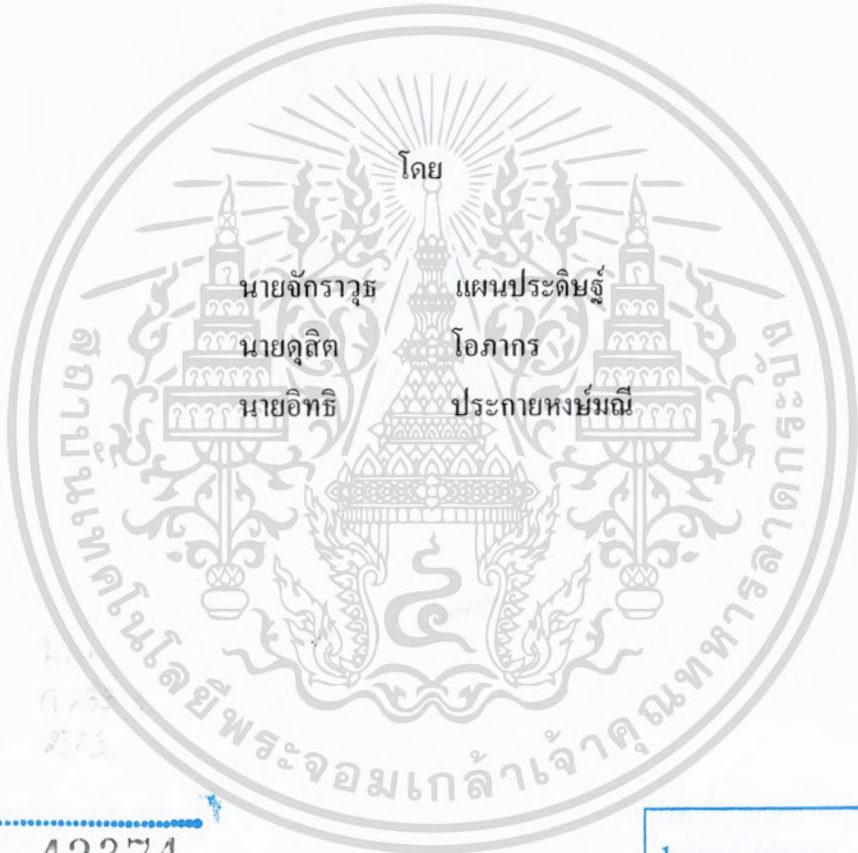


การออกแบบและสร้างเตาเผาชีวมวลแบบฟลูอิดไดซ์เบด

DESIGN AND CONSTRUCTION OF BIOMASS FLUIDIZED BED COMBUSTOR



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 42374
วัน, เดือน, ปี 20 พ.ศ. 2545

b.....
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโท ประจำปีการศึกษา 2543

ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เรื่อง การออกแบบและสร้างเตาเผาชีวมวลแบบฟลูอิดไดซ์เบด

ผู้จัดทำ

1. นายจักรวาล แผนประดิษฐ์
2. นายดุสิต โอภากร
3. นายอิทธิ ประกายหงษ์มณี



..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อ.วัชระ เข็มชาติ)

..... รวิภา เจียรระโนวชิระ:..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร.วิภา เจียรระโนวชิระ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบและสร้างเตาเผาชีวมวลแบบฟลูอิดไดซ์เบด

จักรวาล	แผนประดิษฐ์	
คูสัต	โอภากร	
อิทธิ	ประกายหงษ์มณี	
วัชระ	เพิ่มชาติ	อาจารย์ที่ปรึกษา
วิภา	เจียรระโนวัชระ	อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2543		

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ โครงการวิจัยเตาเผาเชื้อเพลิงชีวมวลแบบฟลูอิดไดซ์เบดที่ใช้ร่วมกับหม้อไอน้ำอุตสาหกรรม โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและค้นคว้าข้อมูลต่างๆ รวมถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชัน ตลอดจนศึกษาถึงแนวทางการออกแบบเตาเผาเชื้อเพลิงชีวมวลแบบฟลูอิดไดซ์เบด โดยใช้เชื้อเพลิงเป็นเชื้อเพลิงและใช้ทรายขนาด 0.3-0.6 เซนติเมตร ที่ความสูง 40 เซนติเมตร เป็นเบดในการเผาไหม้ ตัวเตาเผาที่สร้างขึ้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.9 เมตร โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นทรงกรวยตัด มีความสูง 1 เมตร มุมเอียง 18 องศา และส่วนที่สองเป็นทรงกระบอกจำนวน 4 ท่อน มีความสูงท่อนละ 0.5 เมตร ความสูงรวมทั้งหมดของตัวเตาเผา 3.0 เมตร สร้างจากแผ่นเหล็กหนา 4.5 มิลลิเมตร ประกอบด้วยอุปกรณ์ต่างๆ คือ พัดลมแรงดันสูงสำหรับป้อนอากาศในการเผาไหม้ ระบบป้อนเชื้อเพลิงเป็นแบบเกลียวลำเลียง ระบบอุ่นเบดแบบหัวเผาโดยใช้ก๊าซหุงต้มแอลพีจีเป็นเชื้อเพลิง ระบบเครื่องแยกฝุ่นแบบไซโคลน และแผ่นกระจายลมแบบ nozzle stand pipes with bubble caps มีเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นกระจายลม 0.25 เมตร nozzle มีความสูง 5 เซนติเมตร เจาะรูขนาด 2 มิลลิเมตร โดยรอบ จำนวน 9 หัว

ในขั้นตอนการทดลอง ได้ทำการศึกษาถึงลักษณะของความดันตกคร่อมผ่านเบดที่เกิดขึ้นในส่วนทรงกรวยตัดของตัวเตาเผา ที่มุมเอียง 15, 22 และ 30 องศา พบว่า ทรงกรวยตัดมีส่วนช่วยในการลดความดันตกคร่อมผ่านเบดที่เกิดขึ้นในเตาเผาได้ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อค่ามุมเอียงของทรงกรวยตัดหรือความสูงของเบดเพิ่มมากขึ้น จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ Spouted bed ขึ้นแทน นอกจากนี้ยังได้ทำการทดลองระบบอุ่นเบดขณะที่ยังไม่ได้หุ้มฉนวนเตาเผา พบว่าการใช้หัวเผาอุ่นเบดโดยใช้ก๊าซแอลพีจีเป็นเชื้อเพลิง จะสามารถอุ่นเบดได้ อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ในเวลา 80 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGN AND CONSTRUCTION OF BIOMASS FLUIDIZED BED COMBUSTOR

Mr. Jakkawut	Phanpradit	
Mr. Dusit	Ophakorn	
Mr. Itti	Prakaihongmanee	
Mr. Watchara	Permchart	Advisor
Dr. Vipa	Jayranaiwachira	Advisor
Year 2000		

ABSTRACT

This project is a part of the development of a biomass fluidized bed combustor connected to an industrial steam boiler. The objectives of the project are to study the characteristics of fluidization and preliminary design of the fluidized bed combustor firing biomass fuel by using sawdust as the fuel and sand as the bed material (diameter of 0.3-0.6 mm) with 40 cm of bed height in the combustor. The circular cross sectional area of about 0.9 m inside diameter of a cylindrical part is selected and a total height of the combustor of about 3 m (conical part of 18 degree cone angle is 1 m high and 4 cylindrical parts are 0.5 m high in each part). The combustor is made from a steel sheet with 4.5 mm thick. There are 5 main components such as, forced draft fan, screw feeder, bed preheating system with LPG burner, dust separator and the air distributor plate of nozzle stand pipes with a bubble cap type. A plate diameter of the air distributor is 0.25 m. There are 9 nozzles with 5 cm high and 2 mm of hole diameter around the nozzle body.

In the experimental tests of pressure drop across the bed in the conical part. The study were taking place by selecting 3 conical parts of 15, 22 and 30 degree cone angles. The results have shown that the conical shaped bed can reduce the pressure drop across the bed in the combustor. However, the greater of the cone angle degree or bed height would be led to the spouted bed effect. Additionally, results of the bed preheating tests in a non-insulated combustor shows a bed temperature up to 350°C by taking about 80 minutes.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

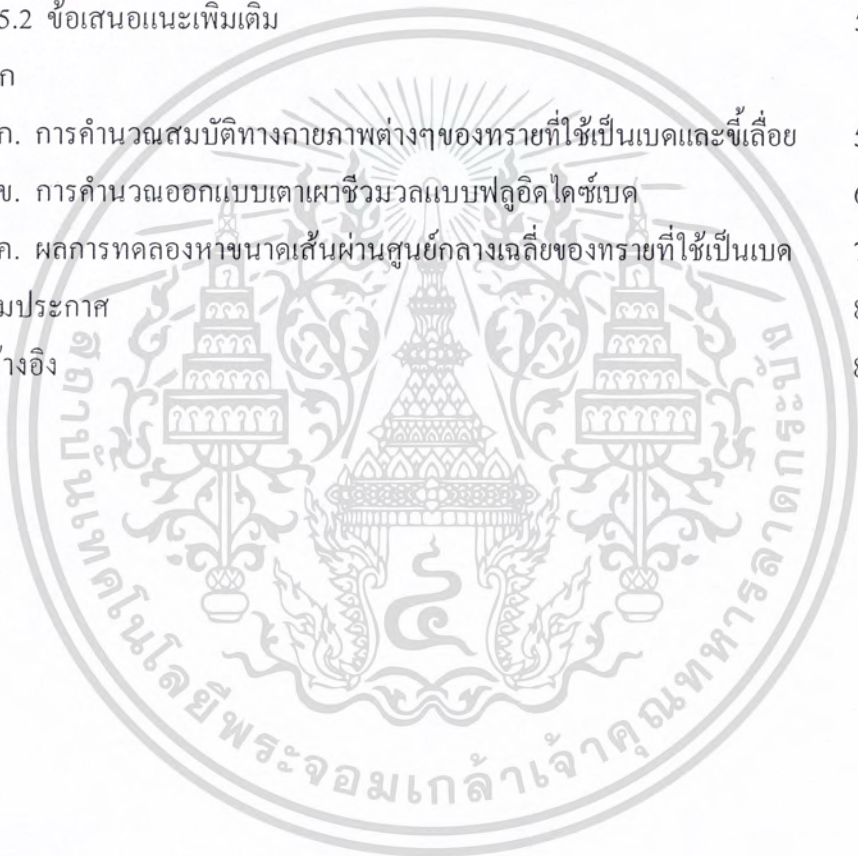
	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
สารบัญ	ค
สารบัญภาพ	ฉ
สารบัญตาราง	ช
สัญลักษณ์	ณ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาของงานโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	
2.1 เชื้อเพลิงชีวมวล	3
2.2 การนำชีวมวลมาใช้เป็นประโยชน์	6
2.3 ทฤษฎีการเผาไหม้	7
2.3.1 ปฏิกิริยาเคมีของการเผาไหม้	8
2.3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการเผาไหม้	8
2.3.3 การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็ง	9
2.4 เทคนิคฟลูอิดไดเซชัน	10
2.5 ฟลูอิดไดซ์เบด	11
2.5.1 การสูญเสียพลังงานการไหลผ่านเบดนิ่ง	13
2.5.2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยและแฟกเตอร์รูปร่าง	15
2.5.3 ความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชัน	16
2.5.4 ผลของความดันและอุณหภูมิต่อฟลูอิดไดซ์เบด	18
2.5.5 ลักษณะของฟลูอิดไดซ์เบดแบ่งตามสมบัติของอนุภาค	19
2.5.6 ความเร็วสุดท้ายของอนุภาค (U _t)	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6	พัดลม	22
2.6.1	ลักษณะของพัดลม	22
2.6.2	ลักษณะของใบพัด	23
2.6.3	การเลือกพัดลม	26
2.7	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	27
บทที่ 3	ขั้นตอนการดำเนินงาน	
3.1	การศึกษาสมบัติทางกายภาพของทรายที่ใช้เป็นเบดและซีลี้อย	30
3.1.1	การหาสัดส่วนช่องว่างและความกลมของเบด	30
3.1.2	การหาความหนาแน่นของทรายและซีลี้อย	30
3.1.3	การหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของทราย โดยใช้ตะแกรงร่อน	31
3.1.4	การหาความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดซ์	31
3.2	การออกแบบเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด	31
3.2.1	ตัวเตาเผา	32
3.2.2	แผ่นกระจายลม	33
3.2.3	ระบบป้อนเชื้อเพลิง	35
3.2.4	ระบบป้อนอากาศ	35
3.2.5	ระบบอุ่นเบด	36
3.2.6	ระบบเครื่องแยกฝุ่น	37
3.2.7	ระบบวัดอุณหภูมิ	38
3.2	การทดสอบหาค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดซ์เบดจากการทดลอง	39
3.4	การทดสอบระบบอุ่นเบด	40
3.5	การจัดเตรียมการทดสอบการทำงานของเตาเผา	41
บทที่ 4	ผลการทดลอง	
4.1	ผลการวิเคราะห์ค่าสมบัติทางกายภาพของทรายที่ใช้เป็นเบด	43
4.2	ผลการวิเคราะห์ค่าสมบัติทางกายภาพของซีลี้อย	45
4.3	การทดลองหาค่าความดันลดของเบด	46
4.3.1	ผลการทดลอง	46
4.3.2	วิจารณ์ผลการทดลอง	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ผลการทดลองการอ่านเบด	50
4.4.1 หลักการ	50
4.4.2 การทดลองการจุด	52
4.4.3 ผลการทดลอง	53
4.4.4 วิจัยณ์ผลการทดลอง	54
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษา	
5.1 สรุปผลการทดลอง	56
5.2 ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม	56
ภาคผนวก	
ก. การคำนวณสมบัติทางกายภาพต่างๆของทรายที่ใช้เป็นเบดและจีลื้อย	58
ข. การคำนวณออกแบบเตาเผาชีวมวลแบบฟลูอิดไดซ์เบด	61
ค. ผลการทดลองหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของทรายที่ใช้เป็นเบด	75
กิตติกรรมประกาศ	81
เอกสารอ้างอิง	82



สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 การเกิดปฏิกิริยา Gasification และ Combustion	7
2.2 ฟลูอิดไดเซชันของเหลว-ของแข็งกับฟลูอิดไดเซชันก๊าซ-ของแข็ง	11
2.3 ลักษณะต่างๆของการฟลูอิดไดเซชันของแข็งกับของไหลที่เกิดขึ้นเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น	11
2.4 ความดันตกและความเร็วในเบดของอนุภาคในช่วงกระจายขนาดกว้าง	14
2.5 ความสัมพันธ์ของความดันตกและความเร็วในเบด	15
2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความกลมกับความพรุนของเบด	16
2.7 แผนภูมิ Geldart	20
2.8 ลักษณะการฟลูอิดไดเซชันที่เกิดขึ้นในอนุภาคนิตต่างๆ	20
2.9 ความสัมพันธ์ของอนุภาคกับค่าความเร็วสุดท้ายของของไหล	21
2.10 ความสัมพันธ์ของอนุภาคกับค่า U/U_{mf}	21
2.11 ตัวอย่างใบพัดที่พบได้ในพัดลมทั่วไป	23
2.12 ลักษณะของใบพัดแบบโค้งหลังทั้งสองแบบ ด้านซ้ายเป็นใบพัดแบบชั้นเดียวและด้านขวาเป็นใบพัดแบบแอร์ฟอยล์	24
2.13 สมรรถนะของพัดลมแบบใบพัดโค้งหลังทั้งสองแบบ ด้านซ้ายเป็นใบพัดแบบชั้นเดียวและด้านขวาเป็นใบพัดแบบแอร์ฟอยล์	25
2.14 ความสัมพันธ์ของความดันสถิตยที่เกิดขึ้นกับปริมาณลมที่ได้ของพัดลมแบบใบพัดโค้งหน้า	26
3.1 รายละเอียดส่วนประกอบของเตาเผา	32
3.2 รายละเอียดของตัวเตาเผา	33
3.3 แผ่นกระจายลม	34
3.4 ระบบป้อนเชื้อเพลิง	35
3.5 พัดลมป้อนอากาศสำหรับเผาไหม้	36
3.6 ระบบอุ่นเบดแบบเหนือบด	36
3.7 ระบบเครื่องแยกฝุ่น	37
3.8 ตำแหน่งของ Thermocouple ต่อเข้ากับตัวเตาเผา	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.9	อุปกรณ์ทดสอบหาค่าความดันลดผ่านเบด	39
3.10	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดกับความเร็ว	40
3.11	ระบบอุ่นเบด	41
3.12	อุปกรณ์การทดสอบการทำงานของเตาเผา	42
4.1	ตัวอย่างของทรายที่นำมาทดสอบหาสมบัติทางกายภาพ	44
4.2	ตัวอย่างซีเมนต์ที่ใช้ทำการทดลอง	46
4.3	ผลการทดลองหาค่าความดันลดผ่านเบดที่มุมเอียงของกรวย 15 องศา	47
4.4	ผลการทดลองหาค่าความดันลดผ่านเบดที่มุมเอียงของกรวย 22 องศา	47
4.5	ผลการทดลองหาค่าความดันลดผ่านเบดที่มุมเอียงของกรวย 30 องศา	47
4.6	การทดลองหาค่าความดันลดผ่านเบด	48
4.7	ผลการทดลองความดันลดเปรียบเทียบกับค่าจากการคำนวณ	49
4.8	เปรียบเทียบกับค่าที่ปรับแก้แล้วที่มุมกรวย 15 องศา กับค่าที่ได้จากการทดลอง	50
4.9	เปรียบเทียบกับค่าที่ปรับแก้แล้วที่มุมกรวย 22 องศา กับค่าที่ได้จากการทดลอง	50
4.10	ลักษณะหัวเผาด้านในเตา	51
4.11	ลักษณะหัวเผาด้านนอกเตา	51
4.12	ลักษณะเปลวไฟขณะอุ่นเบด	52
4.13	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในการอุ่นเบด	53
4.14	ส่วนของเทอร์โมคัปเปิ้ลที่อยู่ด้านนอกเตา	54
4.15	ส่วนของเทอร์โมคัปเปิ้ลที่อยู่ด้านในเตา	55

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สัดส่วนการเปลี่ยนแปลงปริมาณผลผลิตทางการเกษตรเป็นชีวมวล	4
2.2 ปริมาณชีวมวลชนิดต่างๆ ที่ผลิตได้ในประเทศไทยปีเพาะปลูก 2538/39	5
2.3 ราคาชีวมวล	6
2.4 ตัวอย่างค่าความพรุนของอนุภาคชนิดต่างๆ	16
2.5 ค่า K_1 และ K_2 จากคณะวิจัยต่างๆ	18
2.6 ตารางเลือกพิจารณาเลือกพัฒนาเบื้องต้น	27
4.1 ค่าสัดส่วนช่องว่างและความหนาแน่นของทรายขนาดเล็กที่ใช้เป็นเบด	43
4.2 ค่าสัดส่วนช่องว่างและความหนาแน่นของทรายขนาดใหญ่ที่ใช้เป็นเบด	44
4.3 ค่าสัดส่วนช่องว่างและความหนาแน่นของซีลื้อย	45
4.4 ผลการวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบทางเคมีของซีลื้อย	45
4.5 ความเร็วค่าสุดของการเกิดฟลูอิดไดซ์ที่ได้จากการทดลอง	48
ก.1 ผลการทดลองหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของทราย	60
ค.1 ผลการทดลองหาขนาดวัสดุปริมาณมวล (ขนาดเล็กครั้งที่ 1)	76
ค.2 ผลการทดลองหาขนาดวัสดุปริมาณมวล (ขนาดเล็กครั้งที่ 2)	76
ค.3 ผลการทดลองหาขนาดวัสดุปริมาณมวล (ขนาดเล็กครั้งที่ 3)	77
ค.4 ผลการทดลองหาขนาดวัสดุปริมาณมวล (ขนาดเล็กครั้งที่ 4)	77
ค.5 ผลการทดลองหาขนาดวัสดุปริมาณมวล (ขนาดเล็กครั้งที่ 5)	78
ค.6 ผลการทดลองหาขนาดวัสดุปริมาณมวล (ขนาดใหญ่ครั้งที่ 1)	78
ค.7 ผลการทดลองหาขนาดวัสดุปริมาณมวล (ขนาดใหญ่ครั้งที่ 2)	79
ค.8 ผลการทดลองหาขนาดวัสดุปริมาณมวล (ขนาดใหญ่ครั้งที่ 3)	79
ค.9 ผลการทดลองหาขนาดวัสดุปริมาณมวล (ขนาดใหญ่ครั้งที่ 4)	80
ค.10 ผลการทดลองหาขนาดวัสดุปริมาณมวล (ขนาดใหญ่ครั้งที่ 5)	80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์

d_m	=	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กที่สุดของเบด, เซนติเมตร
d_p	=	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเบด, เซนติเมตร
d_{pi}	=	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของขนาดของตะแกรง 2 อันที่ใช้ร่อน, เซนติเมตร
g	=	ค่าความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก, เซนติเมตร/วินาที ²
L_m	=	ความสูงของเบดนิ่ง, เมตร
M	=	น้ำหนักของทราย, กรัม
Re	=	ตัวเลขเรย์โนลด์
U_{mf}	=	ความเร็วต่ำสุดในการฟลูอิดไดซ์, เซนติเมตร/วินาที
U_t	=	ความเร็วสุดท้ายของการฟลูอิดไดซ์, เซนติเมตร/วินาที
V	=	ผลต่างปริมาตรน้ำเมื่อเริ่มต้นและสุดท้าย, เซนติเมตร ³
V_h	=	ปริมาตรของนอร์มอลเฮกเซนก่อนผสม, เซนติเมตร ³
V_n	=	ปริมาตรของทรายรวมกับช่องว่างผสมกับนอร์มอลเฮกเซน, เซนติเมตร ³
V_v	=	ปริมาตรของทรายรวมกับช่องว่าง, เซนติเมตร ³
X_i	=	สัดส่วนของน้ำหนักทรายที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง
ρ_p	=	ความหนาแน่นของทราย, กรัม/เซนติเมตร ³
ρ_s	=	ความหนาแน่นของแข็ง, กรัม/เซนติเมตร ³
ΔP_t	=	ความดันลดทั้งหมดของเตา, พาสกาล
ΔP_b	=	ความดันลดของเบด, พาสกาล
ϵ_m	=	สัดส่วนช่องว่างของเบดนิ่ง
ϵ_{mf}	=	สัดส่วนช่องว่างของเบดขณะฟลูอิดไดซ์
ϕ_s	=	ความกลมของอนุภาค
μ	=	ความหนืดของของไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาของโครงการ

ประเทศไทยในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา ได้มีการพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีอย่างต่อเนื่อง พลังงานนับเป็นปัจจัยที่สำคัญหนึ่งในการพัฒนาทางด้านเทคโนโลยี ประเทศไทยใช้น้ำมันและก๊าซธรรมชาติเป็นพลังงาน โดยปัจจุบันกว่าร้อยละ 50 ของอุปทานพลังงานได้มาจากแหล่งพลังงานภายในประเทศ แต่ในอนาคตคาดว่าจะต้องพึ่งพาแหล่งพลังงานจากการนำเข้า ซึ่งจะทำให้ประเทศไทยต้องขาดดุลการค้าจากการนำเข้าน้ำมันดิบในปีหนึ่งๆ เป็นจำนวนมาก ประกอบกับในช่วง 2-3 ปีที่ผ่านมา ประเทศไทยประสบปัญหาเศรษฐกิจตกต่ำ ภาครัฐได้เริ่มใช้มาตรการในการประหยัดพลังงาน โดยการรณรงค์ให้มีการอนุรักษ์และประหยัดการใช้พลังงานภายในประเทศ ทั้งภาคอุตสาหกรรม ภาคเกษตรกรรม รวมทั้งอาคารและที่พักอาศัย โดยการส่งเสริมให้มีการนำพลังงานรูปแบบอื่นมาทดแทนการใช้ น้ำมัน แหล่งพลังงานทดแทนที่ใช้ในประเทศไทย มีหลายประเภท เช่น พลังงานลม พลังงานชีวมวล พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานความร้อนใต้พิภพ พลังงานน้ำ เป็นต้น พลังงานชีวมวลนับเป็นพลังงานทดแทนรูปแบบหนึ่งที่ประเทศไทยมีศักยภาพเพียงพอที่จะสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ ทั้งนี้เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเช่น แกลบ ไม้ ฟืน ขี้เลื่อย ชานอ้อย เป็นต้น นับว่าเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลที่สามารถนำมาผลิตเป็นพลังงานเพื่อทดแทนการใช้ น้ำมัน ได้ โดยเฉพาะในภาคอุตสาหกรรมซึ่งเป็นส่วนที่มีการใช้พลังงานมาก จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงกระบวนการผลิตให้สามารถใช้พลังงานทดแทนรูปแบบอื่นร่วมกับการใช้น้ำมันหรือเชื้อเพลิงหลักชนิดอื่นๆ ในอุตสาหกรรม การปรับปรุงดังกล่าวจำเป็นต้องใช้เทคโนโลยีการเปลี่ยนรูปพลังงานจากชีวมวลที่มีประสิทธิภาพสูง เพื่อให้ได้พลังงานมาใช้อย่างเต็มที่ ซึ่งจะทำให้ลดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงจากปิโตรเลียมลงได้

แนวทางหนึ่งในการพัฒนาเทคโนโลยีการเปลี่ยนรูปพลังงานจากชีวมวลมาใช้ประโยชน์ โดยการออกแบบเตาเผาเชื้อเพลิงชีวมวลในขนาดที่พอเหมาะ และนำไปประยุกต์ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมให้สามารถนำเชื้อเพลิงชีวมวลมาใช้ในระบบ เพื่อผลิตพลังงานร่วมกับพลังงานที่ได้จากเชื้อเพลิงหลัก เทคโนโลยีเตาเผาประสิทธิภาพสูงที่น่าสนใจ คือ เทคโนโลยีเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบด ซึ่งเป็นการทำให้เบด (Bed) มีสภาพเสมือนของไหลไหลวนอยู่ในเตา เมื่อได้รับความร้อนจากการเผาไหม้จะมีอุณหภูมิประมาณ 400-500 °C ทำให้สามารถทำปฏิกิริยาการเผาไหม้กับวัสดุที่ป้อนเข้าไปได้อย่างรวดเร็ว โดยเตาเผาแบบนี้สามารถเผาไหม้เชื้อเพลิงคุณภาพต่ำได้ ให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้สูง ควบคุมมลพิษง่าย เพราะคุณภาพไอเสียที่ออกจากปล่องมีมลพิษต่ำเมื่อเทียบกับเตาเผาชนิดอื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาหลักการออกแบบและสร้างเตาเผาเชื้อเพลิงชีวมวลแบบฟลูอิดไดซ์เบด ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานร่วมกับเตาเผา (Boiler-Furnace) ในโรงงานอุตสาหกรรมได้ โดยการเชื่อมต่อเข้ากับหม้อไอน้ำในรูปแบบของ Combustor-Boiler System เพื่อลดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงจากปิโตรเลียมลง โดยใช้เงินลงทุนที่ไม่สูงนัก

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชัน
- 1.2.2 เพื่อศึกษาขั้นตอนออกแบบและสร้างเตาเผาเชื้อเพลิงชีวมวลแบบฟลูอิดไดซ์เบด

1.3 ขอบเขตของโครงการ

- 1.3.1 ศึกษาและค้นคว้าข้อมูล รวมถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชัน
- 1.3.2 ศึกษาขั้นตอนการออกแบบ ตลอดจนสร้างเตาเผาเชื้อเพลิงชีวมวลแบบฟลูอิดไดซ์เบด

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ได้รับความรู้ต่างๆ เกี่ยวกับเชื้อเพลิงชีวมวล การเผาไหม้ ตลอดจนการออกแบบเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด
- 1.4.2 สามารถนำข้อมูลไปใช้เป็นแนวทางการศึกษาและวิจัย ตลอดจนการประยุกต์ใช้งานเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดในโรงงานอุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 เชื้อเพลิงชีวมวล

Biomass หรือที่ใ้ช้ชื่อนี้ในภาษาไทยว่า ชีวมวล หมายถึง อินทรีย์สารซึ่งสามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานได้ เชื้อเพลิงชีวมวลนับเป็นเชื้อเพลิงเก่าแก่ที่สุดที่มนุษย์นำมาใช้ ทั้งในการทำอาหารและให้ความร้อนเพื่อกิจกรรมต่างๆ ซึ่งในปัจจุบันเป็นพลังงานที่มีราคาถูกเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงที่ได้จากซากดึกดำบรรพ์ (Fossil fuels) ชีวมวลสามารถพบได้รอบๆ ตัวเรา เช่น ต้นไม้ หญ้า และพืชทะเลต่างๆ นอกจากนี้ยังรวมถึงวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น ฟางข้าว แกลบ ชังข้าวโพด ชานอ้อย เศษดินตอของพืชที่เหลือจากการเก็บเกี่ยว ตลอดจนมูลสัตว์ต่างๆ ด้วย

