>0.14</b>	<b>0.02</b>	<b>0.01</b>	<b>0.00</b>
ดินสอพอง	1	50.63	7.96	0.06	>0.01
	2	50.99	8.02	0.14	>0.01
	3	50.70	8.01	0.09	>0.01
	<b>ค่าเฉลี่ย</b>	<b>50.77</b>	<b>8.00</b>	<b>0.10</b>	<b>&gt;0.01</b>
	<b>SD</b>	<b>0.19</b>	<b>0.03</b>	<b>0.04</b>	<b>0.00</b>
ใบจามจรี ที่ผ่านการ หมักแล้ว	1	61.20	9.97	0.00	0.17
	2	61.65	10.23	0.39	0.13
	3	61.50	10.01	0.21	0.16
	<b>ค่าเฉลี่ย</b>	<b>61.45</b>	<b>10.07</b>	<b>0.20</b>	<b>0.15</b>
	<b>SD</b>	<b>0.23</b>	<b>0.14</b>	<b>0.20</b>	<b>0.02</b>

ตารางที่ ง.3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งที่ตัวประสานต่างๆ

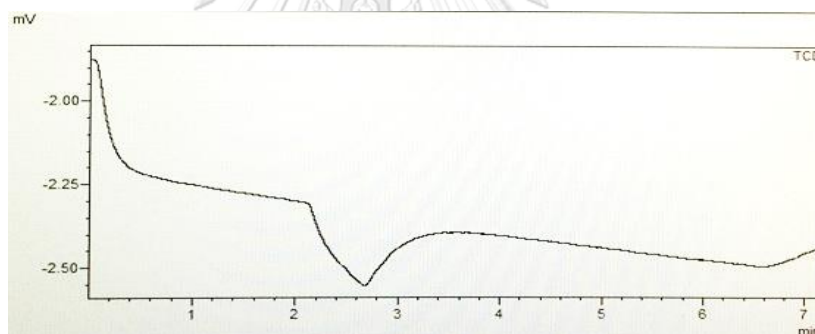
ตัวประสาน		Cu	Zn	Mn	Ni	Co	Cr	Pb	Cd	Hg	As
		(มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)									
โพลีไวนิล แอลกอฮอล์	1	15.8	48.4	14.5	7.1	<0.5	8.9	4.3	0.9	<0.5	<0.5
	2	18.4	42.5	15.4	8.1	<0.5	9.6	2.0	0.8	<0.5	<0.5
	3	16.1	44.9	15.1	7.6	<0.5	9.2	3.1	0.7	<0.5	<0.5
	ค่าเฉลี่ย	16.8	45.3	15.0	7.6	<0.5	9.2	3.1	0.8	<0.5	<0.5
	SD	1.4	3.0	0.5	0.5	0.0	0.4	1.2	0.8	0.0	0.0
ดินสอพอง	1	20.8	58.1	38.8	7.5	<0.5	10.4	9.4	0.5	<0.5	<0.5
	2	18.4	48.4	43.2	18.5	0.6	35.4	2.5	<0.5	<0.5	<0.5
	3	19.2	52.7	40.4	12.7	<0.5	21.5	7.8	<0.5	<0.5	<0.5
	ค่าเฉลี่ย	19.5	53.1	40.8	12.9	<0.5	22.4	6.6	<0.5	<0.5	<0.5
	SD	1.2	4.9	2.2	5.5	0.1	12.5	3.6	0.0	0.0	0.0
ใบจามจรี ที่ผ่าน การหมักแล้ว	1	19.7	45.0	47.2	7.1	0.7	8.4	1.9	<0.5	<0.5	<0.5
	2	16.0	44.7	71.6	8.1	0.9	9.2	1.7	<0.5	<0.5	<0.5
	3	17.6	44.9	56.6	7.5	0.8	8.8	1.8	<0.5	<0.5	<0.5
	ค่าเฉลี่ย	17.8	44.9	58.5	7.6	0.8	8.8	1.8	<0.5	<0.5	<0.5
	SD	1.9	0.2	12.3	0.5	0.1	0.4	0.1	0.0	0.0	0.0

ภาคผนวก จ กราฟมาตรฐานการวัดองค์ประกอบของก๊าซโดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

