



## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การศึกษาการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงผสมระหว่างแกลบอัดเม็ดกับขี้เลื่อยอัดเม็ดใน  
เตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบฟองอากาศ

Study on Combustion of Fuel Mixture between Rice Husk Pellets  
and Sawdust Pellets in Bubble Fluidized Bed Combustor

คณะนักวิจัย

นาย กิตตินันท์ มลิวรรณ

นาย ฐานันดรศักดิ์ เทพญา

นาย ชยุต นันทดุสิต

นาย นันทพันธ์ นภัทรานันท์

นายศกิตินันท์ โอ่แก้ว

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากเงินรายได้

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ประจำปีงบประมาณ 2556 รหัสโครงการ ENG550359S

**ชื่อโครงการ** การศึกษาการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงผสมระหว่างแอลกอฮอล์กับซีลีเนียมใน  
เตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบพองอากาศ

**คณะนักวิจัย และหน่วยงานต้นสังกัด (คณะ/ภาควิชาหรือหน่วยงาน)**

**หัวหน้าโครงการ**

นาย กิตตินันท์ มลิวรรณ

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ หาดใหญ่

**ผู้ร่วมวิจัย**

นาย ฐานันดรศักดิ์ เทพญา

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ หาดใหญ่

นาย ชยุต นันทคุสิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ หาดใหญ่

นาย นันทพันธ์ นภัทรานันท์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ หาดใหญ่

**นักศึกษา**

นายศักตินันท์ โอแก้ว

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ หาดใหญ่

## สารบัญ

สารบัญ.....	1
สารบัญรูปภาพ.....	4
สารบัญตาราง.....	7
กิตติกรรมประกาศ.....	8
บทคัดย่อ.....	9
Abstract.....	11
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ.....	13
1. บทนำ.....	14
1.1 ชื่อโครงการวิจัย.....	14
1.2 ชื่อคณะผู้วิจัย.....	14
1.3 ได้รับทุนอุดหนุนวิจัยจาก.....	14
1.4 ระยะเวลาตลอดโครงการ 2 ปี.....	14
1.5 เริ่มโครงการวิจัยเมื่อ เดือน กันยายน พ.ศ. 2555 ถึงเดือน สิงหาคม 2561 ....	14
1.6 งบประมาณที่ได้รับอนุมัติแล้ว.....	14
1.7 ในปีงบประมาณที่รายงานได้รับทุนวิจัยเมื่อเดือน พฤศจิกายน 2555.....	14
1.8 ที่มาและความสำคัญ.....	14
1.9 วัตถุประสงค์.....	16
1.10 ขอบเขตของงานวิจัย.....	16
1.11 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	16
2. ทฤษฎีและทบทวนงานวิจัย.....	18
2.1 นิยามเชื้อเพลิง.....	18
2.1.1 เชื้อเพลิงชีวมวล.....	18
2.1.2 องค์ประกอบเชื้อเพลิงชีวมวล.....	18
2.2 การเผาไหม้.....	20
2.3 ปฏิกิริยาการเผาไหม้.....	22
2.3.1 ขนาดของอนุภาค ( $d_p$ ).....	22
2.3.2 สัดส่วนช่องว่าง ( $\epsilon_m$ ).....	24

2.3.3	ค่าความกลม ( $\phi_s$ ).....	24
2.3.4	ความเร็วต่ำสุดในการเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชัน ( $u_{mf}$ ).....	25
2.3.5	ความเร็วต่ำสุดในการเกิดปรากฏการณ์ฟองอากาศ ( $u_{mb}$ ).....	27
2.3.6	ความเร็วสุดท้าย ( $u_t$ ).....	29
2.4	เทคโนโลยีเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบด.....	29
2.4.1	การศึกษาเพื่อเปรียบเทียบเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้.....	31
2.4.2	การศึกษาตัวแปรการเผาไหม้.....	33
2.4.3	การศึกษาตัวแปรในการออกแบบเตาเผาไหม้ฟลูอิดไดซ์เบด.....	34
2.5	ปัญหาของเทคโนโลยีเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบด.....	34
2.6	ประสิทธิภาพของการเผาไหม้.....	35
3.	วิธีการวิจัย.....	36
3.1	การออกแบบชุดเตาฟลูอิดไดซ์เบดแบบฟองอากาศ.....	36
3.2	วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	39
3.2.1	วัสดุ.....	39
3.2.2	อุปกรณ์.....	41
3.3	การทดลอง.....	46
3.3.1	การศึกษาการเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชัน.....	47
3.3.2	การศึกษาการเผาไหม้.....	47
4.	ผลการทดลอง.....	49
4.1	ความเร็วต่ำสุดในการเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชัน ( $u_{mf}$ ) และความเร็วต่ำสุดในการเกิดปรากฏการณ์ฟองอากาศ ( $u_{mb}$ ).....	49
4.1.1	ความดันลดคร่อมเบด ( $\Delta P$ ).....	49
4.1.2	ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไดเซชัน ( $u_{mf}$ ).....	50
4.1.3	ความสัมพันธ์ของความเร็วต่ำสุดในการเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชัน ( $u_{mf}$ ) และสัดส่วนมวล.....	51
4.1.4	ความเร็วต่ำสุดในการเกิดปรากฏการณ์ฟองอากาศ ( $u_{mb}$ ).....	53
4.2	การเผาไหม้ของเชื้อเพลิง.....	55
4.2.1	อุณหภูมิ.....	56

4.2.2	ไอเสีย.....	64
4.2.3	เก้าและองค์ประกอบทางเคมี .....	66
5.	สรุปผล .....	70
5.1	สรุปผลการทดลอง.....	70
5.2	ข้อเสนอแนะ .....	71
	บรรณานุกรม.....	72
	ภาคผนวก.....	77
	ภาคผนวก ก การคำนวณแบบเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด .....	78
	ภาคผนวก ข การคำนวณอัตราส่วนอากาศทางทฤษฎี .....	86
	ภาคผนวก ค แบบชุดทดลอง.....	91
	ภาคผนวก ง ผลงานตีพิมพ์และการเผยแพร่ .....	108

## สารบัญรูปร่างภาพ

รูปที่ 2.1 แสดงกระบวนการเผาไหม้ของชีวมวล (Basu, 2010) .....	20
รูปที่ 2.2 แสดงกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) (Basu, 2010).....	21
รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชัน (Kunil & Levenspiel, 1993).....	22
รูปที่ 2.4 แสดงการแยกอนุภาค Geldart (Geldart, 1973) .....	23
รูปที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความกลมของอนุภาคของแข็งและสัดส่วนช่องว่างของอนุภาคของแข็ง (สุวิทย์ เตีย.2535) .....	25
รูปที่ 2.6 แสดงลักษณะอนุภาคของแข็งในการเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชัน.....	28
รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะแอมพลิจูดที่สอดแทรกเมื่อเกิดปรากฏการณ์ฟองอากาศ .....	28
รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบฟองอากาศ (Bubbling Fluidized Bed, BFB) (Neubauer & Liu, 2013).....	30
รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนวน (Circulating Fluidized Bed, CFB) (Neubauer & Liu, 2013).....	31
รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะชุดทดลองฟลูอิดไดซ์เบดใช้เชื้อเพลิงเปลือกถั่วลิสงกับเปลือกมะขาม (Kuprianov & Arromdee, 2013).....	32
รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะชุดทดลองฟลูอิดไดซ์เบดแบบฟองอากาศใช้เชื้อเพลิงเมล็ดลูกพีชกับเมล็ดแอปปริคอต (Kaynak et al., 2005).....	32
รูปที่ 2.12 แสดงลักษณะชุดทดลองฟลูอิดไดซ์เบดแบบฟองอากาศใช้เชื้อเพลิงขี้เลื่อย แกลบ และชานอ้อย (Permchart & Kouprianov, 2004).....	33
รูปที่ 3.1 แสดงขั้นตอนการศึกษาการเผาไหม้ระบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบฟองอากาศโดยใช้เชื้อเพลิงผสมระหว่างแกลบอัดเม็ดและขี้เลื่อยอัดเม็ด .....	37
รูปที่ 3.2 แสดงลักษณะชุดเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบด .....	38
รูปที่ 3.3 แสดงลักษณะของทรายที่ใช้ในการทดลอง .....	39
รูปที่ 3.4 แสดงลักษณะแกลบอัดเม็ด (a) ขี้เลื่อยอัดเม็ด (b) .....	40
รูปที่ 3.5 แสดงลักษณะพัดลมเป่าอากาศ (Blower).....	41
รูปที่ 3.6 แสดงลักษณะอินเวอร์เตอร์ (Inverter) .....	42
รูปที่ 3.7 แสดงลักษณะเซนเซอร์วัดความดัน (Pressure Sensor).....	42
รูปที่ 3.8 แสดงลักษณะ Pitot Tube.....	43
รูปที่ 3.9 แสดงลักษณะ Gas Analyzer รุ่น Testo 350 XL .....	43
รูปที่ 3.10 แสดงลักษณะ Data logger รุ่น WISCO Analog Input Module AI 210.....	44
รูปที่ 3.11 แสดงลักษณะ Data logger ยี่ห้อ National Instruments รุ่น USB-6008.....	44
รูปที่ 3.12 แสดงลักษณะปั๊มลม ยี่ห้อ PUMA.....	44
รูปที่ 3.13 แสดงลักษณะ flow meter ยี่ห้อ KI .....	45
รูปที่ 3.14 แสดงลักษณะ Gas Burner .....	45

รูปที่ 3.15 แสดงลักษณะ Perforated Stainless Steel Sheet.....	46
รูปที่ 3.16 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ชุดทดลองฟลูอิดไดซ์เบดแบบพองอากาศ.....	46
รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดคร่อมเบดและการปรับความเร็วการไหลของอากาศ ของสัดส่วนมวล 0.03, 0.08 และ 0.12 (increasing คือการปรับเพิ่มความเร็วการไหลของอากาศ และ decreasing คือการปรับลดความเร็วการไหลของอากาศ).....	50
รูปที่ 4.2 แสดงการหาความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไดเซชัน ( $u_{mf}$ ) ที่สัดส่วนมวล 0.03 (increasing คือการปรับเพิ่มความเร็วการไหลของอากาศ และ decreasing คือการปรับลดความเร็วการไหลของอากาศ).....	51
รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนมวล (Mass fraction) 0.02-0.14 และความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไดเซชัน (Increasing คือการปรับเพิ่มความเร็วการไหลของอากาศ และ Decreasing คือการปรับลดความเร็วการไหลของอากาศ).....	52
รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไดเซชันและความเร็วต่ำสุดในการเกิดปรากฏการณ์พองอากาศที่สัดส่วนโดยมวลของซีลีเนียมต่อทราย 0.03 (a, c และ e เป็นการปรับเพิ่มความเร็วในการทดลอง ส่วน b, d และ f เป็นการปรับลดความเร็ว).....	54
รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปรียบเทียบความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไดเซชัน ( $u_{mf}$ ) และความเร็วต่ำสุดในการเกิดพองอากาศ ( $u_{mb}$ ) (Increasing คือการปรับเพิ่มความเร็วการไหลของอากาศ และ Decreasing คือการปรับลดความเร็วการไหลของอากาศ).....	55
รูปที่ 4.6 แสดงลักษณะเชื้อเพลิงผสมระหว่างกลบอัดเม็ดและซีลีเนียมที่อัตราส่วนโดยน้ำหนัก (a) 100:0, (b) 0:100, (c) 75:25, (d) 50:50, (e) 25:75.....	56
รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงเหนือตะแกรงเบดกับอุณหภูมิจากการเผาไหม้ของกลบอัดเม็ด 100 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราส่วนอากาศส่วนเกินต่างๆ.....	57
รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงเหนือตะแกรงเบดกับอุณหภูมิจากการเผาไหม้ของซีลีเนียม 100 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราส่วนอากาศส่วนเกินต่างๆ.....	58
รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงเหนือตะแกรงเบดกับอุณหภูมิจากการเผาไหม้กลบอัดเม็ดผสมซีลีเนียม 75:25 ที่อัตราส่วนอากาศส่วนเกินต่างๆ.....	59
รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงเหนือตะแกรงเบดกับอุณหภูมิจากการเผาไหม้กลบอัดเม็ดผสมซีลีเนียม 50:50 ที่อัตราส่วนอากาศส่วนเกินต่างๆ.....	60
รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงเหนือตะแกรงเบดกับอุณหภูมิจากการเผาไหม้กลบอัดเม็ดผสมซีลีเนียม 25:75 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราส่วนอากาศส่วนเกินต่างๆ.....	61
รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงเหนือตะแกรงเบดกับอุณหภูมิที่อัตราการป้อน 2 กิโลกรัมต่อชั่วโมง.....	62
รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงเหนือตะแกรงเบดกับอุณหภูมิที่อัตราการป้อน 3 กิโลกรัมต่อชั่วโมง.....	62
รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงเหนือตะแกรงเบดกับอุณหภูมิที่อัตราการป้อน 4 กิโลกรัมต่อชั่วโมง.....	63

รูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงเหนือตะแกรงเบดกับอุณหภูมิที่อัตราการป้อน 5 กิโลกรัมต่อชั่วโมง.....	63
รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงเหนือตะแกรงเบดกับอุณหภูมิที่อัตราการป้อน 6 กิโลกรัมต่อชั่วโมง.....	64
รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิไอเสียและอัตราส่วนอากาศส่วนเกิน (Excess air) (rh คือ แกลบอัดเม็ด และ sw คือ ซีล้อยอัดเม็ด).....	65
รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และอัตราส่วนอากาศส่วนเกิน (Excess air) (rh คือ แกลบอัดเม็ด และ sw คือ ซีล้อยอัดเม็ด).....	65
รูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างไนโตรเจนออกไซด์ (NO <sub>x</sub> ) และอัตราส่วนอากาศส่วนเกิน (Excess air) (rh คือ แกลบอัดเม็ด และ sw คือ ซีล้อยอัดเม็ด).....	66
รูปที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเถ้าและอัตราการป้อนเชื้อเพลิง (rh คือ แกลบอัดเม็ด และ sw คือ ซีล้อยอัดเม็ด).....	67



## สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1	ขนาดตะแกรงมาตรฐาน Tyler (สุวิทย์ เตีย, 2535).....	24
ตารางที่ 2.2	ตารางค่าความกลมของอนุภาค (สุวิทย์ เตีย, 2535).....	25
ตารางที่ 2.3	แสดงค่า $K_1$ และ $K_2$ (สุวิทย์ เตีย, 2535) .....	27
ตารางที่ 3.1	การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีแบบละเอียดของแกลบอัดเม็ดและซีลี้อยัดเม็ด (Ultimate Analysis).....	40
ตารางที่ 3.2	การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีแบบประมาณของแกลบอัดเม็ดและซีลี้อยัดเม็ด (Proximate Analysis).....	41
ตารางที่ 4.1	แสดงปริมาณสารประกอบของเถ้า (เปอร์เซ็นต์).....	68
ตารางที่ 4.2	แสดงประสิทธิภาพการเผาไหม้ .....	69

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนในการให้เงินทุนวิจัยโดยมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ รหัสโครงการ  
ENG550359S

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงผสมระหว่างแกลบอัดเม็ดกับขี้เลื่อยอัดเม็ดในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบพองอากาศขนาดทดลองในห้องปฏิบัติการ (Lab-scale) มีเส้นผ่านศูนย์กลางห้องเผาไหม้ 9.8 เซนติเมตร สูง 120 เซนติเมตร ใช้ทรายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3-5 มิลลิเมตร ปริมาณ 500 กรัม เป็นอนุภาคเบด การศึกษาทดลองแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกคือการศึกษาหาความเร็วต่ำสุดในการเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชันและพองอากาศ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของขี้เลื่อยอัดเม็ดต่อน้ำหนักรวมที่ศึกษาอยู่ในช่วง 0.02 ถึง 0.14 ส่วนที่สองคือการศึกษาการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงผสมระหว่างแกลบอัดเม็ดกับขี้เลื่อยอัดเม็ดในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบพองอากาศเพื่อศึกษาผลของการกระจายอุณหภูมิ ไอเสีย ประสิทธิภาพการเผาไหม้ ใช้อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนักระหว่างแกลบอัดเม็ดและขี้เลื่อยอัดเม็ด 100:0, 0:100, 75:25, 50:50 และ 25:75 อัตราการป้อนเชื้อเพลิงอยู่ในช่วง 2-6 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

ผลการทดลองในส่วนแรกแสดงให้เห็นว่า ความเร็วต่ำสุดในการเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชัน ( $u_{mf}$ ) อยู่ในช่วง 1.75- 2.03 เมตรต่อวินาที และ ความเร็วต่ำสุดในการเกิดปรากฏการณ์พองอากาศ ( $u_{mb}$ ) อยู่ในช่วง 1.94-2.15 เมตรต่อวินาที และอัตราส่วนของขี้เลื่อยที่เพิ่มขึ้นไม่ได้ส่งผลให้ความเร็วในการเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชันสูงขึ้น

จากการศึกษาการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงผสมระหว่างแกลบอัดเม็ดกับขี้เลื่อยอัดเม็ดในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบพองอากาศ พบว่า อุณหภูมิเฉลี่ยของการเผาไหม้แกลบอัดเม็ดต่ำกว่าขี้เลื่อยอัดเม็ด ดังนั้นการใช้ขี้เลื่อยอัดเม็ดเป็นส่วนผสมทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยเพิ่มสูงขึ้น ในกรณีเชื้อเพลิงผสมแกลบอัดเม็ดต่อขี้เลื่อยอัดเม็ดที่อัตราส่วน 75:25, 50:50 และ 25:75 การกระจายอุณหภูมิแต่ละอัตราส่วนมีค่าใกล้เคียงกันตลอดความสูงห้องเผาไหม้ แตกต่างจากการใช้เชื้อเพลิงแกลบอัดเม็ด 100 เปอร์เซ็นต์ ที่ให้อุณหภูมิสูงในช่วงปลายของห้องเผาไหม้ ส่วนการใช้ขี้เลื่อยอัดเม็ด 100 เปอร์เซ็นต์ ทำให้เกิดอุณหภูมิสูงบริเวณใกล้ตะแกรง กรณีใช้แกลบอัดเม็ด 100 เปอร์เซ็นต์ และอัตราส่วนผสมแกลบอัดเม็ดต่อขี้เลื่อยอัดเม็ดที่ 75:25 ก๊าซไอเสียมีปริมาณ CO อยู่ในช่วง 700-1,400 ppm แต่ในกรณีเชื้อเพลิงผสมแกลบอัดเม็ดต่อขี้เลื่อยอัดเม็ดที่อัตราส่วน 25:75 50:50 และขี้เลื่อยอัดเม็ด 100 เปอร์เซ็นต์ ก๊าซไอเสียมีปริมาณ CO ลดลงอยู่ในช่วง 400-800 ppm ส่วนปริมาณ  $NO_x$  ใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 200-400 ppm ประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงผสมแกลบอัดเม็ดต่อขี้เลื่อยอัดเม็ดที่อัตราส่วน 50:50 ที่อัตราการป้อน 4 กิโลกรัมต่อชั่วโมงมีประสิทธิภาพสูงสุดที่ 99.09 เปอร์เซ็นต์

สำหรับการศึกษาในส่วนที่สอง พบว่าหากใช้เชื้อเพลิงอย่างใดอย่างหนึ่งเพียงอย่างเดียวจะทำให้เกิดปัญหาขึ้นได้ เนื่องจากแกลบอัดเม็ดมีองค์ประกอบของซิลิกา (Si) สูง ทำให้มีความเสี่ยงในการเกิดการรวมตัวกันเป็นก้อน (Agglomeration) ของเถ้า ส่งผลให้เกิดปัญหาการอุดตันในห้องเผาไหม้ได้ ส่วนในกรณีของขี้เลื่อยอัดเม็ด พบว่าในเถ้ามีปริมาณ CaO สูงถึง 19.436 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งใกล้เคียงกับค่าวิกฤติที่ 23-35 เปอร์เซ็นต์ และอุณหภูมิการเผาไหม้ของขี้เลื่อยอัดเม็ดมีค่าสูงกว่า 850 องศาเซลเซียส ซึ่งเสี่ยงต่อการเกิดตะกรัน (Fouling) เกาะบริเวณผิวท่อ ส่งผลให้ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนลดลง แต่หากนำเชื้อเพลิงผสมกัน พบว่าอุณหภูมิของการเผาไหม้ไม่เกิน 850 องศาเซลเซียส และองค์ประกอบของ

ถ้าจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมที่อัตราส่วน 50:50 มีปริมาณ  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  และ  $\text{K}_2\text{O}$  ลดลง ส่งผลให้เกิดปัญหาตะกรัน (Fouling) และการรวมตัวกันเป็นก้อนของเถ้า (Agglomeration) ลดน้อยลงไปด้วย

## Abstract

This research aims to study the combustion of fuel mixture between rice husk pellets and sawdust pellets in a lab-scale bubbling fluidized bed combustor. The combustion chamber has 9.8 cm in diameter and 120 cm in height. Five hundred grams of sand was used as bed particles. Sand particle size is range from 3 to 5 mm in diameter. The experiments in this study were divided into two parts. The first one is the determination of minimum fluidization velocity and minimum bubbling velocity. The experiments were carried out within the range of weight ratios of sawdust pellets to the total weight from 0.02 to 0.14. The second part is the combustion study of fuel mixture between rice husk pellets and sawdust pellets. The temperature distribution along the height of combustor, exhaust gas emission and combustion efficiency were investigated. The experiments were performed for 5 cases of mixing ratio between rice husk pellets and sawdust pellets; 100:0, 0:100, 75:25, 50:50 and 25:75 percent by weight. The rates of fuel mixture feed were 4, 6 and 8 kg/hr.

The results of first part shown that the minimum fluidization velocities ( $u_{mf}$ ) were in the range of 1.75- 2.03 m/s and the minimum bubble fluidization velocities ( $u_{mb}$ ) were in the range of 1.94-2.15 m/s. Increasing the amount of sawdust pellets were not increased the minimum fluidization velocities ( $u_{mf}$ ) and the minimum bubble fluidization velocities ( $u_{mb}$ ).

For the second part, the average combustion temperature of rice husk pellets was lower than sawdust pellets. Increasing the sawdust pellets in fuel mixture was resulted in higher average combustion temperature. In case of the fuel mixtures ratios of 75:25, 50:50 and 25:75, the average combustion temperatures were in the same range throughout the height of combustor. For the combustion of 100% rice husk pellets, they mainly burned at the end of combustion chamber, resulting in the high exhaust gas temperature. Whereas, the combustion temperature of 100% sawdust pellets was high near perforated stainless-steel sheet cause of combustion above it. The CO emission was in the range from 700 to 1,400 ppm for the fuel mixtures ratios of 100:0 and 75:25. For the rest, 25:75, 50:50 and 0:100, the CO emissions were between 400 and 800 ppm. The maximum combustion efficiency was found to be 99.09 % for fuel mixture ratio of 50:50 at feeding rate 4 kg/hr.

The ash from combustion of sawdust pellets contained CaO up to 19.44%, which almost reach to the critical value at 23-35% . Also, the sawdust pellets combustion temperature was beyond 850°C. These conditions have high risk for pipe fouling which

decrease the heat transfer performance. Moreover, high silica content in rice husk pellets could be formed to ash agglomeration after combustion. However, the mixture of rice husk pellets and sawdust pellets with 50:50 ratio can decrease the CaO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O in ash and decreased the combustion temperature (<850°C). Therefore, the fouling and agglomeration may be deduced by using mixture fuel.

## สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

$\Delta P$	ความดันลดคร่อมเบด
$A_b$	พื้นที่หน้าตัดของห้องเผาไหม้
$L_{mf}$	ความสูงของอนุภาคของแข็งที่เกิดฟลูอิดไดเซชัน
$\epsilon_{mf}$	สัดส่วนช่องว่างของเบดที่เกิดฟลูอิดไดเซชัน
$g$	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก
$\mu_f$	ความหนืดของของไหล
$\rho_f$	ความหนาแน่นของของไหล
$\rho_p$	ความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง
$u_{mf}$	ความเร็วต่ำสุดในการเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชัน
$u_{mb}$	ความเร็วต่ำสุดในการเกิดปรากฏการณ์ฟองอากาศ
$u_t$	ความเร็วสุดท้าย
$\phi_s$	ความกลมของอนุภาค
$d_p$	ขนาดของอนุภาค
Ar	Archimedes number
$C_d$	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน
$Re_s$	Reynolds number
BFB	Bubbling Fluidized Bed
CFB	Circulating Fluidized Bed
EA	Excess air
$\eta_c$	ประสิทธิภาพการเผาไหม้
$E_{fuel}$	พลังงานของเชื้อเพลิง
$E_{loss}$	พลังงานที่สูญเสีย

## 1. หน้า

### 1.1 ชื่อโครงการวิจัย

(ภาษาไทย) การศึกษาการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงผสมระหว่างแกลบอัดเม็ดกับขี้เลื่อยอัดเม็ดในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบฟองอากาศ

(ภาษาอังกฤษ) Study on Combustion of Fuel Mixture between Rice Husk Pellets and Sawdust Pellets in Bubble Fluidized Bed Combustor

### 1.2 ชื่อคณะผู้วิจัย

นักวิจัยในโครงการ

ดร.กิตตินันท์ มลิวรรณ หัวหน้าโครงการ

ดร.ฐานันดรศักดิ์ เทพญา ผู้ร่วมวิจัย

ผศ.ดร.ชยุต นันทสุสิต ผู้ร่วมวิจัย

ดร.นันทพันธ์ นภทรานันท์ ผู้ร่วมวิจัย

นักศึกษาผู้รับทุนวิจัย

นายศกิตินันท์ โอแก้ว รหัสนักศึกษา 5510120025 หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

### 1.3 ได้รับทุนอุดหนุนวิจัยจาก

งบประมาณเงินรายได้มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ประเภททั่วไป ประจำปีงบประมาณ 2556

### 1.4 ระยะเวลาตลอดโครงการ 2 ปี

### 1.5 เริ่มโครงการวิจัยเมื่อ เดือน กันยายน พ.ศ. 2555 ถึงเดือน สิงหาคม 2561

### 1.6 งบประมาณที่ได้รับอนุมัติแล้ว

ปีที่ 1 ( 50% ) จำนวน 200,000 บาท

ปีที่ 2 ( 50% ) จำนวน 200,000 บาท

### 1.7 ในปีงบประมาณที่รายงานได้รับทุนวิจัยเมื่อเดือน พฤศจิกายน 2555

### 1.8 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันรัฐบาลได้ส่งเสริมให้มีการใช้ชีวมวลในการผลิตพลังงานเพิ่มมากขึ้นเพื่อทดแทนการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล จำพวกน้ำมันดีเซล น้ำมันเตา หรือถ่านหินที่จะต้องนำเข้าจากต่างประเทศและมีปริมาณลดลงอย่างต่อเนื่องอาจส่งผลให้เกิดปัญหาการขาดแคลนเชื้อเพลิงในอนาคต อีกทั้งการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้โลกประสบกับปัญหาการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศ (Climate Change) ส่งผลกระทบต่อชีวิตความเป็นอยู่ของมนุษย์ในปัจจุบันเป็นอย่างมาก เช่น การเกิดมหาอุทกภัยในประเทศไทยในปี 2554 ที่ผ่านมา เป็นความสูญเสียต่อระบบเศรษฐกิจและชีวิตความเป็นอยู่ของคนไทยเป็นอย่างมาก มหาศาล ดังนั้นการแก้ปัญหาอย่างหนึ่งที่เราควรนำมาพิจารณาคือ การนำเชื้อเพลิงชีวมวลมาผลิตเป็นพลังงานแทนการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล



ประเทศไทยเป็นประเทศที่ประชาชนร้อยละ 40.7 ประกอบอาชีพเกษตรกรรม (สำนักงานสถิติแห่งชาติ, 2554) ทำให้มีผลผลิตจากภาคเกษตรกรรมและเศษเหลือจากผลผลิตทางการเกษตรปริมาณมากและสามารถนำไปใช้ผลิตพลังงานได้ เช่น แกลบ ชานอ้อย ชี้เลื่อย ทะลายปาล์ม เป็นต้น โดยเฉพาะแกลบเป็นส่วนที่เหลือจากกระบวนการแปรรูปข้าวเปลือกเป็นข้าวสาร ประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกข้าวประมาณ 55,095,547 ไร่ มีผลผลิตที่เป็นข้าวเปลือก 29,658,454 ตัน (ศูนย์สารสนเทศการเกษตร, 2560) แกลบมีปริมาณมากทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคเหนือเนื่องจากเป็นพื้นที่ที่มีการปลูกข้าวสูงสุดร้อยละ 57 และ 22 ตามลำดับ พบว่ามีศักยภาพพลังงานสูงถึง 2,838.97 ktoe เมื่อคิดเป็นปริมาณเทียบเท่าน้ำมันดิบ (รายงานพลังงานทดแทนของประเทศไทย, 2557) โดยในประเทศไทยมีโรงไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงแกลบเป็นเชื้อเพลิงเพียงอย่างเดียว 19 โรง (สำนักงานคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน, 2560) แต่การใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงนั้นยังมีปัญหาเก่าที่มีปริมาณมากเนื่องจากแกลบมีซิลิกา (Si) เป็นองค์ประกอบในปริมาณมากและปัญหาการเกาะตัวเป็นตะกักรันบริเวณห้องเผาไหม้ส่งผลให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ลดลง (ประสาน สถิตเรืองศักดิ์ และคณะ, 2550; ภัทรพันธ์ ทองยศ และคณะ, 2555; สุภัทรชัย สุวรรณพันธุ์ และคณะ, 2554) การใช้แกลบเพียงชนิดเดียวเป็นเชื้อเพลิงนั้นมีความเสี่ยงสูงไม่ว่าจะเป็นราคา ช่วงฤดูกาลเพาะปลูก ดังนั้นหากสามารถใช้เชื้อเพลิงชนิดอื่นเป็นส่วนผสมในการเผาไหม้ได้จะช่วยลดความเสี่ยงทางด้านราคาเชื้อเพลิง การแย่งรับซื้อเชื้อเพลิงอีกด้วย ชี้เลื่อยเป็นชีวมวลที่น่าสนใจเนื่องจากปัจจุบันประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกยางพาราทั้งประเทศ 18,223,833 ไร่ (ศูนย์สารสนเทศการเกษตร, 2560) มีอัตราการโค่นต้นยางเพื่อปลูกทดแทนในปี 2008-2011 เฉลี่ยปีละ 295,000 ไร่ (สมบุญรณ์ พุกษานุกศักดิ์, 2555) โดยปริมาณชี้เลื่อยที่ได้เฉลี่ย 3 ตันต่อไร่ (ฐานข้อมูลศักยภาพชีวมวลในประเทศไทยประจำปีเพาะปลูก, 2556) พลังงานจากชี้เลื่อยภายในประเทศไทยคิดเทียบเท่าน้ำมันดิบมีปริมาณ 36.68 ktoe (รายงานพลังงานทดแทนของประเทศไทย, 2557)

เทคโนโลยีฟลูอิดไดเซชันสำหรับกระบวนการทางความร้อนเป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่น่าสนใจเนื่องจากสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้หลายรูปแบบ ไม่ว่าจะเป็นการอบแห้ง การผลิตพลังงานไฟฟ้าและอื่น ๆ อีกมากมาย (Jiliang et al, 2013 ; Karmakar et al., 2013) สำหรับเทคโนโลยีเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดสามารถใช้เชื้อเพลิงชีวมวลและเชื้อเพลิงแข็งจากฟอสซิล เช่น ถ่านหิน ที่มีคุณสมบัติที่หลากหลายได้ ไม่ว่าจะเป็นเชื้อเพลิงที่มีความชื้นสูง ขนาดที่แตกต่างกัน (สุนิรัตน์ พุกตะ, 2558) เทคโนโลยีเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดในปัจจุบันมี 2 ระบบ คือ เทคโนโลยีเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบฟองอากาศ (Bubbling Fluidized Bed, BFB) และเทคโนโลยีเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนวน (Circulating Fluidized Bed, CFB) ซึ่งในกรณีของเทคโนโลยีเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนวน (Circulating Fluidized Bed, CFB) นั้นถูกออกแบบเพื่อให้เหมาะสมกับเชื้อเพลิงประเภทถ่านหินที่มีองค์ประกอบของกำมะถัน (S) ปริมาณสูง จึงต้องนำเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์กลับมาเผาไหม้ซ้ำอีกเพื่อลดปัญหาในส่วนของไอเสียที่เกิดขึ้น (Basu, 2006) และในเทคโนโลยีเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดนั้นยังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้และลดปริมาณก๊าซไอเสียสามารถทำได้โดยการเติมอากาศทุติยภูมิเข้าไปในระบบ (Presto et al, 1987; Bhattacharya & Wu, 1989)

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาทดลองการเผาไหม้ที่อัตราส่วนของเชื้อเพลิงผสมระหว่างแกลบอัดเม็ดและซีลี้อยอัดเม็ดในระบบเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบฟองอากาศ (Bubbling Fluidized Bed, BFB) เนื่องจากระบบมีความซับซ้อนน้อยกว่าเทคโนโลยีเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนวน (Circulating Fluidized Bed, CFB) และเชื้อเพลิงที่ใช้มีส่วนผสมของกำมะถัน (S) ในปริมาณน้อยจึงไม่จำเป็นต้องนำเชื้อเพลิงกลับมาเผาไหม้ซ้ำ ปัจจุบันราคาแกลบอัดเม็ด 3,500-4,000 บาทต่อตัน ส่วนซีลี้อยอัดเม็ดราคา 2,800-3,000 บาทต่อตัน การคมนาคมขนส่งทำได้ง่าย ปริมาณมาก พื้นที่การจัดเก็บน้อยกว่ากรณีที่ไม่ผ่านกระบวนการอัดเม็ด อีกทั้งการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงอัดเม็ดในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดยังให้ประสิทธิภาพสูงกว่าเตาเผาชนิดอื่น (สุนีรัตน์ พุกตะ, 2558)

### 1.9 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงผสมระหว่างแกลบอัดเม็ดและซีลี้อยอัดเม็ดในเตาฟลูอิดไดซ์เบดแบบฟองอากาศ
2. ศึกษาผลของการกระจายตัวของอุณหภูมิจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมระหว่างแกลบอัดเม็ดและซีลี้อยอัดเม็ด
3. ศึกษาองค์ประกอบของไอเสียและเถ้าที่เกิดจากการเผาไหม้ของเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบฟองอากาศจากเชื้อเพลิงผสมระหว่างแกลบอัดเม็ดและซีลี้อยอัดเม็ด

### 1.10 ขอบเขตของงานวิจัย

1. เชื้อเพลิงผสมที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงผสมระหว่างแกลบอัดเม็ดและซีลี้อยอัดเม็ดที่อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนักคือ 100:0, 0:100, 75:25, 50:50 และ 25:75 โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 0.8 เซนติเมตร และยาว 2 เซนติเมตร
2. เตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดที่สร้างขึ้นเป็นแบบฟองอากาศ (bubbling fluidized bed) โดยมีอัตราการป้อนเชื้อเพลิงระหว่าง 2-6 กิโลกรัมต่อชั่วโมง
3. ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ อัตราการป้อนเชื้อเพลิง อัตราส่วนผสมของเชื้อเพลิง ปริมาณอากาศรวม ปริมาณอากาศทุติยภูมิ ปริมาณก๊าซ CO NO<sub>x</sub> SO<sub>2</sub> และองค์ประกอบทางเคมีของเถ้า

### 1.11 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ทำให้ทราบถึงอัตราการป้อนเชื้อเพลิง อัตราส่วนผสมของเชื้อเพลิง ที่เหมาะสมของเชื้อเพลิงในเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบฟองอากาศที่ให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดและปลดปล่อยมลพิษจากการเผาไหม้ต่ำสุดจากเชื้อเพลิงผสมระหว่างแกลบอัดเม็ดและซีลี้อยอัดเม็ด



## 2. ทฤษฎีและทบทวนงานวิจัย

ในการศึกษาการเผาไหม้เชื้อเพลิงในระบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบฟองอากาศนั้นมีความยุ่งยากซับซ้อนเนื่องจากต้องควบคุมความเร็วการไหลของอากาศเพื่อให้ลักษณะของเชื้อเพลิงอยู่ในลักษณะฟลูอิดไดเซชัน ดังนั้นเพื่อให้เข้าใจหลักการและกระบวนการต่าง ๆ ในส่วนของบทที่ 2 จึงเป็นการอธิบายเกี่ยวกับเชื้อเพลิง ทฤษฎีการเผาไหม้ การเกิดฟลูอิดไดเซชัน Geldart's classification เทคโนโลยีฟลูอิดไดซ์เบด และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาการเผาไหม้ในระบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบฟองอากาศ

### 2.1 นิยามเชื้อเพลิง

เชื้อเพลิง คือ สารที่เผาไหม้แล้วให้พลังงานความร้อนออกมาแล้วนำไปใช้ประโยชน์ได้ และอัตราการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้นั้นสามารถควบคุมได้ โดยที่เชื้อเพลิงเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนหรือมีคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบเป็นส่วนใหญ่ และเมื่อเกิดการเผาไหม้จะได้คาร์บอนไดออกไซด์กับน้ำ

เชื้อเพลิงแบ่งตามสถานะได้เป็น 3 ประเภท คือ

- เชื้อเพลิงแข็ง (solid)
- เชื้อเพลิงเหลว (liquid)
- ก๊าซ (gas)

หากแบ่งตามการเกิดจะแบ่งได้ 2 ประเภท คือ

- เชื้อเพลิงที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (natural fuel)
- เชื้อเพลิงที่เกิดจากการสังเคราะห์ขึ้นมา (synthetic fuel)

โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เชื้อเพลิงชีวมวล (biomass) ซึ่งจัดเป็นเชื้อเพลิงที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติเพื่อใช้ในการวิจัย

#### 2.1.1 เชื้อเพลิงชีวมวล

ชีวมวล หมายถึง สิ่งที่ได้จากสิ่งมีชีวิตหรือสารอินทรีย์ทั่วไปในธรรมชาติที่เก็บสะสมพลังงานในตัวของมันเอง และสามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานที่เก็บสะสมไว้ไปใช้ประโยชน์ได้ (Loppinet-Serani et al., 2008) โดยชีวมวลที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้มาจาก 2 แหล่งคือวัสดุที่เหลือจากภาคเกษตรกรรม เช่น แกลบ ฟางข้าว ชี้อ้อย เศษไม้ กิ่งไม้ เป็นต้น และส่วนที่สองได้มาจากการเพาะปลูกเพื่อนำไปใช้ในการผลิตพลังงานโดยตรง (วัชระ ลอยสมุทร, 2558)

#### 2.1.2 องค์ประกอบเชื้อเพลิงชีวมวล

เชื้อเพลิงชีวมวลเป็นสารประกอบขนาดใหญ่ของสารอินทรีย์ ความชื้น และสารอนินทรีย์ (เถ้า) โดยสารประกอบอินทรีย์ของเชื้อเพลิงชีวมวลประกอบไปด้วยธาตุหลัก 4 ธาตุคือ คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ออกซิเจน (O) และ ไนโตรเจน (N) อาจจะมีคลอรีน (Cl) และกำมะถัน (S) ผสมอยู่ในสัดส่วนเล็กน้อย ในการวิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวมวลนั้นประกอบด้วย

1) การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีแบบละเอียด (Ultimate Analysis) จะเป็นการวิเคราะห์ปริมาณของธาตุที่มีอยู่ในเชื้อเพลิง

$$C + H + O + N + S + \text{ASH} + M = 100\% \quad (2.1)$$

เมื่อ ASH คือ เถ้า  
M คือ ความชื้น

โดยที่ C, H, O, N และ S เป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเชื้อเพลิง เชื้อเพลิงบางชนิดอาจจะมีองค์ประกอบดังสมการที่ 2.1 ครบ แต่เชื้อเพลิงบางชนิดอาจไม่มีในส่วนของกำมะถัน (S) ในส่วน of ค่าความชื้น (M) ตามสมการที่ 2.1 นั้นไม่ใช่ปริมาณเดียวกับไฮโดรเจน (H) และออกซิเจน (O) แต่จะเป็นคนละส่วนกัน

2) การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีแบบประมาณ (Proximate Analysis) เป็นการวิเคราะห์ส่วนประกอบของชีวมวล ซึ่งประกอบด้วย 4 ส่วน คือ สารระเหย (Volatile Matter) เถ้า (Ash) ความชื้น (Moisture) และคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon)

ไอระเหย (Volatile Matter) เป็นน้ำหนักที่หายไปของเชื้อเพลิงหลังจากให้ความร้อน 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 นาที หรือจนกว่าน้ำหนักจะคงที่ โดยไอระเหยจะเกิดขึ้นในกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis)

เถ้า (Ash) เป็นอีกองค์ประกอบหนึ่งของเชื้อเพลิงชีวมวล ซึ่งหากเชื้อเพลิงชีวมวลนั้นมีปริมาณเถ้าเยอะจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ต่ำ อีกทั้งยังเป็นปัญหาในการกำจัดเถ้าอีกด้วย

ความชื้น (Moisture) ในชีวมวลความชื้นส่งผลต่อประสิทธิภาพต่อการเผาไหม้อย่างมาก หากเชื้อเพลิงชีวมวลนั้นมีความชื้นเยอะจะส่งผลให้ประสิทธิภาพลดลงอย่างมากเนื่องจากต้องสูญเสียความร้อนในการระเหยน้ำหรือความชื้นออกจากเชื้อเพลิง

คาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) เป็นส่วนของคาร์บอนที่เหลือหรือไม่สามารถเผาไหม้ได้ เมื่อความร้อน 900 องศาเซลเซียส โดยสามารถหาได้จากสมการ 2.2

$$FC = 100 - M - \text{Ash} - \text{VM} \quad (2.2)$$

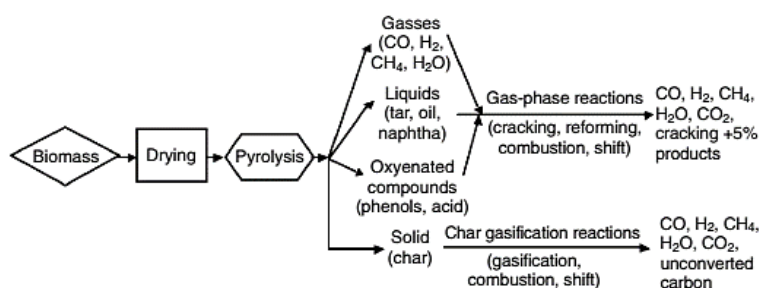
เมื่อ FC คือ เปอร์เซ็นต์คาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon)  
M คือ เปอร์เซ็นต์ความชื้น (Moisture)  
Ash คือ เปอร์เซ็นต์เถ้า (Ash)  
VM คือ เปอร์เซ็นต์ไอระเหย (Volatile Matter)

3) ค่าความร้อน (Heating value) คือค่าความร้อนที่ปล่อยออกมาจากเชื้อเพลิงที่ถูกเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ ค่าความความร้อนของเชื้อเพลิงจะขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวล ความชื้น ปริมาณเถ้า ซึ่ง

ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงมี 2 ชนิด คือ ค่าความร้อนสูง (Higher Heating Value, HHV) และค่าความร้อนต่ำ (Lower Heating Value, LHV)

## 2.2 การเผาไหม้

การเผาไหม้ (Combustion) เป็นการเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาเคมี เมื่อวัตถุหรือเชื้อเพลิงชีวมวลที่เผาไหม้ทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนและปลดปล่อยความร้อนออกมา และแปรสภาพเป็นสารประกอบออกไซด์ ซึ่งได้แก่คาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) และน้ำ หากการเผาไหม้นั้นไม่สมบูรณ์จะทำให้เกิดมลพิษทางอากาศ ซึ่งหลักการของกระบวนการเผาไหม้และวิธีการควบคุมการเผาไหม้ให้สมบูรณ์มีความจำเป็นและสำคัญ เป็นการอนุรักษ์พลังงานและรักษาสิ่งแวดล้อมและยังเพิ่มประสิทธิภาพของการเผาไหม้ (Yokoyama, 2008) โดยลักษณะกระบวนการเผาไหม้แสดงดังรูปที่ 2.1

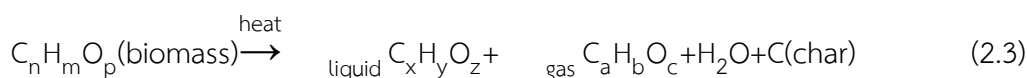


รูปที่ 2.1 แสดงกระบวนการเผาไหม้ของชีวมวล (Basu, 2010)

กระบวนการเผาไหม้ประกอบไปด้วย 4 ขั้นตอน ดังนี้

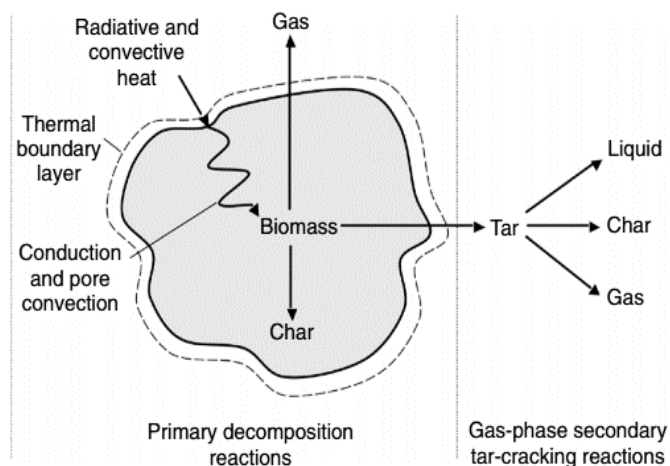
1) กระบวนการทำให้แห้ง (Preheating and drying) เนื่องจากเชื้อเพลิงชีวมวลทุกชนิดจะมีความชื้น ดังนั้นในกระบวนการแรกของการเผาไหม้จะเริ่มจากการระเหยความชื้นออกจากเชื้อเพลิง โดยอุณหภูมิจะอยู่ในช่วง 100-135 องศาเซลเซียส

2) กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) เป็นกระบวนการที่โครงสร้างของเชื้อเพลิงชีวมวลถูกสลายโดยความร้อนทำให้ได้ผลิตภัณฑ์แสดงดังรูปที่ 2.2 โดยช่วงที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาจะอยู่ในช่วง 500-600 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสประกอบด้วย ของเหลว (น้ำมันดิน) ของแข็ง (ถ่านชาร์หรือคาร์บอน) และก๊าซ (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CO, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>) ปฏิกิริยาดังสมการ 2.3



ในเชื้อเพลิงชีวมวลประกอบด้วยธาตุ คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน อยู่ในรูปของเซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และลิกนิน (Lignin) จะถูกย่อยสลายเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น สิ่งที่เหลือคือถ่านชาร์ โดยที่เซลลูโลส (Cellulose) สลายที่อุณหภูมิ 150-350 องศาเซลเซียส เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) สลายที่อุณหภูมิ 275-350 องศาเซลเซียสและลิกนิน (Lignin) สลายที่อุณหภูมิ 250-500 องศาเซลเซียส (Kumar & Pratt, 1996)

ส่วนประกอบ ขนาด รูปร่างและโครงสร้างทางกายภาพของเชื้อเพลิงชีวมวลนั้นมีผลต่อกระบวนการไพโรไลซิสเช่นกัน เชื้อเพลิงชีวมวลที่ขนาดเล็กกว่าจะสามารถรับความร้อนได้ง่ายกว่า เชื้อเพลิงชีวมวลขนาดใหญ่ทำให้กระบวนการไพโรไลซิสเกิดได้ง่ายกว่า



รูปที่ 2.2 แสดงกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) (Basu, 2010)

3) กระบวนการแปรสภาพถ่านชาร์เป็นก๊าซ (Char gasification) การเปลี่ยนถ่านชาร์ให้เป็นก๊าซที่มีค่าความร้อนที่ใช้ประโยชน์ได้ อุณหภูมิทำปฏิกิริยาจะอยู่ในช่วง 650-900 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์ก๊าซที่ได้จะเป็น Synthetic Gas จำพวกก๊าซไฮโดรเจน ( $H_2$ ) ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ( $CO$ ) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) ก๊าซมีเทน ( $CH_4$ ) และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอื่น ๆ ดังสมการที่ 2.4, 2.5, 2.6 และ 2.7



4) การเผาไหม้ถ่านชาร์ (Char combustion) ปฏิกิริยาที่เปลี่ยนเชื้อเพลิงแข็งให้เป็นเชื้อเพลิงแก๊สส่วนใหญ่จะเป็นการดูดพลังงาน แต่ในกระบวนการนี้จะเป็นขั้นสุดท้ายในกระบวนการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวลซึ่งเป็นกระบวนการที่มีการปล่อยพลังงานออกมา เมื่อไอระเหยของเชื้อเพลิงถ่านชาร์จากกระบวนการแปรสภาพถ่านชาร์เป็นก๊าซถูกเผาไหม้หมด สิ่งที่เหลืออยู่คือถ่านชาร์ที่เกิดการเผาไหม้อย่างช้า ๆ จนเหลือแต่เถ้า โดยกระบวนการนี้จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 650-900 องศาเซลเซียส โดยในระบบฟลูอิดไดซ์เบดกระบวนการแปรสภาพถ่านชาร์เป็นก๊าซและกระบวนการเผาไหม้ถ่านชาร์จะเกิดขึ้นในช่วงที่อุณหภูมิใกล้เคียงกันมาก

## 2.3 ปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชัน

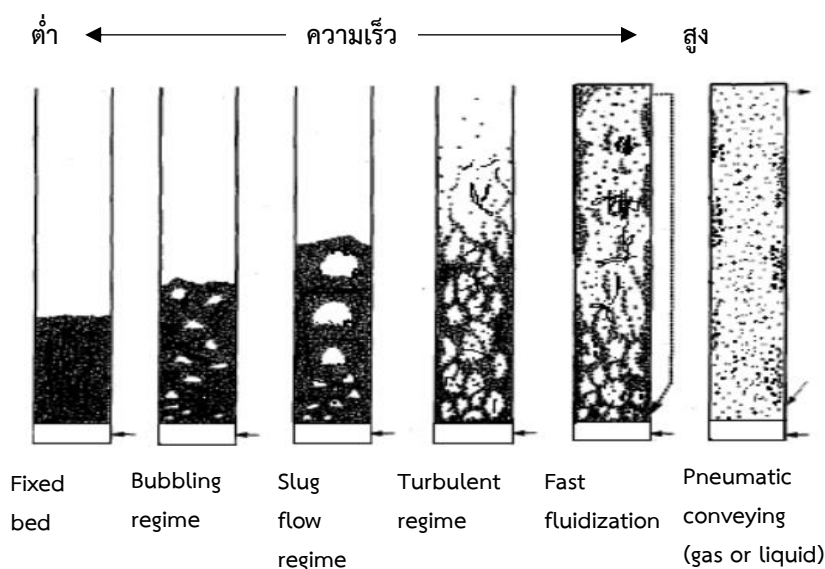
ฟลูอิดไดเซชัน (Fluidization) คือปรากฏการณ์ที่ทำให้อนุภาคของแข็งมีลักษณะการเคลื่อนที่คล้ายของไหลโดยใช้ตัวกลาง ตัวกลางการไหลจะผ่านตะแกรงจากด้านล่างเข้าสู่ห้องเผาไหม้สัมผัสกับอนุภาคของแข็ง ทำให้อนุภาคของแข็งจะค่อยๆเกิดการเคลื่อนที่และการเพิ่มความเร็วการไหลของตัวกลางจะทำให้อนุภาคของแข็งลอยตัวและการกระจายตัวทั่วห้องเผาไหม้ เมื่อความเร็วการไหลของตัวกลางมากพอจะทำให้อนุภาคของแข็งหลุดออกจากห้องเผาไหม้ ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า ฟลูอิดไดเซชัน

ฟลูอิดไดเซชันแบ่งตามสถานะของตัวกลางได้ 2 ประเภท

1) ฟลูอิดไดเซชันแบบสองสถานะ (Two-phase fluidization) ภายในระบบประกอบไปด้วยอนุภาคของแข็งและของไหล โดยที่ของไหลในที่นี้อาจจะเป็น ก๊าซ หรือของเหลวก็ได้

2) ฟลูอิดไดเซชันแบบสามสถานะ (Three-phase fluidization) ภายในระบบประกอบไปด้วยอนุภาคของแข็ง ของเหลวและก๊าซ

ลักษณะการเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชันนั้นมีหลายลักษณะขึ้นอยู่กับความเร็วของตัวกลาง ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งเมื่อเพิ่มความเร็วการไหลของของไหล ทำให้อนุภาคของแข็งที่อยู่ภายในเกิดการเคลื่อนที่ในลักษณะที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชัน (Kunii & Levenspiel, 1993)

ปัจจัยที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของอนุภาคของแข็งหรือการเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชัน มีดังนี้

### 2.3.1 ขนาดของอนุภาค ( $d_p$ )

ขนาดอนุภาคของแข็งแบ่งออกได้เป็น 4 กลุ่ม คือ A, B, C และ D โดยแต่ละกลุ่มจะส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชันที่แตกต่างกัน (Geldart, 1973) แสดงดังรูปที่ 2.4

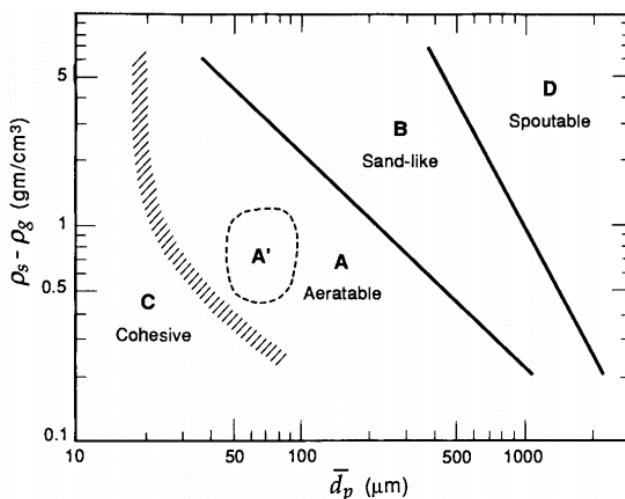


กลุ่ม A (Aeratable) อนุภาคของแข็งในกลุ่มนี้มีขนาดเล็ก ความหนาแน่นของอนุภาคต่ำ สามารถเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชันได้ง่ายและสม่ำเสมอทั่วทั้งห้องเผาไหม้ ความเร็วต่ำสุดในการเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชัน ( $u_{mf}$ ) ต่ำ

กลุ่ม B (Sand-like) อนุภาคของแข็งมีขนาด อยู่ในช่วง 40-500 ไมโครเมตร ความหนาแน่นอยู่ในช่วง 1.4-4.0 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร อนุภาคของแข็งในกลุ่มนี้เกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชันได้ง่าย ความเร็วต่ำสุดในการเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชันมีค่าใกล้เคียงกับความเร็วในการเกิดฟองอากาศ

กลุ่ม C (Cohesive) อนุภาคของแข็งมีขนาดเล็กมาก น้อยกว่า 30 ไมโครเมตร เกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชันได้ยากเนื่องจากมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคสูง อนุภาคกลุ่มนี้จะไม่เกิดฟองอากาศ

กลุ่ม D (Spoutable) อนุภาคของแข็งกลุ่มนี้มีขนาดใหญ่ ความหนาแน่นสูง เกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชันได้ยาก ต้องใช้ความเร็วการไหลของของไหลค่อนข้างสูง



รูปที่ 2.4 แสดงการแยกอนุภาค Geldart (Geldart, 1973)

สำหรับการหาขนาดอนุภาคของแข็งสามารถหาได้จากการใช้ตะแกรงร่อนเพื่อให้อนุภาคของแข็งมีขนาดใกล้เคียงกัน ขนาดตะแกรงแสดงดังตารางที่ 2.1 ซึ่งเหมาะกับอนุภาคของแข็งที่มีขนาดใหญ่กว่า 40 ไมโครเมตร

ตารางที่ 2.1 ขนาดตะแกรงมาตรฐาน Tyler (สุวิทย์ เตีย, 2535)

Mesh Number <sup>a</sup>	Aperture <sup>b</sup>		Mesh Number <sup>a</sup>	Aperture <sup>b</sup>	
	(in)	( $\mu\text{m}$ )		(in)	( $\mu\text{m}$ )
3	0.236	6680	35	0.0165	417
4	0.185	4699	48	0.0116	295
6	0.131	3327	65	0.0082	208
8	0.093	2362	100	0.0058	147
10	0.065	1651	150	0.0041	104
14	0.046	1168	200	0.0029	74
20	0.0328	833	270	0.0021	53
28	0.0232	589	400	0.0015	38

ตัวอย่างการคำนวณขนาดอนุภาค

หากอนุภาคที่ใช้อยู่ในช่วง 3-4 mesh สามารถหาขนาดอนุภาค ( $d_p$ ) ได้จาก

$$d_p = \frac{(6680+4699)}{2} = 5689.5 \text{ ไมโครเมตร}$$

### 2.3.2 สัดส่วนช่องว่าง ( $\epsilon_m$ )

สัดส่วนช่องว่างในเบตนิ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 2.8

$$\epsilon_m = \frac{\text{ปริมาตรช่องว่าง}}{\text{ปริมาตรทั้งหมด}} \quad (2.8)$$

ปริมาตรช่องว่าง และปริมาตรทั้งหมดสามารถหาค่าได้จากการแทนที่ด้วยของเหลว

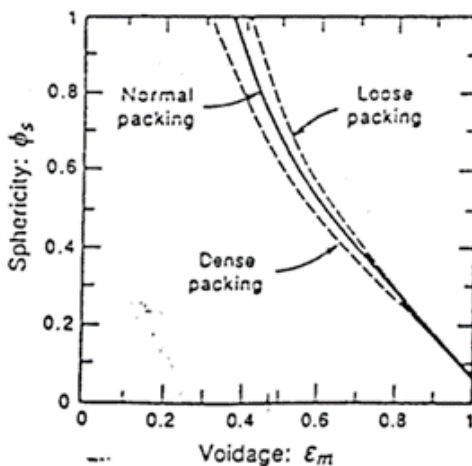
### 2.3.3 ค่าความกลม ( $\phi_s$ )

ค่าความกลมเป็นตัวบ่งบอกว่าอนุภาคของแข็งมีความเบี่ยงเบนไปจากทรงกลมมากน้อยเพียงใด ซึ่งสามารถหาได้จากตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ตารางค่าความกลมของอนุภาค (สุวิทย์ เตีย, 2535)

Particle	Size, $d_p$ (mm)						
	.02	.05	.07	.10	.20	.30	.40
Shap sand, $\phi_s = 0.67$		.60	.59	.58	.54	.50	.49
Round sand, $\phi_s = 0.86$		.56	.52	.48	.44	.42	
Mixed round sand			.42	.42	.41		
Coal and glass powder	.72	.67	.64	.62	.57	.56	
Anthracite coal, $\phi_s = 0.63$		.62	.61	.60	.56	.53	.51
Absorption carbon	.74	.72	.71	.69			
Fisher-Tropsch catst, $\phi_s = 0.58$				.58	.56	.55	
Carborundum		.61	.59	.56	.48		

แต่หากคุณสมบัติของอนุภาคของแข็งไม่เป็นดังตารางที่ 2.2 สามารถหาค่าความกลมของอนุภาคของแข็งได้จากรูปที่ 2.5 โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความกลมและสัดส่วนช่องว่างจากการคำนวณจากสมการที่ 2.8



รูปที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความกลมของอนุภาคของแข็งและสัดส่วนช่องว่างของอนุภาคของแข็ง (สุวิทย์ เตีย.2535)

### 2.3.4 ความเร็วต่ำสุดในการเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชัน ( $u_{mf}$ )

ความเร็วต่ำสุดในการเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชัน ( $u_{mf}$ ) คือความเร็วของของไหลที่ทำให้อนุภาคเริ่มเคลื่อนที่หรือลอยตัวอย่างเป็นอิสระ ซึ่งการเคลื่อนที่ของอนุภาคของแข็งสามารถเขียนในรูปของสมการ 2.9

$$(\text{แรงยก}) = (\text{น้ำหนักอนุภาค}) \quad (2.9)$$

$$(\Delta P)(A_b) = W \quad (2.10)$$

$$(\Delta P)(A_b) = (A_b L_{mf})(1-\epsilon_{mf})(\rho_p - \rho_f)g \quad (2.11)$$

จัดรูปสมการจะได้

$$\frac{\Delta P}{L_{mf}} = (1-\epsilon_{mf})(\rho_p - \rho_f)g \quad (2.12)$$

จากสมการที่ 2.12 Ergun ได้สร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์เป็นสมการที่ 2.13 (Ergun, 1952)

$$\frac{\Delta P}{L_{mf}} = 150 \frac{(1-\epsilon_{mf})^2}{\epsilon_{mf}^3} \frac{\mu_f u_{mf}}{\phi_s^2 d_p^2} + 1.75 \frac{(1-\epsilon_{mf})}{\epsilon_{mf}^3} \frac{\rho_f u_{mf}^2}{\phi_s d_p} \quad (2.13)$$

จากสมการที่ 2.12 และ 2.13 สามารถจัดรูปสมการใหม่ดังนี้

$$\frac{1.75}{\epsilon_{mf}^3 \phi_s} \frac{d_p u_{mf} \rho_f}{\mu_f} + 150 \frac{(1-\epsilon_{mf})}{\epsilon_{mf}^3 \phi_s^2} \frac{d_p u_{mf} \rho_f}{\mu_f} = \frac{d_p^3 \rho_f (\rho_p - \rho_f) g}{\mu_f^2} \quad (2.14)$$

เมื่อ	$\Delta P$	คือ ความดันลดคร่อมเบต
	$A_b$	คือ พื้นที่หน้าตัดของห้องเผาไหม้
	$L_{mf}$	คือ ความสูงของอนุภาคของแข็งที่เกิดฟลูอิดไดเซชัน
	$\epsilon_{mf}$	คือ สัดส่วนช่องว่างของเบตที่เกิดฟลูอิดไดเซชัน
	$g$	คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก
	$\mu_f$	คือ ความหนืดของของไหล
	$\rho_f$	คือ ความหนาแน่นของของไหล
	$\rho_p$	คือ ความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง
	$u_{mf}$	คือ ความเร็วต่ำสุดในการเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชัน
	$\phi_s$	คือ ความกลมของอนุภาค
	$d_p$	คือ ขนาดของอนุภาค

จากสมการที่ 2.14 สามารถจัดรูปสมการได้เป็น

$$Au_{mf}^2 + Bu_{mf} - Ar = 0 \quad (2.15)$$

โดย

$$A = \frac{1.75}{\epsilon_{mf}^3 \phi_s} \frac{d_p \rho_f}{\mu_f}^2 = K_1 \frac{d_p \rho_f}{\mu_f}^2$$

$$B = 150 \frac{(1-\epsilon_{mf})}{\epsilon_{mf}^3 \phi_s^2} \frac{d_p \rho_f}{\mu_f} = K_2 \frac{d_p \rho_f}{\mu_f}$$

$$Ar = \frac{d_p^3 \rho_f (\rho_s - \rho_f) g}{\mu_f^2}$$

ค่า  $K_1$  และ  $K_2$  สามารถหาได้จากตารางที่ 2.3  
 ตารางที่ 2.3 แสดงค่า  $K_1$  และ  $K_2$  (สุวิทย์ เตีย, 2535)

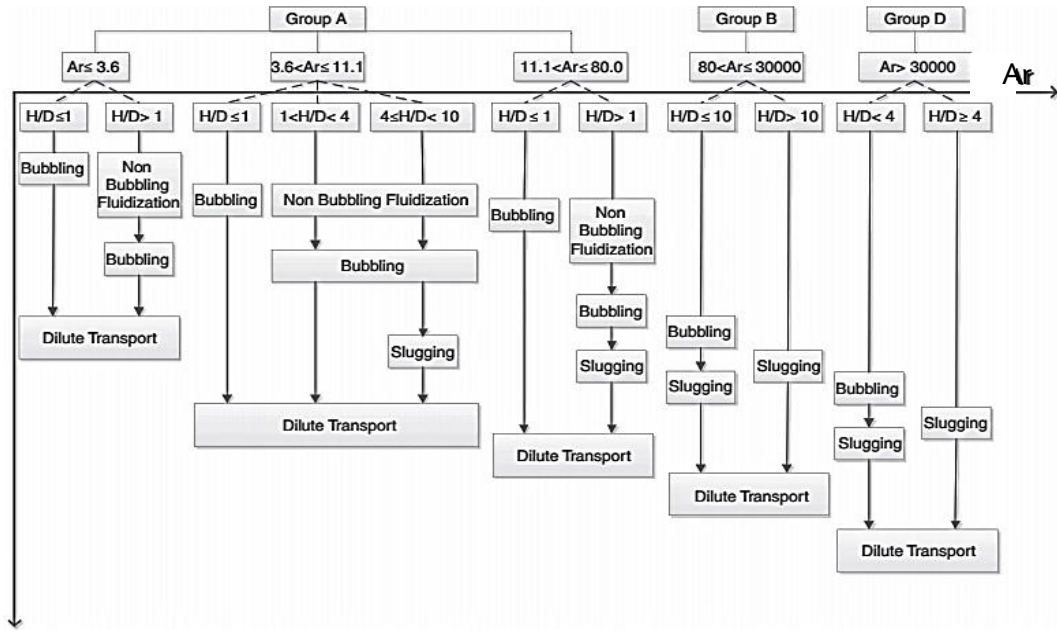
Investigators	First, $K_2/2K_1$	Second, $1/K_1$
Wen and Yu (1966)	33.7	0.0408
284 data points from the literature		
Richardson (1971)	25.7	0.0365
Sexena and Vogel (1977)	25.3	0.0571
Dolomite at high temperature and pressure		
Babu et al. (1978)	25.3	0.0651
Correlation of reported data until 1977		
Grace (1982)	27.2	0.0408
Chitester et al. (1984)	28.7	0.0494
Coal, Char, Ballotini; up to 64 bar		

ความเร็วต่ำสุดในการเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชัน ( $u_{mf}$ ) หาได้จากสมการ 2.15

### 2.3.5 ความเร็วต่ำสุดในการเกิดปรากฏการณ์ฟองอากาศ ( $u_{mb}$ )

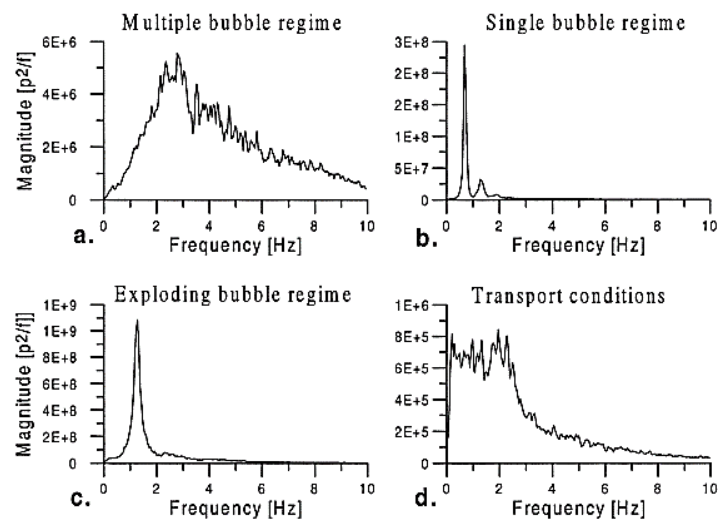
ความเร็วต่ำสุดในการเกิดปรากฏการณ์ฟองอากาศ ( $u_{mb}$ ) คือความเร็วต่ำสุดของของไหลที่ทำให้ฟองก๊าซแทรกระหว่างอนุภาคของแข็ง ส่งผลให้อนุภาคของแข็งเกิดการลอยตัวเหนือฟองก๊าซ โดยอนุภาคของแข็งไม่สามารถเกิดการเคลื่อนที่แบบฟองอากาศได้ทุกชนิด การเกิดปรากฏการณ์ฟองอากาศขึ้นอยู่กับค่าความเร็วการไหลของของไหล ( $u$ ) Archimedes number ( $Ar$ ) และอัตราส่วนระหว่างความสูงของอนุภาคของแข็งภายในเบดต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเบด ( $H/D$ ) (Shaul et al., 2012) ซึ่งแสดงดังรูปที่

2.6



รูปที่ 2.6 แสดงลักษณะอนุภาคของแข็งในการเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชัน (Shaul et al., 2012)

การหาความเร็วต่ำสุดในการเกิดปรากฏการณ์ฟองอากาศนั้นสามารถทำได้โดยการวิเคราะห์คลื่นความดันลดคร่อมเบด (Johnsson et al., 2000) เมื่ออนุภาคของแข็งเริ่มมีลักษณะการเคลื่อนที่แบบฟองอากาศจะมีคลื่นแทรกที่ความถี่ต่ำ ซึ่งเกิดจากความดันลดคร่อมเบดสั้นด้วยความถี่ต่ำตามจังหวะการเกิดฟองอากาศที่เกิดขึ้น ตัวอย่างความถี่ต่ำที่เกิดขึ้นแสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะแอมพลิจูดที่สอดแทรกเมื่อเกิดปรากฏการณ์ฟองอากาศ (Johnsson et al., 2000)

### 2.3.6 ความเร็วสุดท้าย ( $u_t$ )

ความเร็วสุดท้าย ( $u_t$ ) คือความเร็วของของไหลที่ทำให้อนุภาคของแข็งลอยออกจากเบตคำนวณได้จากสมการ

$$u_t = \frac{4gd_p(\rho_s - \rho_f)^{\frac{1}{2}}}{3\rho_f C_d} \quad (2.16)$$

เมื่อ  $C_d$  คือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน คำนวณได้จากสมการ 2.17, 2.18 และ 2.19

$$C_d = \frac{24}{Re_s} \quad ; Re_s < 0.4 \quad (2.17)$$

$$C_d = \frac{10}{Re_s} \quad ; 0.4 < Re_s < 500 \quad (2.18)$$

$$C_d = 0.43 \quad ; 500 < Re_s < 200,000 \quad (2.19)$$

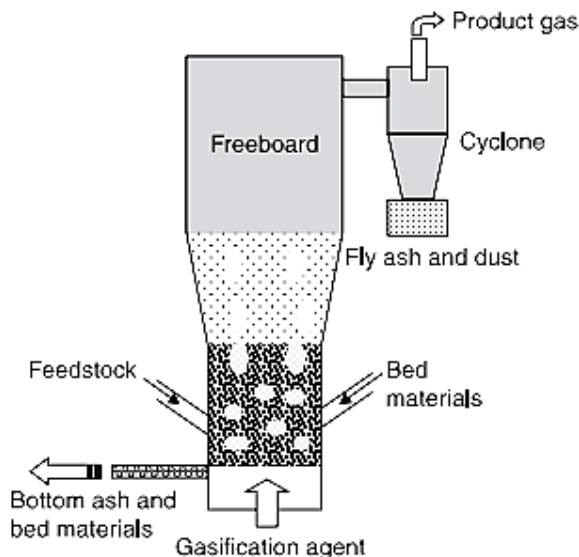
$Re_s$  คือ Reynolds number หาได้จากสมการ 2.20

$$Re_s = \frac{d_p u_{mf} \rho_f}{\mu_f} \quad (2.20)$$

## 2.4 เทคโนโลยีเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบด

เตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดเป็นเทคโนโลยีที่ทำให้เชื้อเพลิงภายในห้องเผาไหม้เกิดการเคลื่อนที่ขณะที่เกิดการเผาไหม้ โดยเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดมี 2 ระบบ คือ เตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบฟองอากาศ (Bubbling Fluidized Bed, BFB) และเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนวน (Circulating Fluidized Bed, CFB)

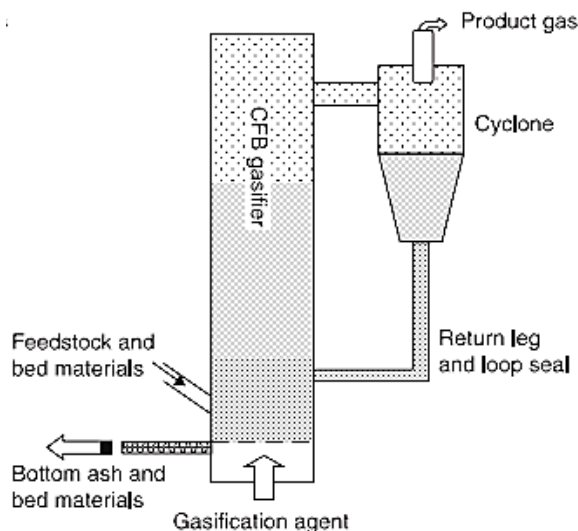
เตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบฟองอากาศ (Bubbling Fluidized Bed, BFB) ถูกพัฒนาขึ้นในปี ค.ศ. 1921 โดย Fritz Winkler เพื่อแทนที่เตาเผาแบบผงถ่านหิน (Pulverized Fuel Combustion, PFC) ที่ต้องทำให้ถ่านหินมีลักษณะเป็นผงเพื่อฉีดเข้าสู่ห้องเผาไหม้ (Lim and Alimuddin, 2008; Narváez et al., 1996) เตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบฟองอากาศนั้นเป็นเทคโนโลยีที่ใช้กันแพร่หลายในปี ค.ศ. 1960 โดย Douglas Elliott เป็นผู้ให้นำเทคโนโลยีเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบฟองอากาศ มาใช้ในการเผาไหม้ถ่านหินเพื่อผลิตไอน้ำในการผลิตไฟฟ้า (Howard, 1983) โดยร่วมกับสถาบันวิจัยถ่านหินแห่งสหราชอาณาจักร (British Coal Utilization Research Association and the National Coal Board of the U.K) โดยข้อดีของระบบเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดนั้นสามารถลดปริมาณกำมะถันที่จะถูกปล่อยออกมาจากการเผาไหม้ได้ดีกว่าเตาเผาแบบผงถ่านหิน (Basu, 2006) ลักษณะของเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบฟองอากาศแสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบฟองอากาศ (Bubbling Fluidized Bed, BFB)  
(Neubauer & Liu, 2013)

เตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนวน (Circulating Fluidized Bed, CFB) เริ่มต้นในปี ค.ศ. 1938 โดย Warren Lewis และ Edwin Gilliland ได้ศึกษาการแตกตัวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในระบบก๊าซ-ของแข็ง ซึ่งต่อมาทำให้สามารถค้นพบระบบ fast fluidized bed หรือ Circulating Fluidized Bed ที่สถาบันเทคโนโลยีแมสซาชูเซตส์ (Massachusetts Institute of Technology, MIT) โดยเทคโนโลยีนี้ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี (Squires, 1986) และต่อมาถูกนำมาใช้ในการเผาไหม้ถ่านหิน เนื่องจากประสิทธิภาพในการเผาไหม้สูง และสามารถลดปริมาณกำมะถันที่จะถูกปล่อยออกมาจากการเผาไหม้ได้ดีกว่าเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบฟองอากาศ ระบบเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนวนจะใช้ความเร็วอากาศที่สูงกว่าเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบฟองอากาศเพื่อทำให้เชื้อเพลิงเกิดการเคลื่อนที่ได้ดีในขณะเกิดการเผาไหม้ เมื่อเชื้อเพลิงที่เกิดการเผาไหม้มีขนาดเล็กจะลอยหลุดออกจากห้องเผาไหม้ แต่จะมีเชื้อเพลิงบางส่วนที่เกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์หรือยังมีขนาดใหญ่อยู่จะถูกนำกลับมาเผาไหม้ใหม่โดยจะถูกแยกด้วยไซโคลนดักฝุ่น (Reh, 1986) ลักษณะของเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนวนแสดงดังรูปที่ 2.9





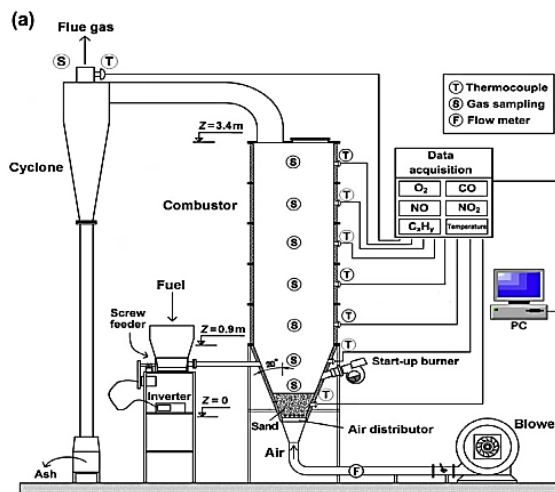
รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนวน (Circulating Fluidized Bed, CFB)  
(Neubauer & Liu, 2013)

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบฟองอากาศ (Bubbling Fluidized Bed, BFB) เนื่องจากเชื้อเพลิงแกลบอัดเม็ดและขี้เลื่อยอัดเม็ดที่ใช้เป็นเพลิงชีวมวลมีองค์ประกอบของกำมะถัน (S) ในปริมาณน้อยจึงไม่จำเป็นต้องนำเชื้อเพลิงกลับมาเผาไหม้ซ้ำ นอกจากนี้เตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบฟองอากาศต้องการความเร็วการไหลของของไหลต่ำและระบบไม่ซับซ้อนเมื่อเทียบกับเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนวน (Circulating Fluidized Bed, CFB)

โดยการศึกษาการเผาไหม้ในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดส่วนใหญ่มีศึกษาใน 3 ประเด็นดังต่อไปนี้

#### 2.4.1 การศึกษาเพื่อเปรียบเทียบเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้

การศึกษาในหัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาการเผาไหม้เพื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิ ไอเสีย ประสิทธิภาพการเผาไหม้ของแต่ละเชื้อเพลิง เช่น การเปรียบเทียบการเผาไหม้ระหว่างเปลือกถั่วลิสงกับเปลือกมะขามในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดด้วยอัตราการป้อน 45 และ 65 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อัตราส่วนอากาศส่วนเกิน (Excess air, EA) 20-80 เปอร์เซ็นต์ จากการศึกษา พบว่า CO ลดลงเมื่อ EA เพิ่มขึ้น โดยปริมาณ CO ต่ำสุดเกิดที่จากการเผาไหม้เปลือกถั่วลิสงที่ EA 80 เปอร์เซ็นต์ มีค่า 59 ppm (Kuprianov & Arromdee, 2013) ลักษณะชุดทดลองแสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะชุดทดลองฟลูอิดไดซ์เบดใช้เชื้อเพลิงเปลือกถั่วลิสงกับเปลือกมะขาม (Kuprianov & Arromdee, 2013)

เมื่อเปรียบเทียบการเผาไหม้ระหว่างเมล็ดลูกพีชกับเมล็ดแอปปริคอตในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบฟองอากาศที่อัตราการป้อน 5, 10, 15 และ 20 กรัมต่อนาทีและอัตราส่วนอากาศส่วนเกินอยู่ในช่วง 1.4-2.0 พบว่า CO จากการเผาไหม้มีปริมาณลดลง เมื่อ EA ลดลง โดยมีค่าต่ำสุดที่ EA เท่ากับ 1.45 ส่วนปริมาณ NO<sub>x</sub> มีค่าใกล้เคียงกัน ลักษณะชุดทดลองแสดงดังรูปที่ 2.11 (Kaynak et al., 2005)

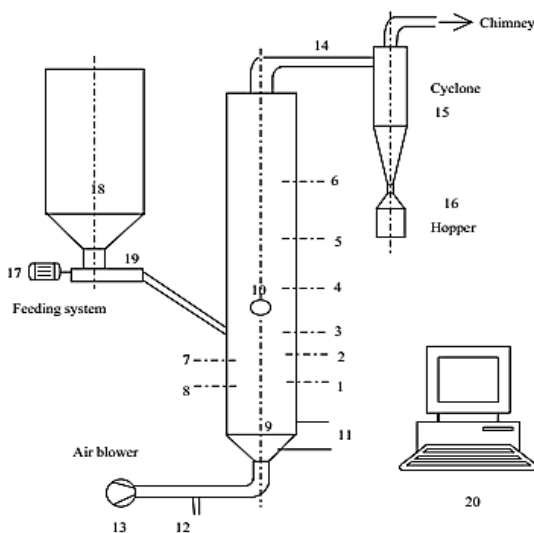
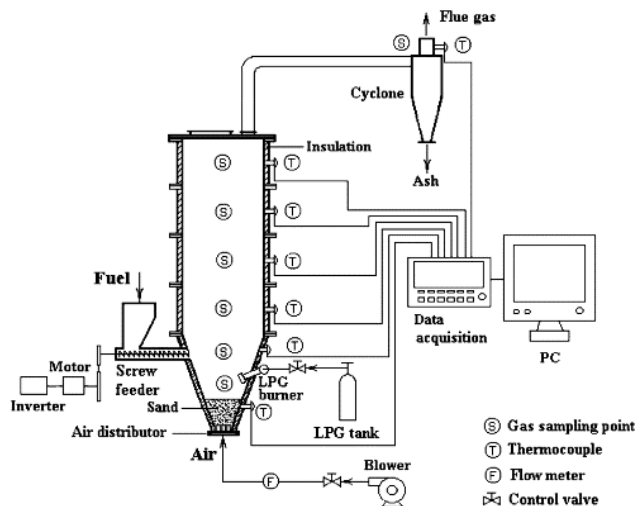


Fig. 1. A schematic diagram of BFBC system: (1-6) Thermocouples; (7-8) Ash exit; (9) Distributor plate; (10) igniter; (11) Manometer; (12) Natural gas feeding; (13) Air blower; (14) Gas sampling port; (15) Cyclone; (16) ash hopper; (17) Motor for screw feeder; (18) Fuel hopper; (19) Screw feeder; (20) Data Acquisition Unit.

รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะชุดทดลองฟลูอิดไดซ์เบดแบบฟองอากาศใช้เชื้อเพลิงเมล็ดลูกพีชกับเมล็ดแอปปริคอต (Kaynak et al., 2005)

เมื่อศึกษาการเผาไหม้ของขี้เลื่อย แกลบ และชานอ้อย ในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดโดยใช้ทรายเป็นตัวช่วยรักษาอุณหภูมิให้คงที่ และป้องกันการรวมตัวกันเป็นก้อนของเถ้าที่อุณหภูมิสูง ที่อัตราส่วนอากาศส่วนเกิน 16, 60 และ 100 เปอร์เซ็นต์ พบว่าไอเสียที่ตำแหน่ง 2.75 เมตรเหนือตะแกรง และปาก

ทางออกไฮโดรคาร์บอนมีค่า CO ลดลงเมื่อ EA เพิ่มขึ้น โดยที่ซีล้อยที่ EA 100 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณ CO ต่ำสุด ณ ตำแหน่งปากทางออกไฮโดรคาร์บอน โดยเชื้อเพลิงแกลบจะมีปริมาณ CO สูงสุด เนื่องจากการเผาไหม้ของซีล้อยให้อุณหภูมิการเผาไหม้สูงกว่า ชานอ้อย และแกลบ ซึ่งแกลบเป็นเชื้อเพลิงที่ให้อุณหภูมิการเผาไหม้ต่ำสุด (Permchart & Koupryanov, 2004) ลักษณะชุดทดลองแสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แสดงลักษณะชุดทดลองฟลูอิดไดซ์เบดแบบพองอากาศใช้เชื้อเพลิงซีล้อย แกลบ และชานอ้อย (Permchart & Koupryanov, 2004)

## 2.4.2 การศึกษาตัวแปรการเผาไหม้

### 1) อากาศปฐมภูมิ (Primary air)

ปริมาณอากาศปฐมภูมิคือปริมาณอากาศที่มีผลต่อการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงโดยตรง เมื่อศึกษาความเร็วการไหลของอากาศปฐมภูมิที่ 1.0, 1.1 และ 1.2 เมตรต่อวินาที ในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบพองอากาศใช้เชื้อเพลิงแกลบ ความเร็วการไหลของอากาศปฐมภูมิทั้งสามนั้นมีอุณหภูมิสูงสุดใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 840-880 องศาเซลเซียส CO มีปริมาณอยู่ในช่วง 1,100-1,800 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (849-1,459 ppm) NO<sub>x</sub> มีปริมาณอยู่ในช่วง 100-490 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (75-371 ppm) ประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงกว่า 97 เปอร์เซ็นต์ โดยในกรณีที่การศึกษาความเร็วการไหลของอากาศปฐมภูมิ 1.2 เมตรต่อวินาที ประสิทธิภาพการเผาไหม้ 98.9 เปอร์เซ็นต์ (Armesto et al, 2002)

### 2) อากาศทุติยภูมิ (Secondary air)

ปริมาณอากาศทุติยภูมิเป็นตัวแปรที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้และลดปริมาณก๊าซไอเสียได้ (Lo et al., 2004; ประสาน สติตเรืองศักดิ์, 2557; Varol et al., 2014; Atimtay and Varol, 2009)

### 3) อากาศส่วนเกิน (Excess air)

ที่อัตราส่วนอากาศส่วนเกิน 0.2-1.0 พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนอากาศส่วนเกิน ปริมาณ CO มีแนวโน้มลดลง โดย CO ต่ำสุดจะอยู่ในช่วงอัตราส่วนอากาศส่วนเกิน 0.8-1.0 เนื่องจากเป็นช่วงที่ให้อุณหภูมิสูงสุด (Kuprianov & Arromdee, 2013; Qian et al., 2011; Li et al., 2017; Kuprianov et al., 2011; Duan et al., 2013; Sirisomboon & Charernporn, 2017) เมื่อเพิ่มอัตราส่วนอากาศ

ส่วนเกินช่วง 1.0-2.0 ปริมาณ CO ค่อยๆเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณอากาศทำให้ความเร็วเพิ่มขึ้น ระยะเวลาการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้น้อยลงทำให้การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงไม่สมบูรณ์ (Varol & Atimtay, 2007; Wang et al., 2015; Madhiyanon et al., 2010)

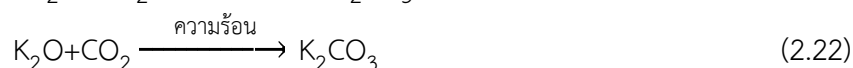
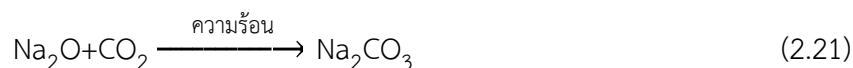
### 2.4.3 การศึกษาตัวแปรในการออกแบบเตาเผาไหม้ฟลูอิดไดซ์เบด

ในหัวข้อนี้จะเป็นการปรับลักษณะรูปแบบของเตาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ เช่น หาดำแหน่ง ในการในการฉีดอากาศทุติยภูมิ ซึ่ง ตำแหน่งที่เหมาะสมในการฉีดอากาศทุติยภูมิคือ 45 เซนติเมตรเหนือ ตะแกรง จะให้ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิสูงที่สุดส่งผลให้ถ้าที่ออกมามีขนาดเล็ก (นิยม ศรีศิริสิทธิกุล และ พงษ์เจต พรหมวงศ์, 2003)

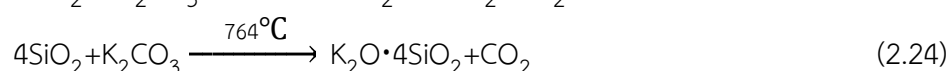
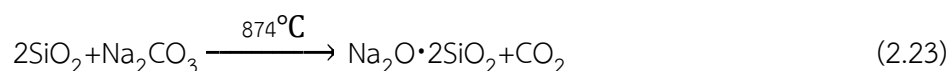
### 2.5 ปัญหาของเทคโนโลยีเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบด

ในการเผาไหม้ในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดระบบจะมีอุณหภูมิค่อนข้างสูงจึงส่งผลให้เกิด ปัญหาการเกิดตะกรัน (Slag) โดยตะกรันจะประกอบด้วย 2 ส่วน คือส่วนที่เกาะบริเวณผนังด้านล่างของ ห้องเผาไหม้ (Slag) และส่วนที่เกาะที่ผิวท่อภายในห้องเผาไหม้ (Fouling) ซึ่งหากเกิดตะกรัน(Fouling) ขึ้นจะส่งผลให้การแลกเปลี่ยนความร้อนเกิดขึ้นได้ยากส่งผลให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ลดลง มีการศึกษา การเกิดตะกรัน (Fouling) ในหม้อไอน้ำของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ พบว่าถ้าหากถ่านหินที่เกิดการเผาไหม้มี ปริมาณ CaO สูงขึ้นอยู่ในช่วง 23-35 % จะทำให้เกิดตะกรัน (Fouling) ได้ง่าย (พิธา ศรีบุญยดี, 2552) และปัญหาการรวมตัวกันเป็นก้อนของเถ้า (Agglomeration) การใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงเพื่อศึกษาการ รวมตัวกันเป็นก้อนของเถ้า (Agglomeration) ที่ อุณหภูมิ 750, 850, 900, 950, และ 1000 องศา เซลเซียส พบว่าที่อุณหภูมิน้อยกว่า 850 องศาเซลเซียส ไม่พบปัญหาการรวมตัวกันเป็นก้อนของเถ้า (Agglomeration) (Mansaray & Ghaly, 2007)

โดยการเกิดตะกรัน (Fouling) เกิดจากสารประกอบทางเคมีหมู่ที่ 1 และหมู่ที่ 2 ได้รับความร้อน จะทำปฏิกิริยากับ CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> ได้เป็นสารประกอบ Eutectic (จุดหลอมเหลวต่ำ) เมื่ออุณหภูมิสูง จะทำให้ผิวของสารมีลักษณะเป็นของเหลว ไปเกาะตามผนังท่อหรือห้องเผาไหม้ ดักจับฝุ่นที่เกิดขึ้นจน เป็นตะกรันขนาดดังสมการ 2.21 และ 2.22



ซึ่งหากเชื้อเพลิงที่ใช้มีองค์ประกอบทางเคมีของ SiO<sub>2</sub> สูง ก็จะมีโอกาสเกิดการรวมตัวกัน เป็นก้อนของเถ้า (Agglomeration) โดยการรวมตัวกันเป็นก้อนของเถ้าแสดงดังสมการที่ 2.23 และ 2.24



จะเห็นได้ว่าจากสมการที่ 2.21 และ 2.22 สารประกอบที่เกิดขึ้น (ตะกรัน) จะถูกใช้เป็น สารตั้งต้นของสมการที่ 2.23 และ 2.24 ซึ่งส่งผลให้เกิดการรวมตัวกันเป็นก้อนของเถ้า (Agglomeration) (อิตยาพร สิงห์ชัย, 2551 ; Wether et al, 2000)

## 2.6 ประสิทธิภาพของการเผาไหม้

ประสิทธิภาพของการเผาไหม้ คือความสามารถของระบบในการเผาไหม้เชื้อเพลิงให้ สมบูรณ์เพียงใด ในการหาค่าประสิทธิภาพการของเผาไหม้เชื้อเพลิงสามารถหาได้จากสมการที่ 2.25

$$\eta_c = 100 \times \left[ \frac{E_{\text{fuel}} - E_{\text{loss}}}{E_{\text{fuel}}} \right] \quad (2.25)$$

เมื่อ	$\eta_c$	คือ ประสิทธิภาพการเผาไหม้
	$E_{\text{fuel}}$	คือ พลังงานของเชื้อเพลิง
	$E_{\text{loss}}$	คือ พลังงานที่สูญเสียหรือ Unburned carbon ที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์

ซึ่งตกค้างในเถ้า

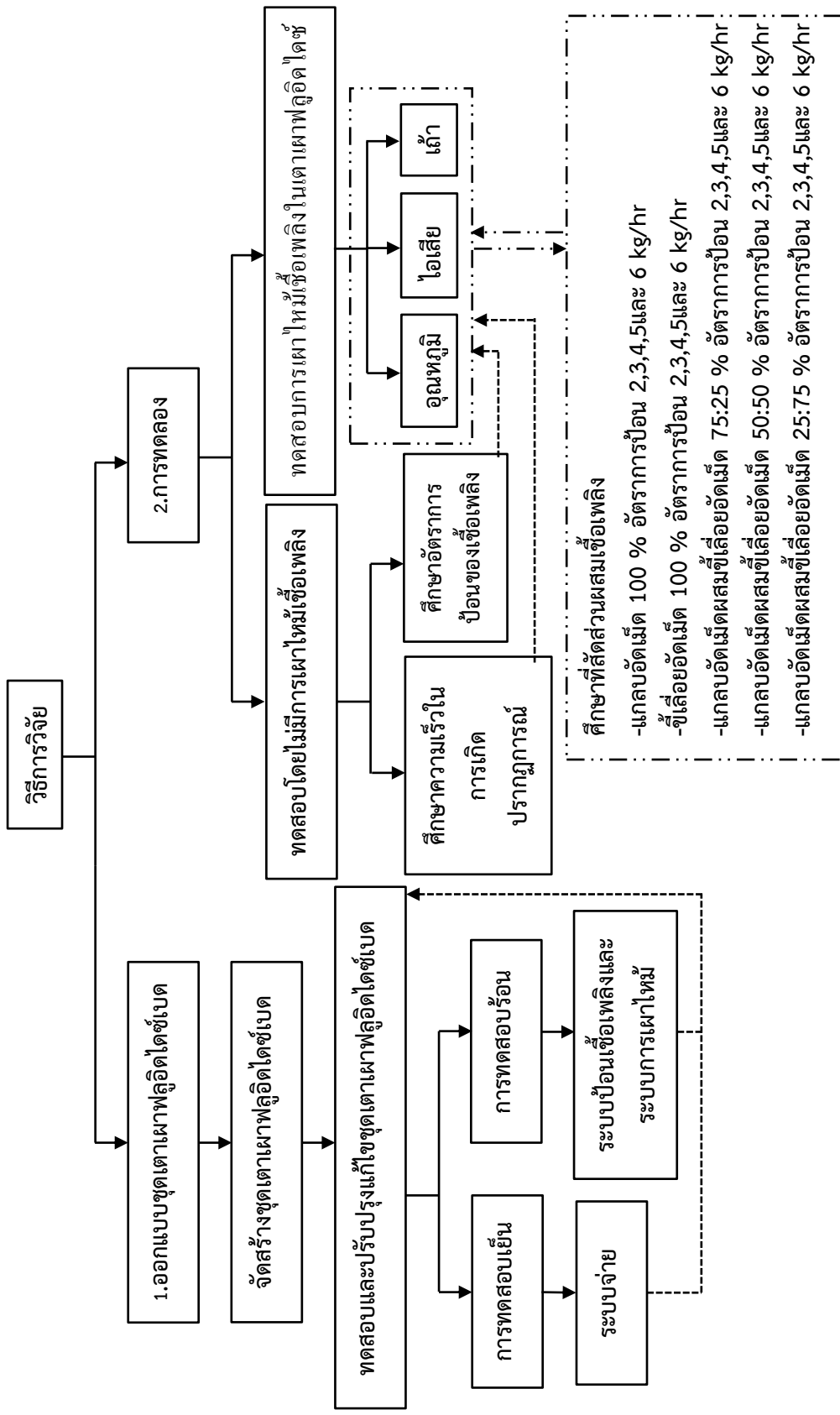
### 3. วิธีการวิจัย

บทนี้เป็นรายละเอียดกระบวนการต่าง ๆ ในงานวิจัย ประกอบด้วยการออกแบบชุดทดลอง ศึกษาการเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชันโดยไม่มีการเผาไหม้ และศึกษาการเผาไหม้ในระบบเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบพองอากาศโดยใช้เชื้อเพลิงผสมระหว่างแกลบอัดเม็ดผสมซีลี้อยัดเม็ด โดยการวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นการออกแบบชุดทดลองซึ่งรายละเอียดจะอยู่ในภาคผนวก ก และภาคผนวก ค ส่วนที่สองจะเป็นการทดลอง ดังรูปที่ 3.1

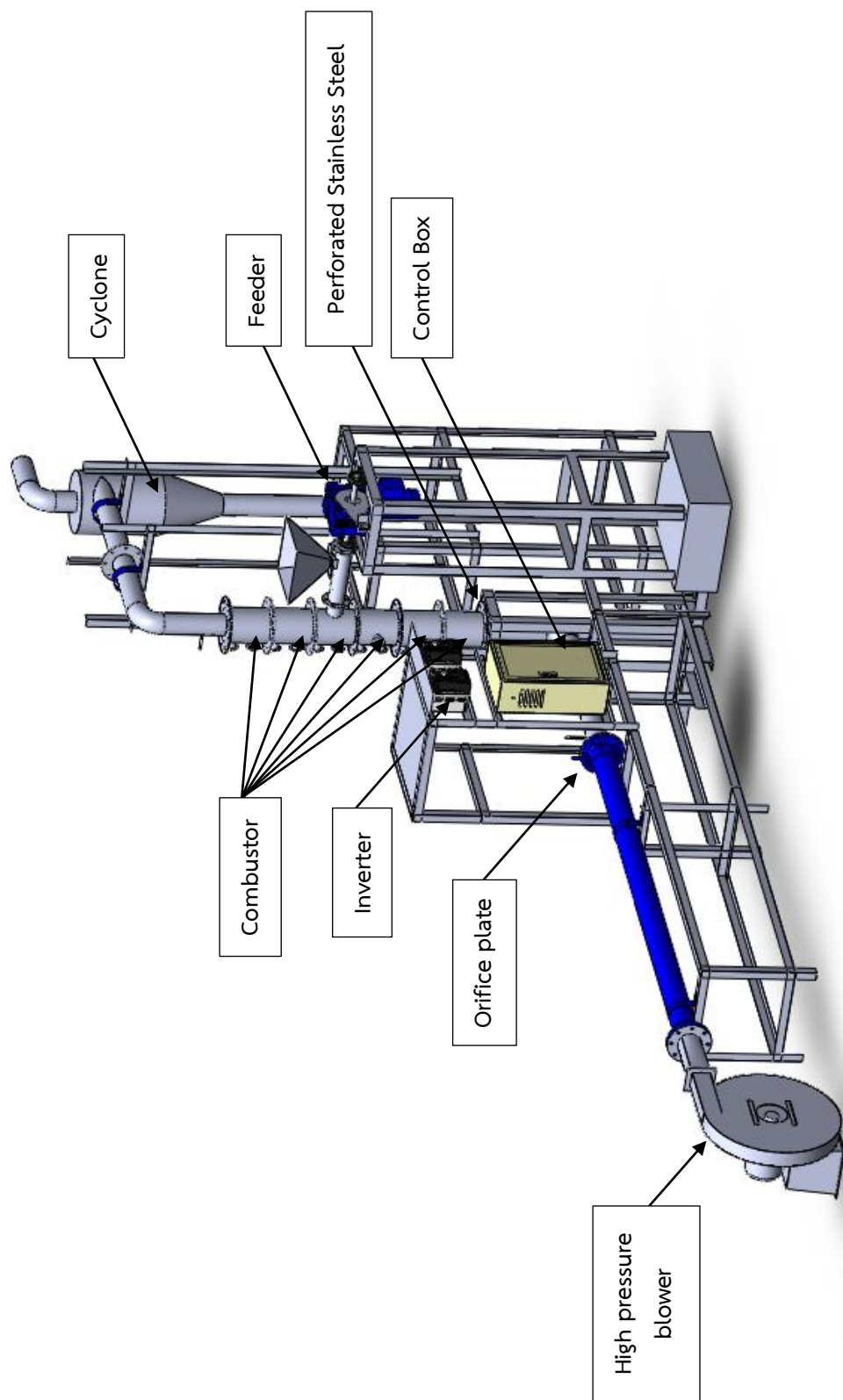
#### 3.1 การออกแบบชุดเตาฟลูอิดไดซ์เบดแบบพองอากาศ

ในงานวิจัยนี้การศึกษาอัตราส่วนเชื้อเพลิงผสมระหว่างแกลบอัดเม็ดและซีลี้อยัดเม็ดต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้ในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบพองอากาศ จะกระทำในเตาเผาชนิดฟลูอิดไดซ์เบดแบบพองอากาศขนาดทดลองในห้องปฏิบัติการ (Lab-scale) โดยศึกษาผลของอัตราส่วนของเชื้อเพลิง อัตราการไหลของอากาศต่ออุณหภูมิการเผาไหม้ รวมถึงประสิทธิภาพการเผาไหม้จากการตรวจวัดก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้ได้ ที่ได้จากเตาเผาเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดชนิดฟลูอิดไดซ์เบดแบบพองอากาศที่ออกแบบนี้ ใช้ทรายเป็นตัวกลางในการกระจายอุณหภูมิ ซึ่งตัวกลางที่อยู่บริเวณด้านล่างของเตาฟลูอิดไดซ์เบดจะถูกทำให้ร้อนและเป่าให้ลอยขึ้นสู่ด้านบน เมื่อบ้อนเชื้อเพลิงเข้าไปในระบบ เชื้อเพลิงจะเคลื่อนตัวชนกับตัวกลางที่ร้อนและเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนจนเกิดการเผาไหม้

ลักษณะของชุดทดลองเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบพองอากาศที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.2 เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของชุดทดลอง 9.8 เซนติเมตร ความสูงของเบด 120 เซนติเมตร



รูปที่ 3.1 แสดงขั้นตอนการศึกษาการเผาไหม้ระบบฟลูอิดไดซ์แบบพองอากาศโดยใช้เชื้อเพลิงผสมระหว่างแกลบอัดเม็ดและซีล้อย



รูปที่ 3.2 แสดงลักษณะชุดเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบด



## 3.2 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

### 3.2.1 วัสดุ

#### 1) ทราย

งานวิจัยนี้ใช้ทรายเป็นอนุภาคเบดเพื่อศึกษาการเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชันและศึกษาการเผาไหม้โดยใช้เชื้อเพลิงผสมระหว่างแกลบอัดเม็ดและซีลี้อยอัดเม็ด ในส่วนของการศึกษาการเผาไหม้นั้นทรายจะเป็นตัวช่วยให้อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้สม่ำเสมอในขณะที่เกิดการเผาไหม้และป้องกันการรวมตัวกันเป็นก้อนของซิลิกาเมื่อเกิดการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูง ทรายที่ใช้ในการศึกษามีขนาดอยู่ในช่วง 3-5 มิลลิเมตร ความหนาแน่น 1,760 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าความกลม 0.90 แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แสดงลักษณะของทรายที่ใช้ในการทดลอง

#### 2) เชื้อเพลิง

เชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ใช้ในการศึกษาการเผาไหม้มี 2 ชนิด คือ แกลบอัดเม็ดและซีลี้อยอัดเม็ด ลักษณะของแกลบอัดเม็ดและซีลี้อยอัดเม็ดแสดงดังรูปที่ 3.4 เส้นผ่านศูนย์กลางของแกลบอัดเม็ดและซีลี้อยอัดเม็ดมีขนาด 0.8 เซนติเมตรเท่ากัน แต่ความยาวของเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้ง 2 ชนิดแตกต่างกัน โดยลักษณะของแกลบอัดเม็ดจากโรงงานผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดในจังหวัดแพร่ จะมีความยาวระหว่าง 0.5-2 เซนติเมตร ความหนาแน่นเนื้อ (Solid density) 1,040 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ความหนาแน่นรวม (Bulk density) 583.33 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมีส่วนที่เป็นผงผสมอยู่ค่อนข้างเยอะ ส่วนซีลี้อยอัดเม็ดจากโรงงานผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดในจังหวัดตรัง นั้นจะมีความยาวระหว่าง 2-5 เซนติเมตร และมีส่วนผสมที่เป็นผงค่อนข้างน้อย ความหนาแน่นเนื้อ (Solid density) 1,171 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ความหนาแน่นรวม (Bulk density) 630.95 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร



รูปที่ 3.4 แสดงลักษณะแกลบอัดเม็ด (a) ชี้อ้อยอัดเม็ด (b)

การวิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิงแกลบอัดเม็ดและชี้อ้อยอัดเม็ดแสดงดังตารางที่ 3.1 และ 3.2 ซึ่ง โดยชี้อ้อยอัดเม็ดมีปริมาณคาร์บอน (C) และค่าความร้อน (Heating value) สูงและปริมาณของเถ้าจากการเผาไหม้ต่ำเมื่อเทียบกับแกลบอัดเม็ด

ตารางที่ 3.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีแบบละเอียดของแกลบอัดเม็ดและชี้อ้อยอัดเม็ด (Ultimate Analysis)

	แกลบอัดเม็ด (Air dry basis)	ชี้อ้อยอัดเม็ด (Air dry basis)
Carbon (%wt)	38.860	48.420
Hydrogen (%wt)	5.380	5.780
Nitrogen (%wt)	0.530	0.132
Oxygen (%wt)	35.650	38.100
Sulfur (%wt)	0.010	0.010
Ash (%wt)	16.443	1.339
Moisture (%wt)	3.127	6.219
HHV(MJ/kg)	14.89	17.99

ตารางที่ 3.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีแบบประมาณของแกลบอัดเม็ดและขี้เลื่อยอัดเม็ด (Proximate Analysis)

	แกลบอัดเม็ด (Air dry basis)	ขี้เลื่อยอัดเม็ด (Air dry basis)
Volatile Matter (%wt)	65.498	78.830
Fixed Carbon (%wt)	14.932	13.612
Ash (%wt)	16.443	1.339
Moisture (%wt)	3.127	6.219

### 3.2.2 อุปกรณ์

#### 1) พัดลมจ่ายอากาศ (Blower)

พัดลมเป่าอากาศที่ใช้มีขนาดกำลัง 3 แรงม้า ชนิด Centrifugal fan (Type AV-D1216) พัดลมที่ใช้เป่าอากาศเป็นแบบระบบแรงดันสูง เนื่องจากงานวิจัยต้องการความเร็วของอากาศที่สูงเพื่อทำให้อุณหภูมิของแข็งเคลื่อนที่อยู่ในสถานะพองอากาศ พัดลมเป่าอากาศมีลักษณะดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แสดงลักษณะพัดลมเป่าอากาศ (Blower)

#### 2) อินเวอร์เตอร์ (Inverter)

อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการทดลองมี 2 ตัว ตัวแรกขนาด 2.2 KW/3HP 380 VAC 3 Phase ใช้ในการควบคุมความเร็วของพัดลมเป่าอากาศ และ อินเวอร์เตอร์ตัวที่สองขนาด 3.7 KW/5HP 380 VAC 3 Phase ใช้ในการควบคุมความเร็วของชุดป้อนเชื้อเพลิง มีลักษณะดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แสดงลักษณะอินเวอร์เตอร์ (Inverter)

### 3) เซนเซอร์วัดความดัน (Pressure Sensor)

เซนเซอร์วัดความดัน รุ่น MPXV5004DP 3.92 kPa (0-400 mm H<sub>2</sub>O) 1-4.9 Volt output สำหรับวัดค่าความดัน โดยวัดความดันคร่อมตรงตำแหน่งออริฟิสและคร่อมห้องเผาไหม้ เซนเซอร์วัดความดันมีลักษณะดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แสดงลักษณะเซนเซอร์วัดความดัน (Pressure Sensor)

### 4) Pitot Tube

ใช้วัดความเร็วการไหลของอากาศเพื่อหาสมการปรับเทียบ (Calibration curve) ของแผ่น Orifice ลักษณะ Pitot Tube ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แสดงลักษณะ Pitot Tube

5) Gas Analyzer ยี่ห้อ Testo รุ่น 350 XL

ใช้ในการวัดและบันทึกไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมระหว่างแก๊สอัดเม็ด และซีล้อยอัดเม็ด ชุด Gas Analyzer ประกอบไปด้วย sensor วัดก๊าซ  $O_2$   $CO_2$   $NO_2$  และ  $SO_2$  Gas Analyzer มีลักษณะดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 แสดงลักษณะ Gas Analyzer รุ่น Testo 350 XL

6) Data logger ยี่ห้อ WISCO Analog Input Module AI 210

ใช้บันทึกอุณหภูมิการเผาไหม้ โดยใช้ร่วมกับ Thermocouple Type K ช่วงอุณหภูมิ - 40-1,200 องศาเซลเซียส Data logger มีลักษณะดังรูป 3.10



รูปที่ 3.10 แสดงลักษณะ Data logger รุ่น WISCO Analog Input Module AI 210

7) Data logger ยี่ห้อ National Instruments รุ่น USB-6008

ใช้ในการอ่านค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ถูกแปลงมาจากความค้ำดันโดย Pressure Sensor รุ่น MPXV5004DP 3.92 kPa (0-400 mm H<sub>2</sub>O) 1-4.9 VDC output ยี่ห้อ National Instruments มีลักษณะดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 แสดงลักษณะ Data logger ยี่ห้อ National Instruments รุ่น USB-6008

8) ปัมลม ยี่ห้อ PUMA

ปัมลม ยี่ห้อ PUMA รุ่น XM-2525 3 HP ถึง 25 L ทำหน้าที่เป็นตัวจ่ายอากาศหตุติย-ภูมิ เข้าสู่ห้องเผาไหม้ผ่าน Flow meter ปัมลมมีลักษณะดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 แสดงลักษณะปัมลม ยี่ห้อ PUMA

## 9) Flow meter ยี่ห้อ KI

Flow meter ยี่ห้อ KI ขนาด 30-300 L/min ทำหน้าที่ควบคุมปริมาณอากาศหุติย-ภูมิ  
Flow meter มีลักษณะดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 แสดงลักษณะ flow meter ยี่ห้อ KI

## 10) Gas Burner

Gas Burner ทำหน้าที่ในการอุ่นเบตให้มีอุณหภูมิ 400-500 องศาเซลเซียส ก่อนที่จะทำการป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ Burner มีลักษณะดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 แสดงลักษณะ Gas Burner

## 11) ตะแกรงสแตนเลส (Perforated Stainless-Steel Sheets)

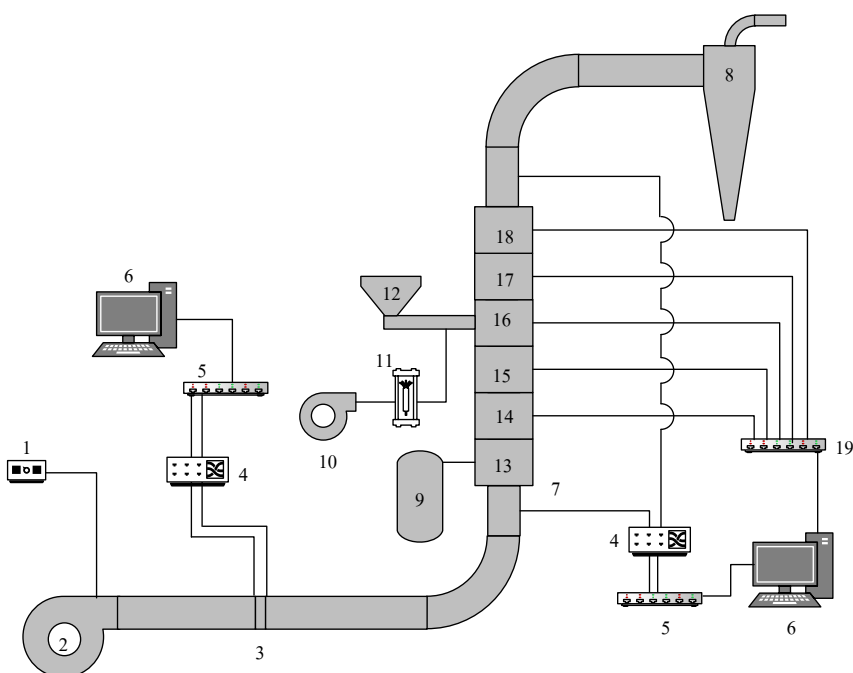
ตะแกรงสแตนเลสทำหน้าที่เป็นตัวกระจายอากาศที่จะเข้าสู่ห้องเผาไหม้และรองรับทราย (Bed particle) ลักษณะดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 แสดงลักษณะ Perforated Stainless Steel Sheet

### 3.3 การทดลอง

การทดลองในงานวิจัยนี้จะแบ่งการทดลองออกเป็น 2 การทดลอง คือการศึกษาการเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชัน เพื่อหาค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชัน ( $u_{mf}$ ) และความเร็วต่ำสุดในการเกิดปรากฏการณ์พองอากาศ ( $u_{mb}$ ) การทดลองที่สองเป็นการศึกษาการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงผสมระหว่างแกลบอัดเม็ดและซีลี้อยัดเม็ดในระบบเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบพองอากาศ เพื่อศึกษาการกระจายตัวของอนุภาคนิวโรไอเสีย เถ้า และประสิทธิภาพการเผาไหม้ โดยลักษณะของชุดทดลองแสดงดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ชุดทดลองฟลูอิดไดซ์เบดแบบพองอากาศ

- ( 1. Inverter 2. High pressure blower 3. Orifice plate 4. Pressure Sensor รุ่น MPXV5004DP 5. National Instruments รุ่น USB-6008 6. Computer 7. Perforated Stainless Steel Sheet 8. Cyclone 9. Burner 10. Pump 11. Flow meter 12. Feeder 13, 14, 15, 16, 17 และ 18. combustor 19. Data logger)



### 3.3.1 การศึกษาการเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชัน

การศึกษาการเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชันมีวัตถุประสงค์เพื่อหาความเร็วต่ำสุดในการเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชัน ( $u_{mf}$ ) และหาความเร็วต่ำสุดในการเกิดปรากฏการณ์ฟองอากาศ ( $u_{mb}$ ) ลักษณะชุดทดลองดังรูปที่ 3.16

โดยขั้นตอนการทดลองมีดังนี้

1) เปิดพัดลมเป่าอากาศและใช้ Inverter เป็นอุปกรณ์ควบคุมความเร็วของอากาศที่ออกจากพัดลมเป่าอากาศโดยความถี่ที่ทดลองเริ่มต้นที่ 10.5 Hz วัดการเปลี่ยนแปลงความดันตรงตำแหน่ง orifice และบริเวณห้องเผาไหม้ซึ่งภายในบรรจุทรายมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3-5 มิลลิเมตร ปริมาณ 500 กรัม ความหนาแน่น 1,760 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าความกลม 0.90 เหนือตะแกรง ดังรูปที่ 3.14 โดยใช้ Pressure sensor โมเดล MPXV5004DP 3.92 kPa (0-400 mm H<sub>2</sub>O) 1-4.9 VDC output ใช้ USB DAQ 6008 National Instrument ในการแปลงสัญญาณและใช้โปรแกรม Labview Signal Express 2013 ในการบันทึกความต่างศักย์ไฟฟ้า

2) ทำซ้ำข้อที่ 1 แต่เปลี่ยนความถี่ของ Inverter จาก 10.5 Hz เป็น 11.5, 12.5, 13.5, 14.5 จนถึง 40 Hz ตามลำดับ บันทึกความต่างศักย์ไฟฟ้า โดยในขั้นตอนที่ 1 และ 2 นั้นเป็นการทดลองเพื่อหาสมการ Calibration curve ของแผ่นแผ่นออริฟิส (orifice plate)

3) จากการทดลองใส่ทราย 500 กรัม ปรับการทดลองด้วยการผสมด้วยซีลี้อยัดเม็ด ปริมาณ 8.5 กรัม บันทึกผลความต่างศักย์ไฟฟ้าจาก Pressure sensor ในการทดลองมีทั้งการปรับเพิ่มและลดความเร็วการไหลของอากาศ จากนั้นเพิ่มปริมาณซีลี้อยัดเม็ดเป็น 16.9, 25.1, 33.6, 42.0, 50.5, 58.7, 67.3, 75.6, และ 84.0 กรัม ตามลำดับ สำหรับขั้นตอนที่ 3 เป็นการทดลองเพื่อหาความเร็วต่ำสุดในการเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชัน ( $u_{mf}$ ) และหาความเร็วต่ำสุดในการเกิดปรากฏการณ์ฟองอากาศ ( $u_{mb}$ )

### 3.3.2 การศึกษาการเผาไหม้

การศึกษาการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมระหว่างแกลบอัดเม็ดและซีลี้อยัดเม็ดในเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบฟองอากาศที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 2-6 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนักระหว่างแกลบอัดเม็ดและซีลี้อยัดเม็ดที่ศึกษาคือ 100:0 0:100 75:25 50:50 และ 25:75 เปอร์เซนต์ ลักษณะชุดทดลองดังรูปที่ 3.16

ขั้นตอนการทดลอง

1) เริ่มจากการอุ่นห้องเผาไหม้ที่มีทราย 500 กรัม (ทรายมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3-5 มิลลิเมตร ความหนาแน่น 1,760 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) และเชื้อเพลิงแกลบอัดเม็ด 100 เปอร์เซนต์ 500 กรัมอยู่ภายในให้มีอุณหภูมิประมาณ 400-500 องศาเซลเซียส

2) จากนั้นทำการป้อนเชื้อเพลิงแกลบอัดเม็ด 100 เปอร์เซนต์ อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 2-6 กิโลกรัมต่อชั่วโมงและเปิดพัดลมเป่าอากาศ (High pressure blower) โดยค่อยๆปรับ Inverter เพื่อเพิ่มความเร็วของอากาศ ที่ไหลผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร จนมีความเร็วอากาศปฐมภูมิที่ 1.7 เมตรต่อวินาที เพื่อให้ทรายและเชื้อเพลิงแกลบอัดเม็ด 100 เปอร์เซนต์ภายในห้องเผาไหม้อยู่ในสภาวะการ

เคลื่อนที่แบบพองอากาศ และป้อนอากาศทุติยภูมิไปพร้อมกับเชื้อเพลิงที่อัตราการไหล 100 ลิตรต่อนาที ควบคุมด้วย Flow meter โดยกำหนดให้อัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิและทุติยภูมิมีค่าคงที่ในทุกการทดลอง

3) อุปกรณ์ที่ใช้วัดปริมาณต่างๆและเก็บค่า ประกอบไปด้วย Pressure Sensor รุ่น MPXV5004DP 3.92 kPa (0-400 mm H<sub>2</sub>O) 1-4.9 VDC Output สำหรับวัดค่าความดันคร่อม orifice โดยใช้ USB DAQ 6008 National Instrument เป็นตัวรับค่าและแปลงสัญญาณไฟฟ้า โดยมีโปรแกรม Labview Signal Express 2013 เป็นตัวแสดงผลและบันทึกผลความต่างศักย์ไฟฟ้า

4) สำหรับอุณหภูมิ อ่านค่าด้วย thermocouple ชนิด k และบันทึกผลด้วย Data logger รุ่น WISCO Analog Input Module AI 210 โดยทำการบันทึกผลตลอดการทดลอง

5) อุณหภูมิไอเสีย ปริมาณก๊าซ CO NO<sub>x</sub> และ SO<sub>2</sub> ใช้เครื่อง Testo 350 xl ทำการสุ่มการบันทึกผล ครั้งละ 10 นาที จำนวน 2 ครั้ง

6) ถ้าที่เกิดจากการเผาไหม้ ทำการสุ่มเก็บบันทึก เป็นเวลา 5 นาที และส่งวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมียังศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

7) เปลี่ยนอัตราส่วนผสมเชื้อเพลิงจากแกลบอลัดเม็ดและซีล้อยัดเม็ดที่ 100:0 เป็นอัตราส่วนผสม 0:100 75:25 50:50 และ 25:75 และทำการทดลองตามข้อที่ 1 ถึงข้อที่ 6 ตามลำดับ บันทึกผลการทดลอง

## 4. ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชันและศึกษาการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงผสมในระบบเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบพองอากาศโดยใช้เชื้อเพลิงผสมระหว่างกลบอัดเม็ดผสมซีลี้อยัดเม็ด ผลการศึกษาทดลองประกอบไปด้วยหัวข้อต่อไปนี้

การศึกษาความเร็วต่ำสุดในการเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชัน ( $u_{mf}$ )

การศึกษาความเร็วต่ำสุดในการเกิดปรากฏการณ์พองอากาศ ( $u_{mb}$ )

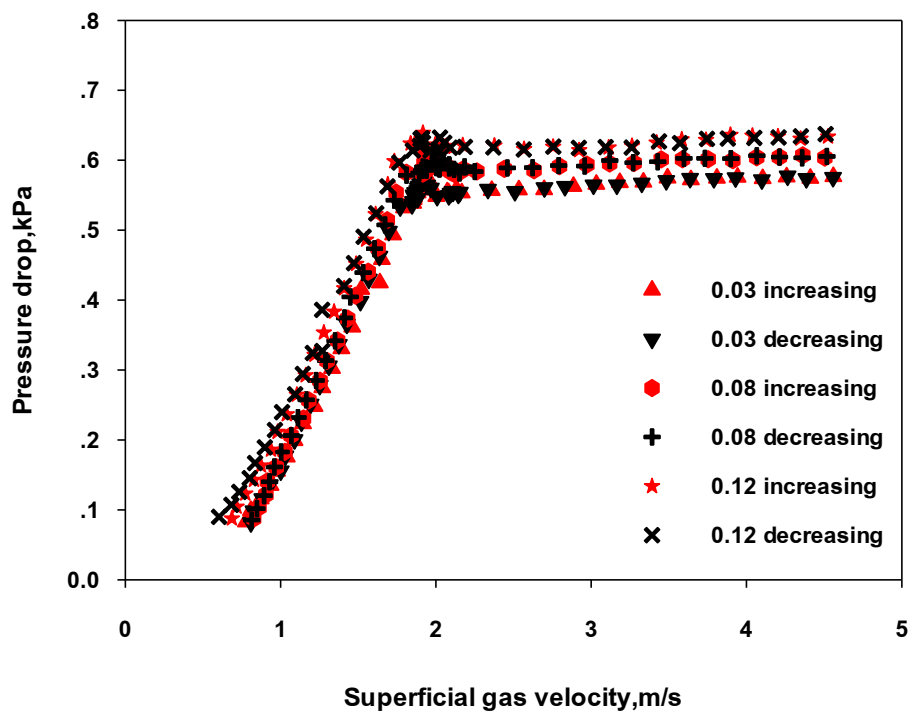
การศึกษาการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงผสมในระบบเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบพองอากาศโดยใช้เชื้อเพลิงผสมระหว่างกลบอัดเม็ดและซีลี้อยัดเม็ด อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 2-6 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนักระหว่างกลบอัดเม็ดและซีลี้อยัดเม็ดที่ศึกษาคือ 100:0, 0:100, 75:25, 50:50 และ 25:75

### 4.1 ความเร็วต่ำสุดในการเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชัน ( $u_{mf}$ ) และความเร็วต่ำสุดในการเกิดปรากฏการณ์พองอากาศ ( $u_{mb}$ )

#### 4.1.1 ความดันลดคร่อมเบด ( $\Delta P$ )

ความดันลดคร่อมเบดเป็นตัวแปรที่สำคัญในการออกแบบระบบฟลูอิดไดซ์เบด เช่นเดียวกับความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไดเซชัน ผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดคร่อมเบดและความเร็วการไหลของอากาศแสดงในรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าความดันลดคร่อมเบดเพิ่มขึ้นตามความเร็วการไหลของอากาศ เมื่อถึงจุดหนึ่งความดันลดคร่อมเบดคงที่แม้ว่าความเร็วการไหลของอากาศจะเพิ่มขึ้น ซึ่งลักษณะของความดันที่คงที่นั้นเป็นไปตามทฤษฎีการเกิดฟลูอิดไดเซชันสำหรับอนุภาคเดี่ยว

ช่วงเริ่มต้นของการปรับเพิ่มความเร็วการไหลอากาศไปจนถึงก่อนตำแหน่งความดันลดคร่อมเบดลดลงจะเรียกว่า เบดนิ่ง อนุภาคของแข็งภายในเบดยังคงหยุดนิ่ง และเมื่อเพิ่มความเร็วการไหลของอากาศจนถึงจุดที่ความดันลดคร่อมเบดลดลง ณ ตำแหน่งนี้อนุภาคเริ่มมีการเคลื่อนที่ เรียกความเร็วนี้ว่า ความเร็วต่ำสุดในการเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชัน สามารถหาค่าความเร็วได้จากการใช้สมการของ Ergun ในการทำนายค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชัน



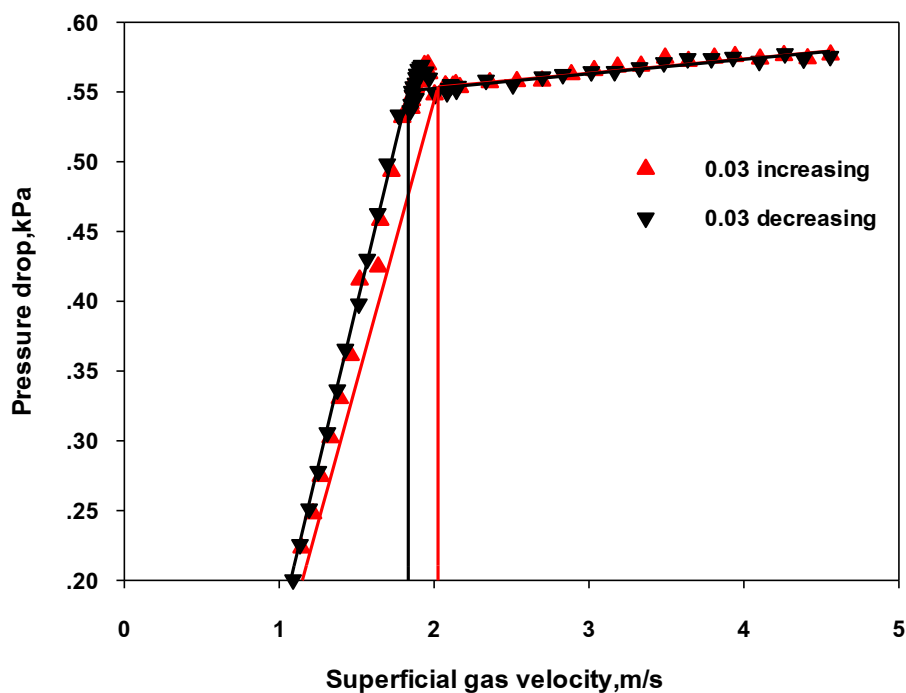
รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดคร่อมเบตและการปรับความเร็วการไหลของอากาศ ของสัดส่วนมวล 0.03, 0.08 และ 0.12 (increasing คือการปรับเพิ่มความเร็วการไหลของอากาศ และ decreasing คือการปรับลดความเร็วการไหลของอากาศ)