ในภาพรวมแล้วชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงที่ใช้มากที่สุดเป็นอันดับที่สี่รองจากน้ำมัน ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติ ซึ่งคิดเป็น 13% ของพลังงานที่ใช้โดยมนุษย์ ประโยชน์ในการนำชีวมวลมาใช้ คือ เชื้อเพลิงชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงที่ไม่มีองค์ประกอบของกำมะถัน ดังนั้นจึงช่วยลดผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกี่ยวข้องกับการเกิดฝนกรด (Acid rain) ได้ ในขณะที่คาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณที่เท่ากันนี้ ก็จะถูกดูดซับจากบรรยากาศในระหว่างวัฏจักรการเติบโตของชีวมวล ดังนั้นเชื้อเพลิงชีวมวลจะหมุนเวียนคาร์บอนจากบรรยากาศทำให้ลดผลกระทบจากภาวะโลกร้อนขึ้น (Global warming) ซึ่งต่างจากการใช้เชื้อเพลิงซากดึกดำบรรพ์ เพราะการใช้เชื้อเพลิงซากดึกดำบรรพ์นั้น เป็นการเพิ่มปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศโดยไม่มีกระบวนการหมุนเวียนนำคาร์บอนไดออกไซด์กลับมาใช้ นอกจากนี้การใช้ชีวมวลยังช่วยลดปริมาณของวัสดุที่ต้องนำไปฝังกลบ และการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลจะก็ทำให้เกิด้านน้อยกว่าการเผาไหม้ถ่านหิน ทำให้ลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดเต้า และถ้าจากชีวมวลนั้นสามารถนำไปใช้เป็นปุ๋ยได้อีกด้วย การใช้ชีวมวล (วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร) เป็นเชื้อเพลิงเป็นการสร้างรายได้เสริมให้แก่เกษตรกร และเกษตรกรยังสามารถปลูกพืชพลังงาน เช่น หญ้า และต้นไม้ เป็นรายได้พิเศษได้อีกด้วย ถ้าในอนาคตมีการสนับสนุนให้นำเชื้อเพลิงชีวมวลมาใช้ในเชิงอุตสาหกรรมมากขึ้น

ปริมาณชีวมวล (วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร) ที่สามารถผลิตได้ในเมืองไทยนั้น จะแปรผันและขึ้นอยู่กับปริมาณผลผลิตทางการเกษตรของประเทศ ซึ่งสามารถประเมินได้จากผลคูณของปริมาณผลผลิตทางการเกษตรที่ก่อให้เกิดชีวมวลนั้นๆ กับสัดส่วนของการเปลี่ยนแปลงปริมาณผลผลิตไปเป็นปริมาณชีวมวล (Crop/Residue ratio) ดังแสดงในตารางที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 สัดส่วนการเปลี่ยนแปลงปริมาณผลผลิตทางการเกษตรเป็นชีวมวล [10]

Crop	Residue	Crop/Residue ratio	Energy content (MJ/kg)
Rice	Husk	0.267	14.40
	Straw	0.695	15.11
Sugar Cane	Bagasse	0.291	7.99
	Top&Trashier	0.215	17.41
Maize	Corn Cob	2.000	17.71
Cassava	Stalk	0.088	18.42
Mungbean	Stalk & Stem	3.200	14.90
Coconut	Fiber	0.420	15.99
	Shell	0.120	17.62
Groundnut	Shell	0.323	12.68
Soybean	Stalk	0.394	19.46
Cotton	Stalk	3.232	19.25
Sorghum	Leaves&Stem	1.200	19.25
Oil Palm	Empty Bunches	0.234	4.41
	Fiber	0.180	9.63
	Shell	0.073	13.44

ปริมาณผลผลิตทางการเกษตรของประเทศไทยในปีเพาะปลูก 2538-2539 นำมาประเมินหาค่าปริมาณชีวมวลประเภทต่างๆ ยกเว้นไม้พื้ ไม้ไผ่ ไม้สัก กล้วย ช้างข้าวโพด ลำต้นมันสำปะหลัง ชานอ้อย เยื่อใยและเปลือกจากผลมะพร้าว และเยื่อใยและเปลือกจากผลปาล์มและทะลายปาล์ม จะได้ชีวมวลในรูปแบบของวัสดุเหลือทิ้งดังแสดงในตารางที่ 2.2

ปริมาณชีวมวลที่สามารถผลิตได้รวมทั้งประเทศมีจำนวนประมาณ 34.45 ล้านตัน ประเมินเป็นพลังงานได้ประมาณ 415,870 ล้านกิโลจูล หรือเทียบเท่าน้ำมันดิบ 9.84 ล้านตัน ชีวมวลส่วนใหญ่ที่ผลิตได้ คือ ชานอ้อยมีปริมาณ 16.87 ล้านตัน หรือเทียบเท่าน้ำมันดิบ 3.19 ล้านตัน รองลงมาคือ ช้างข้าวโพด ซึ่งให้ปริมาณการผลิต 8.31 ล้านตัน หรือเทียบเท่ากับน้ำมันดิบ 3.48 ล้านตัน และกล้วยมีปริมาณ 5.83 ล้านตัน หรือเทียบเท่าน้ำมันดิบ 2.00 ล้านตัน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ปริมาณชีวมวลชนิดต่างๆ ที่ผลิตได้ในประเทศไทยปีเพาะปลูก 2538/39 [10]

ชนิด	ผลผลิต	ชีวมวล		พลังงานทั้งหมด	
		ประเภท	ปริมาณ (1000 ton)	(1000 GJ)	(1000 toe)
ข้าวเปลือก	22,015	แกลบ	5,878.14	84,645.16	2,003.72
มะพร้าว	1,413	กาบมะพร้าว	593.47	9,489.59	224.64
		กะลามะพร้าว	169.57	2,987.82	70.73
มัน	17,388	ค้ำต้นมัน	1,530.12	28,184.90	667.19
ลำปะลั่ง	57,974	ลำปะลั่ง	16,870.36	134,962.91	3,194.84
อ้อย	4,155	ชานอ้อย	8,309.04	147,153.10	3,483.41
ข้าวโพด	2,255	ซังข้าวโพด	527.78	2,327.49	55.10
ปาล์มน้ำมัน		ทะลายปาล์ม	405.98	3,909.60	92.55
		เชือยปาล์ม	164.62	2,212.49	52.37
		กะลาปาล์ม			
รวม	105,200		34,449.08	415,873.06	9,844.55

จากการสำรวจการใช้ชีวมวลในอุตสาหกรรมของศูนย์อนุรักษ์พลังงานแห่งประเทศไทยในปี 2539 พบว่าชีวมวลที่นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงงานอุตสาหกรรมโดยทั่วไปมักจะเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตของโรงงานนั้นๆ หรือเป็นวัสดุเหลือทิ้งที่หาได้จากโรงงานในบริเวณใกล้เคียง ดังนั้นราคาเชื้อเพลิงชีวมวลจึงมีค่าไม่สูงมากเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงฟอสซิล โดยราคาเชื้อเพลิงชีวมวลในแต่ละท้องถิ่นจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับระยะทางจากแหล่งผลิตถึงผู้ใช้ แสดงในตารางที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 2.3 ราคาชีวมวล [10]

ชนิดของชีวมวล	ราคา (บาท / ตัน)
ไม้ฟัน	240 – 1,000
ถ่านไม้	400 – 6,600
แกลบ	100 – 200
ฟางข้าว	40 – 150
ชานอ้อย	130 – 200
คั้นอ้อย	50
ชังข้าวโพด	350 – 500
คั้นข้าวโพด	50
เส้นใย / เปลือกปาล์ม	40 – 200
เส้นใย / เปลือกมะพร้าว	30 – 200
ลำต้นมันสำปะหลัง	40
กากถั่วเหลือง	40

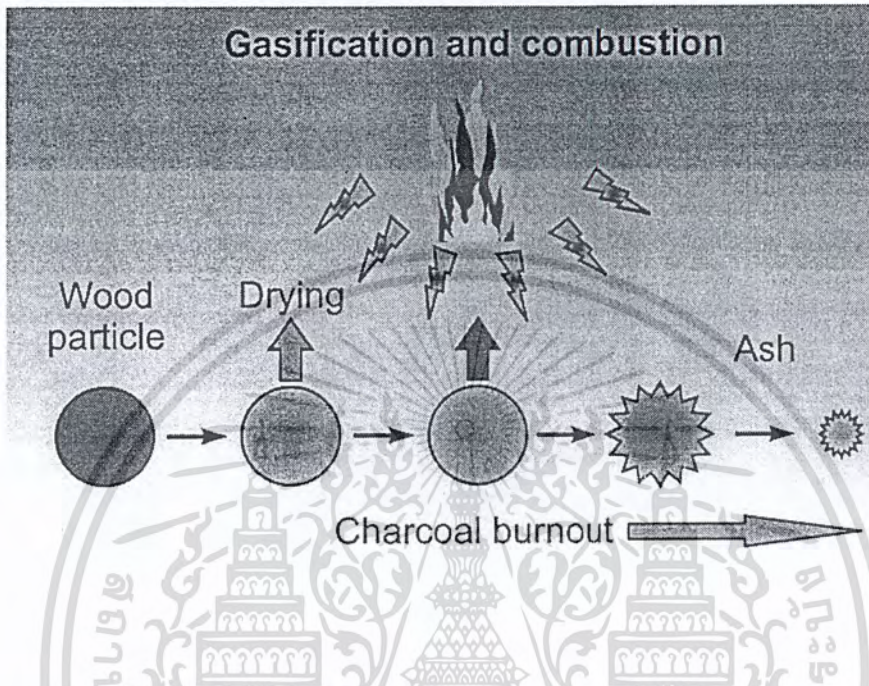
2.2 การนำชีวมวลมาใช้เป็นประโยชน์

การเปลี่ยนรูปชีวมวลให้เป็นพลังงานในรูปความร้อนโดยกระบวนการ Thermal conversion นั้น มีอยู่ 3 วิธีหลักๆ คือ Pyrolysis, Gasification และ Combustion

Pyrolysis คือ การเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน ที่อุณหภูมิสูงกว่า 250 °C ซึ่งผลของกระบวนการ Pyrolysis จะทำให้เกิดผลผลิตออกมา 3 ประเภท คือ ของแข็ง (เช่น Char, Charcoal หรือ ถ่าน) ของเหลว (น้ำมัน สารระเหย หรือกรด) และก๊าซต่างๆ โดยที่อัตราส่วนของผลผลิตที่ได้ นั้น จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของชีวมวลและสภาพของการเกิดปฏิกิริยา โดยปัญหาหลักของวิธี Pyrolysis คือ สามารถสร้างได้เพียงขนาดเล็กๆ เท่านั้น ส่วนก๊าซที่ได้จากปฏิกิริยานั้นมีพลังงานต่ำ

Gasification เป็นการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลอย่างสมบูรณ์ในเตาแบบปิด (Gasifier) ในอุณหภูมิที่สูงกว่า 350 °C โดยจะได้ก๊าซที่สามารถเผาไหม้ได้ สารประกอบอินทรีย์ที่เป็นสารระเหย (Volatile organic compounds) และขี้เถ้า ขั้นตอนของวิธีการ Gasification คือ Drying, Pyrolysis, Oxidation และเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Reduction โดยที่กระบวนการทั้งหมดจะเกิดขึ้นใน Gasifier โดยที่อุณหภูมิ 200 °C จะเริ่มมีสารระเหยของสารประกอบอินทรีย์ระเหยออกมา และที่อุณหภูมิสูงขึ้น โครงสร้างทางเคมีของอินทรีย์สารก็จะแตกตัว จากนั้นเกิดปฏิกิริยาเคมีจนได้ผลผลิตออกเป็นก๊าซชนิดต่างๆ



รูปที่ 2.1 การเกิดปฏิกิริยา Gasification และ Combustion

Direct Combustion เป็นวิธีที่สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมได้ และความร้อนที่ได้นั้นสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลายทาง เช่น นำมาอบแห้ง มาผลิตน้ำร้อนที่ใช้ในกระบวนการผลิต ทำไอน้ำความดันต่ำ (0.1 - 1.0 MPa) ที่นำไปใช้ในการทำความร้อน และน้ำร้อนความดันสูง (4 - 10 MPa) ในการขับเคลื่อนสำหรับผลิตไฟฟ้า และอื่นๆ

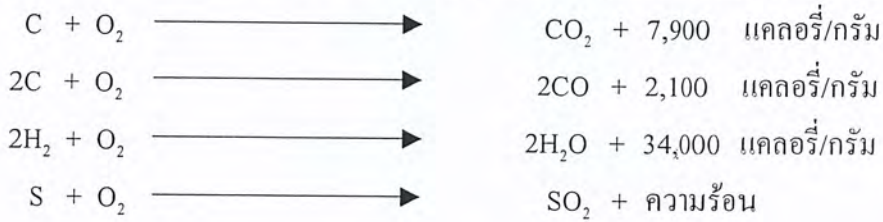
2.3 ทฤษฎีการเผาไหม้ (Theory of combustion)

การเผาไหม้เป็นปฏิกิริยารวมตัวกันของเชื้อเพลิงกับออกซิเจนอย่างรวดเร็ว พร้อมกันเกิดการลุกไหม้และคายความร้อน ในการเผาไหม้ส่วนใหญ่จะไม่ใช้ออกซิเจนล้วนๆ เพราะสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายมากและอันตราย ในทางปฏิบัติจะใช้อากาศซึ่งสามารถหาได้ในราคาถูกแทน ในอากาศมีก๊าซออกซิเจนและไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบหลัก ส่วนก๊าซอื่นๆ มีปะปนอยู่น้อยมาก ออกซิเจนจะมีอยู่ในอากาศร้อยละ 21 และไนโตรเจนร้อยละ 79 โดยปริมาตร หรือประมาณร้อยละ 23 และร้อยละ 77 โดยน้ำหนักตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1 ปฏิกริยาเคมีของการเผาไหม้

เนื่องจากเชื้อเพลิงส่วนใหญ่ประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และปริมาณธาตุอื่นปะปนอยู่บ้าง เช่น กำมะถัน เมื่อนำไปเผาไหม้จะเกิดปฏิกริยาเคมี ดังแสดงด้วยสมการต่อไปนี้



2.3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการเผาไหม้

ขบวนการเผาไหม้ที่ดีที่สุดประกอบด้วย

ก. อัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างที่เชื้อเพลิงกับออกซิเจนหรืออากาศ