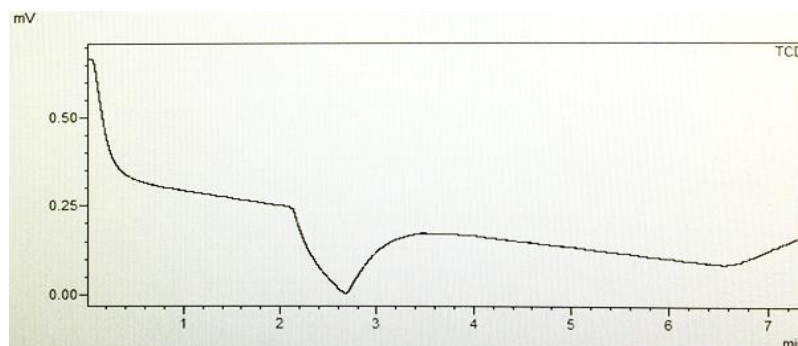
- 1) กราฟมาตรฐานการวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซเชื้อเพลิงจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง  
ซึ่งใช้โพลีไวนิลแอลกอฮอล์เป็นตัวประสาน



- 2) กราฟมาตรฐานการวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซเชื้อเพลิงจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง  
ซึ่งใช้ดินสอพองเป็นตัวประสาน



- 3) กราฟมาตรฐานการวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซเชื้อเพลิงจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง  
ซึ่งใช้ใบจามจรีที่ผ่านการหมักแล้วเป็นตัวประสาน



## บรรณานุกรม

ภาษาไทย

กิตติมา วัฒนามงคลกุล. ผลิตภัณฑ์พลาสติกกับอาหาร. [ออนไลน์]. 2555. แหล่งที่มา:

<http://www.pharmacy.mahidol.ac.th/th/knowledge/article/86> [20 มกราคม 2560]

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. คู่มือการพัฒนาและการลงทุนผลิตพลังงานทดแทน.

[ออนไลน์]. แหล่งที่มา: [http://www.dede.go.th/ewt\\_news.php?nid=774&filename=index](http://www.dede.go.th/ewt_news.php?nid=774&filename=index) [18 มกราคม 2560]

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. รายงานฉบับสมบูรณ์ศึกษาวิจัยและพัฒนาการผลิต

ขยะเชื้อเพลิง (RDF). [ออนไลน์]. 2551 แหล่งที่มา: <http://webkc.dede.go.th/testmax/file/1714> [10 ธันวาคม 2559]

จันทร์ทิพย์ ชี้อัสตย์. สารเคมีในอุตสาหกรรมสิ่งทอ. [ออนไลน์]. 2553. แหล่งที่มา:

<http://www.chemtrack.org/News-Detail.asp?TID=4&ID=24> [30 มกราคม 2560]

ชวลิต รัตนธรรมสกุล. การผลิตปุ๋ยหมักจากขยะอินทรีย์ประเภท Garden Wastes โดยใช้หัวเชื้อจาก

ถังหมักขยะแบบไร้อากาศ. กรุงเทพมหานคร, 2559.

ทิพย์สุภินทร์ หินชุย. การศึกษาการกำจัดขยะชุมชนเพื่อผลิตพลังงานโดยใช้เทคโนโลยีพลาสมาแก๊ส

ซิพีเคชั่น. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2556.

ไทยรัฐออนไลน์. กรมควบคุมมลพิษ สรุปสถานการณ์มลพิษในไทยปี 56. [ออนไลน์]. 2557.

แหล่งที่มา: <http://www.thairath.co.th/content/411086> [10 ธันวาคม 2559]

ทรงวุฒิ ศรีสว่าง. การนำเชื้อเพลิงแข็งทดแทนที่ผ่านการปรับปรุงสภาพ (Refuse Derived Fuel : RDF)

มาใช้เป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์. วารสารข่าวสผ.หมวดการวิเคราะห์ผลกระทบสิ่งแวดล้อม 18 (มกราคม-เมษายน 2559) : 6-12.

นพพร สุดใจธรรม. เชื้อเพลิงอัดแท่งจากกากกาแฟ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชา

วิทยาศาสตร์ (เทคโนโลยีที่เหมาะสมเพื่อการพัฒนาทรัพยากร) มหาวิทยาลัยมหิดล, 2546.