จากรูปที่ 4.1 เมื่อพิจารณาผลของสัดส่วนมวล (น้ำหนักของซีลีเนียมต่อน้ำหนักรวมภายในระบบ) ของซีลีเนียมต่อความดันลดคร่อมเบต โดยสัดส่วนมวลภายในห้องเผาไหม้ที่ 0.03, 0.08 และ 0.12 จะเห็นได้ว่าเมื่อสัดส่วนมวลเพิ่มขึ้นความดันลดคร่อมเบตเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วงระหว่าง 0.50 - 0.62 kPa

#### 4.1.2 ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไดเซชัน ( $u_{mf}$ )

ความเร็วต่ำสุดในการเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชัน คือความเร็วที่ทำให้อนุภาคภายในห้องเผาไหม้เริ่มเคลื่อนที่และยังเป็นตัวแปรที่สำคัญเช่นเดียวกับความดันลดคร่อมเบต ในรูปที่ 4.2 แสดงวิธีการหาความเร็วต่ำสุดในการเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชัน ( $u_{mf}$ ) ซึ่งภายในห้องเผาไหม้ประกอบด้วยอนุภาคของแข็งสองชนิด คือ ทรายและซีลีเนียม

การหาความเร็วต่ำสุดของการเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชัน ( $u_{mf}$ ) ทำได้โดยการสร้างเส้นแนวโน้มขึ้นมาสองเส้นเพื่อหาจุดตัด โดยตำแหน่งที่จุดตัดกันของเส้นแนวโน้มคือ ตำแหน่งของความเร็วต่ำสุดในการเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชัน ในรูปที่ 4.2 ที่สัดส่วนมวล 0.03 การเพิ่มการไหลของอากาศซึ่งทำให้ได้ความเร็วต่ำสุดในการเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชัน ( $u_{mf}$ ) เท่ากับ 2.03 เมตรต่อวินาที ส่วนการลดความเร็วการไหลของอากาศได้ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไดเซชัน ( $u_{mf}$ ) เท่ากับ 1.80 เมตรต่อวินาที

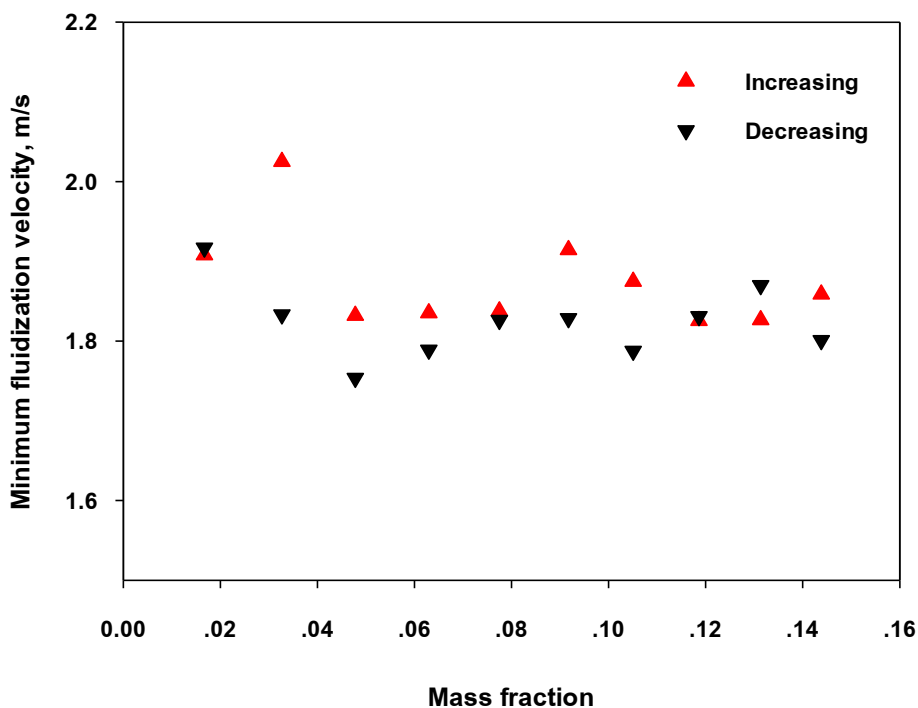


รูปที่ 4.2 แสดงการหาความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไดเซชัน ( $u_{mf}$ ) ที่สัดส่วนมวล 0.03 (increasing คือการปรับเพิ่มความเร็วการไหลของอากาศ และ decreasing คือการปรับลดความเร็วการไหลของอากาศ)

#### 4.1.3 ความสัมพันธ์ของความเร็วต่ำสุดในการเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชัน ( $u_{mf}$ ) และสัดส่วนมวล

การหาความเร็วต่ำสุดของการเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชัน ( $u_{mf}$ ) เนื่องจากเนื่องจากมีความจำเป็นต้องใช้ในการวิเคราะห์ปฏิกิริยาการเผาไหม้ในระบบเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบด โดยมีการศึกษาความสัมพันธ์ของค่าความกลมรูปร่าง ความหนาแน่น ที่มีผลต่อความเร็วต่ำสุดในการเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชัน ( $u_{mf}$ )

รูปที่ 4.3 แสดงผลการศึกษาความสัมพันธ์ของความเร็วต่ำสุดในการเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชัน ( $u_{mf}$ ) และสัดส่วนมวล (Mass fraction) ของซีลีเนียมในช่วง 0.02 - 0.14 โดยการเพิ่มความเร็วการไหลของอากาศ  $u_{mf}$  มีค่าอยู่ในช่วง 1.82-2.03 เมตรต่อวินาที ส่วนในการทดลองลดความเร็วการไหลของอากาศ  $u_{mf}$  มีค่าอยู่ในช่วง 1.75-1.92 เมตรต่อวินาที ซึ่งความเร็วต่ำสุดในการเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชัน ( $u_{mf}$ ) มีแนวโน้มคงที่ที่สัดส่วนมวลระหว่าง 0.02-0.14



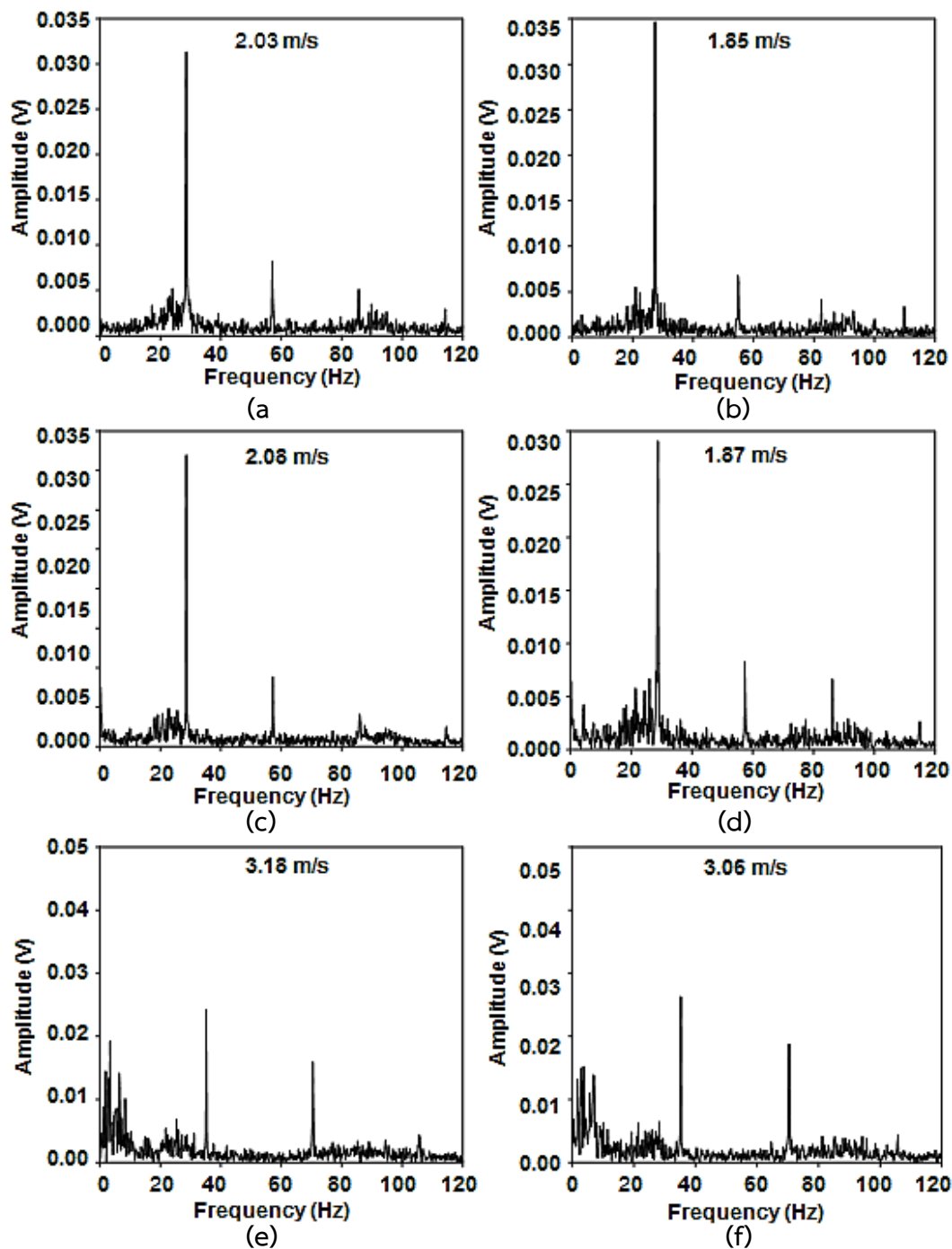
รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนมวล (Mass fraction) 0.02-0.14 และความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไดเซชัน (Increasing คือการปรับเพิ่มความเร็วการไหลของอากาศ และ Decreasing คือการปรับลดความเร็วการไหลของอากาศ)

การเพิ่มสัดส่วนมวลซีลี้อยัดเม็ดภายในห้องเผาไหม้ ส่งผลให้ทั้งความดันลดคร่อมเบดเพิ่มขึ้นแต่ความเร็วต่ำสุดในการเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชัน ( $u_{mf}$ ) มีแนวโน้มคงที่ แต่ในทางทฤษฎีเมื่อสัดส่วนช่องว่าง ( $\epsilon_m$ ) เพิ่มขึ้นจากการเพิ่มมวลของซีลี้อยัดเม็ดจะทำให้ค่าเฉลี่ยความกลมภายในเบดลดลง ส่งผลให้ความเร็วต่ำสุดในการเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชัน ( $u_{mf}$ ) ลดลงเมื่อเทียบกับในกรณีที่ใช้ทรายอย่างเดียว การเพิ่มสัดส่วนมวลของซีลี้อยัดเม็ดเล็กน้อย จึงไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงของความเร็วต่ำสุดในการเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชัน ( $u_{mf}$ ) และผลของการเปรียบเทียบระหว่างการเพิ่มความเร็วการไหลของอากาศกับการลดความเร็วการไหลของอากาศเพื่อศึกษาความเร็วต่ำสุดการเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชัน ( $u_{mf}$ ) พบว่าการลดความเร็วการไหลของอากาศจะให้ค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชัน ( $u_{mf}$ ) ที่สม่าเสมอกว่าในกรณีการเพิ่มความเร็วการไหลของอากาศ โดยสัดส่วนมวลของซีลี้อยัดเม็ดภายในเบดระหว่าง 0.02 - 0.14 ส่งผลให้ความดันลดคร่อมเบดเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วงระหว่าง 0.54 - 0.66 kPa ความเร็วต่ำสุดของอากาศในการเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชัน ( $u_{mf}$ ) มีค่า 1.82-2.03 m/s สำหรับกรณีการเพิ่มความเร็วอากาศ และความเร็วต่ำสุดของอากาศในการเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชัน ( $u_{mf}$ ) มีค่า 1.75-1.92 m/s ในกรณีลดความเร็วการไหลของอากาศลง

#### 4.1.4 ความเร็วต่ำสุดในการเกิดปรากฏการณ์ฟองอากาศ ( $u_{mb}$ )

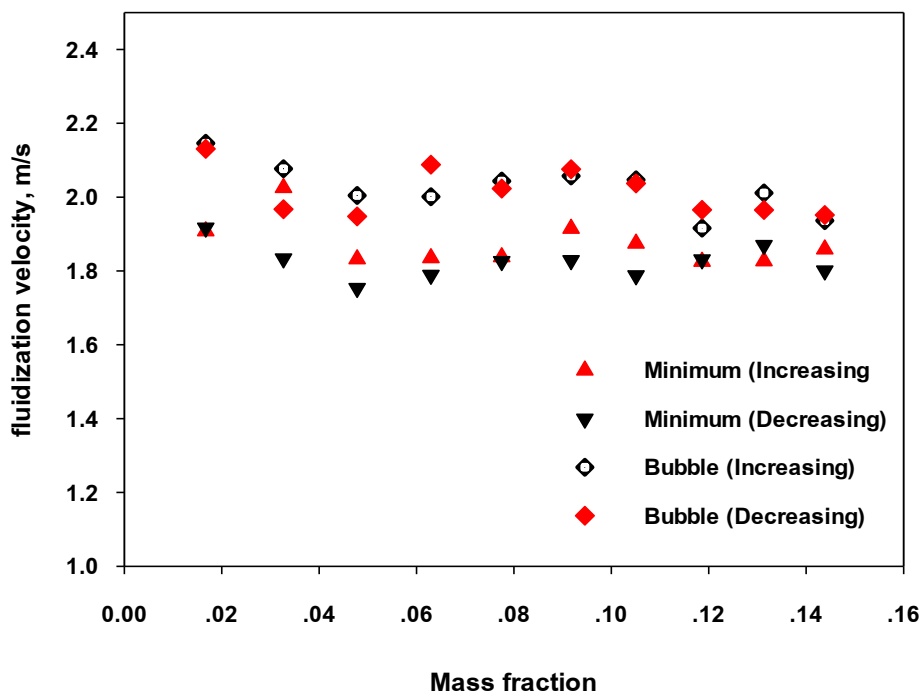
สำหรับความเร็วต่ำสุดในการเกิดปรากฏการณ์ฟองอากาศ ( $u_{mb}$ ) ใช้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จากเซ็นเซอร์วัดความดันเพื่อวิเคราะห์คลื่นความดันลดคร่อมเบต เมื่อเกิดฟองอากาศ ความดันลดคร่อมเบตไม่คงที่และจะผันด้วยเวลาที่ต่ำซึ่งเป็นความถี่ของเกิดฟองอากาศ รูปที่ 4.4 แสดงผลของการวิเคราะห์ FFT ของคลื่นความดันลดคร่อมเบตที่ความเร็วต่างๆ โดยรูปที่ 4.4 a, c และ e เป็นการปรับเพิ่มความเร็วความการไหลของอากาศในการทดลอง ส่วนรูปที่ 4.4 b, d และ f เป็นการปรับลดความเร็วความการไหลของอากาศ ซึ่งรูป a และ b ความเร็วการไหลของอากาศเท่ากับ 2.03 เมตรต่อวินาที และ 1.85 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ ระบบเริ่มเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชันหรืออนุภาคของทรายผสมซีล้อยเริ่มมีการเคลื่อนที่ ซึ่งที่ความถี่ต่ำกว่า 30 เฮิร์ตซ์ คลื่นจะมีแอมพลิจูดต่ำ และเมื่อปรับความเร็วการไหลอากาศไปจนถึง 2.08 เมตรต่อวินาที และ 1.87 เมตรต่อวินาที เริ่มมีคลื่นแทรกเข้ามาในช่วง 0-10 เฮิร์ตซ์ แต่ยังคงมีแอมพลิจูดที่ต่ำดังรูปที่ 4.4 c และ d ตามลำดับแต่เมื่อปรับความเร็วการไหลของอากาศจนถึง 3.18 เมตรต่อวินาที และ 3.06 เมตรต่อวินาที ดังรูปที่ 4.4 e และ f ตามลำดับ แอมพลิจูดในช่วง 0-10 เฮิร์ตซ์ จะมีขนาดเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเกิดฟองอากาศในช่วงความเร็วนี้

การเปรียบเทียบความเร็วต่ำสุดในการเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชัน ( $u_{mf}$ ) และความเร็วต่ำสุดในการเกิดปรากฏการณ์ฟองอากาศ ( $u_{mb}$ ) แสดงดังรูปที่ 4.5 ซึ่งผลการวิเคราะห์ความเร็วการเกิดปรากฏการณ์ฟองอากาศ ( $u_{mb}$ ) มีแนวโน้มคงที่ตามความเร็วต่ำสุดในการเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชัน ( $u_{mf}$ ) โดยผลของความเร็วต่ำสุดในการเกิดปรากฏการณ์ฟองอากาศ ( $u_{mb}$ ) นั้นเป็นไปตามหลักการจำแนกอนุภาคของ Geldart เนื่องจากอนุภาคทั้งสองชนิดอยู่ในกลุ่ม D ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค ( $d_p$ ) มากกว่า 1 มิลลิเมตร จากการที่อนุภาคมีขนาดใหญ่ส่งผลให้ความเร็วต่ำสุดในการเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชันค่อนข้างสูงและความเร็วต่ำสุดในการเกิดปรากฏการณ์ฟองอากาศ ( $u_{mb}$ ) จะมีค่าสูงกว่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชัน ( $u_{mf}$ ) เล็กน้อย ซึ่งจากการทดลองนี้เป็นไปตามทฤษฎีตามหลักการจำแนกอนุภาคของ Geldart



รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไดเซชันและความเร็วต่ำสุดในการเกิดปรากฏการณ์ฟองอากาศที่สัดส่วนโดยมวลของซีลีเนียมต่อทราย 0.03 (a, c และ e เป็นการปรับเพิ่มความเร็วในการทดลอง ส่วน b, d และ f เป็นการปรับลดความเร็ว)





รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปรียบเทียบความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไดเซชัน ( $u_{mf}$ ) และความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟองอากาศ ( $u_{mb}$ ) (Increasing คือการปรับเพิ่มความเร็วการไหลของอากาศ และ Decreasing คือการปรับลดความเร็วการไหลของอากาศ)

#### 4.2 การเผาไหม้ของเชื้อเพลิง

จากการศึกษาความเร็วต่ำสุดในการเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชันและความเร็วต่ำสุดในการเกิดปรากฏการณ์ฟองอากาศจะได้สถานะเริ่มต้นสำหรับการศึกษาการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมระหว่าง แกลบอัดเม็ดและซีลี้อยอัดเม็ดในเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดฟองอากาศที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 2-6 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ในการศึกษาการเผาไหม้เชื้อเพลิงจะถูกป้อนเหนือตะแกรงเบด 70 เซนติเมตร อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนักระหว่างแกลบอัดเม็ดและซีลี้อยอัดเม็ด 100:0 0:100 75:25 50:50 และ 25:75 รูปที่ 4.6 แสดงลักษณะเชื้อเพลิงทั้ง 5 อัตราส่วนผสม โดยกำหนดความเร็วการไหลอากาศปฐมภูมิ 1.7 เมตรต่อวินาที และป้อนอากาศทุติยภูมิไปพร้อมกับเชื้อเพลิงที่อัตราการไหล 100 ลิตรต่อนาที เพื่อศึกษาการกระจายอุณหภูมิภายในเบด ไอเสีย ปริมาณเถ้าและองค์ประกอบของเถ้า ประสิทธิภาพการเผาไหม้



รูปที่ 4.6 แสดงลักษณะเชื้อเพลิงผสมระหว่างแกลบอัดเม็ดและขี้เลื่อยอัดเม็ดที่อัตราส่วนโดยน้ำหนัก (a) 100:0, (b) 0:100, (c) 75:25, (d) 50:50, (e) 25:75

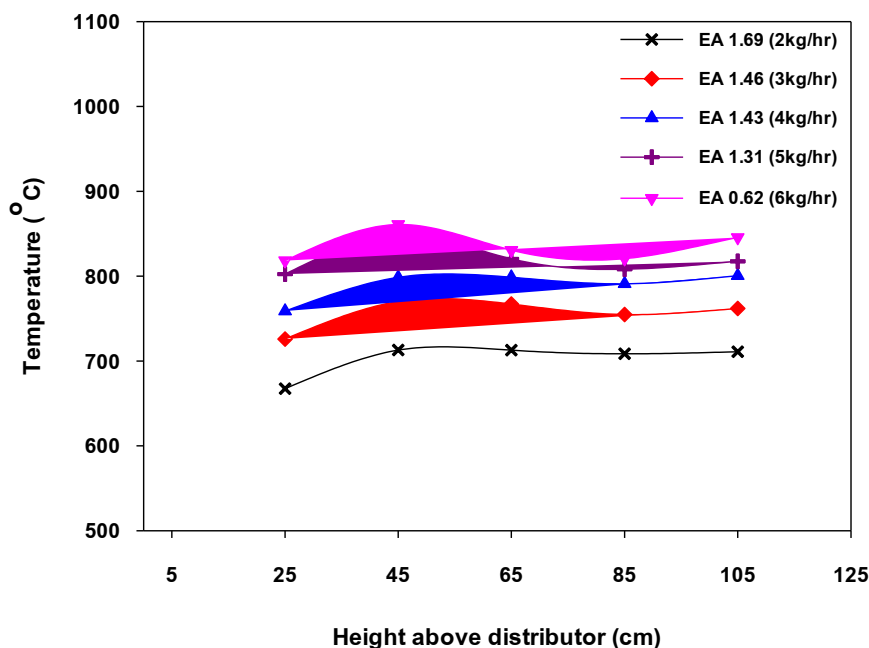
#### 4.2.1 อุณหภูมิ

การวัดอุณหภูมิทั้งหมด 5 ตำแหน่ง แต่ละตำแหน่งห่างกัน 25 เซนติเมตร ค่าอุณหภูมิที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ยในช่วงเวลาของแต่ละตำแหน่ง

1) การเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิกกรณีเชื้อเพลิงชนิดเดียวกัน

กรณีที่ใช้เชื้อเพลิงผสมระหว่างแกลบอัดเม็ดและขี้เลื่อยอัดเม็ดที่อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนักเท่ากับ 100:0 การกระจายตัวของอุณหภูมิแสดงดังรูปที่ 4.7 ที่อัตราส่วนอากาศส่วนเกิน (Excess air) 0.62 และ 1.31 ที่ตำแหน่งความสูงในช่วง 25-65 เซนติเมตร เหนือตะแกรง อุณหภูมิจะมากกว่า 820 องศาเซลเซียส สูงสุดที่ 880 องศาเซลเซียส ที่ตำแหน่งความสูง 45 เซนติเมตรเหนือตะแกรง และอุณหภูมิลดลงตรงตำแหน่งการป้อนเชื้อเพลิงเนื่องจากมีป้อนอากาศหุติยภูมิไปพร้อมกับเชื้อเพลิง ทำให้ช่วงความสูงระหว่าง 65-85 เซนติเมตร เหนือตะแกรง อุณหภูมิมีค่าเท่ากับ 830 องศาเซลเซียส อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อย ที่ตำแหน่งความสูง 105 เซนติเมตร

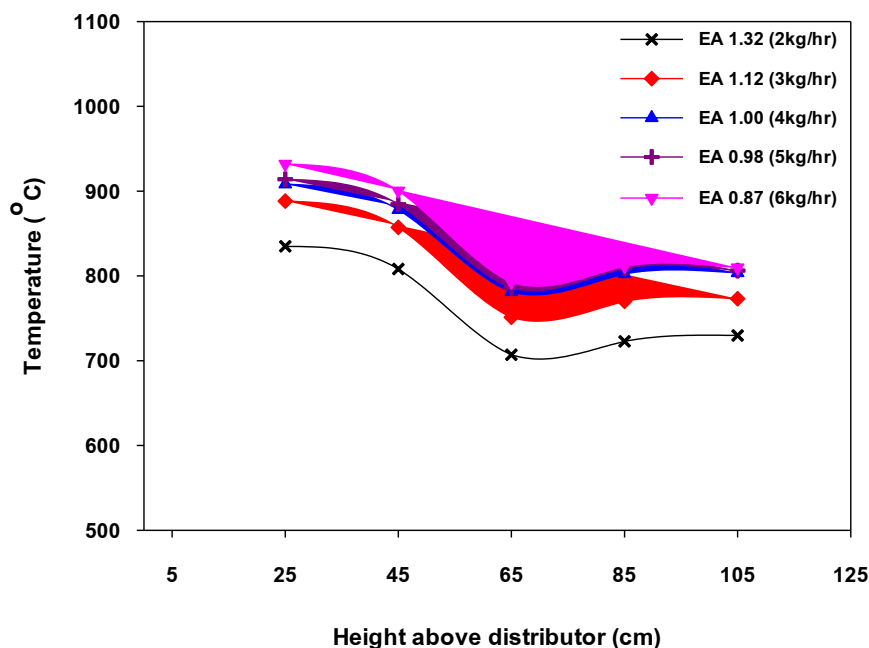
ส่วนในกรณีอัตราส่วนอากาศส่วนเกิน (Excess Air : EA ) 1.43, 1.46, และ 1.69 จะเห็นได้ว่าที่ความสูง 25 เซนติเมตรเหนือตะแกรงอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น และให้อุณหภูมิสูงสุดอยู่ในช่วง 45-65 เซนติเมตรเหนือตะแกรง แต่ในช่วง 65-105 เซนติเมตรเหนือตะแกรง อุณหภูมิค่อนข้างคงที่ ต่างจากกรณีอัตราส่วนอากาศส่วนเกิน 0.62 และ 1.31 เนื่องจากผลของอัตราส่วนอากาศส่วนเกินที่เพิ่มสูงขึ้น ทำให้ผลกระทบจากอากาศหุติยภูมิที่ใส่ไปพร้อมกับเชื้อเพลิงทำให้อุณหภูมิลดลงเล็กน้อย และเชื้อเพลิงมีขนาดเล็กเมื่อถูกป้อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้ทำให้เกิดกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) ได้ง่ายจึงทำให้อุณหภูมิค่อนข้างคงที่



รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงเหนือตะแกรงเบตกับอุณหภูมิจากการเผาไหม้ของ แกลบอัดเม็ด 100 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราส่วนอากาศส่วนเกินต่างๆ

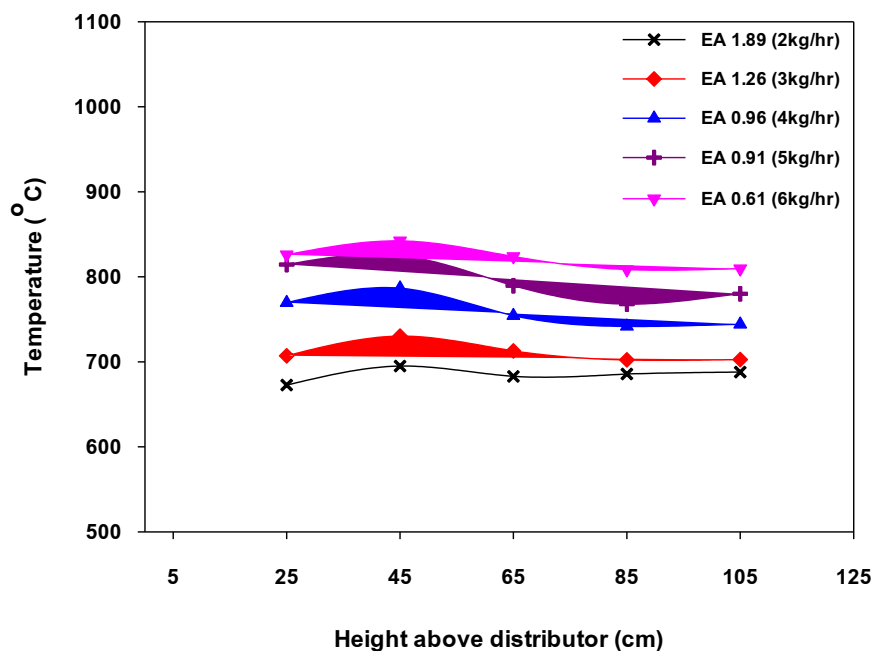
กรณีที่ใช้เชื้อเพลิงผสมระหว่างแกลบอัดเม็ดและขี้เลื่อยอัดเม็ดอัตราส่วนผสมโดยน้ำหนัก ที่ศึกษาคือ 0:100 ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิแสดงดังรูปที่ 4.8 ซึ่งเห็นได้ว่าที่อัตราส่วนอากาศ ส่วนเกิน 0.87, 0.98, 1.00, 1.12 และ 1.32 ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิตลอดความสูงเหนือ ตะแกรงมีลักษณะคล้ายกัน โดยอัตราส่วนอากาศส่วนเกิน 0.87 อุณหภูมิสูงสุด 932 องศาเซลเซียส ความ สูง 25 เซนติเมตรเหนือตะแกรง อุณหภูมิต่ำสุด 732 องศาเซลเซียสที่ความสูง 65 เซนติเมตร เหนือตะแกรง และเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วงความสูง 85-105 เซนติเมตรเหนือตะแกรง แนวโน้มอุณหภูมิจะ ลดลงตามอัตราส่วนอากาศส่วนเกินที่เพิ่มขึ้น

ผลของอุณหภูมิจากใช้เชื้อเพลิงผสมระหว่างแกลบอัดเม็ดและขี้เลื่อยอัดเม็ดอัตรา ส่วนผสมโดยน้ำหนักที่ศึกษาคือ 0:100 จะเห็นว่าแตกต่างจากอัตราส่วน 100:0 เนื่องจากเชื้อเพลิงขี้เลื่อย อัดเม็ดมีค่าความร้อน (HHV) 17.99 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยสูงกว่าแกลบอัดเม็ดที่มีค่า ความร้อนต่ำกว่า อีกทั้งเชื้อเพลิงขี้เลื่อยอัดเม็ดยังมีความหนาแน่นและขนาดความยาวมากกว่า ทำให้ เชื้อเพลิงเมื่อถูกป้อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้นั้นตกลงเหนือตะแกรงเบต ซึ่งการเกิดกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) ของเชื้อเพลิงขี้เลื่อยอัดเม็ดนั้นต้องใช้เวลามากกว่าเชื้อเพลิงแกลบอัดเม็ดเพราะพื้นที่ผิวที่ สัมผัสกับอากาศมีมากกว่าทำให้สามารถที่จะคงอุณหภูมิได้นานกว่าเชื้อเพลิงแกลบอัดเม็ด



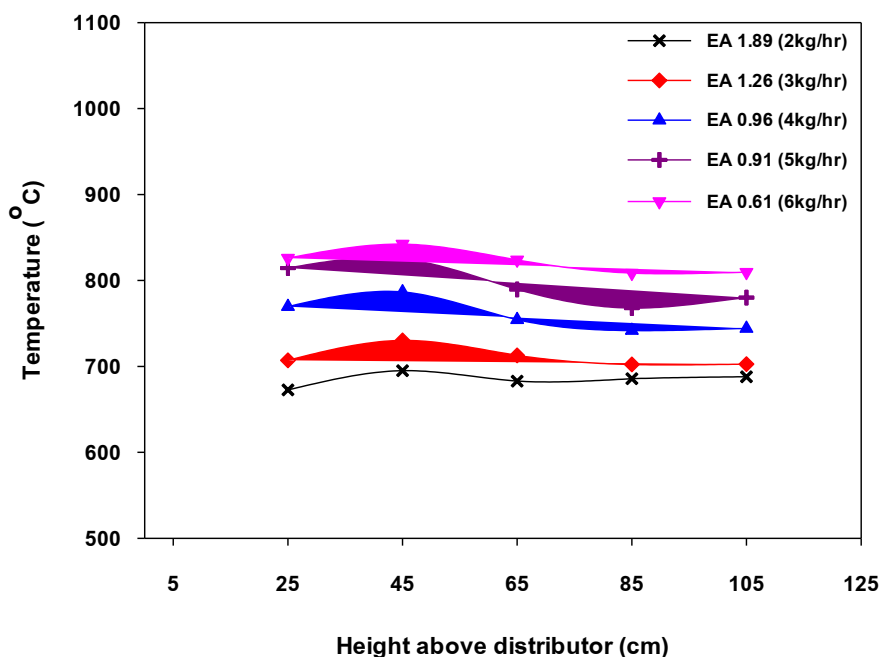
รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงเหนือตะแกรงเบดกับอุณหภูมิจากการเผาไหม้ของซีลี้อยัดเม็ด 100 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราส่วนอากาศส่วนเกินต่างๆ

กรณีใช้เชื้อเพลิงผสมระหว่างแกลบอัดเม็ดและซีลี้อยัดเม็ดอัตราส่วนผสมโดยน้ำหนัก 75:25 ผลของการกระจายอุณหภูมิ แสดงดังรูปที่ 4.9 ที่อัตราส่วนอากาศส่วนเกิน 0.61 ให้ค่าอุณหภูมิสูงสุด 842 องศาเซลเซียส และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนอากาศส่วนเกิน เป็น 0.91, 0.91, 1.26 และ 1.89 ค่าอุณหภูมิจะลดลงตามปริมาณอัตราส่วนอากาศส่วนเกิน ที่เพิ่มขึ้น โดยการกระจายอุณหภูมิในกรณีนี้ อุณหภูมิค่อนข้างคงที่ตลอดความสูงของห้องเผาไหม้ เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เชื้อเพลิงผสมระหว่างแกลบอัดเม็ดและซีลี้อยัดเม็ดอัตราส่วนผสมโดยน้ำหนักที่ 100:0 และ 0:100 เนื่องจากลักษณะของเชื้อเพลิงทั้ง 2 ชนิดที่ต่างกัน ทั้งขนาด ความหนาแน่น และองค์ประกอบทางเคมี อีกทั้งโซนการเผาไหม้ที่แตกต่างกัน โดยอัตราส่วนผสมโดยน้ำหนักที่ 100:0 การเผาไหม้จะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งสูงสุด แต่อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนักที่ 100:0 การเผาไหม้จะอยู่ใกล้ตะแกรงเบด เมื่อนำเชื้อเพลิงทั้ง 2 ชนิด มาผสมกันจึงเกิดลักษณะการเผาไหม้คล้ายกับการรวมโซนการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงทั้ง 2 ชนิดเข้าด้วยกัน



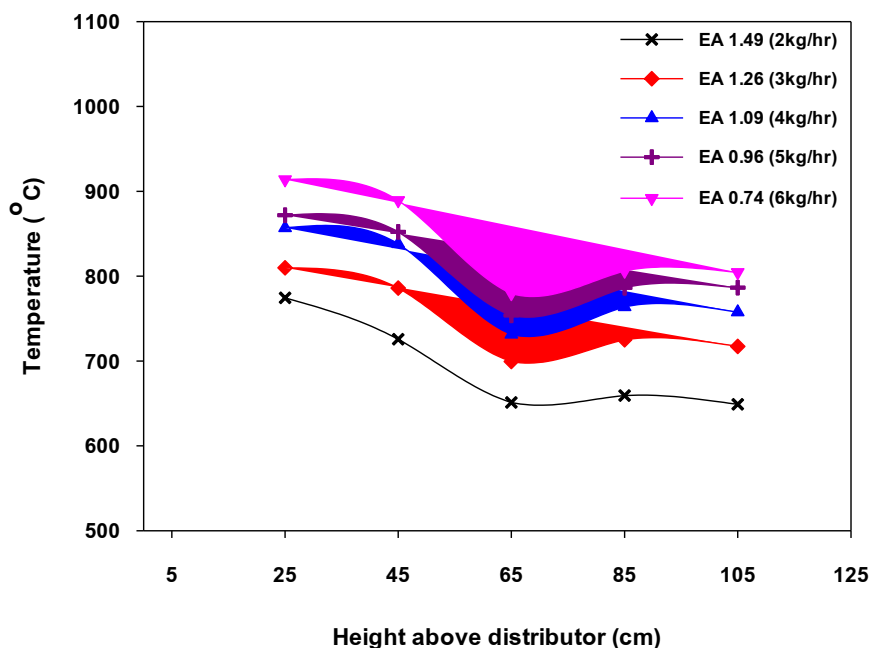
รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงเหนือตะแกรงเบดกับอุณหภูมิจากการเผาไหม้แกลบอัดเม็ดผสมซีลี้อยัดเม็ด 75:25 ที่อัตราส่วนอากาศส่วนเกินต่างๆ

เมื่อปรับอัตราส่วนผสมระหว่างแกลบอัดเม็ดและซีลี้อยัดเม็ดโดยน้ำหนักเป็น 50:50 การกระจายอุณหภูมิ แสดงดังรูปที่ 4.10 เมื่อสัดส่วนของซีลี้อยัดเม็ดเพิ่มขึ้น จะเห็นได้ว่าผลของอุณหภูมิในโซนใกล้ตะแกรงสูงขึ้น เนื่องจากค่าความร้อน ขนาดความยาวของเชื้อเพลิงและความหนาแน่นของซีลี้อยัดเม็ดส่งผลให้พื้นที่ผิวสัมผัสกับอากาศลดลงทำให้กระบวนการไพโรไลซิส(Pyrolysis) เกิดขึ้นช้ากว่าแกลบอัดเม็ดที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่า ที่อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนักเป็น 50:50 อุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 850 องศาเซลเซียส ที่ความสูง 45 เซนติเมตรเหนือตะแกรงและอุณหภูมิลดลงและคงที่ในช่วงความสูง 65-105 เซนติเมตร



รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงเหนือตะแกรงเบตกับอุณหภูมิจากการเผาไหม้แกลบอัดเม็ดผสมซีลี้อยัดเม็ด 50:50 ที่อัตราส่วนอากาศส่วนเกินต่างๆ

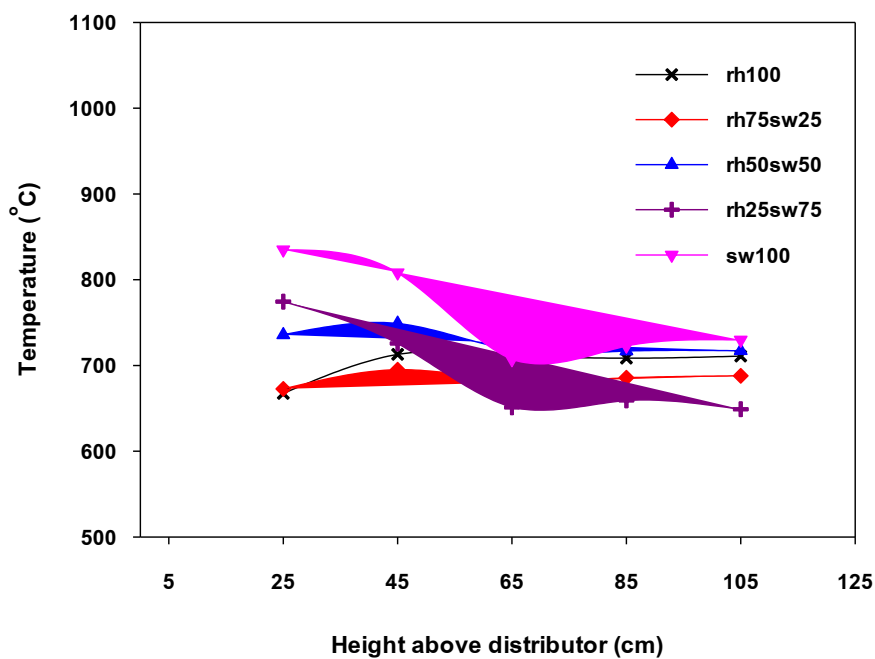
กรณีอัตราส่วนผสมระหว่างแกลบอัดเม็ดและซีลี้อยัดเม็ดโดยน้ำหนักเป็น 25:75 การกระจายอุณหภูมิแสดงดังรูปที่ 4.11 เนื่องจากสัดส่วนของแกลบอัดเม็ดที่เพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้เกิดการแยกโชนการเผาไหม้ที่ชัดเจน โดยลักษณะของอุณหภูมิสูงในบริเวณใกล้ตะแกรง และลดลงตรงบริเวณที่มีการใส่อากาศทุติยภูมิ จากนั้นอุณหภูมิลดลงเรื่อยๆสูงขึ้นคล้ายกับกรณีของการเผาไหม้โดยใช้เชื้อเพลิงแกลบอัดเม็ดอย่างเดียว อัตราส่วนผสมระหว่างแกลบอัดเม็ดและซีลี้อยัดเม็ดโดยน้ำหนักเป็น 25:75 อุณหภูมิสูงสุด 913 องศาเซลเซียส อัตราส่วนอากาศส่วนเกิน 0.74 โดยอุณหภูมิลดลงตามปริมาณอัตราส่วนอากาศส่วนเกิน ที่เพิ่มขึ้นซึ่งมีลักษณะเหมือนกันในทุกกรณีที่ศึกษา



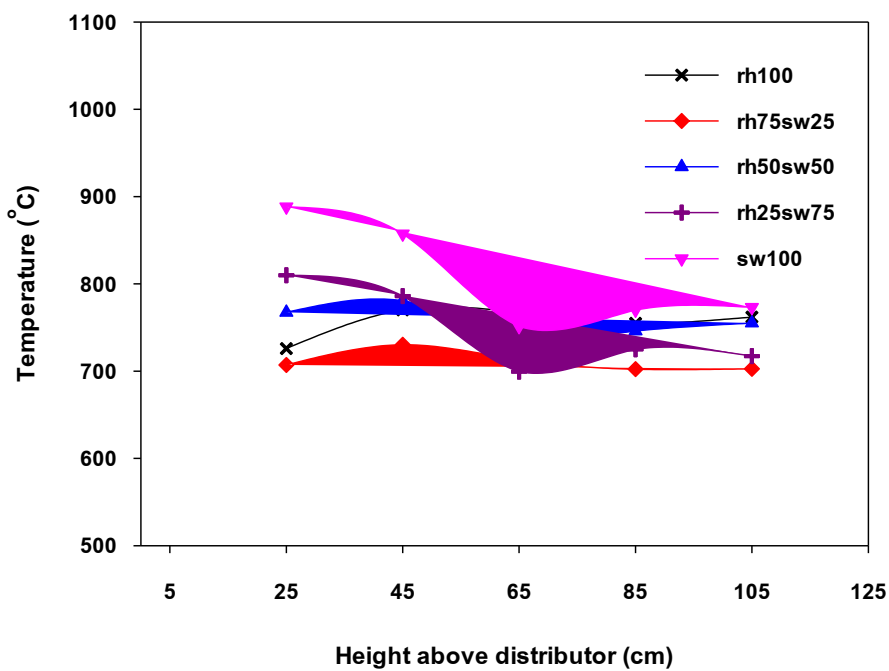
รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงเหนือตะแกรงเบตกับอุณหภูมิจากการเผาไหม้แกลบอัดเม็ดผสมซีลี้อยัดเม็ด 25:75 เปอร์เซนต์ ที่อัตราส่วนอากาศส่วนเกินต่างๆ