ในการเผาไหม้เพื่อให้ได้ผลอย่างสมบูรณ์นั้น จะต้องมีส่วนที่พอดีกันระหว่างปริมาณเชื้อเพลิงกับปริมาณออกซิเจนตามสมการข้างต้น ปริมาณของอากาศตามทฤษฎี (Theoretical air) คือ ปริมาณน้อยที่สุดของอากาศที่ต้องใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงอย่างสมบูรณ์จนคาร์บอน ไฮโดรเจน และกำมะถันเปลี่ยนเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ตามลำดับ ซึ่งได้แสดงวิธีการคำนวณปริมาณอากาศที่ต้องการตามทฤษฎี ไว้ในภาคผนวกที่ ข.1 แต่ในทางปฏิบัติ อากาศที่ต้องการตามทฤษฎีนั้นไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการสันดาปที่สมบูรณ์ ปรากฏการณ์ที่เห็นชัดเจนของการสันดาปที่ไม่สมบูรณ์ คือ การเกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และคาร์บอนในไอเสียที่ออกมา เพื่อแก้ปัญหาจึงต้องใช้ปริมาณอากาศมากเกินไปสำหรับการสันดาปที่สมบูรณ์

$$\begin{aligned} \% \text{ อากาศมากเกินไป} &= 100 \frac{(\text{อากาศที่ใช้จริงๆ} - \text{อากาศที่ต้องการตามทฤษฎี})}{\text{อากาศที่ต้องการตามทฤษฎี}} \quad (2.1) \\ (\% \text{ Excess air}) & \end{aligned}$$

ข. การผสมหรือการสัมผัสกันอย่างทั่วถึงระหว่างเชื้อเพลิงกับออกซิเจนหรืออากาศ

การรวมตัวที่ดีระหว่างเชื้อเพลิงกับออกซิเจน คือ การที่อนุภาคของเชื้อเพลิงสัมผัสกับโมเลกุลของออกซิเจนได้อย่างทั่วถึง ในกรณีที่เชื้อเพลิงเป็นก๊าซการผสมกันนั้น จะเป็นไปได้ง่ายแต่ถ้าเชื้อเพลิงเป็นของแข็งหรือของเหลวการผสมกันจะยุ่งยากขึ้นตามลำดับ ในกรณีที่เชื้อเพลิงเป็นของเหลวส่วนใหญ่จะมีการทำให้เป็นอนุภาคเล็กๆ โดยใช้หัวพ่นไของเหลวเป็นโมเลกุลเล็กๆ แล้วจึงทำการเผาไหม้ซึ่งจะทำให้รวมตัวกับอากาศได้ง่ายขึ้น และเกิดการเผาไหม้ได้ดีเสมือนเชื้อเพลิงที่เป็นก๊าซ ส่วนเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งนั้นมีขั้นตอนปฏิกริยาซับซ้อนจะไปสรุปอยู่ในหัวข้อ 2.3.3 การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก. อุณหภูมิที่สูงพอต่อการเผาไหม้

การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงหรืออัตราการรวมตัวกันทางเคมีของเชื้อเพลิงกับอากาศนั้น จะขึ้นโดยตรงกับอุณหภูมิ การเผาไหม้จะเกิดขึ้นในตอนแรกๆ และเกิดต่อไปเรื่อยๆ ความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ก็จะไปเพิ่มอุณหภูมิของเชื้อเพลิงและอากาศให้สูงขึ้นทำให้อัตราการเผาไหม้เพิ่มขึ้นด้วย ฉะนั้นสิ่งที่ต้องการสำหรับการเผาไหม้แบบเกิดขึ้นได้เองและต่อเนื่อง (Spontaneous combustion) นั้น จะต้องมีปริมาณความร้อนจากภายนอกช่วยเริ่มปฏิกิริยาการเผาไหม้ และให้ปริมาณความร้อนออกมาเพิ่มขึ้นจนมีอุณหภูมิสูงพอต่อการเผาไหม้แบบต่อเนื่องได้เอง โดยปกติแล้วในการเผาไหม้นั้นต้องการให้มียุณหภูมิสูงเท่าที่จะเป็นไปได้เพื่อให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้เร็ว แต่การที่จะให้มียุณหภูมิสูงได้มากนักย่นแค่นั้นมีข้อจำกัดที่สำคัญ คือ ชนิดของเชื้อเพลิงที่ใช้ซึ่งสามารถให้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน ในกรณีที่มียุณหภูมิสูงเกินไป ก็จะทำให้เกิดข้อเสียได้ คือทำให้เกิดการรวมตัวกันเป็นสารที่ไม่ต้องการได้ เช่น สารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) หรืออาจจะทำให้ขี้เถ้าเกิดหลอมรวมตัวจนกลายเป็นชีโลส (Slag) เกาะติดอยู่บนผนังที่เป็นเหล็กที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อน ทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนลดลงและเกิดการกัดกร่อนได้

ง. เวลาที่เพียงพอในการเผาไหม้ให้สมบูรณ์ของเชื้อเพลิง (Residual time)

เวลาที่เชื้อเพลิงอยู่ในเตาเผา ควรจะมีเวลานานพอที่จะทำให้เกิดการเผาไหม้ได้มากที่สุด แต่การที่ต้องการให้ผลสมบูรณ์คือ เชื้อเพลิงเกิดการเผาไหม้จนหมดนั้นย่อมเป็นไปได้ยากเพราะต้องใช้เวลานานมาก และทำให้ค่าใช้จ่ายสูงมากด้วย เพราะต้องใช้เตาเผาที่มีความสูงมาก หรืออาจต้องมีระบบไหลวนเวียนของเชื้อเพลิงกลับมาใหม่ (Recirculating system)

2.3.3 การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็ง

ขบวนการเผาไหม้ในเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งจะประกอบด้วย 4 ขั้นตอน คือ

1. เริ่มต้นด้วยออกซิเจนสัมผัสกับผิวคาร์บอน
2. เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้และให้ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ออกมา
3. มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ออกมาที่ผิว
4. การทำปฏิกิริยาของก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์กับก๊าซออกซิเจนที่ผิวเชื้อเพลิง เกิดเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

และจากสาเหตุดังกล่าวนี้ ปฏิกิริยาการเผาไหม้จะเร่งได้โดยการบดเชื้อเพลิงของแข็งให้มีขนาดเล็กลง เพื่อเป็นการเพิ่มผิวในการสัมผัสในการทำปฏิกิริยาการเผาไหม้ให้มากขึ้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

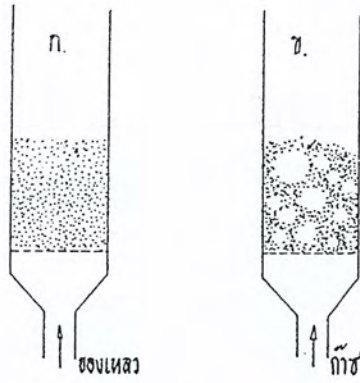
เชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งจะเกิดการผสมแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous) ซึ่งจะทำให้มีพื้นที่ผิวของเชื้อเพลิงในการสัมผัสกับออกซิเจนจำกัด คือ จะเกิดปฏิกิริยาเฉพาะที่ผิวของเชื้อเพลิงเข้าไปเรื่อยๆ จากปัญหานี้จะเห็นว่า การออกแบบระบบการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งนั้นควรคำนึงถึงเหตุผลต่างๆ ดังนี้

- ควรจะให้พื้นที่ผิวสำหรับปฏิกิริยามากที่สุดเท่าที่จะทำเป็นไปได้ ซึ่งจะทำให้ได้โดยการบดเชื้อเพลิงให้มีขนาดเล็กลง เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการสัมผัสให้มากขึ้น หรือการทำให้ก๊าซในเตานั้นเกิดการเคลื่อนไหวอย่างรุนแรง เพื่อที่จะกวาดพื้นที่ผิวของเชื้อเพลิงแข็งนั้นไม่ให้มีเกาะอยู่ โดยการใช้นิวเคลียสของฟลูอิดไอเซชัน เพราะในฟลูอิดไอเซชันจะมีการเคลื่อนไหวของก๊าซอย่างรุนแรงและปั่นป่วน (Turbulence) ทำให้เกิดการสัมผัสกันของอากาศและเชื้อเพลิงที่เป็นไปได้เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ได้อย่างรวดเร็ว และเบดยังทำหน้าที่ช่วยในการขัดเอาเถ้าที่เกาะติดบนผิวเชื้อเพลิงให้หลุดออกด้วย จึงเกิดพื้นที่ผิวใหม่ที่พร้อมจะเกิดการเผาไหม้ต่อไป
- อัตราเร็วของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนั้นขึ้นอยู่กับอัตราเร็วที่พื้นที่ผิวของเชื้อเพลิงที่สัมผัสกับอากาศ ดังนั้น จึงต้องมีเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้อย่างพอเพียง เพื่อให้เชื้อเพลิงถูกเผาไหม้ได้หมด ซึ่งในฟลูอิดไอเซชัน จะมีเบดที่จะทำให้เชื้อเพลิงเกิดการหมุนวนเวียนในเบด ทำให้เชื้อเพลิงมีเวลาอยู่ในเตาเผาได้นานเพียงพอที่จะทำให้การเผาไหม้เกิดขึ้นสมบูรณ์
- อุณหภูมิในการเผาไหม้จะต้องมีค่าสูงพอที่จะทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ต่อเนื่องกันและในเตาเผาฟลูอิดไอเซชัน จะมีเบดเป็นตัวสะสมความร้อน (Heat storage) เอาไว้ ทำให้เมื่อเชื้อเพลิงสัมผัสกับเบดที่ร้อน จะสามารถเกิดการเผาไหม้ได้อย่างรวดเร็ว

2.4 เทคนิคฟลูอิดไอเซชัน

เป็นปรากฏการณ์ที่ของแข็งขนาดเล็กมีสภาพเหมือนกับของไหล โดยเกิดจากการพองจากก๊าซหรือของเหลวที่ไหลผ่านขึ้นไปด้านบน ซึ่งอาจจะมีการถ่ายเทมวลสาร ความร้อน และ/หรือ เกิดปฏิกิริยาเคมี ในขณะที่มีการสัมผัสกันระหว่างของแข็งกับของไหลกันนั้นด้วย โดยเทคนิคทางฟลูอิดไอเซชันสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ ฟลูอิดไอเซชันแบบของเหลว-ของแข็ง (Liquid-solid fluidization) กับ ฟลูอิดไอเซชันแบบก๊าซ-ของเหลว (Gas-solid fluidization)

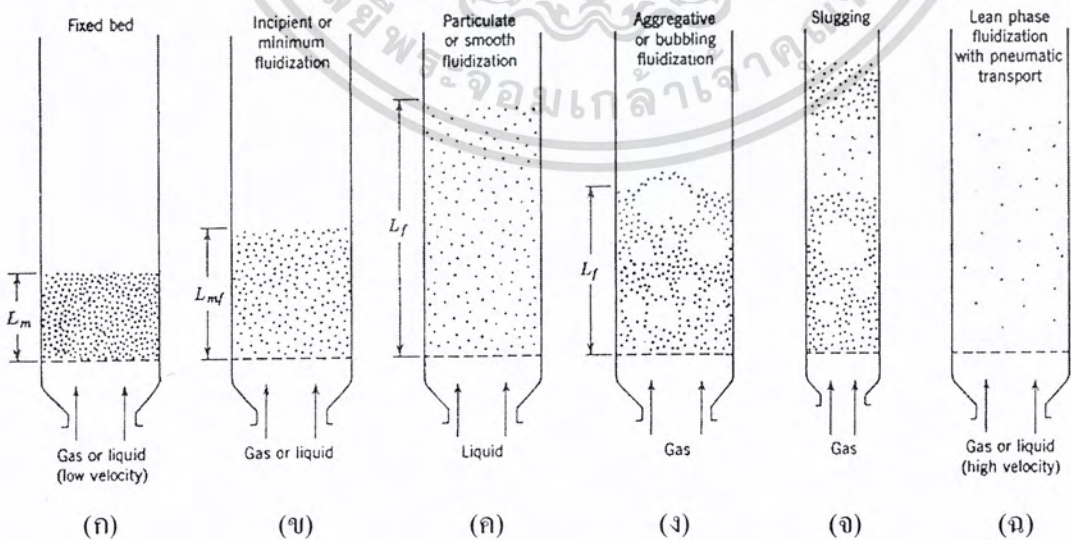
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 ฟลูอิดไดเซชันของเหลว-ของแข็งกับฟลูอิดไดเซชันก๊าซ-ของแข็ง

2.5 ฟลูอิดไดเซชัน

สมศักดิ์ คำรงเลิศ [4] ได้อธิบายลักษณะการเกิดฟลูอิดไดเซชัน มีขั้นตอนดังนี้คือ ในขณะที่ของไหล (ของเหลวหรือก๊าซ) ไหลผ่านเบดของอนุภาคของแข็งที่มีขนาดเล็กในทิศทางจากด้านล่างสู่ด้านบนที่อัตราการไหลค่อนข้างต่ำเบดจะอยู่ในสภาพนิ่ง (Fixed bed) (รูปที่ 2.2 ก) ถ้าเพิ่มความเร็วของของไหลถึงจุดหนึ่ง อนุภาคจะเริ่มขยับตัวและบางส่วนจะมีการสั่น และมีการเคลื่อนที่ได้บ้าง สภาพนี้เรียก “เบดขยายตัว” (Expanded bed) (รูปที่ 2.2 ข) เพราะการไหลของของไหลจะทำให้เกิดแรงจูง (Drag force) กระทำบนผิวของอนุภาคของแข็ง และมีทิศทางตามการไหลของของไหล แรงจูงที่เกิดขึ้นจะพยายามทำให้อนุภาคของแข็งลอยตัวขึ้นด้านบน



รูปที่ 2.3 ลักษณะต่างๆ ของการฟลูอิดไดเซชันของแข็งกับของไหลที่เกิดขึ้นเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น[1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่เสียค่าใช้จ่าย
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำหนักของอนุภาคนั้นมีมากกว่าจึงทำให้เบดส่วนใหญ่ยังคงอยู่กับที่ จากจุดนี้ถ้าเพิ่มความเร็วต่อไปจะถึงสภาวะที่น้ำหนักของเบด และแรงจุดบนอนุภาคของแข็งนั้นสมดุลกัน ที่จุดนี้ของแข็งจะเริ่มลอยตัวเป็นอิสระในกระแสน้ำของไหล เรียกสภาวะนี้ว่า “ จุดต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไอเซชัน ” โดยความเร็วของไหลที่จุดนี้ เรียกว่า ความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไอเซชัน (Minimum fluidization velocity, U_{mf})