นฤภัทร ตั้งมั่นคงวรกุล และพัชรี ปริดาสุริยะชัย. การศึกษากากกาแฟและกากชามาใช้ประโยชน์ในรูป

เชื้อเพลิงอัดแท่ง. วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒสาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 7 (มกราคม-มิถุนายน 2558) : 15-26.

วสันต์ ปินะเต และดวงกลม ดังโพนทอง. การผลิตเชื้อเพลิง RDF-5 จากขยะชุมชน : กรณีศึกษามหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม. วารสารวิชาการคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมมหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง 9 (มกราคม-มิถุนายน 2559) : 72-86.

สัณชัย ชนะสงคราม. เทคโนโลยีการผลิตเชื้อเพลิงขยะ (Refuse Derived Fuel : RDF). [ออนไลน์]. 2553. แหล่งที่มา: [http://reo13.go.th/KM\\_reo13/data\\_know/53-09-15\\_RDF.pdf](http://reo13.go.th/KM_reo13/data_know/53-09-15_RDF.pdf) [25 มกราคม 2560]

สุธินี หิรัญประเสริฐศรี และสุเทพ บุตรดี. การศึกษาสภาวะเหมาะสมสำหรับการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากขยะหลุมฝังกลบโดยผ่านกระบวนการก๊าซซิฟิเคชัน. วารสารวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ 9 (มกราคม-มิถุนายน 2557) : 16-27.

สุพัฒตรา ส่งเสริม. การผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากกากตะกอนน้ำเสียชุมชนร่วมกับแกลบด้วยวิธีการอัดแบบเอ็กทราซัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2558.

สำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ. พลังงานและทางเลือกการใช้เชื้อเพลิงของประเทศ ไทย. [ออนไลน์]. 2542. แหล่งที่มา: <http://www2.eppo.go.th/doc/doc-AlterFuel.html> [20 มกราคม 2560]

สำนักจัดการกากของเสียและสารอันตราย. ความรู้ด้านการลด คัดแยก และนำขยะมูลฝอยกลับมาใช้ใหม่. [ออนไลน์]. 2555. แหล่งที่มา: [http://www.pcd.go.th/info\\_serv/waste\\_3R.htm](http://www.pcd.go.th/info_serv/waste_3R.htm) [20 มกราคม 2560]

อธิภัทร ทวีชศรี และสุรชัย สนิทใจ. การศึกษาการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากขยะพลาสติกโดยเตาแก๊สซีพีเออร์แบบไหลลงขนาดเล็ก. การประชุมสัมมนาวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทยครั้งที่ 8. (4-6 พฤศจิกายน 2558) : 62-65.

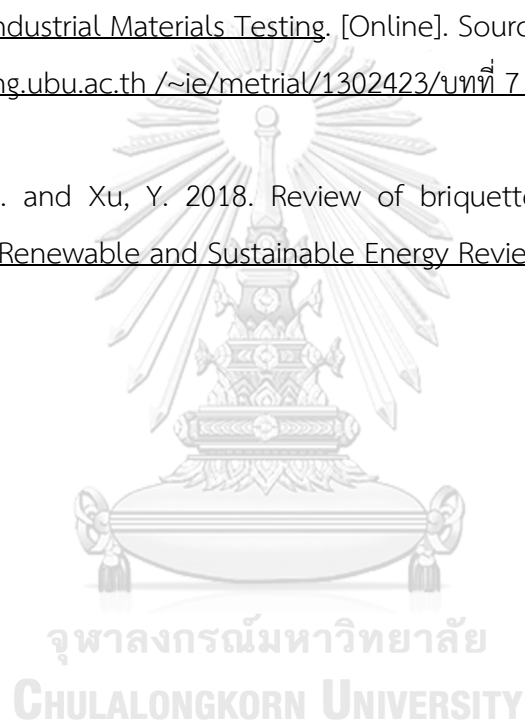
อรรถกร ฤกษ์วีรี. เชื้อเพลิงแข็งจากขยะมูลฝอยชุมชนอัดแท่ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.

ภาษาอังกฤษ

American Society for Testing and Materials, (ASTM). 2004. Standard Test Method for Gross Calorific Value of Refuse-Derived Fuel by the Bomb Calorimeter E0711-87 (Reapproved 2004).