## 2) การเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิกรณีอัตราการป้อนเดียวกัน

ในการศึกษาผลของการกระจายอุณหภูมิที่อัตราการป้อนเดียวกันพบว่าลักษณะของการกระจายอุณหภูมิมิมีแนวโน้มเหมือนกันทุกอัตราการป้อน ดังรูปที่ 4.2, 4.13, 4.14, 4.15 และ 4.16 อุณหภูมิของการเผาไหม้ของแกลบอัดเม็ด 100 เปอร์เซนต์ อุณหภูมิใกล้ตะแกรงจะต่ำแล้วเพิ่มสูงขึ้นเมื่อตำแหน่งสูงขึ้นเหนือตะแกรง ซึ่งแตกต่างจากการใช้ซีลี้อยัดเม็ด 100 เปอร์เซนต์ อุณหภูมิสูงบริเวณใกล้ตะแกรงและค่อยๆลดลงเมื่อตำแหน่งสูงขึ้น โดยอุณหภูมิจะลดต่ำสุดที่ความสูง 70 เซนติเมตรเหนือตะแกรงเบตเนื่องจากเป็นตำแหน่งที่มีการใส่อากาศทุติยภูมิ (Secondary air) โดยสาเหตุที่ทำให้ตำแหน่งที่เกิดอุณหภูมิสูงแตกต่างกันเนื่องจากขนาดที่แตกต่างกันระหว่างเชื้อเพลิงทั้ง 2 ชนิด จากตารางที่ 3.1 ค่าความร้อน (Heating value) ที่สูงกว่าของเชื้อเพลิงซีลี้อยัดเม็ดส่งผลให้อุณหภูมิเฉลี่ยเมื่อเกิดการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงซีลี้อยัดเม็ด 100 เปอร์เซนต์นั้นจะสูงกว่าของเชื้อเพลิงแกลบอัดเม็ด 100 เปอร์เซนต์ ทำให้ผลการกระจายอุณหภูมิเมื่อใช้เชื้อเพลิงผสมระหว่างแกลบอัดเม็ดกับซีลี้อยัดเม็ดที่อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนัก 75:25, 50:50 และ 25:75 พบว่าเมื่อลดส่วนผสมของแกลบอัดเม็ดและเพิ่มส่วนผสมของซีลี้อยัดเม็ดทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยของการเผาไหม้สูงขึ้น

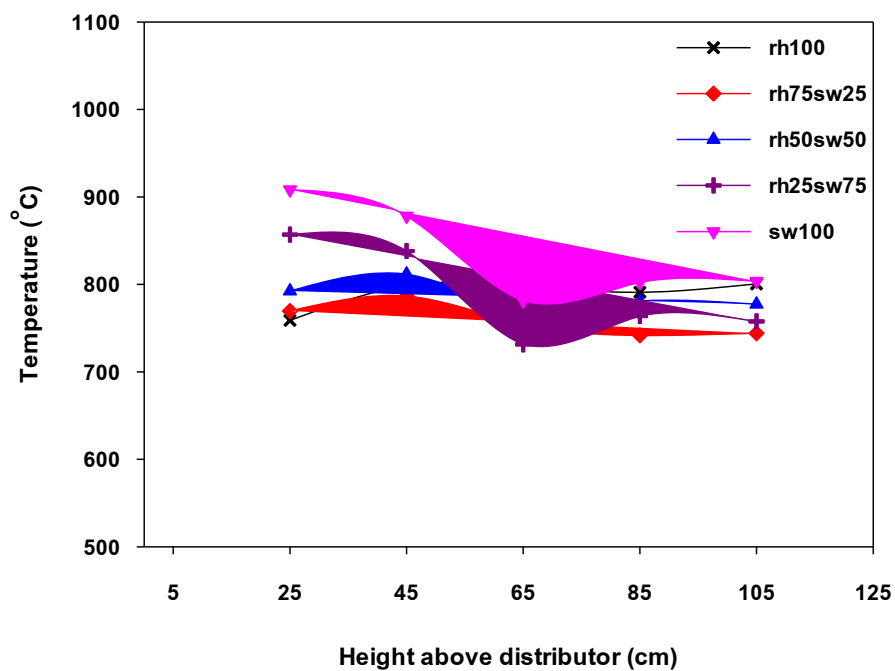


รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงเหนือตะแกรงเบตกับอุณหภูมิที่อัตราการป้อน 2 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

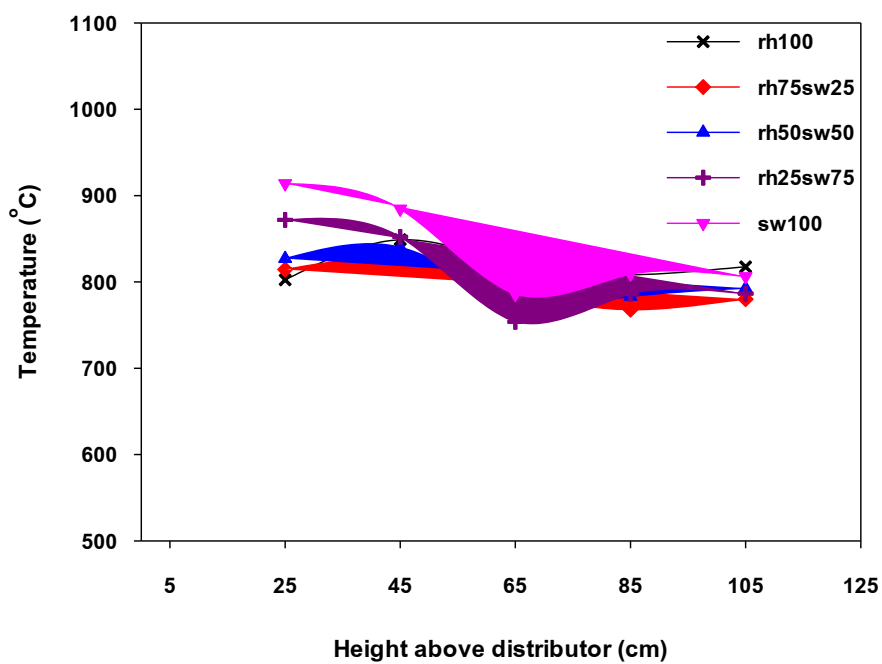


รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงเหนือตะแกรงเบตกับอุณหภูมิที่อัตราการป้อน 3 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

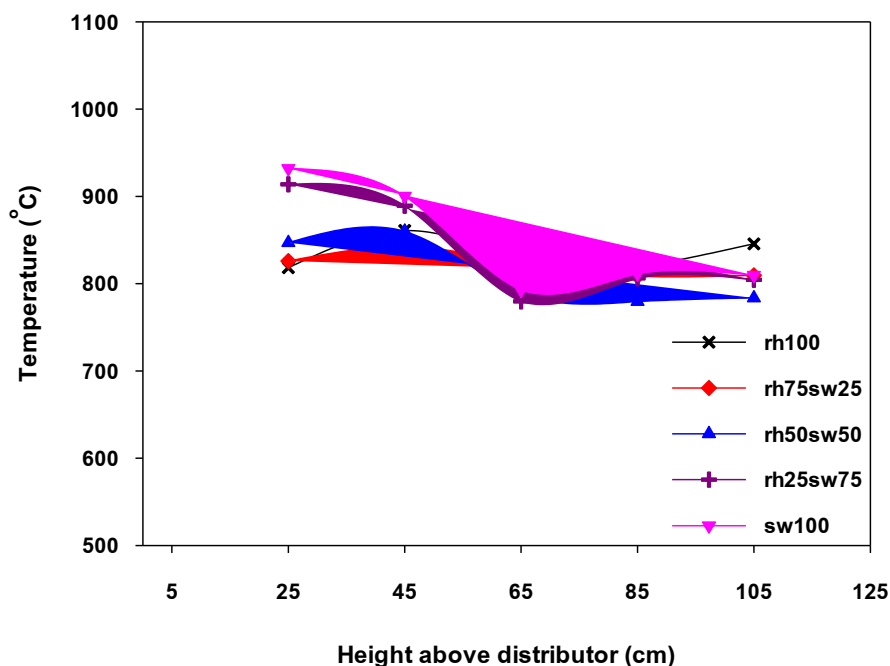




รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงเหนือตะแกรงเบตกับอุณหภูมิที่อัตราการป้อน 4 กิโลกรัมต่อชั่วโมง



รูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงเหนือตะแกรงเบตกับอุณหภูมิที่อัตราการป้อน 5 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

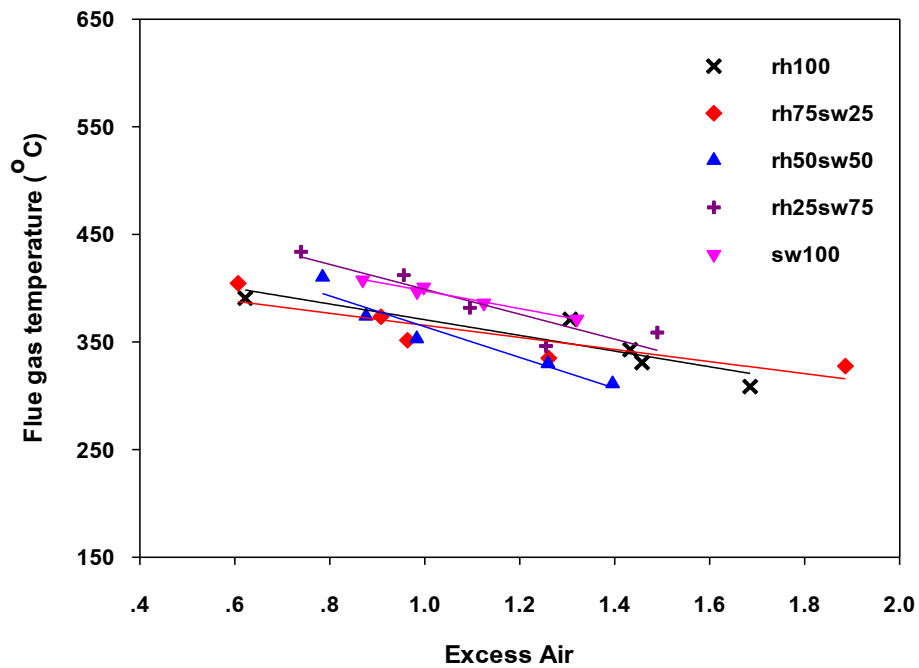


รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงเหนือตะแกรงเบดกับอุณหภูมิที่อัตราการป้อน 6 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

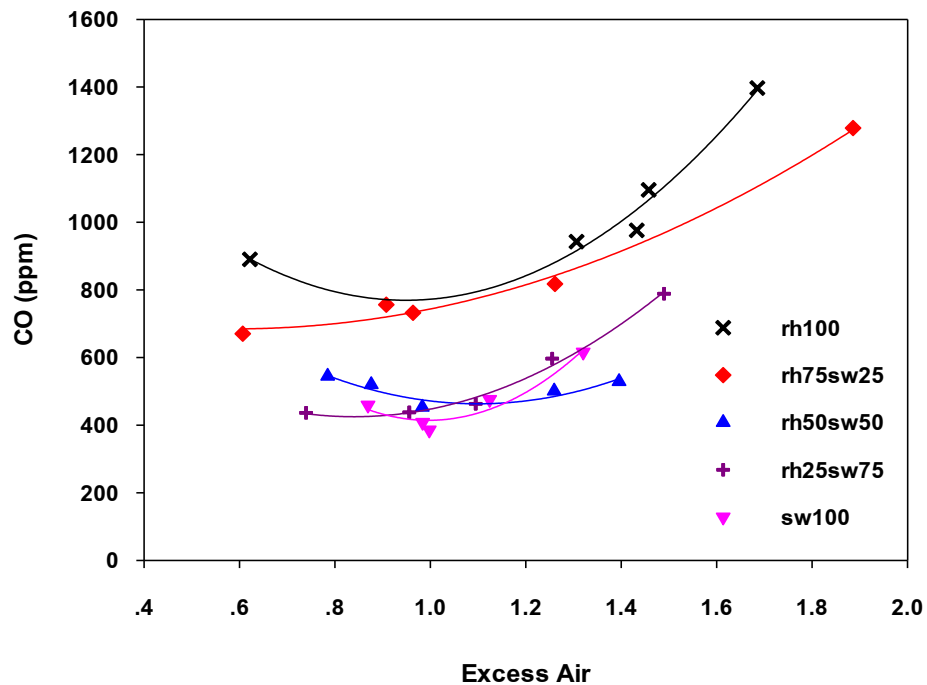
#### 4.2.2 ไอเสีย

การเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมระหว่างแกลบอัดเม็ดและซีลี้อยัดเม็ดในเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบพองอากาศอัตราส่วนผสมโดยน้ำหนักระหว่างแกลบอัดเม็ดและซีลี้อยัดเม็ดที่ศึกษาประกอบไปด้วย 100:0, 0:100, 75:25, 50:50 และ 25:75 วัดปริมาณไอเสียที่ตำแหน่งทางออกของไซโคลนดักฝุ่นด้วยเครื่องวัดก๊าซ TESTO 350 XL ซึ่งผลของอุณหภูมิไอเสีย คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และไนโตรเจนออกไซด์ (NO<sub>x</sub>) ผลของอุณหภูมิไอเสียแสดงดังรูปที่ 4.17 อุณหภูมิไอเสียของเชื้อเพลิงระหว่างแกลบอัดเม็ดและซีลี้อยัดเม็ดที่อัตราส่วน 100:0, 75:25 และ 50:50 มีค่าอยู่ระหว่าง 308-410 องศาเซลเซียส ต่ำกว่าอัตราส่วน 25:75 และ 0:100 ที่มีอุณหภูมิไอเสีย 358-433 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิไอเสียจะลดลงตามอัตราส่วนอากาศส่วนเกินที่เพิ่มขึ้นและสอดคล้องกับอุณหภูมิการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง เมื่อลดสัดส่วนแกลบอัดเม็ดและเพิ่มสัดส่วนของซีลี้อยัดเม็ด ค่าความร้อนที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิเฉลี่ยของการเผาไหม้สูงขึ้น แต่เมื่ออัตราส่วนอากาศส่วนเกินเพิ่มขึ้นอุณหภูมิเฉลี่ยของการเผาไหม้ลดลง

สำหรับค่าคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แสดงดังรูปที่ 4.18 จะเห็นว่าในกรณีอัตราส่วนผสมโดยน้ำหนักระหว่างแกลบอัดเม็ดและซีลี้อยัดเม็ด 100:0 และ 75:25 คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) มีค่าสูงเกินมาตรฐานของเชื้อเพลิงชีวมวล 690 ppm แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนซีลี้อยัดเม็ดเป็น 0:100, 50:50 และ 25:75 ทำให้คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) อยู่ระหว่าง 385-615 ppm ซึ่งต่ำกว่าค่ามาตรฐานการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวล

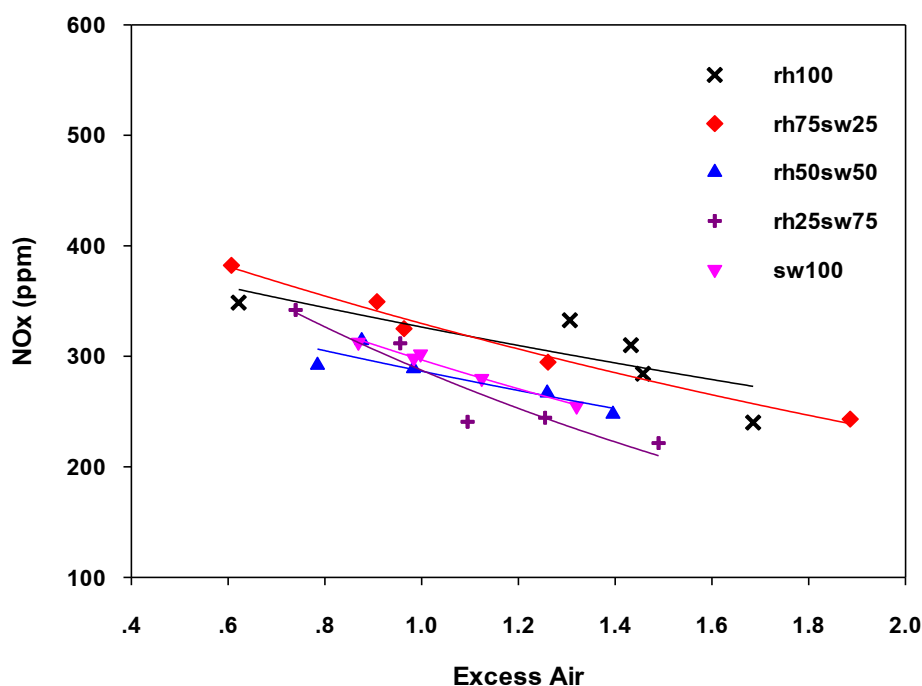


รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิไอเสียและอัตราส่วนอากาศส่วนเกิน (Excess air)  
(rh คือ แกลบอัดเม็ด และ sw คือ ชี้อัดเม็ด)



รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และอัตราส่วนอากาศส่วนเกิน  
(Excess air) (rh คือ แกลบอัดเม็ด และ sw คือ ชี้อัดเม็ด)

จากผลศึกษาเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมระหว่างแกลบอัดเม็ดและซีลี้อยัดเม็ด พบว่าปริมาณของไนโตรเจนออกไซด์ ( $\text{NO}_x$ ) เชื้อเพลิงผสมระหว่างแกลบอัดเม็ดและซีลี้อยัดเม็ดสูงกว่าค่ามาตรฐานการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวลที่ 200 ppm ทุกกรณี โดยจะเห็นว่ากรณีที่มีอัตราส่วนผสมโดยน้ำหนักระหว่างแกลบอัดเม็ดและซีลี้อยัดเม็ด 100:0 และ 75:25 มีปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ ( $\text{NO}_x$ ) สูงกว่าอัตราส่วนผสม 0:100, 50:50 และ 25:75 สาเหตุที่ทำให้ไนโตรเจนออกไซด์ ( $\text{NO}_x$ ) สูงกว่าเกิดจากองค์ประกอบทางเคมีของแกลบอัดเม็ดมีปริมาณไนโตรเจน 0.506 เปอร์เซ็นต์มากกว่าซีลี้อยัดเม็ดที่มีปริมาณไนโตรเจนเพียง 0.126 เปอร์เซ็นต์ เมื่ออัตราส่วนอากาศส่วนเกิน (Excess air) เพิ่มขึ้น อุณหภูมิของการเผาไหม้ลดลงส่งผลให้ไนโตรเจนออกไซด์ ( $\text{NO}_x$ ) ลดลง ดังรูปที่ 4.19

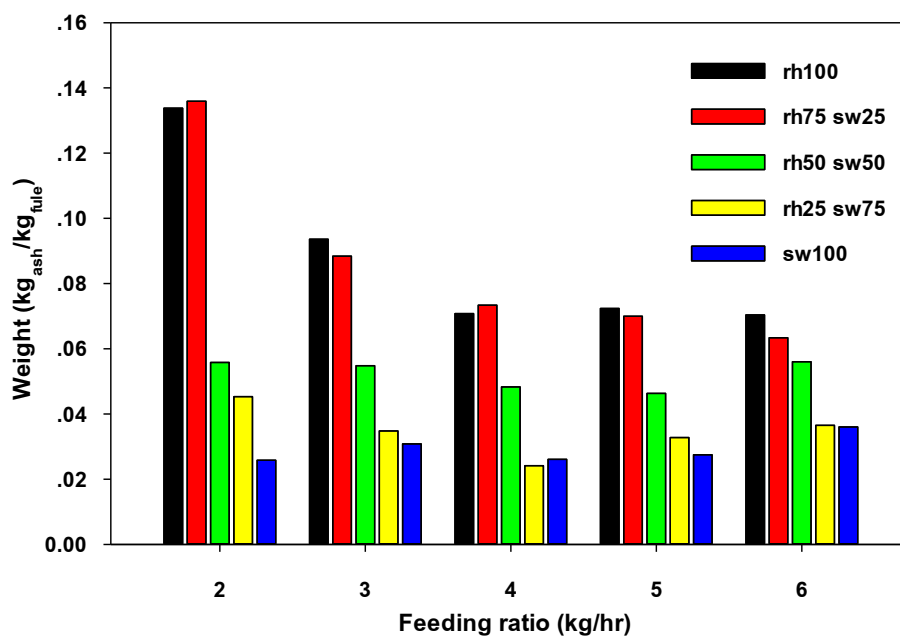


รูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างไนโตรเจนออกไซด์ ( $\text{NO}_x$ ) และอัตราส่วนอากาศส่วนเกิน (Excess air) (rh คือ แกลบอัดเม็ด และ sw คือ ซีลี้อยัดเม็ด)

#### 4.2.3 เถ้าและองค์ประกอบทางเคมี

ปริมาณเถ้าจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมระหว่างแกลบอัดเม็ดและซีลี้อยัดเม็ด แสดงดังรูปที่ 4.20 พบว่าปริมาณของเถ้าจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของเชื้อเพลิงโดยจากตาราง 3.1 การวิเคราะห์ห้องค้ประกอบทางเคมีแบบละเอียดของแกลบอัดเม็ดและซีลี้อยัดเม็ด ในแกลบอัดเม็ดมีปริมาณเถ้า 16.443 เปอร์เซ็นต์ แต่ในซีลี้อยัดเม็ดมีปริมาณเถ้า 1.339 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นในการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงผสมเมื่อลดอัตราส่วนของแกลบอัดเม็ดลงและเพิ่มอัตราส่วนซีลี้อยัดเม็ดทำให้ปริมาณเถ้าลดลง แต่ในกรณีแกลบอัดเม็ด 100 เปอร์เซ็นต์และกรณีอัตราส่วนระหว่างแกลบอัดเม็ดและซีลี้อยัดเม็ด 75:25 ที่อัตราการป้อน 2 และ 3 กิโลกรัมต่อชั่วโมง มีปริมาณเถ้าที่สูงเนื่องจากอัตราการป้อนที่น้อยและส่วนผสมที่เป็นผงค่อนข้างมาก เมื่อถูกป้อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ค่อนข้างเร็วและการเผาไหม้ของแกลบอัดเม็ดจะเกิดขึ้นในช่วงปลายของห้องเผาไหม้ทำให้ระยะเวลาที่เกิดการเผาไหม้น้อยส่งผลให้มีส่วนที่

เหลือออกมาเป็นเถ้าค่อนข้างมาก ซึ่งสอดคล้องกับผลของ CO ที่มีปริมาณสูงแสดงถึงการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์



รูปที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเถ้าและอัตราการป้อนเชื้อเพลิง (rh คือ แกลบอัดเม็ด และ sw คือ ขี้เลื่อยอัดเม็ด)

ตารางที่ 4.1 แสดงปริมาณสารประกอบของเถ้า (เปอร์เซ็นต์)

สารประกอบ	ปริมาณสารประกอบ (แคลบอัดเม็ด:ซีลี้อยอัดเม็ด)				
	100:0 (4 kg/hr)	0:100 (4 kg/hr)	50:50 (2 kg/hr)	50:50 (4 kg/hr)	50:50 (6 kg/hr)
Na <sub>2</sub> O	1.101	0.83	0.113	0.102	0.093
MgO	0.527	7.177	0.893	0.941	0.605
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.151	2.88	0.415	0.442	0.251
SiO <sub>2</sub>	76.438	13.862	70.277	72.796	76.305
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.708	2.26	0.65	0.721	0.619
K <sub>2</sub> O	1.688	8.349	2.046	2.431	1.997
CaO	0.692	19.436	2.198	2.8	1.608
MnO <sub>2</sub>	0.138	0.376	0.171	0.157	0.167
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.132	1.804	0.29	0.337	0.29
SO <sub>3</sub>	0.179	1.264	0.199	0.252	0.207
TiO <sub>2</sub>	-	0.285	0.034	0.031	0.025
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.026	0.080	0.041	0.039	0.015
NiO	0.006	0.018	0.008	0.009	-
Rb <sub>2</sub> O	0.007	0.063	0.012	0.013	0.009
SrO	0.004	0.081	0.012	0.015	0.008
Cl	0.141	0.126	0.091	0.135	0.098
CuO	-	0.012	-	-	-
ZrO <sub>2</sub>	-	0.037	-	-	-
Unburned carbon	21.5327	42.3519	21.3448	18.8368	20.7562

ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.21 โดยผลของประสิทธิภาพการเผาไหม้แสดงดังตารางที่ 4.2 เชื้อเพลิงแคลบอัดเม็ด 100 เปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการเผาไหม้ 98.48 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งต่ำกว่ากรณีใช้เชื้อเพลิงซีลี้อยอัดเม็ด 100 เปอร์เซ็นต์ ที่มีประสิทธิภาพการเผาไหม้ 98.89 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อใช้เชื้อเพลิงผสมระหว่างแคลบอัดเม็ดและซีลี้อยอัดเม็ดอัตราส่วน 50:50 พบว่าค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้เพิ่มขึ้นเป็น 99.09 เปอร์เซ็นต์ เป็นผลจากการที่เชื้อเพลิงทั้งสองชนิดมีโชนการเผาไหม้ที่แตกต่างกัน เมื่อนำเชื้อเพลิงทั้งสองชนิดมาผสมกันทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์ขึ้นจะเห็นได้จากไอเสียของการเผาไหม้ และที่อัตราส่วนผสม 50:50 อัตราการป้อน 4 กิโลกรัมต่อชั่วโมงนั้นมีค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงกว่าอัตราการป้อน 2 และ 6 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

ตารางที่ 4.2 แสดงประสิทธิภาพการเผาไหม้

อัตราส่วนเชื้อเพลิง		อัตราการป้อน (kg/hr)	ประสิทธิภาพการเผาไหม้ (%)
แกลบอัดเม็ด	ขี้เลื่อยอัดเม็ด		
100	0	4	98.48
0	100	4	98.89
50	50	2	98.81
50	50	4	99.09
50	50	6	98.84

## 5. สรุปผล

### 5.1 สรุปผลการทดลอง

การวิจัยนี้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนเป็นการศึกษาการเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชัน ตัวแปรที่ศึกษาคือความเร็วต่ำสุดในการเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชัน ( $u_{mf}$ ) และความเร็วต่ำสุดในการเกิดปรากฏการณ์ฟองอากาศ ( $u_{mb}$ ) ส่วนสองศึกษาการเผาไหม้ในเตาเผาฟลูอิดไดเซชันแบบฟองอากาศโดยใช้เชื้อเพลิงผสมระหว่างแกลบอัดเม็ดผสมซีลี้อยัดเม็ด อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 2-6 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนักระหว่างแกลบอัดเม็ดและซีลี้อยัดเม็ดที่ศึกษาคือ 100:0, 0:100, 75:25, 50:50 และ 25:75 เพื่อดูกระจายอุณหภูมิภายในเขต องค์ประกอบไอเสียประสิทธิภาพการเผาไหม้ ปริมาณเถ้าและองค์ประกอบของเถ้า สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

การศึกษาความเร็วต่ำสุดในการเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชัน ( $u_{mf}$ ) โดยใช้ทรายผสมซีลี้อยัดเม็ด เมื่อเพิ่มสัดส่วนมวล (Mass fraction) ของซีลี้อยัดเม็ดพบว่าไม่ส่งผลต่อความเร็วต่ำสุดในการเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชัน ( $u_{mf}$ ) ที่สัดส่วนมวลของซีลี้อยัด 0.2-0.14 ความเร็วต่ำสุดในการเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชัน ( $u_{mf}$ ) มีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 1.85-2.03 เมตรต่อวินาที และความเร็วในการเกิดปรากฏการณ์ฟองอากาศ ( $u_{mb}$ ) ซึ่งมีค่าสูงกว่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชัน ( $u_{mf}$ ) เล็กน้อย อยู่ในช่วง 1.92-2.15 เมตรต่อวินาที

การกระจายอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ของเชื้อเพลิงผสมระหว่างแกลบอัดเม็ดผสมซีลี้อยัดเม็ด การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงทั้ง 2 ชนิดมีความแตกต่างกันโดยแกลบอัดเม็ดมีโซนการเผาไหม้ช่วงปลายของห้องเผาไหม้แต่ซีลี้อยัดเม็ดจะมีโซนการเผาไหม้ช่วงใกล้ตะแกรง เมื่อนำเชื้อเพลิงทั้ง 2 ชนิดมาผสมในอัตราส่วนโดยน้ำหนัก 75:25, 50:50 และ 25:75 พบว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิตลอดความสูงเหนือตะแกรงเบดมีค่าเฉลี่ยใกล้เคียงกัน ต่างจากการใช้เชื้อเพลิงชนิดเดียว และการเพิ่มปริมาณซีลี้อยัดเม็ดเป็น 50 เปอร์เซ็นต์ และ 75 เปอร์เซ็นต์ ยังช่วยลดปริมาณเถ้าลงได้ ในการผสมเชื้อเพลิงทั้ง 2 ชนิดที่อัตราส่วนผสม 50:50 อัตราการป้อน 2, 4 และ 6 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ให้สูงกว่าการใช้เชื้อเพลิงซีลี้อยัดเม็ด 100 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการป้อน 6 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ของเชื้อเพลิงผสมระหว่างแกลบอัดเม็ดผสมซีลี้อยัดเม็ดที่อัตราส่วน 50:50 มีประสิทธิภาพการเผาไหม้ 98.84 เปอร์เซ็นต์ สูงกว่าการใช้แกลบอัดเม็ดและซีลี้อยัดเม็ด 100 เปอร์เซ็นต์ รวมทั้งยังช่วยลดปริมาณไอเสีย โดยเฉพาะคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่ 690 ppm ซึ่งการใช้เชื้อเพลิงเดียวมีความเสี่ยงในการเกิดปัญหา ในกรณีของแกลบอัดเม็ดที่มีซิลิกา (Si) เป็นองค์ประกอบในปริมาณสูงมีโอกาสที่จะเกิดการรวมตัวกันเป็นก้อนของเถ้าหลอม ในส่วนของซีลี้อยัดเม็ดเกิดการเผาไหม้ให้อุณหภูมิสูงกว่า 850 องศาเซลเซียส และมีปริมาณ CaO ที่สูงใกล้เคียงค่าวิกฤติที่ 23-35 เปอร์เซ็นต์ จึงมีความเสี่ยงในการเกิดตะกรัน เมื่อใช้เชื้อเพลิงผสมระหว่างแกลบอัดเม็ดผสมซีลี้อยัดเม็ดที่อัตราส่วน 50:50 พบว่าช่วยลดปริมาณของ CaO, Na<sub>2</sub>O และ K<sub>2</sub>O ลง และอุณหภูมิการเผาไหม้ต่ำกว่า 850 จึงทำให้ลดความเสี่ยงในการเกิดตะกรัน และการรวมตัวกันเป็นก้อนของเถ้าหลอม



## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยมุ่งเน้นการศึกษาในส่วนของการใช้เชื้อเพลิงผสมในการศึกษาการเผาไหม้ในระบบเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบฟองอากาศซึ่งยังพบปัญหาในด้านปริมาณไอเสียและปริมาณเถ้าที่สูง ซึ่งทางผู้วิจัยได้เสนอแนวทางเพื่อเป็นการพัฒนาการใช้เชื้อเพลิงผสมในการศึกษาการเผาไหม้ในระบบเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบฟองอากาศดังนี้

1) เพิ่มความยาวห้องเผาไหม้ให้สูงขึ้นอีกประมาณ 1-1.2 เมตร เพื่อเพิ่มระยะทางในการเผาไหม้ซึ่งคาดว่าจะช่วยลดปริมาณไอเสียและปริมาณของเถ้าที่สูงลงได้

2) ปรับตำแหน่งทางเข้าอากาศก่อนผ่านตะแกรงให้มีขนาดเล็กลง โดยปรับให้มีลักษณะเป็น diffuser เพื่อลดปริมาณอากาศปฐุมภูมิ โดยเพิ่มปริมาณอากาศทุติยภูมิแทนเพื่อช่วยให้การเผาไหม้ช่วงปลายของห้องเผาไหม้ดีขึ้นและช่วยลดปริมาณไอเสีย

3) เปลี่ยนจากการป้อนเชื้อเพลิงผสมเป็นการป้อนแยกกัน โดยให้เชื้อเพลิงแกลบอัดเม็ดที่มีความหนาแน่นน้อยกว่า และขนาดเล็กกว่าป้อนที่ตำแหน่งใกล้ตะแกรง ส่วนชีเลื่อยอัดเม็ดอาจจะป้อนที่ตำแหน่งเดิมหรือสูงกว่าเดิม

## บรรณานุกรม

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) กระทรวงพลังงาน. (2557). รายงานพลังงานทดแทนของประเทศไทย.

นิยม ศรีศิริสิทธิกุล และ พงษ์เจต พรหมวงศ์. (2003). อิทธิพลของตำแหน่งการฉีดอากาศทุติยภูมิต่ออุณหภูมิการเผาไหม้ในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบอากาศหมุนวน. วิศวกรรมลาดกระบัง. 20(1)

ประสาน สถิตย์เรืองศักดิ์, สมชาติ โสภณธฤทธิ์ และ ฐานิตย์ เมธียนนท์ (2550). การเผาไหม้กลบร่วมกับถ่านหินบิทูมินัสในเตาเผาไหม้ฟลูอิดไดซ์เบดแบบห้องเผาไหม้สั้น: การเผาไหม้ถ่านหินแบบขั้นเพื่อลดปัญหาการเกาะตัวของเบด. ใน การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 21, 17-19 ตุลาคม 2550 จังหวัดชลบุรี.

ประสาน สถิตย์เรืองศักดิ์, ปรัชญา บุญประสิทธิ์ และ ฐานิตย์ เมธียนนท์. (2557). อิทธิพลของการจ่ายอากาศทุติยภูมิที่มีต่อสมรรถนะของการเผาไหม้ถ่านหินภายในเตาเผาไหม้ฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน. ใน การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 28 15-17 ตุลาคม 2557 จังหวัดขอนแก่น.

พลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2556). ฐานข้อมูลศักยภาพชีวมวลในประเทศไทย ประจำปีเพาะปลูก พ.ศ. 2556. (ออนไลน์). สืบค้นจาก :

<http://webkc.dede.go.th/testmax/node/2450> [13 มิถุนายน 2560].

พิธา ศรีบุศย์ดี. (2552). การศึกษาปัจจัยที่ควบคุมการเกิดตะกรันของหม้อไอน้ำของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ. ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม. คณะวิศวกรรมศาสตร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภัทรพันธ์ ทองยศ, สุภัทรชัย สุวรรณพันธุ์, ธีรพัฒน์ ชมภูคำ และ พงษ์เจต พรหมวงศ์. (2555). อิทธิพลของครีบสามเหลี่ยมรูปตัววีภายในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีผลต่อพฤติกรรมการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกลบ. ใน การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13, 4-5 เมษายน 2555 จังหวัดเชียงใหม่.

วัชระ ลอยสมุทร. (2558). โครงการศึกษาพัฒนาระบบฐานข้อมูลศักยภาพชีวมวลในประเทศไทย. การดำเนินการด้านธุรกิจพลังงานทดแทน. หน้า 140-145.

ศูนย์สารสนเทศการเกษตร สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร (ออนไลน์). สืบค้นจาก :

<http://aginfo.oae.go.th/ewtnews/majorrice.html> และ

<http://aginfo.oae.go.th/ewtnews/secondrice.html> [13 มิถุนายน 2560].

ศูนย์สารสนเทศการเกษตร สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร (ออนไลน์). สืบค้นจาก :

<http://aginfo.oae.go.th/ewtnews/rubber.html>. [13 มิถุนายน 2560].

สำนักงานสถิติแห่งชาติ. (2554). รายงานสรุปผลที่สำคัญการสำรวจภาวะการทำงานของประชากร.

สุนิรัตน์ พุกุดะ. (2558). การอบรมเชิงปฏิบัติการ “เทคโนโลยีผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากชีวมวลสำหรับภาคอุตสาหกรรม”. 25 สิงหาคม 2558 ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีวิทยาเขตบางขุนเทียน.

สุภัทรชัย สุวรรณพันธ์, ชินรัชย์ เจริญพงษ์ และ พงษ์เจต พรหมวงศ์. (2554). การเผาไหม้ชีวมวลในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดที่มีศรีรูปตัววี. ใน การประชุมวิชาการ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ประจำปี 2554. “การพัฒนาอนาคตชนบทไทย: ฐานรากที่มั่นคงเพื่อการพัฒนาประเทศไทยอย่างยั่งยืน” 27-29 มกราคม 2554.

สุวิทย์ เตีย. (2535). การถ่ายเทความร้อนในฟลูอิดไดซ์เบด เอกสารประกอบการฝึกอบรมวิชาการ เรื่อง การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งในระบบฟลูอิดไดซ์เบด. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. กรุงเทพมหานคร. หน้า ส1-ส13.

สมบูรณ์ พุกขานุกศักดิ์. (2555). วารสารยางพารา. ฉบับอิเล็กทรอนิกส์ 10 กรกฎาคม-กันยายน 2555.

อติญาพร สิงห์ชัย. (2551). การประเมินความน่าจะเป็นในการเกิด Slagging และ Fouling โดยการใช้ข้อมูลทางกายภาพและทางเคมีของชีวมวล. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี. คณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

Armesto, L., Bahilloa, A., Veijonenb, K., Cabanillas, A. and Otero, J. (2002). Combustion behaviour of rice husk in a bubbling fluidised bed. *Biomass and Bioenergy* 23: 171–179

Atimtay, A.T. and Varol, M. (2009). Investigation of co-combustion of coal and olive cake in a bubbling fluidized bed with secondary air injection. *Fuel*. 88: 1000–1008.

Basu, P. (2006). *Combustion and Gasification in Fluidized Beds*.

Basu, P. (2010). *Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory*. pp.119-127.

Bhattacharya, S.C. and Wu, W. (1989). Fluidized-bed combustion of rice husk for disposal and energy recovery. *Energy from Biomass and Wastes*. 12: 591-601.

Duan, F., Liu, J., Chyang, C.S., Hu, C.H. and Tso, J. (2013). Combustion behavior and pollutant emission characteristics of RDF (refuse derived fuel) and sawdust in a vortexing fluidized bed combustor. *Energy*. 57:421-426.

Ergun, S. (1952). Fluid flow through packed columns, *Chemical Engineering Progress*. 48: 89-94.

Geldart, D. (1973). Types of gas fluidization, *Powder Technology*. 7: 285-292.

Gomez-Barea, A., Leckner, B. and Campoy, M., (2008). Conversion of char in CFB gasifiers. In *Circulating Fluidized Bed Technology* vol. 10. pp.727–732.

Howard, J.R. (1983). *Fluidized Beds. Combustion and Applications*. p. 131.

Jiliang, M., Xiaoping, C., and Daoyin, L. (2013). Minimum fluidization velocity of particle with wide size distributor at high temperature. *Powder Technology*. 234: 67-75.

Johnsson, F., Zijerveld, R.C., Schoutenb, J.C. and van den Bleek, C.M. (2000). Characterization of fluidization regimes by time-series analysis of pressure fluctuations. *International Journal of Multiphase Flow*. 26(4): 663–715.

Karmakar, M.K., Haldar, S. and Chatterjee, P.K. (2013). Studies on fluidization behavior of sand and biomass mixture. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. 3: 1-6.

Kaynak, B., Topalb, H. and Atimtay, A.T. (2005). Peach and apricot stone combustion in a bubbling fluidized bed. *Fuel Processing Technology*. 86: 1175– 1193.

Kumar, J.V. and Pratt, B.C. (1996). Compositional analysis of some renewable biofuels. *American Laboratory*. 28 (8): 15–20.

Kunii, D. and Levenspiel, O. (1993). *Fluidization Engineering*, second ed.

Kuprianov, V.I. and Arromdee, P. (2013). Combustion of peanut and tamarind shells in a conical fluidized-bed combustor: A comparative study. *Bioresource Technology*. 140: 199–210.

Kuprianov, V.I., Kaewklum, R. and Chakritthakul, S. (2011). Effects of operating conditions and fuel properties on emission performance and combustion efficiency of a swirling fluidized-bed combustor fired with a biomass fuel. *Energy*. 36: 2038-2048.

Lim, M.T. and Alimuddin, Z. (2008). Bubbling Fluidized bed gasification performance, process findings and energy analysis. *Renewable Energy*. 33 (10): 2339–2343.

Li, S., Li, H., Li, W., Xu, M., Eddings, E.G., Ren, Q. and Lu, Q. (2017). Coal combustion emission and ash formation characteristics at high oxygen concentration in a 1 MWth pilot-scale oxy-fuel circulating fluidized bed. *Applied Energy*. 197: 203–211.

Lo, K.C., Chyang, C.S. and Lo, H.H. (2004). A Study of Rice Husks Combustion in a Vortexing Fluidized Bed Combustor. Asian Pacific Confederation of Chemical Engineers congress program and abstracts.

Loppinet-Serani, A., Aymonie, C. and Cansell, F. 2008. Current and foreseeable applications of supercritical water for energy and the environment. *Chemistry & Sustainability* 1: 486–503.

Madhiyanon, T., Sathitruangsak, P. and Soponronnarit, S. (2010). Combustion characteristics of rice-husk in a short-combustion-chamber fluidized-bed combustor (SFBC). *Applied Thermal Engineering*. 30: 347–353.

Mansaray, K.G. and Ghaly, A.E. (2007). Agglomeration Characteristics of Alumina Sand-Rice Husk Ash Mixtures at Elevated Temperatures. *Energy Sources*. 19: 1005-1025.