ถ้าเพิ่มความเร็วของไหลสูงกว่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไอเซชัน แล้วจะเกิดฟลูอิดไอเซชันแบบราบเรียบ (Smooth fluidization) (รูปที่ 2.2 ค) ในระบบของเหลวของแข็ง แต่ในระบบก๊าซของแข็ง จะมีพฤติกรรมที่แตกต่างออกไป คือ จะเกิดฟองอากาศ (Bubble) ของก๊าซนั้นเรียกว่า ฟลูอิดไอเซชันแบบฟองอากาศ (Bubbling fluidization) (รูปที่ 2.2 ง) และถ้าหากว่าฟองก๊าซที่ลอยขึ้นไปนั้น จะเกิดการรวมตัวก่อน และมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อมันลอยก่อนจะถึงเหนือเบดก็จะทำให้ชั้นของแข็งถูกฟองก๊าซผลักขึ้นไปและอนุภาคของแข็งก็จะตกกลับลงมาอีก ปรากฏการณ์เช่นนี้เรียกว่าเกิด Slugging มักจะพบปรากฏการณ์นี้ในฟลูอิดไอเซชันที่แคบและยาว (รูปที่ 2.2 จ) และถ้าหากเพิ่มความเร็วของก๊าซให้สูงขึ้นจนถึงความเร็วสุดท้ายของการฟลูอิดไอเซชันแล้ว (Terminal velocity) แล้วพื้นที่ผิวชั้นบนของของแข็งจะตายไป เนื่องจากเบดจะถูกของไหลพัดพาไปด้วยสภาวะนี้เรียกว่า เบดเบาบาง (Lean phase fluidization) (รูปที่ 2.2 ฉ)

เตาเผาฟลูอิดไอซ์เบดแบ่งตามเทคนิคของการออกแบบเตาเผาได้เป็นหลายแบบ [1] เช่น

- ก) เตาเผาฟลูอิดไอซ์เบดฟองอากาศ (Bubbling fluidized-bed incinerator)
- ข) เตาเผาฟลูอิดไอซ์เบดความดันสูง (Pressurized fluidized-bed incinerator)
- ค) เตาเผาฟลูอิดไอซ์เบดหมุนวน (Circulation fluidized-bed incinerator)
- ง) เตาเผาฟลูอิดไอซ์เบดใช้เชื้อเพลิงแข็งได้หลายชนิด (Multisolid fluidized-bed Incinerator)

ข้อดีของการเผาไหม้เชื้อเพลิงคุณภาพต่ำโดยใช้เทคนิคทางฟลูอิดไอซ์เบด [5] ได้สรุปการเผาไหม้ด้วยเทคนิคฟลูอิดไอซ์เบดว่ามีข้อดีกว่าเตาเผาชนิดอื่นๆคือ

- ก) ใช้กับเชื้อเพลิงได้หลายประเภทรวมถึงเชื้อเพลิงคุณภาพต่ำได้ ตัวอย่างเช่น เชื้อเพลิงจำพวกที่มีความชื้นสูงและปริมาณเถ้าสูง
- ข) เตาเผาแบบฟลูอิดไอซ์เบด จะมีสารเฉื่อย (Inert materials) คือเบด เช่นทราย หรือ เถ้า จะทำให้เกิดการผสมของเชื้อเพลิงกับออกซิเจนได้ดี เกิดการเผาไหม้ได้อย่างสมบูรณ์และรวดเร็วนอกจากนี้ตัวเบดยังช่วยอมความร้อนทำให้เตามีความเสถียร ไม่ดับง่ายและเกิดการเผาไหม้ในตัวเตาได้อย่างทั่วถึง จึงทำให้อุณหภูมิในเตาเผามีค่าเท่ากันและสม่ำเสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ค) เตาเผาแบบฟลูอิดไคซ์เบดสามารถใช้เผาไหม้เชื้อเพลิง ในช่วงอุณหภูมิการเผาไหม้ที่ต่ำ (ประมาณ 850°C) จึงช่วยแก้ปัญหาทางมลพิษทางอากาศ เนื่องจากเกิดเป็นสารประกอบไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) น้อย และสามารถลดปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ขณะทำการเผาได้ โดยการเติมหินปูน (CaCO_3) หรือใช้หินปูนเป็นเบด
- ง) เตาเผาแบบฟลูอิดไคซ์เบด จะเป็นระบบเกี่ยวกับลมเกือบทั้งหมด (Pneumatic system) ไม่มีระบบเครื่องกลจึงทำให้การควบคุมระบบทำได้ง่าย
- จ) เชื้อเพลิงที่เผาไหม้ในเตาเผาแบบฟลูอิดไคซ์เบด ใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาสั้นซึ่งน้อยกว่าเวลาที่เชื้อเพลิงใช้อยู่ในเตาเผาจึงทำให้เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์
- ฉ) การเคลื่อนที่ที่รุนแรงของเบดทำให้เถ้าแตกเป็นชิ้นเล็กและขัดขวางการหลอมละลายของเถ้า ทำให้เถ้าเล็กละเอียดเท่าๆกัน และจะถูกพาไปกับก๊าซไอเสีย เตาเผาแบบฟลูอิดไคซ์เบดง่ายต่อการควบคุม มีมลทินน้อย ค่าใช้จ่ายต่ำกว่าเตาประเภทอื่น อุณหภูมิของไอเสีย ประมาณ 730°C มีการปลดปล่อยสารประกอบประเภท Carbonyl และ Hydrocarbon น้อย

ถึงแม้ว่าเตาเผาแบบฟลูอิดไคซ์เบดจะมีข้อดีหลายประการ แต่ก็มีข้อจำกัดอยู่บ้างดังนี้

- ก) เบดจะถูกขัดสีและลดขนาดลงทำให้ถูกพัดพาออกจากเตาได้โดยง่าย จึงจำเป็นจะต้องคอยเติมเบดเพื่อชดเชยปริมาณที่เสียไป เกิดการกักร้อนในอุปกรณ์บำบัดก๊าซ
- ข) การทำงานที่อุณหภูมิสูงจะเกิดการเกาะติดกันของอนุภาคขึ้น (Agglomeration) ทำให้ต้องลดอุณหภูมิ ส่งผลทำให้อัตราเร็วของปฏิกิริยาลดลง ทำให้เถ้าหลอมละลาย และอุปกรณ์บางอย่างอาจเสียหายได้
- ค) การควบคุมให้เกิด Fluidization ขึ้นภายในเตาไม่สามารถทำได้โดยง่าย ความเร็วของอากาศที่ทำให้เกิดฟลูอิดไคซ์เบดขึ้นนั้นต้องแปรผันตามมวลของอนุภาคในนั้นด้วย

2.5.1 การสูญเสียพลังงานการไหลผ่านเบดนิ่ง

การสูญเสียพลังงานเนื่องจากความเสียดทานเมื่อของไหลไหลผ่านกลุ่มของอนุภาคแข็งในสถานะอยู่นิ่ง Ergun ได้เสนอสมการคำนวณหาความดันลด สำหรับอนุภาคขนาดเดียวกันดังสมการ

$$\frac{\Delta p}{L} \cong 150 \frac{(1 - \epsilon_m)^2}{\epsilon_m^3} \frac{\mu U_m}{(\phi_r d_p)^2} + 1.75 \frac{(1 - \epsilon_m)}{\epsilon_m^3} \frac{\rho_f U_m^2}{\phi_r d_p} \quad (2.2)$$

เมื่อ Δp = ความดันลด
 L = ความสูงของเบดนิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

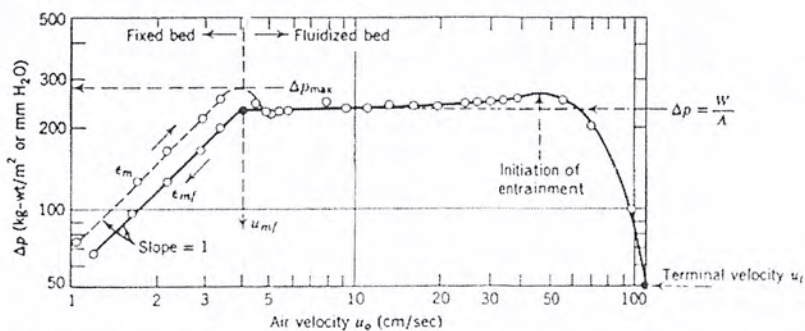
μ, ρ_g	=	ความหนืดและความหนาแน่นของของไหล
U_0	=	ความเร็วการไหลเทียบห่อเปล่า
d_p	=	ขนาดอนุภาค
\mathcal{E}_m	=	ความพรุนของเบดนิ่ง
ϕ_s	=	ความกลมของอนุภาค

กราฟที่พล็อตระหว่างความดันตกของเบด (ΔP_b) และความเร็วของการไหลบอกถึงคุณภาพของฟลูอิดไดซ์เบดได้ โดยพบว่าเมื่อเริ่มเกิดการฟลูอิดไดซ์ ความดันตกในเบดจะมีค่ามากที่สุด เนื่องจากต้องไปต้านน้ำหนักของวัสดุที่เป็นเบด และยังเกิดจากการเสียดสีระหว่างชนิดของแข็งที่เป็นเบดพร้อมกับการสูญเสียพลังงาน เนื่องจากการชนกันของเม็ดของแข็ง การคำนวณความดันตกที่จุดนี้คำนวณได้จาก

- สำหรับอนุภาคขนาดเล็กและมีช่วงขนาดเดียว (รูปที่ 2.4) จุดเปลี่ยนจากเบดนิ่งไปสู่สถานะฟลูอิดไดซ์ชั้น ก่อนข้างชัดเจน (จุด A ในรูป 2.4)
- อนุภาคที่มีการกระจายขนาดกว้าง (รูปที่ 2.5) จุดเปลี่ยนจากเบดนิ่งไปเป็นฟลูอิดไดซ์เบดจะมีช่วงกว้าง การหาค่า U_{mf} ทำได้โดยลากเส้นของเบดนิ่งตัดกับกราฟฟลูอิดไดซ์เบด จุดตัดได้แก่จุด B ในรูปจะเป็นค่า U_{mf}

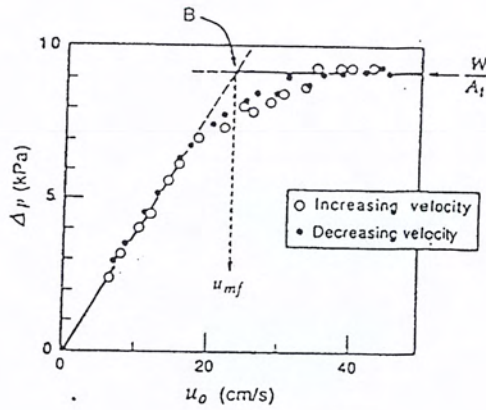
ความเร็วการไหลต่ำสุดที่เริ่มสังเกตเห็นฟองเกิดขึ้นในเบดเรียก ความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟอง (Minimum bubbling velocity, U_{mb}) ในระบบของเหลว-ของแข็งค่า U_{mb} จะไม่มีความหมาย เพราะในระบบนี้การขยายตัวของเบดจะเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ ไม่มีช่องว่างของเหลวเกิดขึ้นในเบด แต่ในระบบก๊าซ-ของแข็งที่เบดมีขนาดใหญ่ ทันทีที่ความเร็วของก๊าซเกินค่า U_{mf} จะเกิดฟองก๊าซไหลผ่านเบด ดังนั้น

$$U_{mf} = U_{mb} \quad (2.3)$$



รูปที่ 2.4 ความดันตกและความเร็วในเบดของอนุภาคที่ช่วงกระจายขนาดกว้าง[1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ของความดันตกและความเร็วในเบด[3]

2.5.2. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (d_p) และ แฟกเตอร์รูปร่าง

ในกรณีที่มีเม็ดของแข็งหลายๆ ขนาดรวมอยู่ด้วยกันในเบด เพื่อความสะดวกในการคำนวณหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยได้

$$d_p = \frac{1}{\sum \left(\frac{x_i}{d_{pi}} \right)} \tag{2.4}$$

เมื่อ x_i สัดส่วนของน้ำหนักของแข็งที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ที่ได้จากการร่อนแยก ส่วนขนาดของแข็งด้วยตะแกรง
 d_{pi} คือค่าเฉลี่ยทางเลขคณิตของขนาดตะแกรง 2 อันที่ใช้ร่อน

แฟกเตอร์รูปร่าง คือ อัตราส่วนของพื้นที่ผิวของทรงกลมที่มีปริมาตรเท่าเม็ดของแข็ง ต่อพื้นที่ผิวของเม็ดของแข็งใดๆ

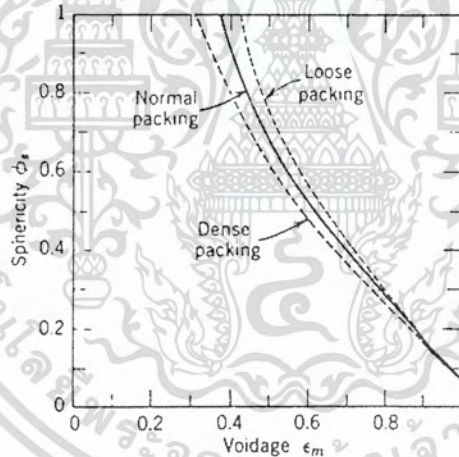
$$\phi_s = \frac{\text{พื้นที่ผิวของทรงกลม}}{\text{พื้นที่ผิวของอนุภาค}} \tag{2.5}$$

รูปที่ 2.6 แสดงสัมพันธ์ระหว่างความกลม และความพรุนของเบด พบว่าเมื่อความกลมของอนุภาคลดลง ค่าความพรุนจะเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 ตัวอย่างค่าความพรุนของอนุภาคชนิดต่างๆ [3]

Particle	Size, d_p (mm)						
	0.02	0.05	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40
Sharp sand $\phi_s = 0.67$	-	0.60	0.59	0.58	0.54	0.50	0.49
Round sand $\phi_s = 0.86$	-	0.56	0.52	0.48	0.44	0.42	-
Mixed round sand	-	-	0.42	0.42	0.41	-	-
Coal and glass powder	0.72	0.67	0.64	0.62	0.57	0.56	-
Anthracite Coal $\phi_s = 0.63$	-	0.62	0.61	0.60	0.56	0.53	0.51
Absorption carbon	0.74	0.72	0.71	0.69	-	-	-
Fischer-Tropsch catalyst, $\phi_s = 0.58$	-	-	-	0.58	0.56	0.55	-
Carborundum	-	0.61	0.59	0.56	0.48	-	-