- American Society for Testing and Materials, (ASTM). 2004. Standard Test Method for Residual Moisture in a Refuse-Derived Fuel Analysis Sample E0790-87 (Reapproved 2004).
- American Society for Testing and Materials, (ASTM). 2004. Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Refuse-Derived Fuel E0830-87 (Reapproved 2004).
- American Society for Testing and Materials, (ASTM). 2004. Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample of Refuse-Derived Fuel E0897-88 (Reapproved 2004).
- Chiemchaisri, C., Charnnok, B. and Visvanathan, C. 2010. Recovery of plastic wastes from dumpsite as refuse-derived fuel and its utilization in small gasification system. Bioresource Technology. 101: 1522-1527.
- Environment Protection Authority Victoria (EPA). Waste materials density data. [online]. 2017. Source: [https://www.epa.vic.gov.au/business-and-industry/lower-your-imp-act/~/\\_media/Files/bus/EREP/docs/wastematerials-densities-data.pdf](https://www.epa.vic.gov.au/business-and-industry/lower-your-imp-act/~/_media/Files/bus/EREP/docs/wastematerials-densities-data.pdf) [ 1 November 2018]
- Fernandes, A.S., Mello, F.V.C., Filho, S.T., Carpes, R.M., Honorio, J.G. and Marques, M.R.C. 2017. Impacts of discarded coffee waste on human and environmental health. Ecotoxicology and Environmental Safety. 141: 30-36.
- Garces, D., Diaz, E., Sastre, H., Ordonez, S. and Gonzalez, J.M. 2016. Evaluation of the potential of different high calorific waste fractions for the preparation of solid recovered fuels. Waste Management. 47: 164-173.
- Hilado, C.J. Flammability Handbook for Plastics. 5. United States of America: Technomic Publishing Company, 1998
- Jamradloedluk, J. and Lertsatitthanakorn, C. 2015. Properties of Densified-Refuse Derived Fuel using glycerin as a binder. Procedia Engineering. 100: 505-510.
- Kara, M., Gunay, E., Tabak, Y. and Yildiz, S. 2009. Perspectives for pilot scale study of RDF in Istanbul, Turkey. Waste Management. 29: 2976-2982.
- Komilis, D., Evangelou, A., Giannakis, G. and Lympers, C. 2012. Revisiting the elemental composition and the calorific value of the organic fraction of municipal solid wastes. Waste Management. 32: 372-381.

- Mussatto, S.I., Carneiro, L.M., Silva, J.A., Roberto, I.C. and Teixeira, J.A. 2011. A study on chemical constituents and sugars extraction from spent coffee grounds. Carbohydrate Polymers. 83: 368-374.
- Othman, Z., Lias, K., Hashim, N.H. and Clement, F.N. 2013. Comparative study on characteristics and potential of rice straws and dry leaves as a binder in refuse derived fuel (RDF). The Malaysian Journal of Analytical Sciences. 17: 85-90.
- Paolo, M. and Paola, M. 2015. RDF: from waste to resource-the Italian case. Energy Procedia. 81: 569-584.
- Sukangkana Lee. Industrial Materials Testing. [Online]. Source: <http://app.eng.ubu.ac.th/~ie/metrial/1302423/บทที่ 7 Compression.ppt> [ 21 August 2018]
- Zhang, G., Sun, Y. and Xu, Y. 2018. Review of briquette binders and briquetting mechanism. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 82: 477-487.





บรรณานุกรม



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ชนমন วิริยะจารุ
วัน เดือน ปี เกิด	4 สิงหาคม 2535
สถานที่เกิด	นครราชสีมา
วุฒิการศึกษา	ปีการศึกษา 2556 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ปีการศึกษา 2558 เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตร มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	443 หมู่ 9 ต.บ้านใหม่ อ.ครบุรี จ.นครราชสีมา 30250
ผลงานตีพิมพ์	WiriyaJar, C. and Ratanatamskul, C. 2018. Refuse Derived Fuel with Marl as Binder. 2nd International Conference on Environmental Change and Management in Disruptive Age. Bangkok. Thailand. WiriyaJar, C. and Ratanatamskul, C. 2018. Refuse derived fuel from general waste with polyvinyl alcohol as binder. Proceedings of the International Conference on Technology, Science, Engineering and Management (ICTSEM). Kuala Lumpur. Malaysia. pp. 8-14.