Narváez, I., Orío, A., Aznar, M.P. and Corella, J. (1996). Biomass gasification with air in an atmospheric bubbling fluidized bed. Effect of six operational variables on the quality of the produced raw gas. *Industrial Engineering Chemistry and Research*. 35 (7): 2110–2120.

Neubauer, Y. and Liu, H. (2013). *Biomass combustion science, technology and engineering*.

Permchart, W. and Kouprianov, V.I. (2004). Emission performance and combustion efficiency of a conical fluidized-bed combustor firing various biomass fuels. *Bioresource Technology*. 92: 83–91.

Presto, F., Anthony, J., Desai, E.D.L., and Friedrich, F.D. (1987). Combustion trials of rice hulls in a pilot-scale fluidized bed, *Proc. In Int. Conf. Fluid. Bed Combust.* pp.1123-1127.

Qiana, F.P., Chyang, C.S., Huang, K.S. and Tso, J. (2011). Combustion and NO emission of high nitrogen content biomass in a pilot-scale vortexing fluidized bed combustor. *Bioresource Technology*. 102: 1892–1898.

Reh, L. (1986). The circulating fluidized bed reactor-the key to efficient gas–solid contacting process. In *Circulating Fluidized Bed Technology*. pp.105-118,

Shaul, S., Rabinovich, E. and Kalman, H. (2012). Generalized flow regime diagram of fluidized beds based on the height to bed diameter ratio. *Powder Technology*: 228: 264–271.

Sirisomboon, K. and Charernporn, P. (2017). Effects of air staging on emission characteristics in a conical fluidized-bed combustor firing with sunflower shells. *Journal of the Energy Institute*. 90: 316-323.

Squires, A.M. (1986). The story of fluid catalytic cracking. In *Circulating Fluidized Bed Technology*.

Varol, M. and Atimtay, A.T. (2007). Combustion of olive cake and coal in a bubbling fluidized bed with secondary air injection. *Fuel* 86: 1430–1438.

Varol, M., Atimtay, A.T. and Olgun, H. (2014). Emission characteristics of co-combustion of a low calorie and high-sulfur-lignite coal and woodchips in a circulating fluidized bed combustor: Part 2. Effect of secondary air and its location. *Fuel*. 130: 1–9.

Wang, Y., Shao, Y., Matovic, M.D. and Whalen, J.R. (2015). Exploring switchgrass and hardwood combustion on excess air and ash fouling/slugging potential: Laboratory combustion test and thermogravimetric kinetic analysis. *Energy Conversion and Management*. 97: 409–419.

Werther, J., Saenger, M., Hartge, E.U., Ogada, T. and Siagi, Z. (2000). Combustion of agricultural residues. *Progress in Energy and Combustion Science*. 26: 1–27.

Yokoyama, S. (2008). คู่มือสารชีวมวลเอเชีย แนวทางการผลิตและใช้สารชีวมวล.

ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก การคำนวณแบบเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด

### การคำนวณการออกแบบเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด

ขั้นตอนในการคำนวณหาขนาดของเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบพองอากาศมีดังนี้

#### 1) หาค่าความหนาแน่นของทราย

ขนาดเม็ดทรายที่เลือกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ	3.0-5.0	mm
ปริมาณทรายที่ใช้คิดเป็นน้ำหนักของทราย	300	g
ทรายที่ใช้ปริมาณ 300 g คิดเป็นปริมาตร (เฉพาะเม็ดทราย)	170	cm <sup>3</sup>
ดังนั้น ความหนาแน่นของทรายที่ใช้มีค่า 300/170 =	1.760	g/cm <sup>3</sup>

#### 2) หาสัดส่วนช่องว่างของทราย

ขนาดทรายที่ใช้มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3.0-5.0 mm ปริมาณ 300 g คิดเป็นปริมาตรของทรายรวมช่องว่างเท่ากับ 200 cm<sup>3</sup> โดยมีปริมาตรของช่องว่างเท่ากับ 70 cm<sup>3</sup>

ดังนั้น จะได้สัดส่วนช่องว่างของทรายที่ใช้ (void ratio,  $\epsilon_m$ )

$$\epsilon_m = \frac{\text{void volume}}{\text{total volume}}$$

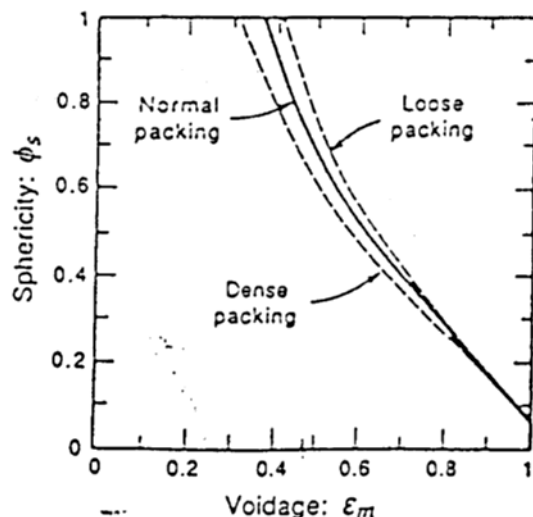
$$\epsilon_m = 70/200$$

$$\epsilon_m = 0.35$$

กำหนดให้เบดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.098 เมตร(ตามขนาดท่อสแตนเลส  $\phi$  3.5 นิ้ว ที่เลือกใช้) และเผาเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดซึ่งมีความหนาแน่นในช่วง 1,000-1,200 กก./ลบ.ม. ในอัตราการป้อนเชื้อเพลิง 2 3 4 5 และ 6 กก./ชม. และใช้ทรายเป็นตัวช่วยในการเผาไหม้

จากค่าสัดส่วนช่องว่าง สามารถหาค่าความกลมของอนุภาคได้จากรูปที่ ก.1 ซึ่งค่าความกลมของอนุภาคมีค่าประมาณ 0.9 โดยเลือกจากเส้น Normal Packing





รูปที่ ก.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความกลมและความพรุนของเบต

### 3) หาค่าความเร็วต่ำสุดขณะเกิดฟลูอิดไดซ์เบต

เมื่ออากาศไหลผ่านอนุภาคของแข็งในเบตนิ่งและเพิ่มความเร็วของอากาศขึ้นจนถึงค่าที่ทำให้อนุภาคของแข็งเริ่มมีการเคลื่อนที่ เรียกว่าความเร็วที่จุดนี้ว่า ความเร็วต่ำสุดขณะเกิดฟลูอิดไดซ์เบต ( $u_{mf}$ ) ซึ่งสามารถหาค่าได้จากสมการ

$$150 \frac{(1-\epsilon_{mf})}{\epsilon_{mf}^3 \phi_s^2} \frac{d_p u_{mf} \rho_f}{\mu_f} + \frac{1.75}{\epsilon_{mf}^3 \phi_s} \frac{d_p u_{mf} \rho_f}{\mu_f} = \frac{d_p^3 \rho_f (\rho_p - \rho_f) g}{\mu_f^2}$$

โดยที่

$$K_1 = \frac{1.75}{\epsilon_{mf}^3 \phi_s} \quad \text{และ} \quad K_2 = \frac{150(1-\epsilon_{mf})}{\epsilon_{mf}^3 \phi_s^2}$$

เมื่อ  $u_{mf}$  คือ ความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดซ์เบต

$\epsilon_{mf}$  คือ สัดส่วนช่องว่างของเบตที่เกิดฟลูอิดไดซ์เบต

$d_p$  คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาค

$\mu_f$  คือ ค่าความหนืดของของไหล

$\phi_s$  คือ สัมประสิทธิ์ความกลมของอนุภาค

$g$  คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก

$\rho_p, \rho_f$  คือ ความหนาแน่นของอนุภาคและก๊าซตามลำดับ

มีผู้ทำการศึกษาเพื่อหาค่า  $K_1$  และ  $K_2$  พบว่ามีค่าค่อนข้างคงที่สำหรับอนุภาคชนิดต่างๆ ในช่วง  $Re_p$  ตั้งแต่ 0.001-4,000 ดังตารางที่ 1 ซึ่งสรุปค่า  $K_1$  และ  $K_2$

ตารางที่ ก.1 แสดงค่า  $K_1$  และ  $K_2$ 

Investigators	First, $K_2/2K_1$	Second, $1/K_1$
Wen and Yu (1966)		
284 data points from the literature	33.7	0.0408
Richardson (1971)	25.7	0.0365
Sexena and Vogel (1977)		
Dolomite at high temperature and pressure	25.3	0.0571
Babu et al. (1978)		
Correlation of reported data until 1977	25.3	0.0651
Grace (1982)	27.2	0.0408
Chitester et al. (1984)		
Coal, char, Ballotini; up to 64 bar	28.7	0.0494

ในที่นี้ เลือกใช้ค่า  $1/K_1$  เท่ากับ 0.0408

จะได้  $K_1 = 24.5098$

จากสมการ  $\epsilon_{mf} = \sqrt[3]{\frac{1.75}{K_1 \phi_s}}$

เมื่อแทนค่า  $K_1$  และ  $\phi_s$  จะได้

$$\epsilon_{mf} = 0.430$$

จากสมการ

$$150 \frac{(1-\epsilon_{mf})}{\epsilon_{mf}^3 \phi_s^2} \frac{d_p u_{mf} \rho_f}{\mu_f} + \frac{1.75}{\epsilon_{mf}^3 \phi_s} \frac{d_p u_{mf} \rho_f}{\mu_f} = \frac{d_p^3 \rho_f (\rho_p - \rho_f) g}{\mu_f^2}$$

ลดรูปสมการเป็น  $Au_{mf}^2 + Bu_{mf} - Ar = 0$

โดยที่  $Ar = \frac{d_p^3 \rho_f (\rho_p - \rho_f) g}{(\mu_f)^2}$

แทนค่าต่างๆ จะได้

$$Ar = 4,089,796.26$$

$$A = 1,936,577.1$$

$$B = 355,003.54$$

$$K_2 = 1,331.26$$

ดังนั้น จากสมการ จะได้

$$1,936,577.1u_{mf}^2 + 355,003.54u_{mf} - 4,089,796.26 = 0$$

และความเร็วต่ำสุดขณะเกิดฟลูอิดไดเซชัน

$$u_{mf} = 1.36 \text{ m/s}$$

#### 4) หาค่าความเร็วสุดท้ายของฟลูอิดไดเซชัน

เมื่ออากาศไหลผ่านอนุภาคของแข็งในเบตนิ่งและเพิ่มความเร็วของอากาศไปจนถึงความเร็วที่ทำให้อนุภาคของแข็งลอยหลุดหลุดพ้นจากโซนห้องเผาไหม้ เรียกความเร็วที่จุดนี้ว่า ความเร็วสุดท้ายของฟลูอิดไดเซชัน ( $u_t$ )

สำหรับการหาความเร็วสุดท้ายของฟลูอิดไดเซชัน จะต้องทราบค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของอนุภาคกับของไหล และตรวจสอบค่าเรโนลด์นัมเบอร์ว่าสอดคล้องกันหรือไม่

กำหนดให้  $C_D$  คือสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของทรงกลมกับอากาศ

และค่า  $C_D = 0.43$  ในช่วงค่าเรโนลด์นัมเบอร์ของอนุภาค

$$500 < Re_p < 200,000$$

คำนวณหาความเร็วสุดท้ายของฟลูอิดไดเซชันได้จากสมการ

$$u_t = \frac{4gd_p(\rho_p - \rho_f)}{3\rho_f C_D}^{\frac{1}{2}}$$

แทนค่าต่างๆ จะได้

$$u_t = 13.35 \text{ m/s}$$

นำค่า  $u_t$  ที่ได้ไปคำนวณหา  $Re_p$  จากสมการ

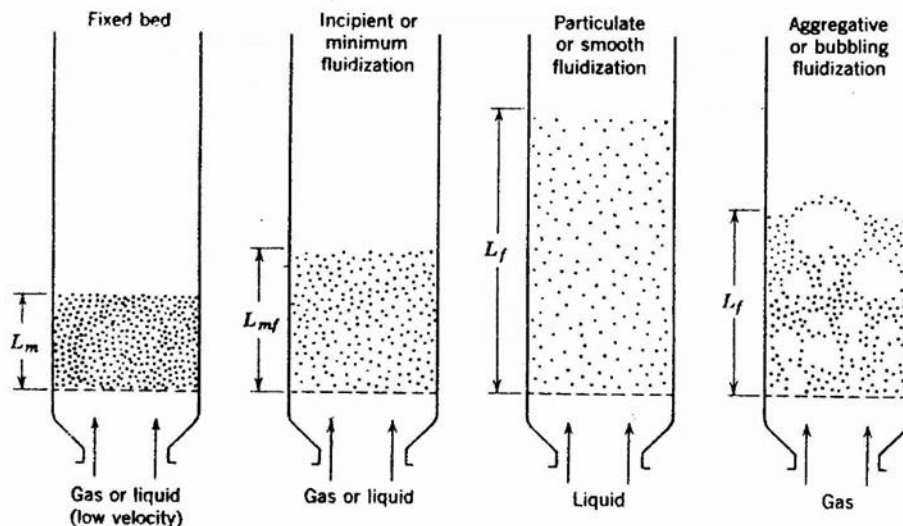
$$Re_p = \frac{d_p u_t \rho_f}{\mu_f}$$

$$Re_p = 3,561$$

จะเห็นได้ว่าค่า  $Re_p$  ที่คำนวณได้อยู่ในช่วงที่กำหนด คือ  $500 < (Re_p = 3,561) < 200,000$

#### 5) หาค่าความสูงของเบตขณะเกิดฟลูอิดไดเซชัน

รูปที่ ก.2 แสดงขั้นตอนการเกิดฟลูอิดไดเซชัน ตั้งแต่เบตนิ่งไปจนถึงการเกิดฟองอากาศระยะความสูงของเบตที่สภาวะต่างๆแสดงอยู่ในรูป ซึ่งสามารถหาระยะต่างๆได้ดังนี้



รูปที่ ก.2 แสดงลักษณะการเกิดฟลูอิดไดซ์เซชัน (สุวิทย์ เตีย.2535)

ความสูงเริ่มต้นของการเกิดฟลูอิดไดซ์เซชันหาได้จากสมการ

$$L_{mf} = L_m \frac{(1 - \epsilon_m)}{(1 - \epsilon_{mf})}$$

เมื่อ  $L_{mf}$  คือความสูงเริ่มต้นของเกิดฟลูอิดไดซ์เซชัน  
 $L_m$  คือ ความสูงของทราย

กำหนดให้ความสูงของทราย ( $L_m$ ) ที่ใช้ในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบด เท่ากับ 0.1 m จากการแทนค่าในสมการ

$$L_{mf} = 0.114 \quad \text{m}$$

### 6) หาคความสูงของห้องเผาไหม้ (Fluidized bed incinerator)

จากรูปที่ 2 ความสูง  $L_f$  สำหรับ bubbling fluidization สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\frac{L_f}{L_{mf}} = \frac{14.314 (u - u_{mf})^{0.738} d_p^{1.006} \rho_p^{0.376}}{\rho_p^{0.126} u_{mf}^{0.937}} + 1$$

เมื่อ  $L_f$  คือ ความสูง bubbling fluidized bed หรือ ความสูงในโซนที่มีการเผาไหม้  
 จากผลการศึกษาความเร็วในการเกิดฟองอากาศ (bubble) พบว่า  $u_b = 3 u_{mf}$   
 แทนค่าต่างๆในสมการที่ จะได้

$$L_f = 0.191 \quad \text{m}$$

## 7) หาความสูง freeboard

ในการเกิดฟลูอิดไดเซชัน พบว่าระยะ Transport Disengaging Height (TDH) หรือระยะความสูงห่อเผา (freeboard) ควรมีค่า

$$TDH \geq 3L_f$$

ซึ่งจะได้ว่า  $TDH \geq 3 \times 0.191$

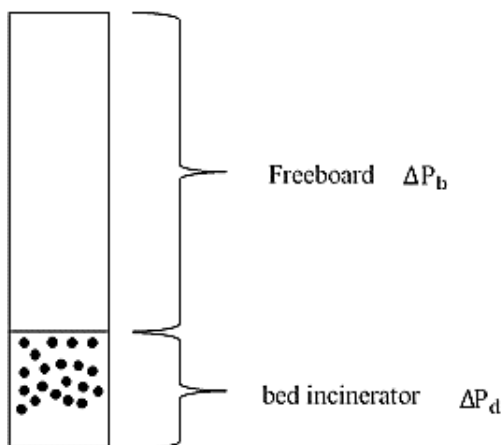
$$TDH \geq 0.573 \approx 0.6 \text{ m}$$

ซึ่งในการออกแบบเพื่อสร้างเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดขนาด lab-scale นี้ ได้เผื่อระยะความสูงของเตาไว้

ประมาณ 20 เซนติเมตร (เผื่อระยะห่อเผา freeboard 20 ซม.) ดังนั้นความสูงของเตาจึงมีค่าเท่ากับ 0.8 เมตร

## 8) คำนวณระบบป้อนอากาศ

จากคุณสมบัติของอนุภาคของของไหลในการเกิดฟลูอิดไดซ์เซชันในเตา สามารถคำนวณความดันแตกต่างระหว่างเบดได้จากสมการ



รูปที่ ก.3 แสดงความดันแตกต่างระหว่างเบดและห่อเผา (freeboard)

$$\frac{\Delta P_b}{L_{mf}} = g(\rho_p - \rho_f)(1 - \epsilon_{mf})$$

แทนค่าต่างๆในสมการ

$$\Delta P_b = 1,868.59 \text{ Pa}$$

$$\Delta P_b = 190.54 \text{ mmH}_2\text{O}$$

และจากความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างระหว่าง freeboard

$$\Delta P_d = 0.3\Delta P_b$$

$$\Delta P_d = 560.57 \text{ Pa}$$

จะได้  $\Delta P_d = 57.16 \text{ mmH}_2\text{O}$

ความแตกต่างความดันทั้งหมดในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบด

$$\Delta P_t = \Delta P_b + \Delta P_d$$

$$\Delta P_t = 2429.16 \text{ Pa}$$

$$\Delta P_t = 247.70 \text{ mmH}_2\text{O}$$

ค่าความแตกต่างความดันที่คำนวณได้นี้จะนำไปใช้ในการเลือกขนาดของโบลเวอร์ ในการสร้างให้เกิดฟลูอิดไดซ์เซชัน

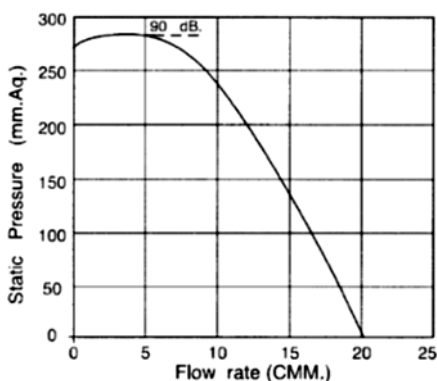
สำหรับการเลือกขนาดของโบลเวอร์จะนำค่าความเร็วสุดท้ายของฟลูอิดไดซ์เซชัน ( $u_t$ ) มาเปรียบเทียบกับค่าความเร็วสูงสุดของอากาศที่โบลเวอร์ทำได้ และต้องสามารถสร้างค่าความแตกต่างความดันระหว่างเบดได้ตั้งแต่ 247.70 mm.H<sub>2</sub>O ขึ้นไป ความเร็วอากาศที่โบลเวอร์ทำได้ต้องมีความเร็วมากกว่าความเร็วที่ทำให้เกิดฟองอากาศ ( $u_b$ )

อุปกรณ์ที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้เป็น High Pressure Blower (Type AV-D1216) ซึ่งมีข้อมูลจำเพาะดังตารางที่ ก.2 และความสัมพันธ์ระหว่างความดันสถิตย์และอัตราการไหลอากาศ ดังรูปที่ ก.4

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลจำเพาะของ High Pressure Blower : Type AV-D1216

Motor			Fan Speed	Static Pressure	Capacity	
HP.	P.	V.	RPM.	mm.Aq.	CMM.	CFM.
3	2	220/380	2,800	275	5	180

**Type AV-D1216**



รูปที่ ก.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันสถิตย์และอัตราการไหลอากาศ

จากรูปที่ 4 ที่ความดันแตกต่าง 275 mm.H<sub>2</sub>O โบลเวอร์จะมีอัตราการไหล 5 CMM (m<sup>3</sup>/min) หรือเท่ากับ 8.5 m/s ในขณะที่ความเร็วสุดท้ายของฟลูอิดไดซ์เซชัน ที่คำนวณได้ในหัวข้อ 10.4 มีค่าเท่ากับ 8.18 m/s ซึ่งมีค่าต่ำกว่าความเร็วที่โบลเวอร์ทำได้ ดังนั้นจึงสามารถเลือกใช้อุปกรณ์จ่ายอากาศนี้ ในชุดทดลองได้

## ภาคผนวก ข การคำนวณอัตราส่วนอากาศทางทฤษฎี

การคำนวณปริมาณอากาศที่ต้องใช้ในการเผาไหม้

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแกลบอัดเม็ด

ตารางที่ ข.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีแบบละเอียดของแกลบอัดเม็ด (Ultimate Analysis) (Air dry basis)

รายการ	% by weight
Carbon	38.860
Hydrogen	5.380
Oxygen	35.650
Nitrogen	0.530
Sulfur	0.01

ตารางที่ ข.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีแบบประมาณของแกลบอัดเม็ด (Proximate Analysis) (Air dry basis)

รายการ	% by weight
Moisture	3.127
Volatile matter	65.498
Fixed Carbon	14.932
Ash	16.443

### 1. หาสัดส่วนมวล

ตารางที่ ข.3 การหาสัดส่วนมวลโมเลกุล

	$mf_i$	$MW_i$	$mf_i/MW_i$	$x_i$
C	0.483153	12.00	0.040263	0.458581
H <sub>2</sub>	0.066890	2.00	0.033445	0.380932
O <sub>2</sub>	0.443243	32.00	0.013851	0.157763
N <sub>2</sub>	0.006590	28.00	0.000235	0.002680
S	0.000124	32.00	0.000004	0.000044
รวม			0.087799	1.000000



ตัวอย่างการคำนวณ Carbon

คำนวณค่า  $mf_i$

$$mf_i = \frac{\% \text{carbon (by weight)}}{100\% - \% \text{ash (by weight)} - \% \text{moisture (by weight)}}$$

$$mf_i = \frac{38.860}{100 - 16.443 - 3.127} = 0.483153$$

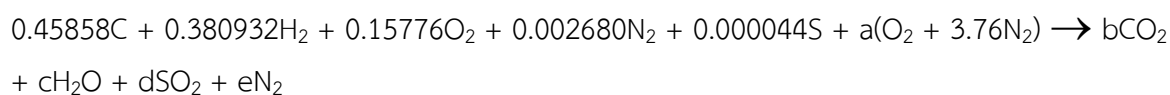
คำนวณค่า  $\frac{mf_i}{MW_i}$

$$\frac{mf_i}{MW_i} = \frac{0.483153}{12.00} = 0.040263$$

คำนวณค่า  $x_i$

$$x_i = \frac{0.040263}{0.087799} = 0.458581 \quad \frac{\text{kg-mole}_i}{\text{kg-mole}_{\text{tot}}}$$

## 2. หาสมการ stoichiometric



$$\text{Carbon atom balance} \rightarrow b = 0.45858$$

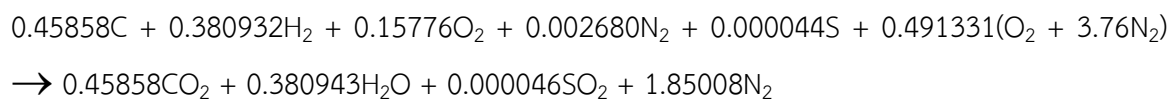
$$\text{Hydrogen atom balance} \rightarrow c = 0.380943$$

$$\text{Sulfur atom balance} \rightarrow d = 0.000046$$

$$\text{Oxygen atom balance} \rightarrow a = 0.491331$$

$$\text{Nitrogen atom balance} \rightarrow e = 1.85008$$

จากการดุลสมการ stoichiometric สามารถจัดรูปใหม่ได้เป็น



### 3. หา Air-fuel ratio

Molar

$$1 \text{ kmol O}_2 + 3.76 \text{ kmol N}_2 = 4.76 \text{ kmol air}$$

$$AF' = 0.49133 \times 4.76 \text{ kg-mole}_{\text{air}}/\text{kg-mole}_{\text{fuel}}$$

$$AF' = 2.34 \text{ kg-mole}_{\text{air}}/\text{kg-mole}_{\text{fuel}}$$

Mass

$$1 \text{ kmol air} = 28.97 \text{ kg}$$

$$AF = 2.338737 \times 28.96 \times 0.087799 \text{ kg}_{\text{air}}/\text{kg}_{\text{fuel}}$$

$$AF = 5.95 \text{ kg}_{\text{air}}/\text{kg}_{\text{fuel}}$$

จากการคำนวณหาสัดส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง คือ เชื้อเพลิง 1 กิโลกรัม จะใช้อากาศ 5.95 กิโลกรัม หรือ 5.02 ลูกบาศก์เมตร ในการเผาไหม้ ที่สภาวะ STP

จากตารางวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเคมีของซีล้อยัดเม็ด

ตารางที่ ข.4 การวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเคมีแบบละเอียดของซีล้อยัดเม็ด (Ultimate Analysis) (Air dry basis)

รายการ	% by weight
Carbon	48.420
Hydrogen	5.780
Oxygen	38.10
Nitrogen	0.132
Sulfur	0.010

ตารางที่ ข.5 การวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเคมีแบบประมาณของซีล้อยัดเม็ด (Proximate Analysis) (Air dry basis)

รายการ	% by weight
Moisture	6.219
Volatile matter	78.830
Fixed Carbon	13.612
Ash	1.339

## 1. หาสัดส่วนมวล

ตารางที่ ข.6 การหาสัดส่วนมวลโมเลกุล

	$mf_i$	$MW_i$	$mf_i/MW_i$	$x_i$
C	0.523788	12.00	0.043649	0.496883
H <sub>2</sub>	0.062526	2.00	0.031263	0.355884
O <sub>2</sub>	0.412150	32.00	0.012880	0.146617
N <sub>2</sub>	0.001428	28.00	0.000051	0.000581
S	0.000101	32.00	0.000003	0.000036
รวม			0.087846	1.000000

ตัวอย่างการคำนวณ Carbon

คำนวณค่า  $mf_i$

$$mf_i = \frac{\% \text{carbon (by weight)}}{100\% - \% \text{ash (by weight)} - \% \text{moisture (by weight)}}$$

$$mf_i = \frac{48.420}{100 - 1.339 - 6.219} = 0.523788$$

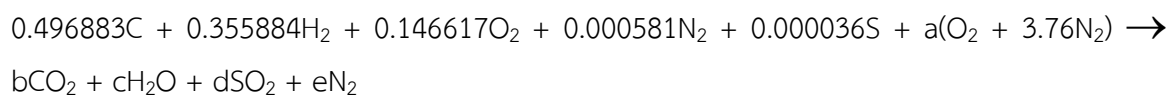
คำนวณค่า  $\frac{mf_i}{MW_i}$

$$\frac{mf_i}{MW_i} = \frac{0.523788}{12.00} = 0.0496883$$

คำนวณค่า  $x_i$

$$x_i = \frac{0.043649}{0.087846} = 0.496883 \quad \frac{\text{kg-mole}_i}{\text{kg-mole}_{\text{tot}}}$$

## 2. หาสมการ stoichiometric



Carbon atom balance  $\rightarrow$   $b = 0.496883$

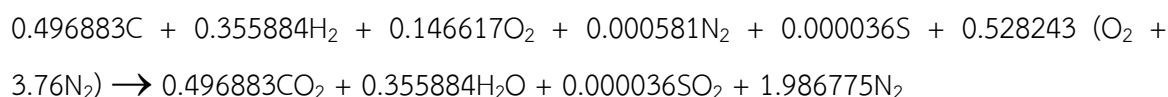
Hydrogen atom balance  $\rightarrow$   $c = 0.355884$

Sulfur atom balance  $\rightarrow$   $d = 0.000036$

Oxygen atom balance  $\rightarrow$   $a = 0.528243$

Nitrogen atom balance  $\rightarrow$   $e = 1.986775$

จากการดุลสมการ stoichiometric สามารถจัดรูปใหม่ได้เป็น



### 3. หา Air-fuel ratio

Molar

$$1 \text{ kmol } O_2 + 3.76 \text{ kmol } N_2 = 4.76 \text{ kmol air}$$

$$AF' = 0.528243 \times 4.76 \text{ kg-mole}_{\text{air}}/\text{kg-mole}_{\text{fuel}}$$

$$AF' = 2.51 \text{ kg-mole}_{\text{air}}/\text{kg-mole}_{\text{fuel}}$$

Mass

$$1 \text{ kmol air} = 28.97 \text{ kg}$$

$$AF = 2.51 \times 28.96 \times 0.087846 \text{ kg}_{\text{air}}/\text{kg}_{\text{fuel}}$$

$$AF = 6.40 \text{ kg}_{\text{air}}/\text{kg}_{\text{fuel}}$$

จากการคำนวณหาสัดส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง คือ เชื้อเพลิง 1 กิโลกรัม จะใช้อากาศ 6.40 กิโลกรัม หรือ 5.40 ลูกบาศก์เมตร ในการเผาไหม้ ที่สภาวะ STP

ตารางที่ ข.7 ปริมาณอากาศทางทฤษฎีของเชื้อเพลิงผสมระหว่างแกลบอลัดเม็ดและซีล้อยัดเม็ด

อัตราส่วนผสม		ปริมาณอากาศ (ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง)
แกลบอลัดเม็ด	ซีล้อยัดเม็ด	
100	0	5.02
0	100	5.40
75	25	5.12
50	50	5.21
25	75	5.31

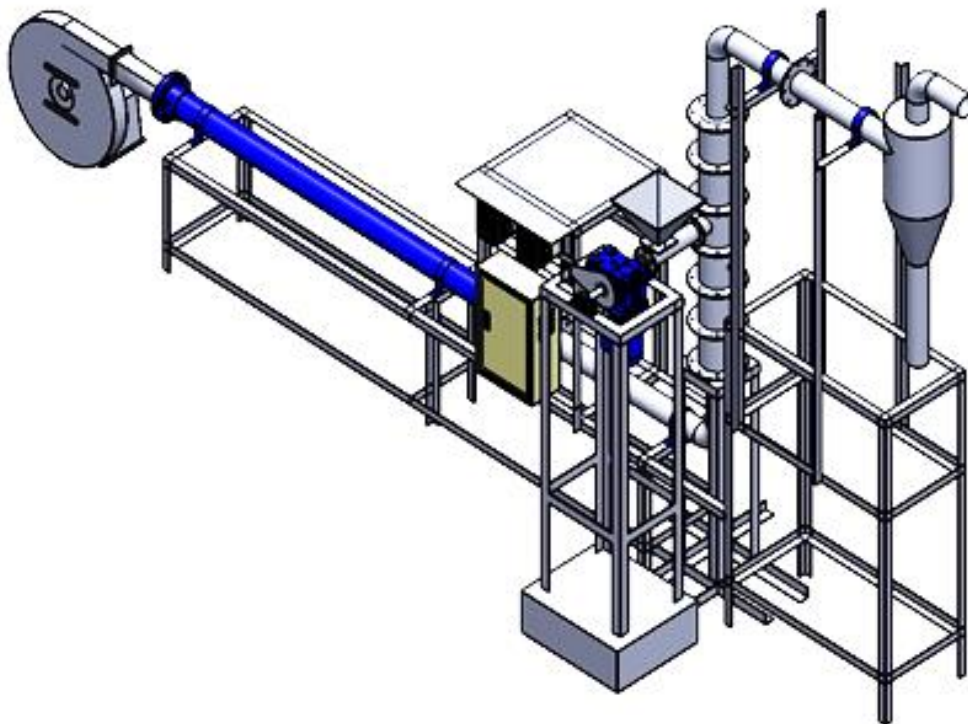
## ภาคผนวก ค แบบชุดทดลอง

## แบบชุดทดลองและอุปกรณ์

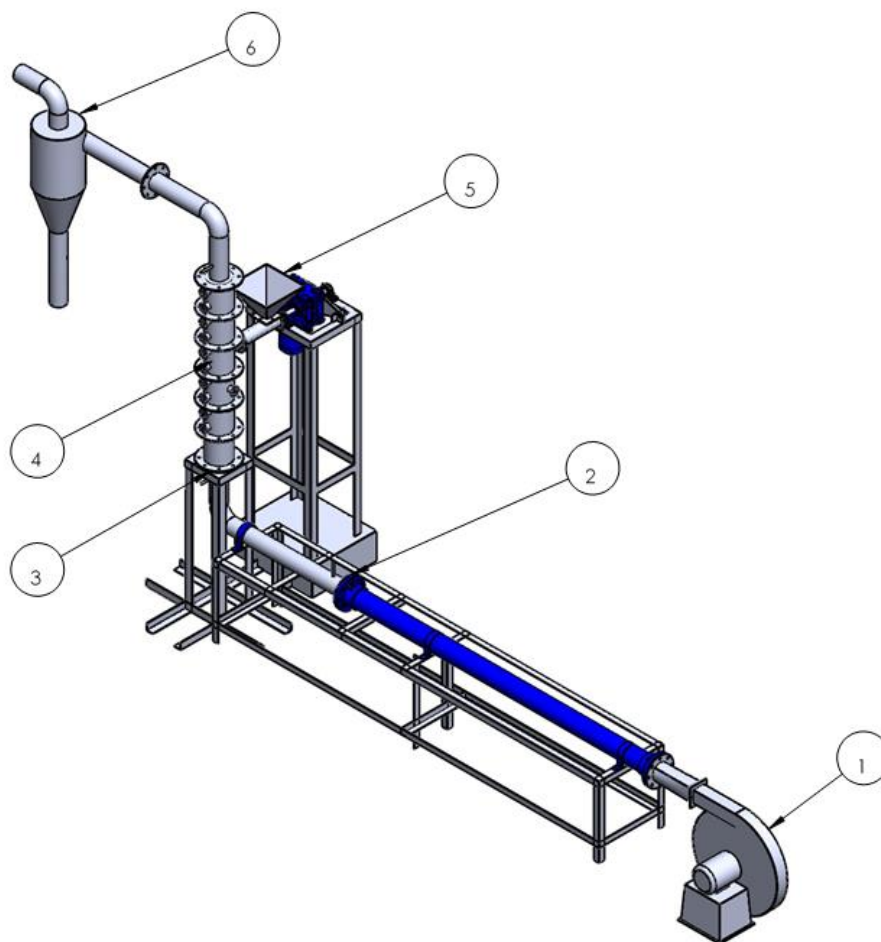
ตารางที่ ค.1 รายการชิ้นส่วนอุปกรณ์ของชุดทดลองเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบพองอากาศ

ลำดับที่	ชื่อ	จำนวน	หน่วย	ขนาด	หมายเหตุ
1	High pressure blower	1	ตัว	3 HP	Centrifugal fan (Type AV-D1216)
2	Orifice Plate	1	แผ่น	ตามแบบ	รูปที่ ค.3
3	ท่อยาง		เส้น	i.d.5mm	-
4	flow meter KI	1	ตัว	30-300 L/m	ยี่ห้อ KI
5	ปั๊มลม	1	ตัว	3 HP 25 L	ยี่ห้อ PUMA
6	Gas analyzer	1	ตัว	-	ยี่ห้อ Testo 350 xl
7	USB-6008	1	ตัว	-	ยี่ห้อ National Instruments
8	Pressure Sensor	2	ตัว	3.92 kPa	รุ่น MPXV5004DP
9	Data logger	1	ตัว	-	ยี่ห้อ WISCO 210L
10	ปลอกเทอร์โมคัปเปิ้ล	8	อัน	i.d.24.5mm	-
11	เทอร์โมคัปเปิ้ล type k	6	เส้น	1.5 m	-
12	ท่อ PVC	1	เส้น	2 m	-
13	Motor	1	ตัว	0.37 KW 0.5 HP	ยี่ห้อ TEC Electric
14	4PB5 Gear box	1	ตัว	1:100	รุ่น NMRV-P063 I 100
15	Pitot tube	1	ตัว	-	-
16	ฐานวางเบด	1	อัน	ตามแบบ	รูปที่ ค.4
17	ตะแกรง	1	แผ่น	i.d. 2 mm	-
18	ห้องเผาไหม้ชั้นที่ 1	1	อัน	ตามแบบ	รูปที่ ค.5
19	ห้องเผาไหม้ชั้นที่ 2, 3, 5 และ 6	4	อัน	ตามแบบ	รูปที่ ค.6
20	ห้องเผาไหม้ชั้นที่ 4	1	อัน	ตามแบบ	รูปที่ ค.7
21	สกรูลำเลียงเชื้อเพลิง	1	อัน	ตามแบบ	รูปที่ ค.8
22	ท่อลำเลียงเชื้อเพลิง	1	อัน	ตามแบบ	รูปที่ ค.9

ลำดับที่	ชื่อ	จำนวน	หน่วย	ขนาด	หมายเหตุ
23	Hopper	1	อัน	ตามแบบ	รูปที่ ค.10
24	ไซโคลนดักฝุ่น	1	อัน	ตามแบบ	รูปที่ ค.11



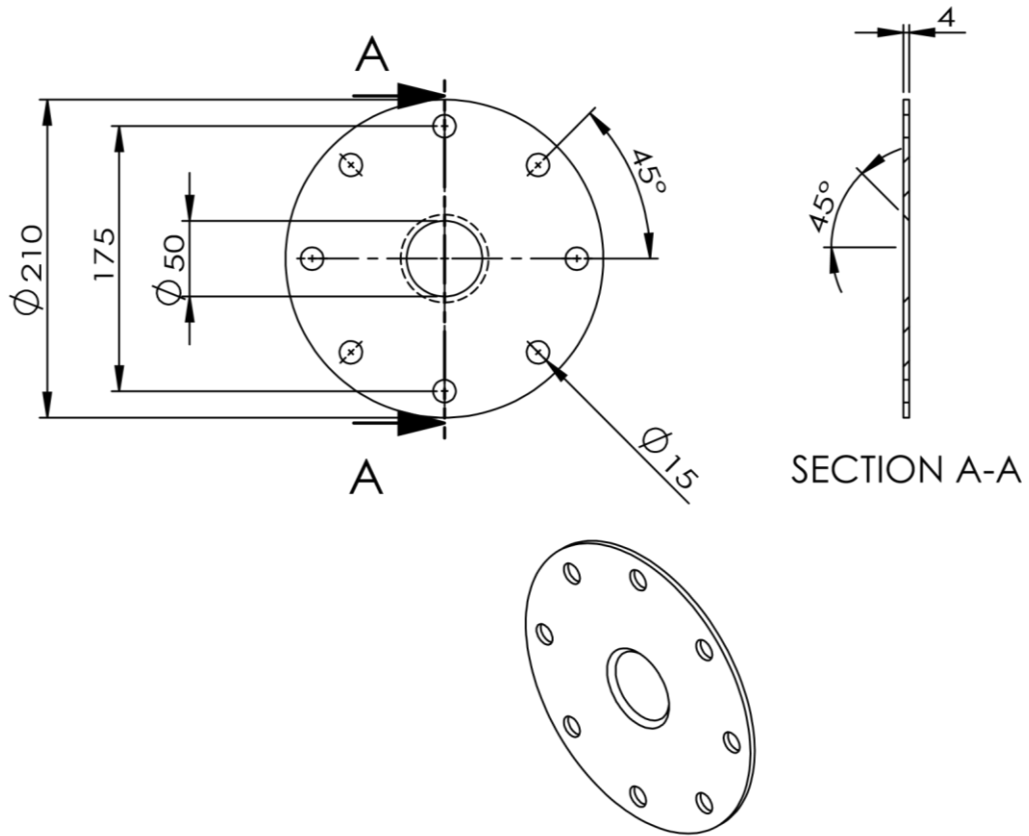
รูปที่ ค.1 แบบชุดทดลองเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบด



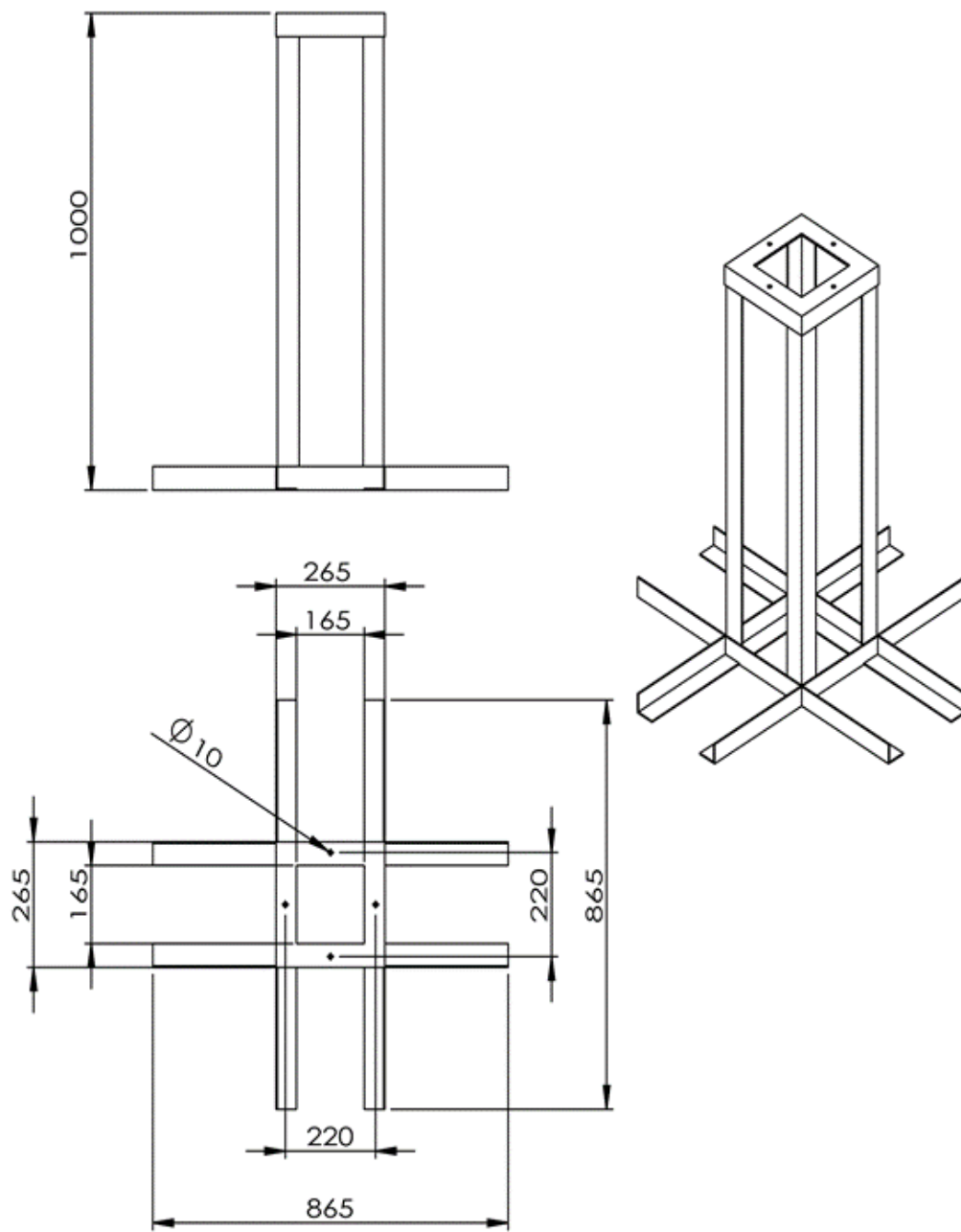
หมายเลข	ชื่อ-วัสดุ	จำนวน
1	High pressure blower	1
2	Orifice plate	1
3	ตะแกรงขนาดรู 2 มิลลิเมตร	1
4	ห้องเผาไหม้	6
5	ชุดป้อนเชื้อเพลิง	1
6	ไซโคลนดักฝุ่น	1