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความกลมกับความพรุนของเม็ด [1]

2.5.3 ความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชัน (Minimum fluidization velocity)

ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน หมายถึง ช่วงระหว่างความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชันแบบ ลักษณะของเบดมีความสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกันตลอดทั้งเบด (Uniform and homogeneous) ผิวหน้าของเบดราบเรียบไม่ว่าของไหลนั้นจะเป็นของเหลวหรือก๊าซ ในขณะที่เม็ดของแข็งเริ่มลอยตัวเป็นอิสระนั้น เม็ดของแข็งอยู่ในสภาวะสมดุลของแรงสองแรงที่เกิดขึ้นบนเม็ดของแข็ง (แรงที่เกิดจากน้ำหนักของตัวเม็ดของแข็งกับแรงพยุงจากการไหล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ความดันตกคร่อม)(พื้นที่หน้าตัดท่อทดลอง)=(ปริมาตรของเบด)(สัดส่วนของของแข็งในเบด)(น้ำหนักจำเพาะของเบด) (2.6)

$$\Delta p A_t = W = (A_t L_{mf})(1 - \epsilon_{mf})[(\rho_s - \rho_g) \frac{g}{g_c}] \quad (2.7)$$

จัดเทอมใหม่

$$\frac{\Delta p}{L_{mf}} = (1 - \epsilon_{mf})(\rho_s - \rho_g) \frac{g}{g_c} \quad (2.8)$$

ค่า ϵ_{mf} โดยปกติจะมีค่าสูงกว่าความพรุนของเบดหนึ่ง (ϵ_m) เล็กน้อย ความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชัน (U_{mf}) หาได้จาก

$$\frac{1.75}{\phi_s \epsilon_{mf}^3} \left(\frac{\rho_g U_{mf} d_p}{\mu} \right)^2 + \frac{150(1 - \epsilon_{mf})}{\phi_s^2 \epsilon_{mf}^3} \left[\frac{\rho_g U_{mf} d_p}{\mu} \right] = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2} \quad (2.9)$$

หรืออยู่ในรูปกลุ่มไร้นหน่วย

$$\frac{1.75}{\epsilon_{mf}^3 \phi_s} Re_{p,mf}^2 + \frac{150(1 - \epsilon_{mf})}{\epsilon_{mf}^3 \phi_s^2} Re_{p,mf} = Ar \quad (2.11)$$

โดยที่

$$Re_{p,mf} = \frac{d_p U_{mf} \rho_g}{\mu} \quad (2.10)$$

$$Ar = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2} \quad (2.12)$$

$$U_{mf} = \frac{d_p^2 (\rho_s - \rho_g) g \epsilon_{mf}^3 \phi_s^2}{150 \mu (1 - \epsilon_{mf})} \quad Re_{p,mf} < 20 \quad (2.13)$$

$$U_{mf}^2 = \frac{d_p (\rho_s - \rho_g) g}{1.75 \rho_g} \epsilon_{mf}^3 \phi_s \quad Re_{p,mf} > 1000 \quad (2.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่ไม่ทราบค่า ε_{mf} และ ϕ_s เราสามารถประมาณค่า U_{mf} ได้โดยพิจารณาสมการ (2.11) ซึ่งเขียนใหม่เป็น

$$K_1 Re_{p,mf}^2 + K_2 Re_{p,mf} = Ar \quad (2.15)$$

เมื่อ
$$K_1 = \frac{1.75}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s^3}, \quad K_2 = \frac{150(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s^2}$$

จากการศึกษาพบว่าค่า K_1 และ K_2 มีค่าค่อนข้างคงที่สำหรับอนุภาคชนิดต่างๆ ในช่วง Re ตั้งแต่ 0.001-4000 ในตารางที่ 2.5 สรุปค่า K_1 และ K_2 จากคณะวิจัยต่างๆ

ตารางที่ 2.5 ค่า K_1 และ K_2 จากคณะวิจัยต่างๆ[1]

Investigators	First, $K_2/2K_1$	Second, $1/K_1$
Wen and Yu (1996) 284 data points from the literature	33.7	0.0408
Richardson (1971)	25.7	0.0365
Babe et al. (1978) Correlation of reported data until 1977	25.3	0.0651
Grace (1984)	27.2	0.0408
Chitester et al. (1984) Coal, Char, Ballotini; up to 64 bar	28.7	0.0494

2.5.4 ผลของความดันและอุณหภูมิต่อฟลูอิดไดซ์เบด

การศึกษาผลของความดัน ถึงประมาณ 80 บาร์ สำหรับผงถ่าน อนุภาคถ่านหิน และ glass beads ที่มีช่วงขนาดแคบๆ สรุปได้ว่า

- ε_{mf} จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย (1 - 4%) เมื่อความดันเพิ่มขึ้น
- U_{mf} จะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มความดัน สำหรับอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 100 ไมโครเมตร ผลของความดันจะมีค่าน้อยมาก แต่จะมีผลมากขึ้นถึง 40 % สำหรับอนุภาคที่ขนาด

$d_p = 360$ ไมโครเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ค่า U_{mb}/U_{mf} สำหรับอนุภาคนา ($d_p = 450$ ไมโครเมตร) จะเพิ่มขึ้น 30 % เมื่อเพิ่มความดัน แสดงว่าการเพิ่มความดันของระบบจะทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์เบดแบบ Homogeneous fluidization มีช่วงกว้างขึ้น

สำหรับผลของอุณหภูมิพอสรุปได้ดังนี้

- ค่า ϵ_{mf} จะเพิ่มตามอุณหภูมิ สำหรับอนุภาคขนาดเล็ก (เพิ่ม 8% เมื่ออุณหภูมิเพิ่มเป็น 500°C) สำหรับอนุภาคขนาดใหญ่อุณหภูมิจะไม่มีผล
- เราสามารถใช้สมการ 2.8 - 2.11 ในการคำนวณหา U_{mf} ที่อุณหภูมิต่างๆ ได้ เมื่อใช้ค่าที่ถูกต้องของ μ , ρ_s และ ϵ_{mf} ซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ

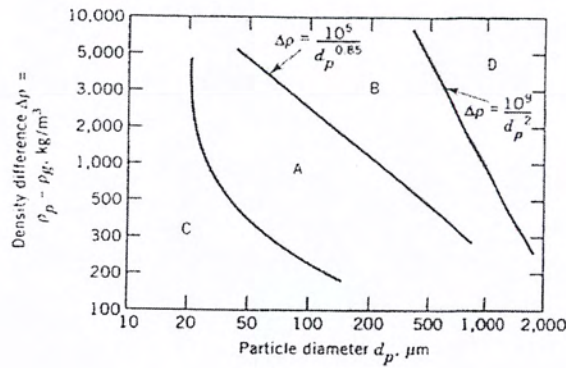
2.5.5 ลักษณะของฟลูอิดไดซ์เบดแบ่งตามสมบัติของอนุภาค

Geldart [3] ได้แบ่งลักษณะฟลูอิดไดซ์เบดตามสมบัติของอนุภาคออกเป็น 4 กลุ่ม ดังนี้

- Group C (Cohesive) อนุภาคมีขนาดละเอียดมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคสูงทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์ขึ้นได้ยาก ตัวอย่างเช่น แป้งจากเมล็ดธัญพืช
- Group A (Aeratable) อนุภาคขนาดเล็กหรือความหนาแน่นต่ำ (น้อยกว่า 1.4 g/cm^3) จะเกิดฟลูอิดไดซ์ขึ้นได้ง่าย โดยเกิด Homogeneous fluidization ที่มีความเร็วก๊าซต่ำ และ Bubbling bed ที่ความเร็วสูง
- Group B (Sand like) อนุภาคอยู่ในช่วง $d_p = 40\text{-}500$ ไมครอน และมีความหนาแน่น $\rho_s = 1.4\text{-}4 \text{ g/cm}^3$ อนุภาคในกลุ่มนี้ฟลูอิดไดซ์ได้ดี โดยมีการเคลื่อนที่ของฟองก๊าซอย่างรุนแรงและฟองก๊าซจะขยายขนาดใหญ่ขึ้น ตามความสูงของเบด
- Group D (Spoutable) อนุภาคมีขนาดใหญ่และความหนาแน่นสูง ทำให้ไม่เกิดสภาวะฟลูอิดไดซ์ขึ้น หรือเกิดได้ยาก การทำให้เกิดการสัมผัสระหว่างก๊าซและของแข็งทำได้โดยผ่านอากาศให้เข้าตรงกลางหอ ในลักษณะเป็นลำอากาศ ลักษณะสัมผัสแบบนี้เรียก "Spouted bed"

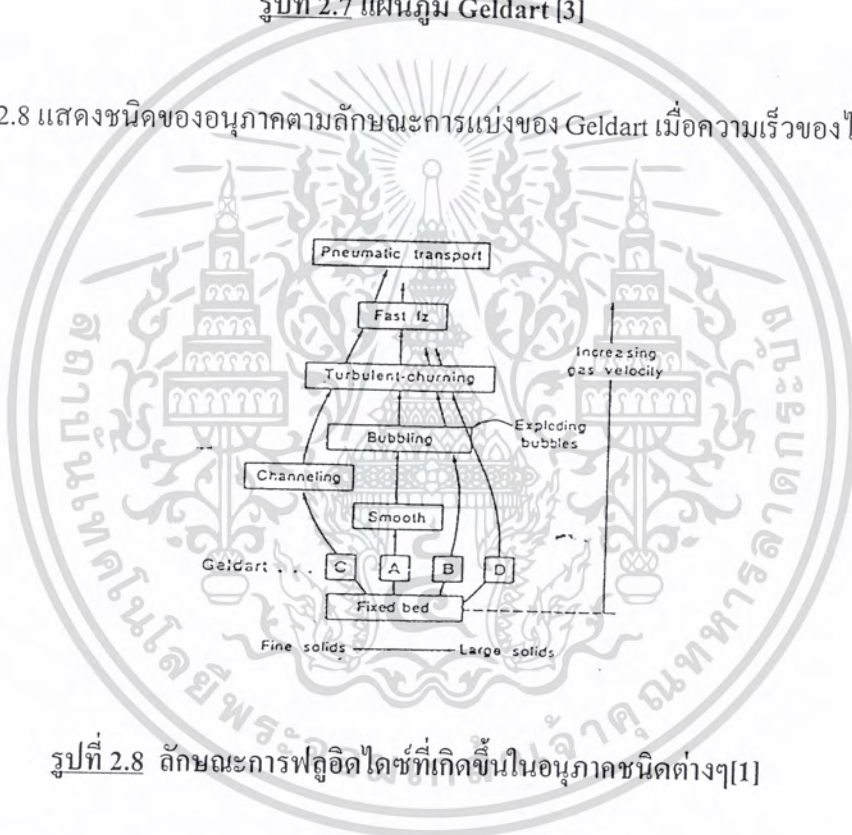
รูปที่ 2.7 เป็นแผนภูมิ Geldart ใช้ได้กับฟลูอิดไดซ์เบดที่มีอากาศเป็นตัวกลางที่สภาวะปกติและความเร็วอากาศต่ำกว่า $10 U_{mf}$ มีประโยชน์บอกถึงลักษณะของฟลูอิดไดซ์เบดเมื่อทราบขนาดและความหนาแน่นของอนุภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 แผนภูมิ Geldart [3]

รูปที่ 2.8 แสดงชนิดของอนุภาคตามลักษณะการแบ่งของ Geldart เมื่อความเร็วของไหลเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.8 ลักษณะการฟลูอิดไดซ์ที่เกิดขึ้นในอนุภาคชนิดต่างๆ[1]

2.5.6 ความเร็วสุดท้ายของอนุภาค (U_t)

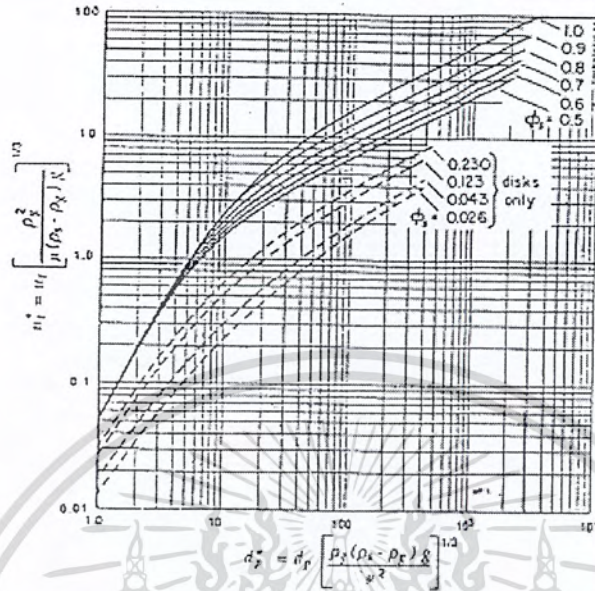
ค่าความเร็วสุดท้ายของอนุภาคที่มีขนาด d_p เมื่อตกผ่านของไหลที่มีความหนาแน่น ρ_g คำนวณได้จากสมการ

$$U_t = \left[\frac{4d_p [\rho_s - \rho_g] g}{3\rho_g C_D} \right]^{1/2} \tag{2.16}$$

C_D = สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ซึ่งขึ้นกับค่า Re และความกลมของอนุภาค

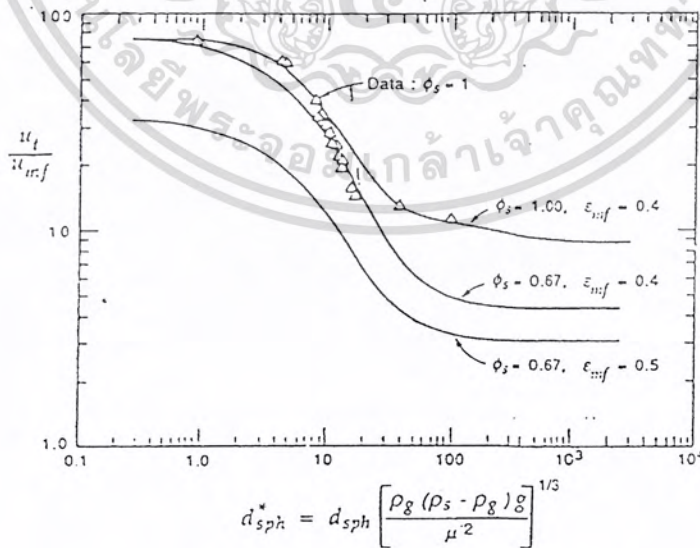
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.9 ใช้หาค่าความเร็วสุดท้ายของอนุภาคเมื่อทราบค่า d_p และ สมบัติกายภาพอื่นๆ