รูปที่ ค.2 แบบแจกแจงรายละเอียดเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบด

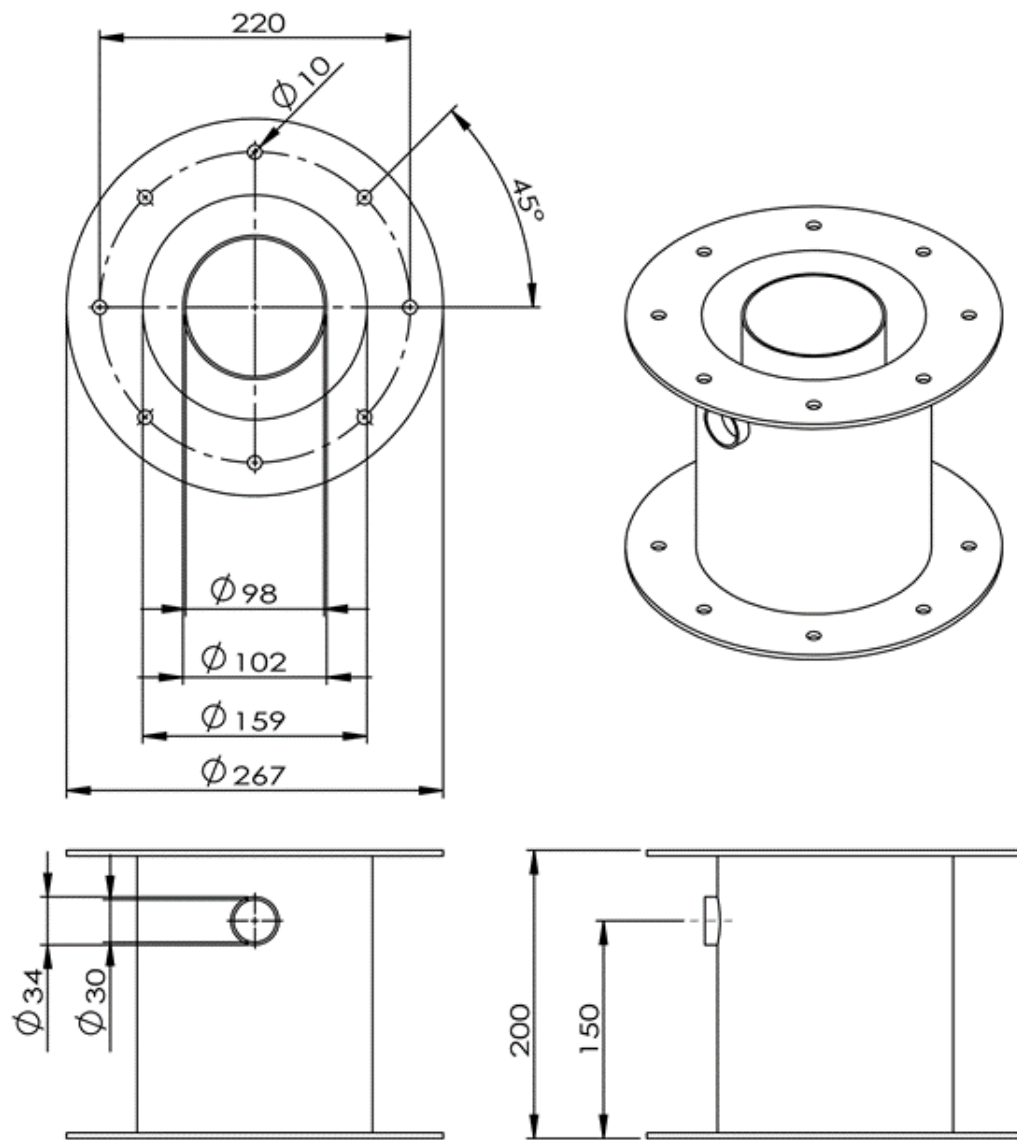




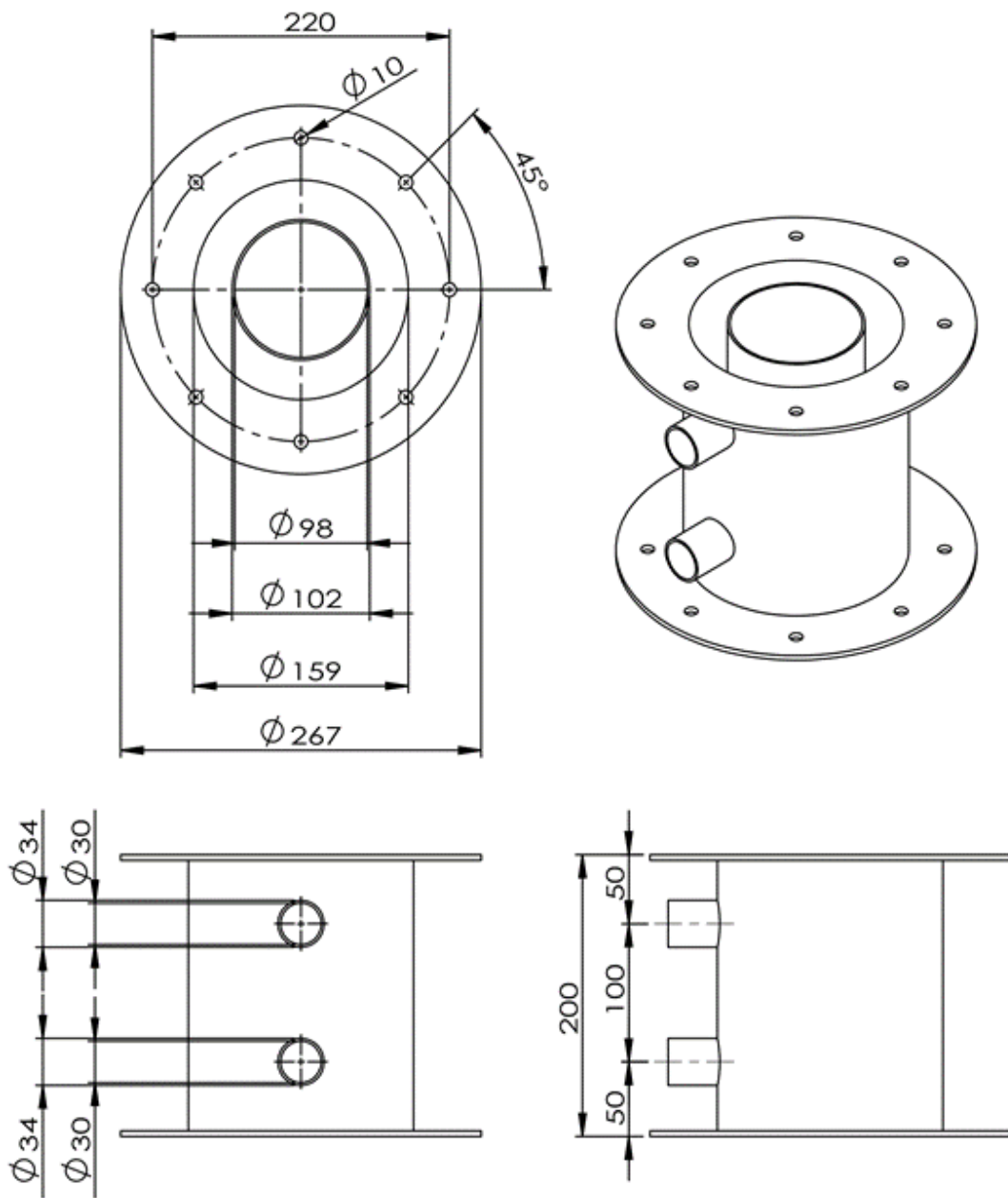
รูปที่ ค.3 Orifice plate



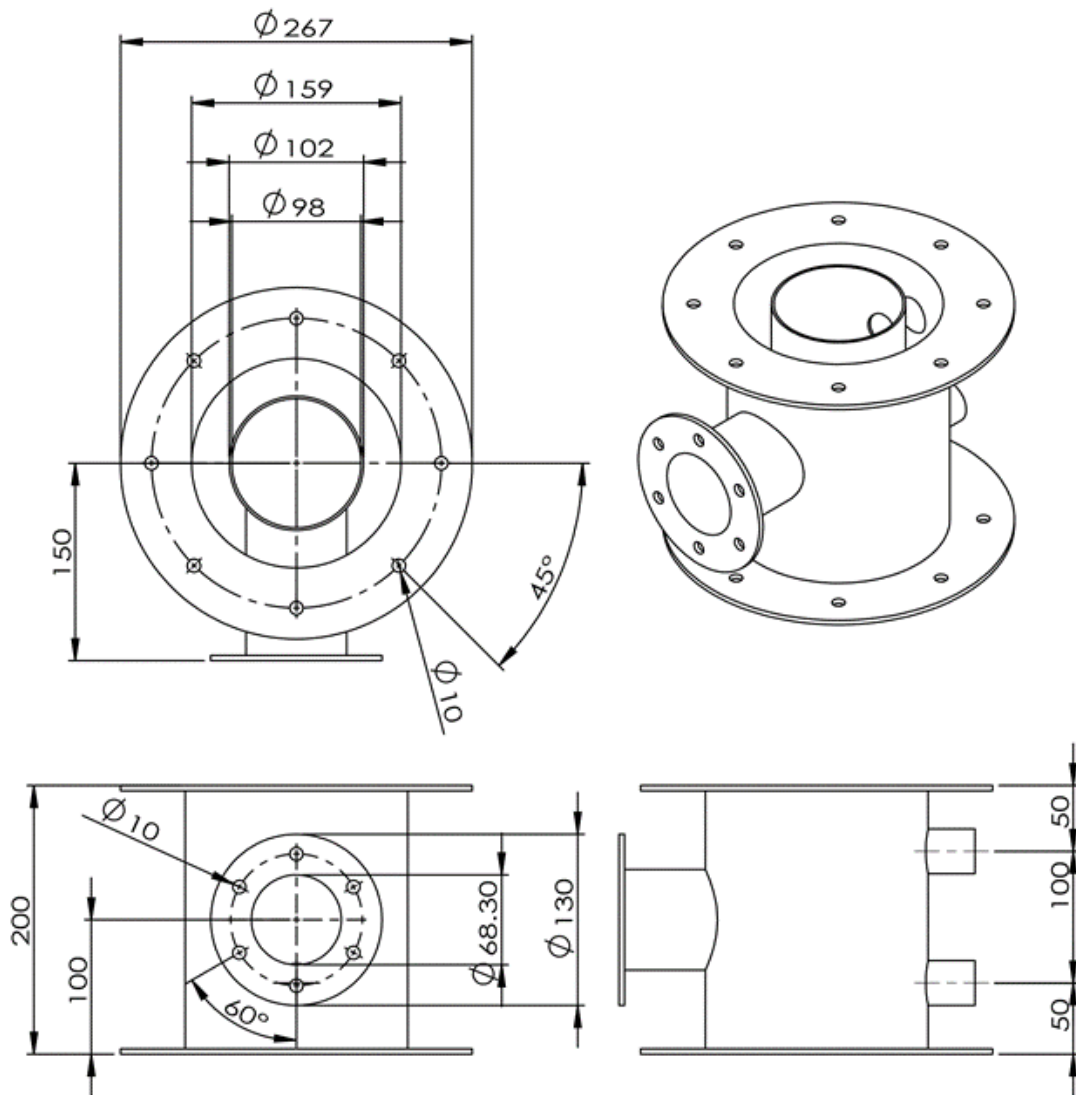
รูปที่ ค.4 โครงสร้างฐานวางเบด (ห้องเผาไหม้)



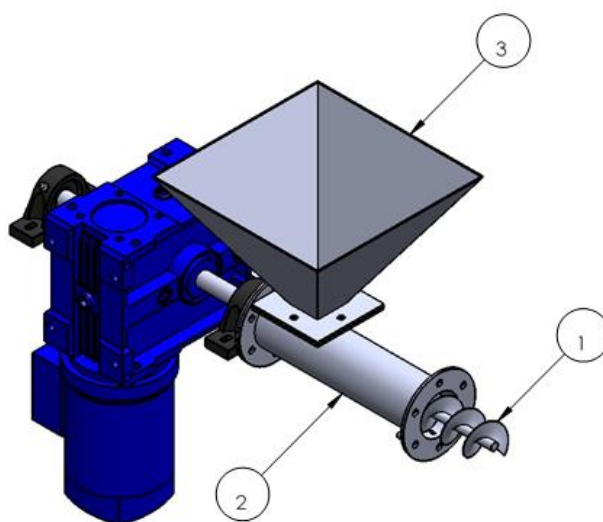
รูปที่ ค.5 ห้องเผาไหม้ชั้นที่ 1



รูปที่ ค.6 ห้องเผาไหม้ชั้นที่ 2, 3, 5 และ 6

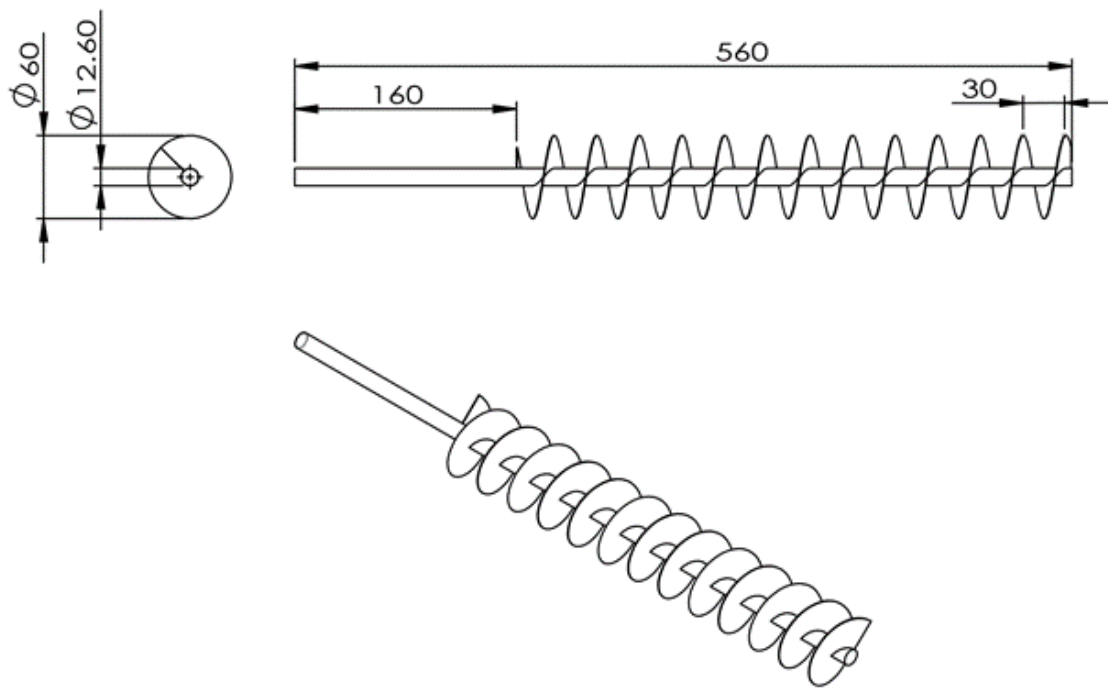


รูปที่ ค.7 ห้องเผาไหม้ชั้นที่ 4 ที่มีการป้อนเชื้อเพลิง

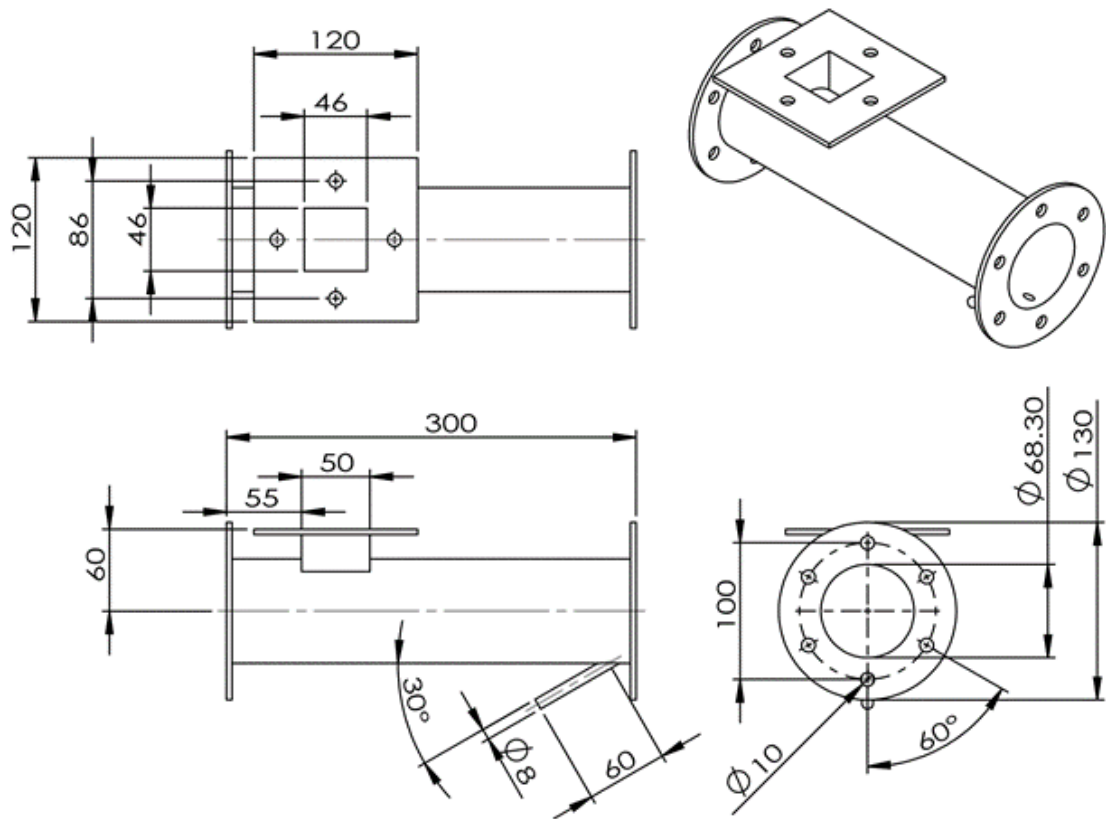


หมายเลข	ชื่อ-วัสดุ	จำนวน
1	สกรูลำเลียงเชื้อเพลิง	1
2	ท่อลำเลียงเชื้อเพลิง	1
3	Hopper	1

รูปที่ ค.8 ชุดป้อนเชื้อเพลิง

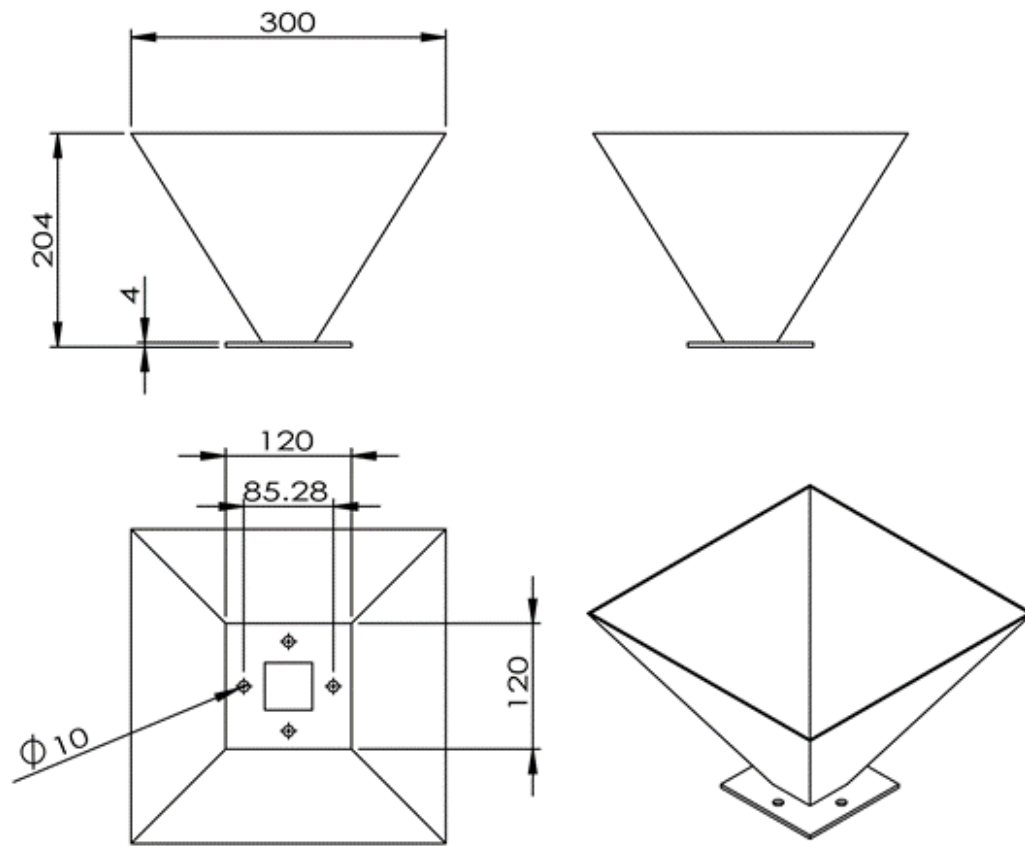


รูปที่ ค.9 สกรูล้ำเลียงข้อเพลิง ระยะพิต 3 เซนติเมตร

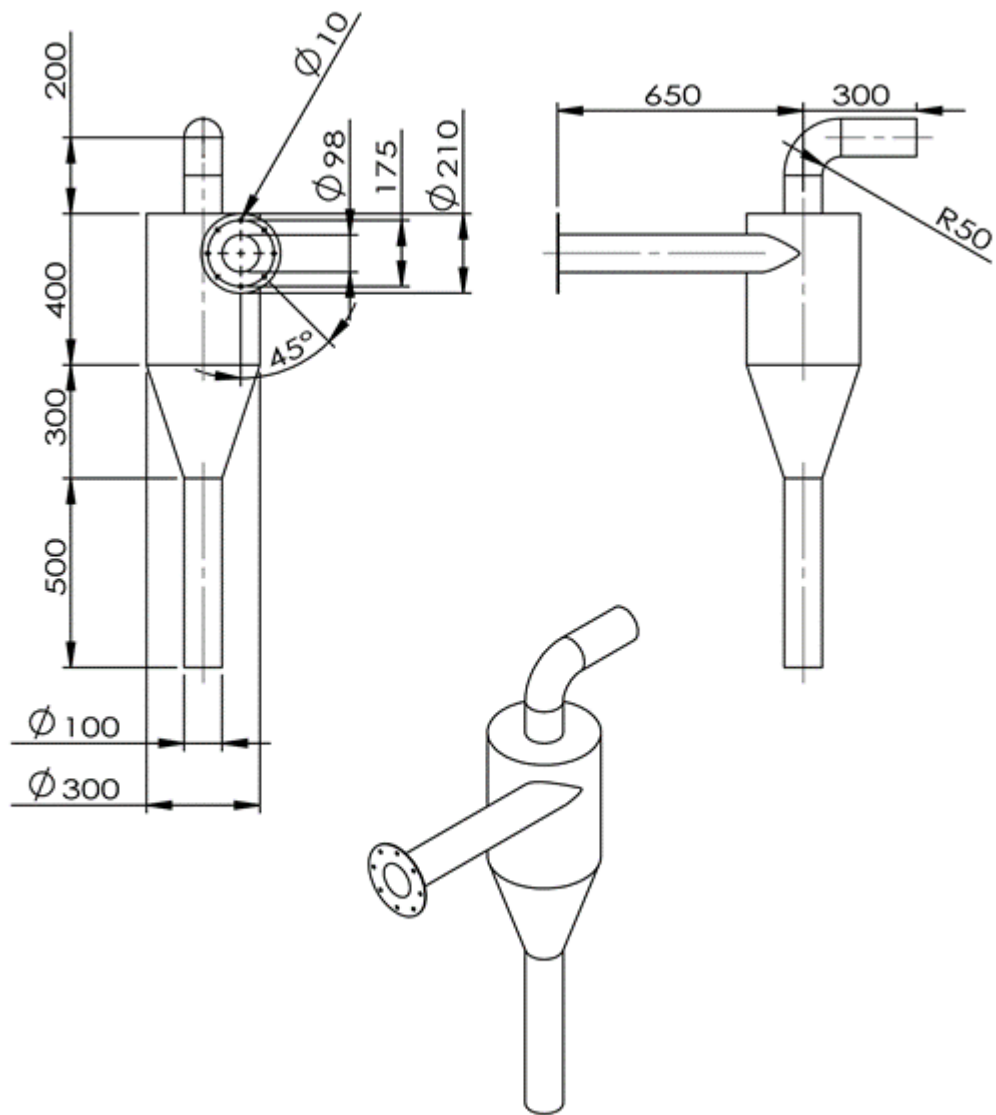


รูปที่ ค.10 ท่อลำเลียงเชื้อเพลิง



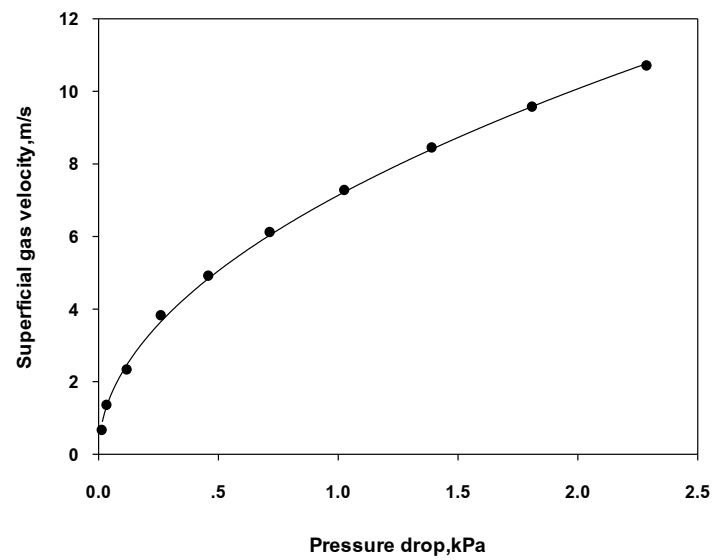


รูปที่ ค.11 Hopper



รูปที่ ค.12 ไชโคลนดักฝุ่น

ผลการ Calibration curve ของ orifice

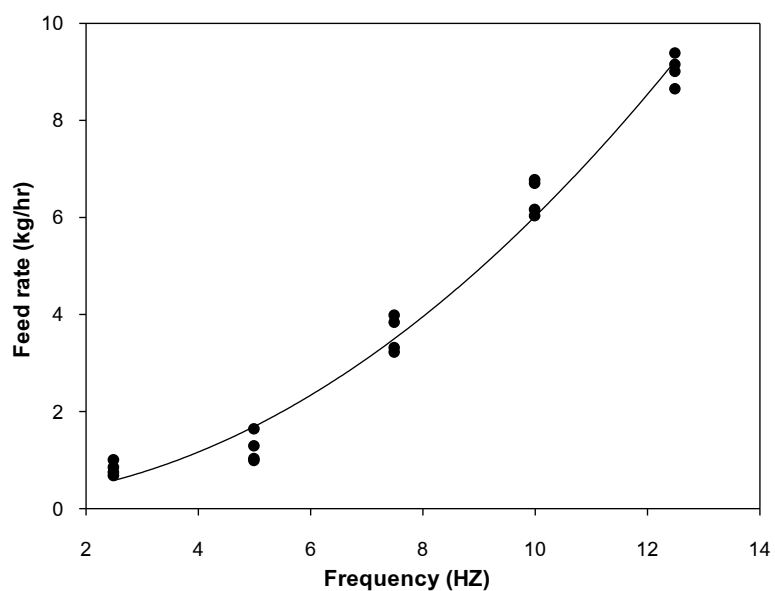


รูปที่ ค.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและความดันคร่อม Orifice

ผลการ Calibration curve ของ orifice

$$y=7.1996x^{0.5377}$$

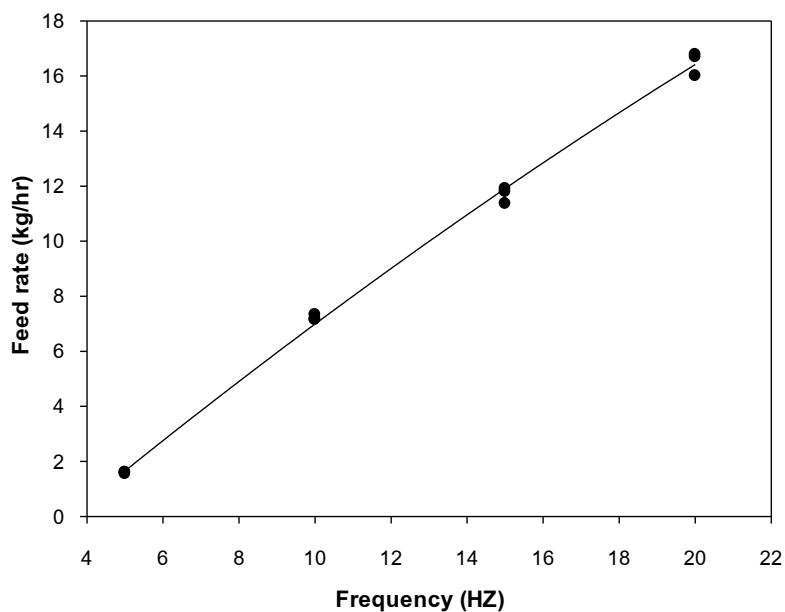
### สมการ Calibration curve ของ Feeder



รูปที่ ค.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนและความถี่ของซีล้อยัดเม็ด 100 เปอร์เซนต์

สมการ Calibration curve ของ Feeder ของซีล้อยัดเม็ด 100 เปอร์เซนต์

$$y = 0.056x^2 + 0.0252x + 0.168; R^2 = 0.9832$$



รูปที่ ค.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนและความถี่ของเชื้อเพลิงแกลบอัดเม็ด 100 เปอร์เซ็นต์ และแกลบอัดเม็ดผสมขี้เลื่อยอัดเม็ดที่อัตราส่วน 75:25, 50:50 และ 25:75

สมการ Calibration curve ของ Feeder ของขี้เลื่อยอัดเม็ด 100 เปอร์เซ็นต์และแกลบอัดเม็ดผสมขี้เลื่อยอัดเม็ดที่อัตราส่วน 75:25, 50:50 และ 25:75

$$y = 0.9842x - 3.06; R^2 = 0.9962$$

ภาคผนวก ง ผลงานตีพิมพ์และการเผยแพร่



Prince of Songkla University

# PEC-11

EC<sup>11th</sup>

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์  
19-20 มิถุนายน 2558  
ณ โรงแรมดวงจิตต์ รีสอร์ท แอนด์ สปา หาดป่าตอง จังหวัดภูเก็ต

## การศึกษาการเกิดฟลูอิดไอเซชันของทรายผสมขี้เลื่อยอัดเม็ด Study the fluidization of sand mixed with sawdust pellet

ศักดิ์นันท์ โอแก้ว<sup>1\*</sup>, กิตตินันท์ มลิวรรณ<sup>2</sup>, ฐานันดรศักดิ์ เทพญา<sup>3</sup> และชยุต นันทดูลิต<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup>ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112

\*อีเมล: s\_okaew@hotmail.com

S. Okaew<sup>1\*</sup>, K. Maliwan<sup>2</sup>, T. Theppaya<sup>3</sup>, and C. Nuntadulit<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup>Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90112

\*E-mail: s\_okaew@hotmail.com

### บทคัดย่อ

การศึกษาการเกิดฟลูอิดไอเซชันแบบระบบก๊าซ-ของแข็งในชุดทดลองที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเบด 9.8 เซนติเมตร สูง 80 เซนติเมตร อนุภาคที่ใช้เป็นของผสมระหว่างทรายและขี้เลื่อยอัดเม็ด มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาการเกิดความดันลดคร่อมเบด ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชันและความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนมวลกับความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชัน ผลของการเพิ่มสัดส่วนมวลภายในเบดอยู่ระหว่าง 0.02 - 0.14 ส่งผลให้ความดันลดคร่อมเบดเพิ่มขึ้นระหว่าง 0.73 - 0.92 kPa การเพิ่มความเร็วยังอากาศ ทำให้ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชัน ( $U_{mf}$ ) มีค่า 1.74 - 1.87 m/s ส่วนการลดความเร็วของอากาศ ทำให้ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชัน ( $U_{mf}$ ) มีค่า 1.76 - 1.88 m/s ผลของการเพิ่มสัดส่วนมวลภายในเบดทำให้ความดันลดคร่อมเบดและความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชันเพิ่มสูงขึ้น

คำหลัก ฟลูอิดไอเซชัน, ความดันลดคร่อมเบด, สัดส่วนมวล

### Abstract

Study the fluidization of solid-gas system in the test rig with diameter of 9.8 cm and 80 cm in height. The solid particles are sand and sawdust pellet. The purposes of this study were to determine the pressure drop, the minimum fluidization velocity and the correlation of mass fraction with the minimum fluidization velocity. The increasing of mass fraction from 0.02 to 0.14 were affected the pressure drop across the bed by 0.73 - 0.92 kPa. The increasing of gas velocities were created the minimum fluidization velocities ( $u_{mf}$ ) of 1.74 - 1.87 m/s. As a result of decreasing the gas velocities, the minimum fluidization velocities ( $u_{mf}$ ) were 1.76 - 1.88 m/s. The pressure drop and the minimum fluidization velocity were increased with increasing mass fraction of solid particles.

**Keywords:** fluidization, pressure drop, mass fraction

### 1. บทนำ

จากสภาวะขาดแคลนเชื้อเพลิงฟอสซิลในปัจจุบันทำให้พลังงานทางเลือกถูกนำมาใช้ทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลกันอย่างแพร่หลาย ไม่ว่าจะเป็น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานจากชีวมวล ซึ่งในภาคใต้ของประเทศไทย ขี้เลื่อยซึ่งเป็นชีวมวลที่ค่อนข้างหาได้ง่ายเนื่องจากพื้นที่ส่วนใหญ่ของภาคใต้ปลูกยางพาราเป็นหลัก [1]

เทคโนโลยีฟลูอิดไอเซชันสำหรับกระบวนการทางความร้อนเป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้หลายรูปแบบ ไม่ว่าจะเป็นการอบแห้ง การผลิตพลังงานไฟฟ้า และอื่น ๆ อีกมากมาย [2,3] อีกทั้งยังเป็นระบบที่มีประสิทธิภาพสูง อุณหภูมิภายในระบบค่อนข้างสม่ำเสมอ และสามารถลดก๊าซ  $NO_x$  ที่ปล่อยออกมาได้โดยใช้ระบบอากาศทุติยภูมิในการเผาไหม้ [4]

จากการศึกษาปรากฏการณ์การเกิดฟลูอิดไอเซชันในระบบของแข็ง-ก๊าซ ที่ผ่านมามีการศึกษาสัดส่วนความสูงของอนุภาคในเบดต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเบด (H/D) อนุภาคของแข็งที่ใช้ศึกษา โดยยึดตามหลักการแบ่งอนุภาคของ Geldart เพื่อหาความสัมพันธ์ของความเร็วต่ำสุดของการเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไอเซชัน ( $u_{mf}$ ) และความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟองอากาศ ( $u_{b0}$ ) โดยอนุภาคในกลุ่ม B และ D มีความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชันเท่ากับความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟองอากาศ ส่วนอนุภาคในกลุ่ม A มีความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟองอากาศสูงกว่า [5,6] ซึ่งความเร็วต่ำสุดของการเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไอเซชันเป็นตัวแปรที่สำคัญในการออกแบบระบบและใช้ในการทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟองอากาศ [7,8] นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการใช้ภาพถ่ายแสดงลักษณะการเกิดฟลูอิดไอเซชัน [9]

งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาพฤติกรรมการเกิดฟลูอิดไอเซชันเพื่อหาความดันลดคร่อมเบด ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชัน และความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนมวลกับความเร็วต่ำสุดในการเกิด

ฟลูอิดไดเซชัน เพื่อที่จะประยุกต์ใช้ในการศึกษาการเผาไหม้ของซีลี้อยต์เม็ดต่อไป

## 2. ทฤษฎี

ฟลูอิดไดเซชัน (Fluidization) คือ กระบวนการที่ทำให้อนุภาคของแข็งสัมผัสกับของไหลแล้วทำให้อนุภาคของแข็งมีคุณสมบัติคล้ายของไหล โดยของไหลจะไหลเข้าเบตทางด้านล่าง ผ่านตะแกรงเบตและไหลออกจากเบตทางด้านบน ลักษณะที่ของไหลทำให้อนุภาคของแข็งเริ่มเคลื่อนที่ และเมื่อเพิ่มความเร็วจะทำให้อนุภาคของแข็งเป็นอิสระต่อกัน เรียกลักษณะเช่นนี้ว่า ฟลูอิดไดเซชัน

### 2.1 ความเร็วต่ำสุดของการฟลูอิดไดเซชัน

ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน คือความเร็วที่ทำให้อนุภาคของแข็งเริ่มเคลื่อนที่ ณ ตำแหน่งนี้ความดันลดคร่อมเบตจะมีค่าสูงสุด Ergun [10] ได้เสนอสมการคำนวณดังนี้ (2.1)

$$150 \frac{(1-\varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \phi^2} \left( \frac{d_p \mu_f \rho_f}{\mu_f} \right) + \frac{1.75}{\varepsilon_{mf}^2 \phi} \left( \frac{d_p \mu_f \rho_f}{\mu_f} \right) = \frac{d_p^3 \rho_f (\rho_p - \rho_f) g}{\mu_f^2}$$

เมื่อ  $\Delta p$  คือ ความดันลดคร่อมเบต

$\varepsilon_{mf}$  คือ สัดส่วนช่องว่างของเบต

$g$  คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก

$\rho_p, \rho_f$  คือ ความหนาแน่นของอนุภาคและก๊าซตามลำดับ

$\mu_f$  คือ ความเร็วก๊าซป้อน

$d_p$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค

$\mu_f$  คือ ค่าความหนืดของของไหล

$\phi$  คือ สัมประสิทธิ์ความกลมของอนุภาค

สัดส่วนช่องว่างภายในเบตหาได้จากสมการ (2.2)

$$\varepsilon_{mf} = 1 - (1 - \varepsilon_0) \frac{L_0}{L_{mf}} \quad (2.2)$$

โดยที่  $\varepsilon_0$  คือ สัดส่วนช่องว่างของอากาศขณะเบตนิ่ง

$L_0$  คือ ความสูงของเบตนิ่ง

$L_{mf}$  คือ ความสูงของเบต

จากสมการ (2.1)

$$\frac{1.75}{\varepsilon_{mf}^3 \phi} \text{Re}_{p,mf}^2 + \frac{150(1-\varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \phi^2} \text{Re}_{p,mf} = \text{Ar} \quad (2.3)$$

$$\text{Re}_{p,mf} = \frac{d_p \mu_f \rho_f}{\mu_f} \quad (2.4)$$

$$\text{Ar} = \frac{d_p^3 \rho_f (\rho_p - \rho_f) g}{\mu_f^2} \quad (2.5)$$

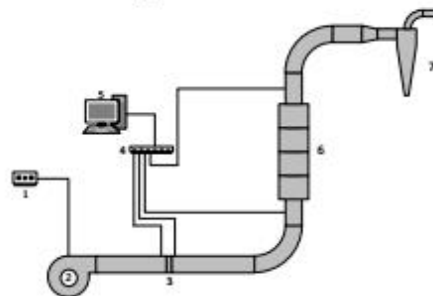
โดย  $\text{Re}_{p,mf}$  คือ ตัวเลขเรย์โนลด์

$\text{Ar}$  คือ ตัวเลขอาคิมิติล

## 3. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

### 3.1 ชุดทดลอง

ลักษณะของชุดทดลองฟลูอิดไดเซชันที่ใช้ในการทดลอง แสดงดังในรูปที่ 1 โดยเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของชุดทดลอง 9.8 เซนติเมตร ความสูงของเบต 80 เซนติเมตร



รูปที่ 1 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ชุดทดลองฟลูอิดไดเซชัน

(1. Inverter 2. High pressure blower 3. Orifice plate  
4. Data logger 5. Computer 6. Bed 7. Cyclone)

อุปกรณ์วัดความดันภายในฟลูอิดไดเซชัน คือ เซนเซอร์วัดความดัน (Pressure Sensor) โมเดล MPXV5004DP 3.92 kPa (0-400 mm H<sub>2</sub>O) 1-4.9 volt output โดยใช้ USB DAQ 6008 National Instrument ในการแปลงสัญญาณ และใช้โปรแกรม Labview SignalExpress 2013 ในการบันทึกผลการทดลอง

### 3.2 อนุภาคที่ใช้ในการทดลอง

ในการทดลองใช้ทรายเป็นอนุภาคหลัก โดยคุณสมบัติของทรายมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3-5 มิลลิเมตร ความหนาแน่น 1,760 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าความกลม 0.90 ส่วนคุณสมบัติของซีลี้อยต์เม็ด เส้นผ่านศูนย์กลาง 8.5 มิลลิเมตร ความหนาแน่น 1,171 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าความกลม 0.73 สัดส่วนความสูงของอนุภาคในเบตต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเบต (H/D) อยู่ระหว่าง 0.4 - 1.0 ค่า Ar ของทรายเท่ากับ 4,089,796.267 โดยทรายที่ใช้ในการทดลองจัดอยู่ในกลุ่ม D ตามหลักการแบ่งอนุภาคของ Geldart



รูปที่ 2 แสดงลักษณะของทรายและซีลี้อยต์เม็ดในการทดลอง



3.3 ขั้นตอนการทดลอง

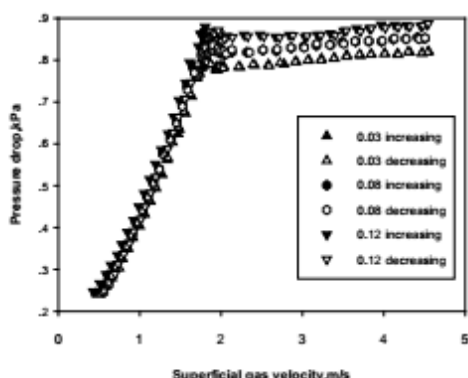
ใช้พัดลมแรงดันสูง (High pressure blower) เป่าอากาศผ่านแผ่นออร์ฟิส (Orifice plate) เข้าสู่เบตทางด้านล่าง โดยอากาศไหลผ่านตะแกรงเบต เหนือชั้นตะแกรงเบตบรรจุทรายปริมาณ 500 กรัม ผสมด้วยซีลี้อยัดเม็ดปริมาณ 8.5 กรัม บันทึกผลความดันด้วยไฟฟ้าจาก pressure transmitter ในการทดลองมีการปรับเพิ่มและลดความเร็วการไหลของอากาศ จากนั้นเพิ่มปริมาณซีลี้อยัดเม็ดเป็น 16.9, 25.1, 33.6, 42.0, 50.5, 58.7, 67.3, 75.6, และ 84.0 กรัม ตามลำดับ

4. ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 ความดันลดคร่อมเบต ( $\Delta P$ )

ความดันลดคร่อมเบตเป็นตัวแปรที่สำคัญในการออกแบบระบบฟลูอิดไดซ์เบดเช่นเดียวกับความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไดเซชัน หลายงานวิจัยได้ศึกษาเกี่ยวกับความดันลดคร่อมเบตของอนุภาคผสม [11-15] ความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดคร่อมเบตและความเร็วการไหลของอากาศแสดงในรูปที่ 3 จะเห็นว่าความดันลดคร่อมเบตเพิ่มขึ้นตามความเร็วการไหลของอากาศ เมื่อถึงจุดหนึ่งความดันลดคร่อมเบตคงที่แม้ว่าความเร็วการไหลของอากาศจะเพิ่มขึ้น ซึ่งลักษณะของกราฟก็เป็นไปตามทฤษฎีการเกิดฟลูอิดไดเซชันสำหรับอนุภาคเดี่ยว

ช่วงเริ่มต้นของการปรับเพิ่มความเร็วการไหลอากาศไปจนถึงก่อนตำแหน่งความดันลดคร่อมเบตลดลงจะเรียกว่า เบตนิ่ง อนุภาคของแข็งภายในเบตยังคงหยุดนิ่ง และเมื่อเพิ่มความเร็วการไหลของอากาศจนถึงจุดที่ความดันลดคร่อมเบตลดลง ณ ตำแหน่งนี้อนุภาคเริ่มมีการเคลื่อนที่ เรียกว่าความเร็วนี้ว่า ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไดเซชัน สามารถหาค่าความเร็วได้จากสมการของ Ergun หรือ Carman-Kozeny โดยทั้งสองสมการสามารถใช้ทำนายความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไดเซชัน [16]



รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดคร่อมเบตและความเร็วการไหลของอากาศ

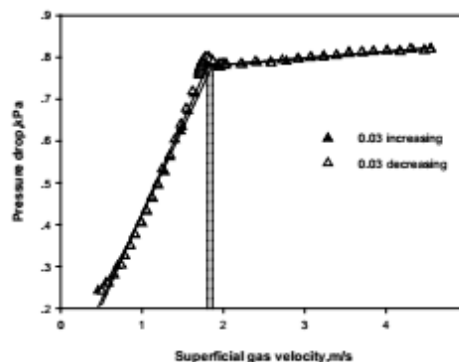
จากรูปที่ 3 เมื่อพิจารณาผลของสัดส่วนมวลของซีลี้อยัดต่อ

ความดันลดคร่อมเบต โดยสัดส่วนมวลภายในเบตอยู่ระหว่าง 0.02 - 0.14 จะเห็นได้ว่าเมื่อตามสัดส่วนมวลเพิ่มขึ้นความดันลดคร่อมเบตเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วงระหว่าง 0.73 - 0.92 kPa

4.2 ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไดเซชัน ( $U_{mf}$ )

ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไดเซชัน คือความเร็วที่ทำให้อนุภาคภายในเบตเริ่มเคลื่อนที่และยังเป็นตัวแปรที่สำคัญเช่นเดียวกับความดันลดคร่อมเบต ในรูปที่ 4 แสดงวิธีการหาความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไดเซชัน ( $U_{mf}$ ) ซึ่งภายในเบตประกอบด้วยอนุภาคของแข็งสองชนิดคือ ทรายและซีลี้อยัดเม็ด

การหาความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชันทำได้โดยการสร้างเส้นแนวโน้มขึ้นมาสองเส้นเพื่อหาจุดตัด โดยตำแหน่งที่จุดตัดกันของเส้นแนวโน้มคือ ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไดเซชัน ในรูปที่ 4 ที่สัดส่วนมวล 0.03 การเพิ่มการไหลของอากาศซึ่งทำให้ได้  $U_{mf}$  เท่ากับ 1.87 m/s ส่วนการลดความเร็วการไหลของอากาศได้  $U_{mf}$  เท่ากับ 1.80 m/s






รูปที่ 4 แสดงวิธีการหาความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไดเซชัน ( $U_{mf}$ )

4.3 ความสัมพันธ์ของความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไดเซชันและสัดส่วนมวล

การทดลองส่วนใหญ่ของระบบฟลูอิดไดซ์เบดมีวัตถุประสงค์เพื่อหาความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชันเนื่องจากจำเป็นต้องใช้ในการวิเคราะห์ปฏิกิริยาการเผาไหม้ในระบบเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบด โดยมีการศึกษาความสัมพันธ์ของค่าความกลมรูปร่าง ความหนาแน่น ที่มีผลต่อความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไดเซชัน [17]

ผลการศึกษาความสัมพันธ์ของความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไดเซชันและสัดส่วนมวล ที่สัดส่วนมวล 0.02 - 0.14 ในการทดลองการเพิ่มความเร็วของอากาศ  $U_{mf}$  มีค่า 1.74-1.87 m/s ส่วนในการทดลองลดความเร็วของอากาศ  $U_{mf}$  มีค่า 1.76-1.88 m/s ซึ่งความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไดเซชันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มสัดส่วนมวลของทรายผสมซีลี้อยัด ดังแสดงในรูปที่ 5







5<sup>th</sup>- 8<sup>th</sup> July 2016, PSU, Songkhla

**Proceedings**

**The 30<sup>th</sup> Conference**  
**of Mechanical Engineering Network of Thailand**

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 30  
 วันที่ 5-8 กรกฎาคม 2559  
 ณ โรงแรม บีพี สมิหลา บีช โฮเต็ล แอนด์ รีสอร์ท  
 อ.เมือง จ.สงขลา

## AEC0019

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 30  
5-8 กรกฎาคม 2559 จังหวัดสงขลา



การศึกษาการเผาไหม้ระบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบฟองอากาศโดยใช้เชื้อเพลิงผสมระหว่างซีเลื่อย  
อัดเม็ดและแกลบอัดเม็ด

Combustion Study of Sawdust Pellet and Rice Husk Pellet Mixture in Bubbling  
Fluidized Bed

ศักดิ์นันท์ โอแก้ว<sup>1</sup>, ฐานันดรศักดิ์ เทพญา<sup>2</sup>, ชยุต นันทคุสิฐ<sup>3</sup> และกิตตินันท์ มลิวรรณ<sup>4\*</sup>

<sup>1,2,3,4\*</sup> ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112

\*ติดต่อ: kittinan.m@psu.ac.th, 0-7428-7206, 0-7421-2893

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมระหว่างแกลบอัดเม็ดและซีเลื่อยอัดเม็ดในเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดฟองอากาศ ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางห้องเผาไหม้ 9.8 เซนติเมตร สูง 120 เซนติเมตร ในการทดลองใช้ทรายปริมาณ 500 กรัมเป็นอนุภาคหลัก โดยทรายมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3-5 มิลลิเมตร ความหนาแน่น 1,760 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เชื้อเพลิงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร และยาว 1 เซนติเมตร อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนักระหว่างซีเลื่อยอัดเม็ดและแกลบอัดเม็ดที่ศึกษาคือ 100:0 0:100 75:25 50:50 และ 25:75 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 4 6 และ 8 กิโลกรัมต่อชั่วโมง โดยกำหนดให้ความเร็วอากาศปฐมภูมิคงที่ที่ 1.7 เมตรต่อวินาที และอากาศทุติยภูมิถูกป้อนเข้าไปในห้องเผาไหม้ที่ตำแหน่งการป้อนเชื้อเพลิงด้วยอัตราการไหลคงที่ที่ 100 ลิตรต่อนาที จากผลการทดลอง พบว่าการเพิ่มปริมาณแกลบอัดเม็ดในเชื้อเพลิงผสมจะทำให้การกระจายตัวอุณหภูมิในห้องเผาไหม้มีค่าสม่ำเสมอขึ้น ตำแหน่งอุณหภูมิสูงสุดเปลี่ยนจากระยะเหนือตะแกรงที่ 25 เซนติเมตรเป็น 45 เซนติเมตร

**คำหลัก:** ซีเลื่อยอัดเม็ด, แกลบอัดเม็ด, ฟลูอิดไดซ์เบดแบบฟองอากาศ

**Abstract**

This research aimed to investigate the combustion of sawdust pellet and rice husk pellet mixture in bubbling fluidized bed combustor. Size of combustion chamber is 9.8 cm diameter and 120 cm in height. Five hundred grams of sand was used as bed particles. Sand particles lie within a 3 to 5 mm diameter range and its density is 1760 kg/m<sup>3</sup>. The size of fuel pellets is about 6 mm diameter and 1 mm length. The studied mixture between sawdust pellet and rice husk pellet were 100:0 0:100 75:25 50:50 and 25:75 percent by weight. The feed velocities were 4 6 and 8 kg/hr. The primary air velocity was fixed at 1.7 m/s. And, the secondary air was introduced into the chamber at fuel feed point with the constant volume velocity of 100 l/m. The results shown that when amount of rice husk pellet in mixture increased, the combustion temperature distributed more uniform. The maximum temperature point changed from 25 cm to 45 cm above the combustor fluidizing grid.

**Keywords:** sawdust pellet, rice husk pellet, bubbling fluidized bed

**1. บทนำ**

ในปัจจุบันการเพิ่มขึ้นของประชากรส่งผลให้มีการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลเพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดความวิตกกังวลต่อปริมาณเชื้อเพลิงฟอสซิลในอนาคต มีการหาวิธีแก้ปัญหานี้โดยการใช้พลังงานทางเลือกเช่น พลังงานลม พลังงานแสงอาทิตย์ เป็นต้น หนึ่งในพลังงานทางเลือกที่เป็นที่นิยมคือ พลังงานชีวมวล เนื่องจากการใช้พลังงานชีวมวลนั้น

เป็นพลังงานที่ไม่เพิ่มปริมาณของก๊าซเรือนกระจก ที่ส่งผลให้เกิดปัญหาโลกร้อนในปัจจุบัน [1-4] อีกทั้งเชื้อเพลิงชีวมวลนั้นหาได้ง่ายเพราะเป็นส่วนที่เหลือจากภาคเกษตรกรรมและภาคอุตสาหกรรม นอกจากนี้ เชื้อเพลิงชีวมวลต่างชนิดกันสามารถผสมกันได้ และสามารถผสมเชื้อเพลิงที่มีความชื้นสูงกับเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีความชื้นต่ำได้ แต่อย่างไรก็ตามเชื้อเพลิงชีวมวลก็ยังมีข้อเสีย คือ

## AEC0019

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 30  
5-8 กรกฎาคม 2559 จังหวัดสงขลา



เชื้อเพลิงบางชนิดอาจจะมีโพแทสเซียมในปริมาณสูง ส่งผลให้เกิดเถ้าหลอมในห้องเผาไหม้ จึงได้มีการศึกษาการใช้ดินขาวลดปัญหาของการหลอมของเถ้าส่งผลให้เกิดตะกั่ว(5) สำหรับเทคโนโลยีการเผาไหม้ที่น่าสนใจสำหรับเชื้อเพลิงชีวมวล คือ ฟลูอิดไคซ์เบด เนื่องจากสามารถใช้เชื้อเพลิงที่มีคุณสมบัติที่หลากหลายได้ [6] และการเติมอากาศทุติยภูมิเข้าไปในระบบสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้และลดปริมาณก๊าซไอเสียได้ [7-8] สำหรับระบบการป้อนเชื้อเพลิงแบบสกรู อากาศทุติยภูมิสามารถเติมไปพร้อมกับเชื้อเพลิงเพื่อช่วยป้องกันการเกิดเปลวไฟย้อนกลับไปติดเชื้อเพลิงในถังเก็บได้ [9]

ชีเลื่อยซึ่งเป็นส่วนที่เหลือจากอุตสาหกรรมการแปรรูปไม้ สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้เพราะมีความชื้นต่ำและค่าพลังงานความร้อนสูง [10] แต่เนื่องจากมีค่า bulk density ต่ำและปริมาณสารละลายสูง จึงส่งผลให้เกิดการเผาไหม้เร็ว [11] แต่การอัดเม็ดชีเลื่อยจะสามารถแก้ปัญหา bulk density ที่ต่ำได้ ส่วนเชื้อเพลิงที่น่าสนใจอีกชนิด คือ แกลบ [12-13] แต่เมื่อเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงเถ้าของแกลบซึ่งมีซิลิกาเป็นส่วนประกอบจะเกิดการรวมตัวเป็นก้อน จึงต้องใช้ทรายเป็นเบดเพื่อลดการเกิดการรวมตัวกันเป็นก้อน [14]

ดังนั้นในงานวิจัยจึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเผาไหม้ในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบพองอากาศโดยใช้เชื้อเพลิงผสมระหว่างชีเลื่อยอัดเม็ดและแกลบอัดเม็ดเพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมในการเผาไหม้ เพราะเชื้อเพลิงทั้งสองชนิดสามารถหาได้ง่ายภายในประเทศ

## 2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

### 2.1 เชื้อเพลิง

การศึกษาการเผาไหม้ระบบฟลูอิดไคซ์เบดแบบพองอากาศใช้เชื้อเพลิงผสมระหว่างชีเลื่อยอัดเม็ดและแกลบอัดเม็ดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร และยาว 1 เซนติเมตร โดยมีอัตราส่วนผสม ดังนี้ ชีเลื่อยอัดเม็ด 100 เปอร์เซ็นต์ แกลบอัดเม็ด 100 เปอร์เซ็นต์ ชีเลื่อยอัดเม็ดผสมแกลบอัดเม็ดที่สัดส่วน 75:25 50:50 และ 25:75 เปอร์เซ็นต์ ลักษณะทางกายภาพของเชื้อเพลิงทั้ง 5 อัตราส่วน แสดงในรูปที่ 1 โดยในแต่ละอัตราส่วนจะป้อนที่อัตรา 4 6 และ 8 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

ความหนาแน่นของชีเลื่อยอัดเม็ดและแกลบอัดเม็ดมีค่าเป็น 1,171 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และ 1,040

กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ โดยผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของชีเลื่อยอัดเม็ดและแกลบอัดเม็ดแสดงดังตารางที่ 1 และตารางที่ 2 ตามลำดับ ซึ่งค่าความร้อนของชีเลื่อยอัดเม็ดสูงกว่าแกลบอัดเม็ด แต่เถ้าจะมีมากในแกลบอัดเม็ด



รูปที่ 1 แสดงลักษณะของเชื้อเพลิง 5 สัดส่วน ( a. ชีเลื่อยอัดเม็ด 100 เปอร์เซ็นต์ b. แกลบอัดเม็ด 100 เปอร์เซ็นต์ c. ชีเลื่อยอัดเม็ดผสมแกลบอัดเม็ด 75:25 เปอร์เซ็นต์ d. ชีเลื่อยอัดเม็ดผสมแกลบอัดเม็ด 50:50 เปอร์เซ็นต์ e. ชีเลื่อยอัดเม็ดผสมแกลบอัดเม็ด 25:75 เปอร์เซ็นต์ )

ตารางที่ 1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีแบบละเอียดของแกลบอัดเม็ดและชีเลื่อยอัดเม็ด (Ultimate Analysis)

	ชีเลื่อยอัดเม็ด	แกลบอัดเม็ด
Carbon	46.277	37.102
Hydrogen	5.524	5.137
Nitrogen	0.126	0.506
Oxygen	36.414	34.037
Sulfur	0.010	0.010
Ash	1.280	15.699
Moisture	10.37	7.510
HHV(MJ/kg)	17.99	14.89

ตารางที่ 2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีแบบประมาณของแกลบอัดเม็ดและชีเลื่อยอัดเม็ด (Proximate Analysis)

	ชีเลื่อยอัดเม็ด	แกลบอัดเม็ด
Volatile Matter	75.341	62.535

## AEC0019

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 30  
5-8 กรกฎาคม 2559 จังหวัดสงขลา

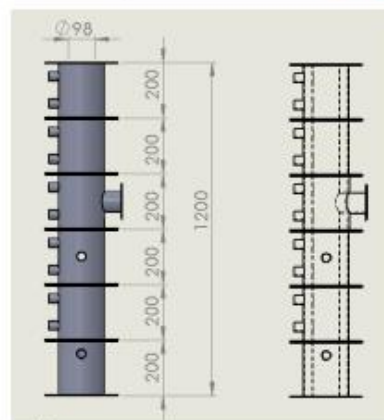


Fixed Carbon	13.009	14.256
Ash	1.280	15.699
Moisture	10.37	7.510

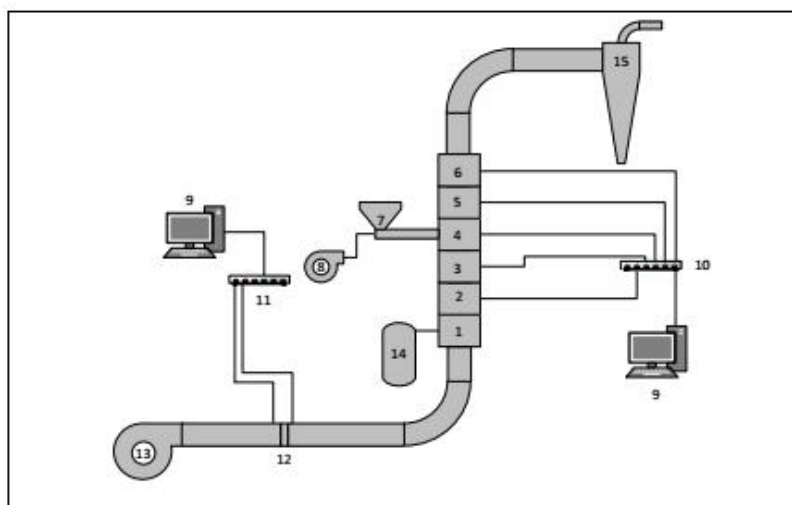
### 2.2 ชุดทดลอง

ส่วนประกอบของชุดทดลองเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบพองอากาศแสดงดังรูปที่ 2

ลักษณะของห้องเผาไหม้แสดงดังในรูปที่ 3 เส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 9.8 เซนติเมตร และสูง 120 เซนติเมตร โดยแบ่งเป็น 6 ชั้น แต่ละชั้นมีความสูงชั้นละ 20 เซนติเมตร ซึ่งห้องเผาไหม้นั้นจะถูกออกแบบให้มีช่องว่างระหว่างผนังท่อด้านในกับผนังท่อด้านนอกกว้าง 2.54 เซนติเมตร และภายในช่องว่างบรรจุเซรามิกไฟเบอร์เพื่อเป็นฉนวนกันความร้อน



รูปที่ 3 แสดงลักษณะห้องเผาไหม้



รูปที่ 2 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ชุดทดลองฟลูอิดไดซ์เบดแบบพองอากาศ (1,2,3,4,5,6 bed 7. Feeder 8. Blower 9. Computer 10. Data logger 11. Pressure Sensor 12. Orifice 13. High pressure blower 14. Burner 15. Cyclone )

### 2.3 ขั้นตอนการทดลอง

เริ่มจากการอุ่นเบดที่มีทราย 500 กรัม (ทรายมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3-5 มิลลิเมตร ความหนาแน่น 1,760 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) และเชื้อเพลิง 500 กรัมอยู่ภายในให้มีอุณหภูมิประมาณ 400-500 องศาเซลเซียส จากนั้นทำการป้อนเชื้อเพลิงและเปิดพัดลมเป่าอากาศ

# AEC0019

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 30  
5-8 กรกฎาคม 2559 จังหวัดสงขลา



(High pressure blower) โดยค่อยๆเพิ่มความเร็วของอากาศ ที่ไหลผ่านตะแกรงเบตขนาด 2 มิลลิเมตร จนมีความเร็วอากาศปฐมภูมิที่ 1.7 เมตรต่อวินาที เพื่อให้ทรายและเชื้อเพลิงภายในห้องเผาไหม้อยู่ในสภาวะการเคลื่อนที่แบบพองอากาศ และป้อนอากาศทุติยภูมิไปพร้อมกับเชื้อเพลิงที่อัตราการไหล 100 ลิตรต่อนาที โดยกำหนดให้อัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิและทุติยภูมิมีค่าคงที่ในทุกการทดลอง

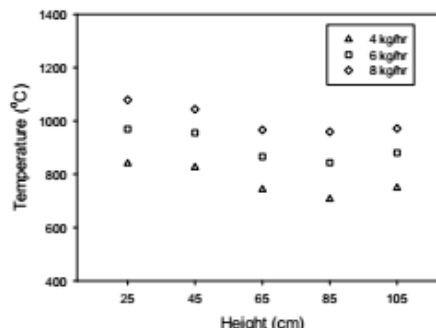
อุปกรณ์ที่ใช้วัดปริมาณต่างๆและเก็บค่า ประกอบไปด้วย Pressure Sensor รุ่น MPXV5004DP 3.92 kPa (0-400 mm H<sub>2</sub>O) 1-4.9 volt output สำหรับวัดค่าความดันตกคล่อม orifice โดยใช้ USB DAQ 6008 National Instrument เป็นตัวรับค่าและแปลงสัญญาณ โดยมีโปรแกรม Labview SignalExpress 2013 เป็นตัวแสดงผลและบันทึกผลสำหรับอุณหภูมิ อ่านค่าด้วย thermocouple ชนิด k และบันทึกผลด้วย Data logger รุ่น WISCO 210L ส่วนอุณหภูมิไอเสีย ปริมาณก๊าซ CO NO<sub>x</sub> และ SO<sub>2</sub> ใช้เครื่อง Testo 350 xl บันทึกผล

### 3. ผลการทดลองและวิจารณ์

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงผสมซีลีอียดเม็ดและกลบอัดเม็ดในเตาเผาฟลูอิดไคซ์แบบพองอากาศ โดยศึกษาผลของอุณหภูมิ ไอเสีย และปริมาณเถ้าที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้

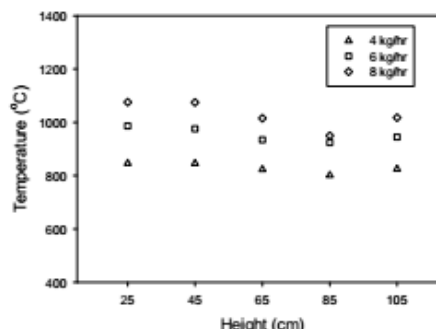
#### 3.1 อุณหภูมิ

การกระจายตัวอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ของเชื้อเพลิงผสม 5 อัตราส่วน ที่อัตราการป้อน 4 6 และ 8 กิโลกรัมต่อชั่วโมงแสดงในรูปที่ 4-7 จากรูปที่ 4 ซีลีอียดเม็ด 100 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการป้อน 4 กิโลกรัมต่อชั่วโมง มีอุณหภูมิเผาไหม้สูงสุด 840 องศาเซลเซียส ที่ระดับความสูงเหนือตะแกรง 25 เซนติเมตรและลดลงตามความสูงที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากอากาศทุติยภูมิถูกป้อนไปพร้อมกับเชื้อเพลิงที่ตำแหน่งเหนือตะแกรง 50 เซนติเมตร จึงทำให้ที่บริเวณนั้นมีอุณหภูมิลดลง และจะเพิ่มขึ้นช่วงปลายของห้องเผาไหม้ เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนเป็น 6 และ 8 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ตามลำดับ อุณหภูมิสูงสุดจะเพิ่มขึ้นเป็น 970 และ 1,080 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งมีลักษณะแนวโน้มการกระจายตัวของอุณหภูมิตลอดความสูงของห้องเผาไหม้เหมือนกับอัตราการป้อน 4 กิโลกรัมต่อชั่วโมง



รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความสูงจากตะแกรงของเชื้อเพลิงซีลีอียดเม็ด 100 เปอร์เซ็นต์

กรณีซีลีอียดเม็ดผสมกลบอัดเม็ดที่อัตราส่วนผสม 75:25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อมีกลบอัดเม็ดเป็นส่วนผสมส่งผลให้ตำแหน่งอุณหภูมิสูงสุดของการเผาไหม้เปลี่ยนแปลงดังรูปที่ 5 สำหรับอัตราการป้อน 4 กิโลกรัมต่อชั่วโมงโดย อุณหภูมิสูงสุดเท่ากันคือ 846 องศาเซลเซียส ที่ระดับความสูงเหนือตะแกรง 25 และ 45 เซนติเมตร และเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการป้อนเพิ่มขึ้น โดยที่ระดับความสูงเหนือตะแกรง 25 และ 45 เซนติเมตร มีอุณหภูมิ 986 และ 976 องศาเซลเซียส และ 1075 และ 1074 องศาเซลเซียส ที่อัตราการป้อน 6 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และ 8 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ตามลำดับ การกระจายตัวของอุณหภูมิแต่ละตำแหน่งใกล้เคียงกันยกเว้นบริเวณที่มีการใส่อากาศทุติยภูมิที่มีอุณหภูมิลดลงเล็กน้อย



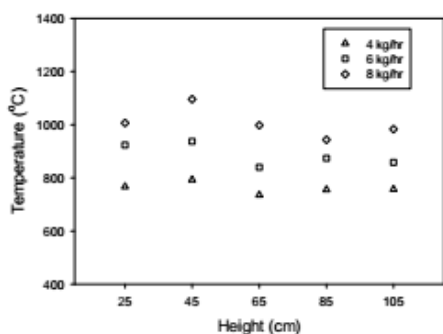
รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความสูงจากตะแกรงของเชื้อเพลิงซีลีอียดเม็ดผสมกลบอัดเม็ด 75:25 เปอร์เซ็นต์

## AEC0019

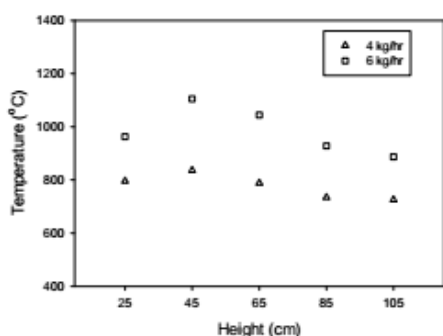
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 30  
5-8 กรกฎาคม 2559 จังหวัดสงขลา



เมื่อเพิ่มปริมาณแกลบอัดเม็ดเป็นอัตราส่วน 50:50 และ 25:75 เปอร์เซ็นต์ ดังรูปที่ 6 และ 7 ตามลำดับ ตำแหน่งของอุณหภูมิสูงสุดเปลี่ยนไป โดยอุณหภูมิการเผาไหม้ลดลงที่ระยะ 25 เซนติเมตรเหนือตะแกรง และเพิ่มขึ้นที่ระยะ 45 และ 65 เซนติเมตรเหนือตะแกรง



รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความสูงจากตะแกรงของเชื้อเพลิงซีลื้อยอัดเม็ดผสมแกลบอัดเม็ด 50:50 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความสูงจากตะแกรงของเชื้อเพลิงซีลื้อยอัดเม็ดผสมแกลบอัดเม็ด 25:75 เปอร์เซ็นต์

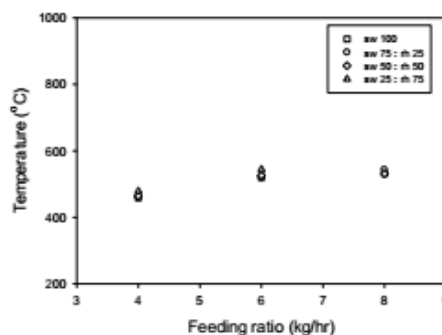
เนื่องจาก bulk density ของเชื้อเพลิงทั้ง 2 ชนิดแตกต่างกัน โดยซีลื้อยอัดเม็ดมีค่า bulk density ที่มากกว่า ทำให้เมื่อเข้าสู่ห้องเผาไหม้จะตกลงเหนือตะแกรงและเกิดการเผาไหม้บริเวณนั้น ส่งผลให้อุณหภูมิเผาไหม้มีค่าสูงที่ตำแหน่งแรกซึ่งอยู่เหนือตะแกรง 25 เซนติเมตร ดังรูปที่ 4 เมื่อผสมซีลื้อยอัดเม็ดกับแกลบอัดเม็ดที่มีค่า bulk density ที่ต่ำกว่า มีขนาดแท่งที่สั้นกว่า และแตกหักได้ง่ายกว่า ส่งผลให้เกิดการเผาไหม้แกลบอัดเม็ดได้ง่ายกว่าซีลื้อยอัดเม็ด จึงทำให้มีการ

กระจายตัวของอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกันตลอดระยะตั้งแต่ตะแกรงจนถึงตำแหน่งที่มีการป้อนเชื้อเพลิง ทำให้ตำแหน่งอุณหภูมิสูงสุดเปลี่ยนไป ดังรูปที่ 5 ถึง 7

สำหรับการทดลองที่อัตราการป้อน 8 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ไม่สามารถบันทึกผลการทดลองได้เนื่องจากปัญหาการรวมตัวเป็นก้อนของเถ้าจากอุณหภูมิสูงทำให้เกิดการอุดตันภายในห้องเผาไหม้ ดังรูปที่ 13

### 3.2 ไอเสีย

อุณหภูมิไอเสียจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของแกลบอัดเม็ดและอัตราการป้อนเชื้อเพลิง ดังรูปที่ 8 อุณหภูมิไอเสียอยู่ระหว่าง 400-600 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิจะมีความแตกต่างของอุณหภูมิเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนจาก 4 กิโลกรัมต่อชั่วโมง เป็น 6 กิโลกรัมต่อชั่วโมง แต่อุณหภูมิมีค่าใกล้เคียงกันที่อัตราการป้อน 6 กิโลกรัมต่อชั่วโมงและ 8 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

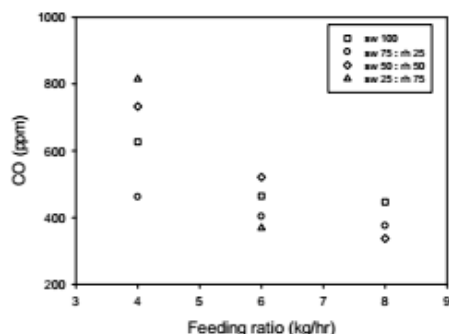


รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิไอเสียและอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่ส่วนผสมต่างๆ

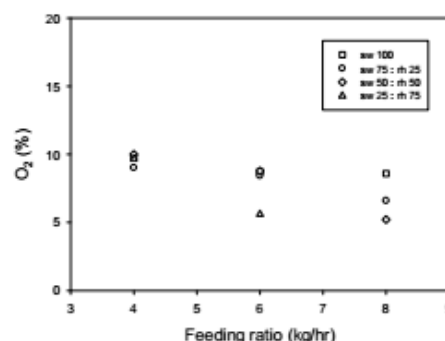
จากรูปที่ 9-12 พบว่าเมื่ออัตราการป้อนเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น การเผาไหม้สมบูรณ์ขึ้น จากผลของปริมาณ  $CO_2$  ที่เพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่ปริมาณ  $CO$  และ  $O_2$  ลดลง สำหรับการทดลอง อากาศส่วนเกินอยู่ในช่วง 100-300% ดังนั้นเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนเชื้อเพลิง ปริมาณอากาศส่วนเกินก็ลดลง การเผาไหม้ที่สมบูรณ์ขึ้นจะทำให้อุณหภูมิการเผาไหม้ที่สูงขึ้นและค่า  $NO_x$  ก็เพิ่มสูงขึ้นด้วย นอกจากนี้ปริมาณ  $CO$  และ  $NO_x$  ในไอเสียเพิ่มขึ้นเมื่อผสมแกลบอัดเม็ดมากขึ้น

## AEC0019

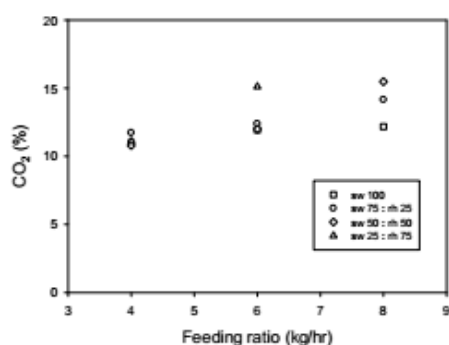
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 30  
5-8 กรกฎาคม 2559 จังหวัดสงขลา



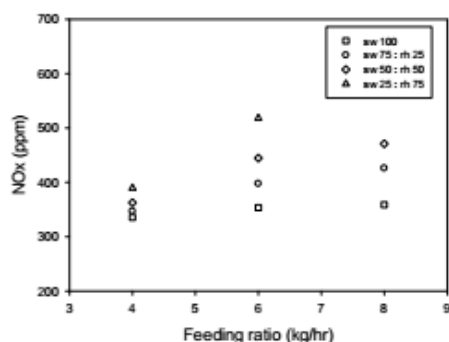
รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างก๊าซ CO และอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่ส่วนผสมต่างๆ



รูปที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างก๊าซ O<sub>2</sub> และอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่ส่วนผสมต่างๆ



รูปที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างก๊าซ CO<sub>2</sub> และอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่ส่วนผสมต่างๆ



รูปที่ 11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างก๊าซ NOx และอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่ส่วนผสมต่างๆ

### 3.3 เถ้า

จากการศึกษาการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงซีล้อยัดเม็ดผสมแกลบอัดเม็ด 5 อัตราส่วนผสม พบว่าปริมาณของเถ้าจะเพิ่มขึ้นจาก 2 กรณี คือเพิ่มขึ้นตามอัตราการป้อน และเพิ่มขึ้นตามปริมาณของแกลบ ดังตารางที่ 3 ที่อัตราการป้อนเดียวกัน เมื่อเพิ่มปริมาณแกลบ เป็น 25 50 และ 75 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ปริมาณของเถ้ามีค่าใกล้เคียงกัน จากตารางที่ 2 พบว่าในองค์ประกอบทางเคมีของแกลบอัดเม็ดจะพบเถ้าสูงถึง 15.699 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแตกต่างจากซีล้อยัดเม็ดที่มีปริมาณเถ้าเพียง 1.280 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นแกลบอัดเม็ดจึงเป็นตัวกำหนดปริมาณของเถ้าที่พบ

ตารางที่ 3 ปริมาณของเถ้า

เชื้อเพลิง (เปอร์เซ็นต์)		ปริมาณเถ้า (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)	
ซีล้อยัดเม็ด	100	4 kg/hr	0.2100
		6 kg/hr	0.3400
		8 kg/hr	0.4596
ซีล้อยัดเม็ด : แกลบอัดเม็ด	75:25	4 kg/hr	0.4260
		6 kg/hr	0.9348
		8 kg/hr	1.1640
	50:50	4 kg/hr	0.6085
		6 kg/hr	0.8328
		8 kg/hr	1.1568
25:75	4 kg/hr	0.5064	



## AEC0019

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 30  
5-8 กรกฎาคม 2559 จังหวัดสงขลา



		6 kg/hr	0.8496
		-	-
แกลบอัดเม็ด	100	-	-
		-	-
		-	-

สำหรับเชื้อเพลิงชีเลื่อยอัดเม็ดผสมแกลบอัดเม็ด 25:75 เปอร์เซนต์ ที่อัตราการป้อน 8 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และเชื้อเพลิงแกลบอัดเม็ด 100 เปอร์เซนต์ที่อัตราการป้อน 4 6 และ 8 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ไม่สามารถบันทึกผลการทดลอง ได้เนื่องจากเกิดการจับตัวเป็นก้อนของเถ้า ส่งผลทำให้ห้องเผาไหม้เกิดการอุดตัน โดยลักษณะของการรวมตัวเป็นก้อนของเถ้าแสดงดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 แสดงลักษณะการรวมตัวเป็นก้อนของเถ้า

#### 4. สรุป

จากการศึกษาการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีเลื่อยอัดเม็ดผสมแกลบอัดเม็ด 5 อัตราส่วนผสม ในเตาเผาฟลูอิดไอดีซ์แบบพองอากาศโดยใช้ อัตราการป้อน 4 6 และ 8 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ที่ความเร็วการไหลอากาศปฐมภูมิ 1.7 เมตรต่อวินาที เมื่อเพิ่มปริมาณของแกลบอัดเม็ดเป็น 25 50 และ 75 เปอร์เซนต์ จะทำให้ตำแหน่งอุณหภูมิสูงสุดเปลี่ยนจากระยะเหนือตะแกรงที่ 25 เซนติเมตรเป็น 45 เซนติเมตร และอุณหภูมิในห้องเผาไหม้เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการป้อน

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่สนับสนุนทุนวิจัยและเอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำการทดลอง และขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และอาจารย์ประจำภาควิชาภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่ให้คำปรึกษาแนะนำ

#### 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] D.O. Hall, F. Rosillo-Calle, R.H. Williams, J. Woods, Biomass for Energy : Supply Prospects. Washington DC, 1993.
- [2] J. Goldemberg, T.B. Johanson, World Energy Assessment. Overview 2004 Update, United Nation Development Programme, New York, USA,2004
- [3] M. Junginer, E. de Visser, K. Hjort-Gregersen, J. Koorneef, R. Raven, A. Faaji, et al., Technological learning in bioenergy systems, *Energy Policy* 34 (18) (2006) 4024-4041.
- [4] C.N. Hamelinck, R. A. A. Suurs, A. P. C. Faaij, International bioenergy transport costs and energy balance, *Biomass and Bioenergy* 29 (2005) 114-134.
- [5] สุขสวัสดิ์ คงกล้า และ ฐานิตย์ เมธิยานนท์, ผลกระทบและแนวทางการแก้ปัญหาการเกิดฟาว์ลิงบนท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจากเผาไหม้วัสดุเหลือใช้จากกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มในเตาเผาไหม้ตะกรับแบบขึ้นบันได,การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25
- [6] A. A. Khan, W. de Jong, P. J. Jansens, H. Spliethoff. Biomass Combustion in Fluidized bed Boilers : Potential problems and remedies. *Fuel Processing Technology* 90 (2009) 21-50.
- [7] Presto, F., J. Anthony, E. D. L. Desai and F. D. Friedrich. Combustion trials of rice hulls in a pilot-scale fluidized bed, *Proc. Int. Conf. Fluid. Bed Combust.* (1987) 1123-1127.
- [8] Bhattacharya, S. C. and Wu, W. Fluidized-bed combustion of rice husk for disposal and energy recovery. *Energy from Biomass and Wastes XII.* (1989).
- [9] เรืออากาศเอกธีรชัย สายแก้ว (2552). ผลของชนิดชีวมวลต่อการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์และไนตรัสออกไซด์ในเตาเผาฟลูอิดไอดีซ์แบบหมุนเวียน
- [10] Feng Duan, Jian Liu, Chien-Song Chyang, Chun-Hsuan Hu, Jim Tso. Combustion behavior and pollutant emission characteristics of RDF

## AEC0019

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 30  
5-8 กรกฎาคม 2559 จังหวัดสงขลา



(refuse derived fuel) and sawdust in a vortexing fluidized bed combustor. *Energy*. (2013) 421-426.

[11] J. Werthera, M. Saenger, E.-U. Hartge, T. Ogada, Z. Siagi. Combustion of agricultural residues. *Progress in Energy and Combustion Science* 26 (2000) 1–27.

[12] L. Armesto, A. Bahillo, K. Veijonen, A. Cabanillas, J. Otero. Combustion behaviour of rice husk in a bubbling fluidised bed. *Biomass and Bioenergy* 23 (2002) 171 – 179.

[13] Feng Duan, Chien-Song Chyang, Chien-Wei Lin, Jim Tso. Experimental study on rice husk combustion in a vortexing fluidized-bed with flue gas recirculation (FGR). *Bioresource Technology* 134 (2013) 204–211.

[14] Bartels M, Vermeer B, Nijenhuis N, van Ommen R, Kapteijn F. Towards selective agglomeration detection in fluidized beds using advanced signal analysis methods. In: Bi X, Berruti F, Pugsley T, editors. *Fluidization XII, engineering conferences international*; 2007. p. 441–8.