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ของอนุภาคกับค่าความเร็วสุดท้ายของไหล[1]

U_t/U_{mf} จะขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาค สำหรับอนุภาคกลมที่มีขนาดเดียว และ $U_{mf} = 0.4$
พบว่า สำหรับอนุภาคขนาดเล็ก $U_t/U_{mf} = 78$
สำหรับอนุภาคขนาดใหญ่ $U_t/U_{mf} = 9.2$



รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ของอนุภาคกับค่า U_t/U_{mf} [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.10 แสดงผลของขนาดอนุภาคต่อค่า U_r/U_{mf} สำหรับอนุภาคขนาดเล็ก $d_p < 1$ และอนุภาคขนาดใหญ่ $d_p < 100$ พบว่าอนุภาคขนาดเล็กช่วง U_r/U_{mf} จะกว้างกว่าของอนุภาคขนาดใหญ่

2.6 พัดลม

2.6.1 ลักษณะของพัดลม[15,16]

ปัจจุบันพัดลมที่ใช้กันทั่วไปมีอยู่ 2 ชนิด Forced draft fan และ Induced draft fan

ก. Forced draft fan ใช้ดูดอากาศทางเข้าระบบอุ่นอากาศ หรือเตาเผา โดยใช้กับอากาศเย็นเท่านั้นซึ่งมีประโยชน์มากกว่า Induced draft fan

- ต้องการการบำรุงรักษาต่ำ
- ใช้กำลังน้อยเพราะว่าใช้กับอากาศเย็นที่มีปริมาตรจำเพาะต่ำ
- ภาระงานน้อยลงเมื่อไม่จำเป็นต้องเพิ่มก๊าซตามเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้น
- จากเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้น จึงเป็นสาเหตุให้ค่าใช้จ่ายเริ่มต้นและค่าใช้จ่ายปฏิบัติการต่ำ

ข้อเสียเมื่อนำ Forced draft fan ไปใช้กับเตาเผาภายใต้ความดัน (Pressure furnace) : เมื่อใช้กับก๊าซพิษอาจเกิดการรั่วไหลของก๊าซพิษนั้นได้

ข. Induced draft fans ใช้ดูดอากาศจากเตาเผาสู่ stack เมื่อ stack มีความสูงมากหรือเพื่อจะเพิ่มความดันขับให้กับก๊าซ

พัดลมโดยทั่วไปจะมีอยู่ 3 ลักษณะ คือ Axial, Propeller และ Centrifugal (โดยที่ Axial และ Propeller จะมีลักษณะใกล้เคียงกัน)

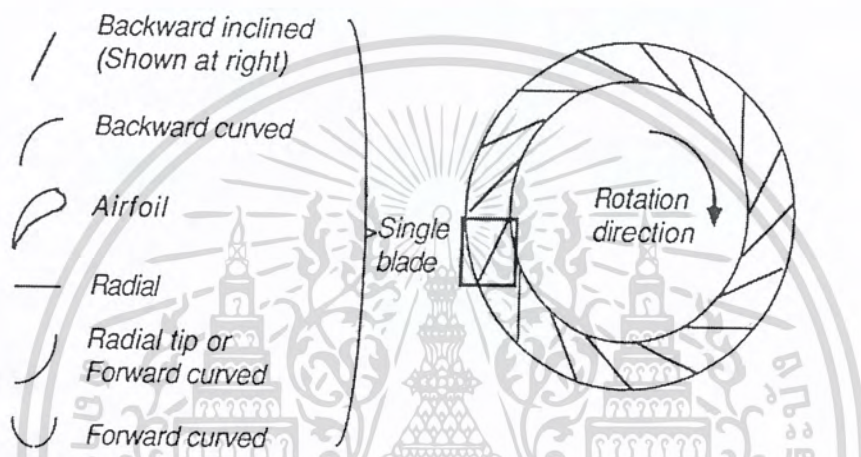
Axial fan(พัดลมแบบไหลตามแนวแกน) กับ Propeller fan มีความใกล้เคียงกันมาก เนื่องจากพัดลมทั้ง 2 แบบนี้ ใช้หลักการเคลื่อนย้ายอากาศได้โดยมุมที่ใบพัดให้ไหลไปตามแนวแกนมอเตอร์ ในพัดลมแบบไหลตามแนวแกน ใบพัดมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งต่อการควบคุมการทำงานของพัดลม แต่แบบ Propeller fan นั้นใบพัดจะไม่มีอิทธิพลต่อการบังคับอากาศ ดังนั้น Propeller fan จึงไม่นิยมกับงานที่ต้องควบคุมการไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนพัดลมแบบ Centrifugal fan (พัดลมแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง) นั้น จะเพิ่มพลังงานจลน์ของก๊าซที่ไหลผ่านพัดลมด้วยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง

2.6.2 ลักษณะของใบพัด[14]

ลักษณะของใบพัดจะมีอยู่ 6 แบบ ได้แก่ Backward inclined, Backward curved, Airfoil, Radial หรือ Straight, Radial tip หรือ Forward curved และ Forward curved ตามรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ตัวอย่างใบพัดที่พบได้ในพัดลมทั่วไป[14]

- การใช้ใบพัดแบบ Backward inclined จะมีราคาค่อนข้างแพงกว่าแบบอื่นๆ แต่จะเหมาะกับอัตราการไหลที่กว้างและไม่แน่นอน เพราะลักษณะจำเพาะของใบพัดชนิดนี้จะไม่ Overload
- ใบพัดแบบ Backward curved ลักษณะจำเพาะของใบพัดจะราบเรียบตลอด
- การใช้ใบพัดแบบ Airfoil จะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพพัดลม โดยทั่วไปแล้วใบพัดแบบ Airfoil นั้นจะใช้กับก๊าซสะอาดเพื่อให้ใบพัดสึกกร่อนน้อยที่สุด
- ใบพัดแบบ Radial เป็นใบพัดที่ใช้กับพัดลมราคาถูก ซึ่งมีความเร็วใบพัดน้อยและประสิทธิภาพต่ำ โดยเฉพาะกับการใช้งานประจำซึ่งเป็นการง่ายในการเปลี่ยนใบพัดสำหรับพัดลมแบบเปิด (โดยที่ไม่มี Shroud รอบใบพัด) แต่ใบพัดชนิดนี้ไม่นิยมใช้ในงานหนักเพราะจะเกิดความเครียดสูงที่ใบพัด
- ใบพัดแบบ Radial tip ใช้เมื่อการออกแบบพิจารณาถึงการสึกกร่อนของสิ่งแวดล้อม ซึ่งจะให้ค่าใช้จ่ายการปฏิบัติการต่ำกว่าใบพัดตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ใบพัดแบบ Forward curved จะให้ปริมาณการไหลมากเมื่อไม่คำนึงถึงการสึกกร่อนที่จะเกิดขึ้น

รายละเอียดใบพัดที่ใช้ กันส่วนใหญ่ 2 ชนิด

- พัดลมแบบใบพัดโค้งหลัง

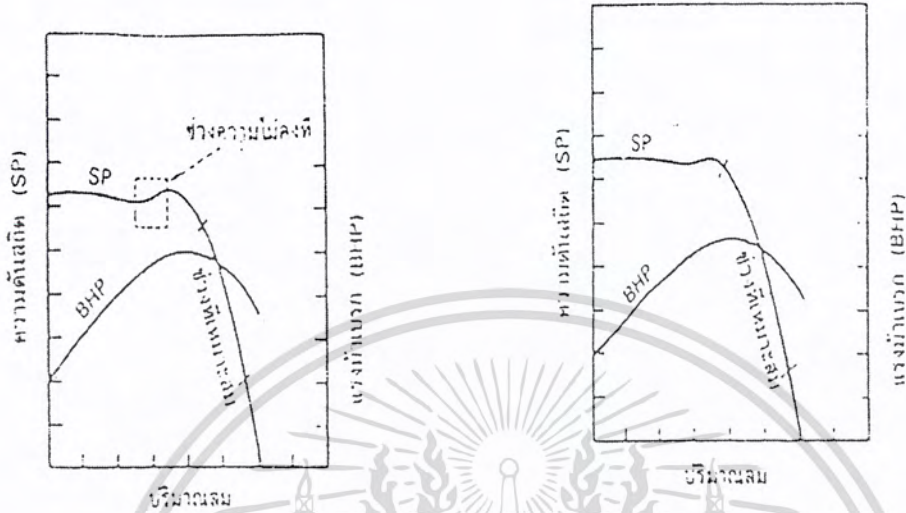
ลักษณะโดยทั่วไปได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.12 พัดลมชนิดนี้ยังแบ่งออกเป็นใบพัดชั้นเดียวและใบพัดแอร์ฟอยล์ ใบพัดแบบแอร์ฟอยล์จะมีประสิทธิภาพสูงกว่าถึง 90% เสียงที่เกิดจากการทำงานก็น้อยกว่า ส่วนพัดลมแบบใบพัดเดี่ยวจะมีคุณสมบัติรับความชื้นที่มาปะปนมากับลมได้ซึ่งความชื้นนี้อาจทำให้พัดลมแบบแอร์ฟอยล์เกิดความเสียหายได้ ประสิทธิภาพทางกลของพัดลมที่มีใบพัดชั้นเดียวคือที่ 84% หรือมากกว่า



รูปที่ 2.12 ลักษณะของใบพัดแบบโค้งหลังทั้งสองแบบ ด้านซ้ายเป็นใบพัดแบบชั้นเดียวและด้านขวาเป็นใบพัดแบบแอร์ฟอยล์[16]

ข้อดีของพัดลมแบบนี้ คือ จะไม่เกิดการโอเวอร์โหลดขณะทำงานคุณลักษณะของพัดลมแบบนี้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.13 จะเห็นว่าเมื่อให้แรงม้าเบรก (Brake Horse Power : BHP) เพิ่มปริมาณการไหลก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เมื่อถึงจุดหนึ่งเส้นโค้งก็จะตกลง การเลือกขนาดมอเตอร์ของพัดลม ต้องเลือกที่จุดนี้ ซึ่งจะทำให้ได้แรงม้าเบรกสูงสุดที่จะไม่ทำให้เกิดโอเวอร์โหลดต่อพัดลม เส้นโค้งแสดงค่าความดันสถิตย์ (Static Pressure) ของพัดลมแบบใบพัดชั้นเดียวได้ แสดงไว้ในรูปที่ 2.13 (ด้านซ้าย) จะเห็นว่าในช่วงความไม่คงที่ของความดันอยู่ เส้นโค้งที่เอียงลงจะมีความดันสูงแต่ปริมาณการไหลของลมต่ำ ซึ่งเกิดจากการที่อากาศวิ่งเข้าไป-มาระหว่างใบพัด ลมเกิดการชะงักเป็นผลให้พัดลมไม่คงที่ อยู่ช่วงหนึ่งอันเป็นจุดค้อยอย่างหนึ่งของใบพัดชั้นเดียว ส่วนรูปที่ 2.13 (ด้านขวา) เป็นเส้นโค้งแสดงสมรรถนะของใบพัดโค้งหลังแบบแอร์ฟอยล์ จะเห็นว่าช่วงความดันสถิตย์จะคงที่กว่า พัดลมแบบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แอร์ฟอยล์จึงสามารถนำไปใช้ระบายลมที่มีปริมาณและความต้านทานการไหลที่แตกต่างกันมากๆ ได้ทั้งนี้เพราะใบพัดแบบแอร์ฟอยล์จะมีความลึกที่ทำให้ลมที่ผ่านมายังใบพัดขยายตัวได้อย่างมีประสิทธิภาพ

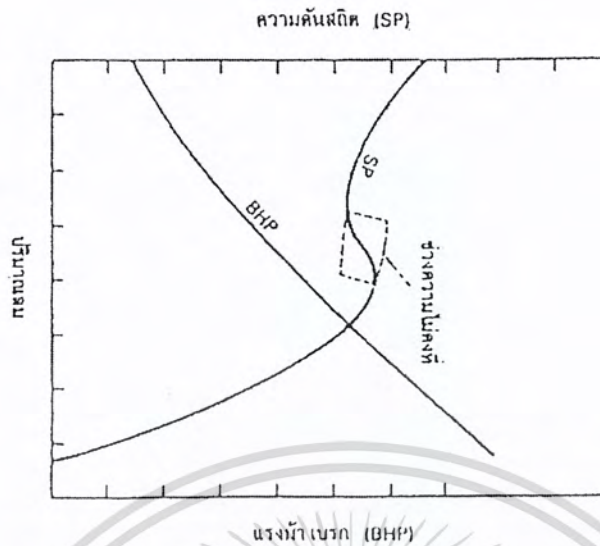


รูปที่ 2.13 สมรรถนะของพัดลมแบบใบพัดโค้งหลังทั้งสองแบบ ด้านซ้ายเป็นใบพัดแบบขนเดียวและด้านขวาเป็นใบพัดแบบแอร์ฟอยล์[16]

พัดลมแบบใบพัด โค้งหลังอาจจะติดตั้งอยู่เป็นชุดเดียวเป็นลักษณะหอยโข่ง และมีช่องทางออกของลมตั้งฉากกับทางเข้าทำให้ลมไหลผ่านใบพัดได้โดยตรงซึ่งจะไม่มีผลต่อสมรรถนะของแรงม้าเบรกและความดันสถิตย์ แต่จะมีประโยชน์เมื่อออกแบบให้พัดลมเชื่อมศูนย์กลางกับท่อจะช่วยประหยัดเนื้อที่ในการติดตั้งได้ พัดลมแบบใบพัด โค้งหลังมักจะถูกนำไปใช้ในระบบทำความร้อน ระบบระบายอากาศ ระบบปรับอากาศขนาดใหญ่ ระบายฝุ่น ควัน เป็นต้น

- พัดลมแบบใบพัด โค้งหน้า

พัดลมชนิดนี้มีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า พัดลมทรงกระบอก (Squirrel cage) ลมที่ออกจากพัดลมจะวิ่งออกด้วยความเร็วที่สูงกว่าความเร็วที่สูงกว่าความเร็วที่ปลายใบพัดซึ่งนำไปใช้กับงานที่ต้องการปริมาณลมต่ำถึงปานกลางที่ความดันต่ำๆ ใบของพัดลมมีรูปร่างคล้ายถ้วยกาแฟลักษณะใบแฉ่นโค้งไปข้างหน้า ลมที่ไหลผ่านจะต้องมีความสะอาดมากอันเป็นข้อจำกัดของพัดลมแบบนี้



รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ของความดันสถิตย์ที่เกิดขึ้นกับปริมาณลมที่ได้ของพัดลมแบบใบพัดโค้งหน้า[16]

ในรูปที่ 2.14 เป็นเส้นโค้งแสดงสมรรถนะของพัดลมจะเห็นว่าที่ด้านซ้ายมือเป็นค่าความดันสถิตย์ที่จะเกิดขึ้นสูงสุด และจะมีช่วงความไม่แน่นอนของความดันเกิดขึ้นซึ่งในการใช้งานต้องหลีกเลี่ยงจากจุดนี้ ตามกราฟเมื่อค่าแรงม้าเชกเพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณลมเพิ่มขึ้นด้วย เมื่อเปรียบเทียบในด้านสมรรถนะที่เท่ากันกับพัดลมชนิดอื่นๆแล้ว พัดลมใบพัดโค้งหน้าจะใช้รอบความเร็วที่ต่ำกว่า สามารถนำไปใช้งานกับลมที่มีอุณหภูมิสูง ซึ่งถือเป็นคุณสมบัติพิเศษของพัดลมแบบนี้ ตัวอย่างของงาน เช่น ใช้กับอุปกรณ์ให้ความร้อนสำหรับเครื่องอบแห้งที่จำเป็นต้องใช้ลมร้อนสำหรับหมุนเวียนและอบแห้งชิ้นงาน เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีข้อดีอีกอย่างคือ เมื่อเปรียบเทียบในทางประสิทธิภาพทางกลที่เท่ากันกับพัดลมชนิดอื่นๆ เนื่องจากพัดลมแบบนี้หมุนที่ความเร็วรอบที่ต่ำกว่าจึงทำให้เกิดการสั่นสะเทือนที่น้อยกว่าเสียงที่เกิดก็จะน้อยกว่าด้วย

2.6.3 การเลือกพัดลม

สิ่งที่พื้นฐานในการเลือกพัดลม คือ ปริมาณของก๊าซที่จะลำเลียงกับความดันที่เพิ่มขึ้นเมื่อผ่านพัดลม

ขั้นตอนในการเลือกพัดลมมี 2 ขั้นตอน คือ

1. การเลือกพัดลมขั้นต้น พิจารณาตามวัตถุประสงค์ต่างๆ ไปดังตารางที่ 2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.6 ตารางเลือกพิจารณาเลือกพัดลมเบื้องต้น[14]

	< Centrifugal >		< Axial >	
	Radial (paddle wheel)	Backward Curved (squirrel cage)	Tube	Vane
Absolute P (gauge, bars)	Near 1	Near 1	Near 1	Near 1
ΔP /stage	15 kPa	10 kPa	1 kPa	5 kPa
Max Q (std m ³ /s)	300	500	300	300
Efficiency range (%)	65-70	75-80	60-65	60-70
<i>Relative costs</i>				
Purchase	Moderate	Low	Low	Moderate
Installation	Moderate	Moderate	Low	Low
Maintenance	Low	Low	Low	Low
<i>Compatibility^b</i>				
Corrosive gases	C	C	C	C
High-temperature gases	C	C	D	D
Abrasive gases (particles)	A	C	D	D
Vacuum service	X	X	X	X
Variable flows	A	A	A	A
Variable pressures	E	E	E	E
<i>Performance problems^b</i>				
Lubrication contamination	A	A	A	A
Flow pulsations	A	A	A	A
Noise	B	B	D	D
Vibration	B	B	A	A
Explosion hazards	B	B	B	B
<i>Other</i>	Flow direction reverses easily			

Footnotes: a. Modified from Ulrich (1984). Used with permission. b. Key: A=excellent, B=modest limitations, C=special units available at higher cost to minimize problems, D=limited in this regard, E=severely limited in this regard, X=unacceptable.

2. การเลือกพัดลมขั้นสุดท้าย คำนึงถึงลักษณะจำเพาะของพัดลมแต่ละชนิด

โดยทั่วไปแล้ว Centrifugal fan ที่ใช้ใบพัดแบบ Backward curved จะใช้กับ Forced draft fan และ Centrifugal fan ที่ใช้ใบพัดแบบ Radial หรือ Forward curved จะใช้กับ Induced draft fan แต่ในบางกรณี อาจจะใช้ใบพัดแบบ Backward curved ที่มีความโค้งน้อยกว่าใบพัดที่ใช้กับ Forced draft fan ก็ได้

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

- เสรีย์ คู่ประกาย (2540) [3] ได้ออกแบบและสร้างเตาเผาภาคตะกอนแบบฟลูอิดไดซ์เบดที่ได้มาจากโรงบำบัดน้ำเสีย โดยออกแบบส่วนของเตาเผาเป็นทรงกระบอก มีความสูงรวมจากพื้น 1.8 เมตร โครงสร้างทำจากเหล็ก ในส่วนบริเวณที่เกิดการเผาไหม้ (Combustion zone) เส้นผ่านศูนย์กลางภายในเตา 0.2 เมตร ส่วนระยะ Freeboard มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.4 เมตร โดยใช้ทรายขนาดเฉลี่ย 1 มิลลิเมตรเป็นเบด ความสูงของเบด 20 เซนติเมตร ใช้ตัวกระจายลม (Distributor) แบบแผ่น Plate เจาระบุ โดยแต่ละรูมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร จำนวน 30 รูต่อตารางเซนติเมตร โดยศึกษาถึงประสิทธิภาพไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของเตาเผา และประสิทธิภาพในการทำลายกากตะกอน (Sludge) โดยทำการศึกษาหลายรูปแบบ พบว่าการทำลายกากตะกอนจะมีประสิทธิภาพ 96.67% เมื่อใช้อัตราการป้อนกากตะกอน 10 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และประสิทธิภาพ 95.62% เมื่อใช้อัตราการป้อนกากตะกอน 15 กิโลกรัมต่อชั่วโมง จากการวิจัยได้แสดงให้เห็นว่าประโยชน์ของเทคนิคฟลูอิดไดเซชัน สามารถนำมาใช้เผาของเสียประเภทของแข็ง ที่มีความชื้นสูงได้

- Koupryanov, V.I., และคณะ (1996) [7] ได้ศึกษาการเผาขี้เลื่อย (Sawdust) ในเตาเผาฟลูอิดไดซ์แบบทรงกระบอก เตาเผาทำจากเหล็ก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเตา 0.82 เมตร ส่วนของกรวยมีความสูง 1 เมตร และส่วนของทรงกระบอกมีความสูง 2.04 เมตร โดยใช้ทรายเป็นเบด สูง 25 และ 35 เซนติเมตร ที่อัตราการป้อน 52 และ 70 กิโลกรัมต่อชั่วโมง โดยใช้ก๊าซ LPG อุณหภูมิประมาณ 30 นาที จึงจะทำให้มีสภาพการเผาไหม้ที่อยู่ตัว ปรากฏว่าอุณหภูมิสม่ำเสมอทั่วทั้งเตา และก๊าซ CO ที่ออกจากเตาอยู่ที่ระดับ 400 ppm ที่อากาศส่วนเกิน (Excess Air) 50-60%

- Suwanayuen, S., และคณะ(1992) [6] ได้ศึกษาการเผาไหม้ของเกลบในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบด โดยมีขนาดพื้นที่หน้าตัด 45×45 ตารางเซนติเมตร มีขนาดความสูง 2.5 เมตร โดยตัวเตาทำจากเหล็กหล่อ ภายในก่ออิฐทนไฟหนา 25 เซนติเมตร ใช้ทรายขนาด 0.5-0.6 มิลลิเมตร เป็นเบด ความสูงเบด 0.32 เมตร โดยใช้ตัวกระจายลมแบบ Plate มีหัว Nozzle แบบท่อตั้ง 12 หัว (เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.75 นิ้ว และสูง 17 เซนติเมตร) เจาะรูขนาด 2 มิลลิเมตรโดยรอบ เกลบถูกป้อนทางใต้เบดด้วยระบบการลำเลียงแบบนิวแมติก ระบบอุ่นเตาใช้ก๊าซ LPG อุณหภูมิเบดมีความร้อนประมาณ 350°C โดยใช้ระยะเวลา 20 นาที จากนั้นจึงเริ่มป้อนเกลบ โดยมุ่งศึกษาถึงผลกระทบของอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง ต่อการถ่ายเทความร้อนของเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบด พบว่า อุณหภูมิของเตาประมาณ 880±10°C ทั่วทั้งเตา ที่อัตราการป้อนเกลบ 13.6 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ประสิทธิภาพในการเผาไหม้มากกว่า 95% ที่อากาศส่วนเกิน 70-200% และถ้าเพิ่มความเร็วฟลูอิดไดซ์ จะทำให้ลดการถ่ายเทความร้อนในเบด แต่จะเพิ่มการถ่ายเทความร้อนช่วงเหนือเบดแทน และได้แนะนำให้ใช้การลำเลียงด้วยสกรู (Screw feeder) ในการป้อนเกลบใต้เบด เพื่อป้องกันเชื้อเพลิงติดในท่อลำเลียง (Plugging) ที่จะทำให้เกิด Interlocking ของเกลบได้

- Vanichseni, S., และคณะ (1981) [9] ได้พัฒนาเตาเผาเกลบแบบฟลูอิดไดซ์เบด โดยใช้เชื้อเพลิง คือ เกลบจากโรงสีขนาดกลางและขนาดเล็ก (กำลังการสีข้าว 9-10 ตันต่อวัน ซึ่งจะให้เกลบ 1,300-2,600 กิโลกรัมต่อวัน) ออกแบบเตาเผาที่มีอัตราการป้อนเกลบ 300 กิโลกรัมต่อชั่วโมง เตาเผาที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดสี่เหลี่ยม 1.1×1.2 ตารางเมตร ความสูงเตา 3 เมตร ใช้ตัวกระจายลมแบบ Nozzle stand pipe โดยใช้ทรายเป็นเบด มีขนาดเฉลี่ย 0.3-0.5 มิลลิเมตร ความสูงเบด 30-40 เซนติเมตร ใช้หัวเผาแบบ Diescl เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

burner ในการอุ่นเบด พบว่าอุณหภูมิเตาในขณะที่ทำการเผาแกลบมีความสม่ำเสมอทั่วทั้งเตาที่อุณหภูมิประมาณ $650-700^{\circ}\text{C}$

- อภิชัย เทอดเทียนวงศ์ (2528) [5] ได้ศึกษาการเผาไหม้ของชีวมวลในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบด โดยใช้แกลบและขี้เถ้าเป็นเชื้อเพลิง ตัวเตาเผามีขนาดพื้นที่หน้าตัด 17.5×17.5 ตารางเซนติเมตร ขนาดความสูง 30 เซนติเมตร ขึ้นรูปด้วย Mortar cement ใช้ทรายเป็นเบด ขนาด 0.3-0.5 มิลลิเมตร ความสูงของเบด 15 เซนติเมตร และมีท่อน้ำภายในเตา 2 ชุด ที่ได้เบดและเหนือเบด เพื่อหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน มีอัตราการป้อนเชื้อเพลิง 3-4 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ความเร็วลมมีค่า 3-4 เท่าของความเร็วต่ำสุดฟลูอิดไดซ์ชัน และอากาศส่วนเกิน 50-60 % พบว่าการเผาไหม้สมบูรณ์ เกิด CO ต่ำ โดยใช้อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง (A/F ratio) ต่ำสุด และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในเบดจะสูงกว่าเหนือเบดถึง 20 เท่า

- Weizhang, W., (1987) [8] ได้พัฒนาเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบด สำหรับเตาเผาแกลบ โดยใช้เตาเผาฟลูอิดไดซ์เบด 2 ชนิดในการทดลอง คือ เตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบ Lab scale และเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบ Pilot scale ซึ่งพัฒนามาจากเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบ Lab scale โดยก่ออิฐทนไฟภายในเตาเผาและเตาเผาภายนอกเป็นเหล็ก มีพื้นที่หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 6.4 ตารางเมตร มีความสูง 2 เมตร ความสูงเบด 15 เซนติเมตร พบว่าเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบ Pilot scale จะมีประสิทธิภาพสูง และเกิดขี้เถ้าน้อย ความร้อนที่ได้ประมาณ 200-300 กิโลวัตต์ เมื่อทำงานที่อัตราอากาศส่วนเกิน 20 % ประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงกว่า 95 % อากาศส่วนที่สอง (Secondary air) เป็นส่วนสำคัญ และจำเป็นต่อการเผาไหม้ที่ดีและอุณหภูมิสม่ำเสมอ

- Bhattacharya, S.C., และคณะ (1983) [11] ได้ศึกษาเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบด ใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิง มีขนาดพื้นที่หน้าตัดสี่เหลี่ยม 15×15 เซนติเมตร มีความสูง 60 เซนติเมตร ทำจากเหล็กเหนียว มีความสูงเบด 10 เซนติเมตร ใช้ตัวกระจายลมแบบ Plate เจาะรูขนาด 1 มิลลิเมตร โดยมีระยะห่างระหว่างรู 1 เซนติเมตร ในการทดลองอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ได้มาจาก 2 ส่วนคือ ส่วนแรก เป็นอากาศที่ผ่านตัวกระจายลม และส่วนที่สองมาจากการป้อนเชื้อเพลิง เพื่อป้องกันการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงก่อนเข้าสู่ตัวเตา อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 9.5 กิโลกรัมต่อชั่วโมง จากการทดสอบเปลี่ยนขนาดทรายหลายๆ ขนาด พบว่าขนาดทรายที่เหมาะสมต่อการเกิดฟลูอิดไดซ์ชันที่ดี คือ 0.3-0.4 มิลลิเมตร และเกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ อุณหภูมิประมาณ 760°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงานแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นการหาสมบัติทางกายภาพของทรายที่ใช้เป็นเบดและซีลี้อยู่ และส่วนที่สองเป็นการออกแบบเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบด ซึ่งจะกล่าวในรายละเอียดต่อไป

3.1 การศึกษาสมบัติทางกายภาพของทรายที่ใช้เป็นเบด และซีลี้อยู่

ในการศึกษาหาสมบัติทางกายภาพของทรายที่ใช้เป็นเบด ได้ทำการทดลองเพื่อหาสมบัติต่อไปนี้ สัดส่วนช่องว่าง (Void fraction) ความกลม (Sphericity) ความหนาแน่น (Density) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยวัสดุ โดยใช้ตะแกรงร่อน สำหรับซีลี้อยู่ได้ทำการหาความหนาแน่น

3.1.1 การหาสัดส่วนช่องว่าง, ϵ_m และความกลมของเบด, ϕ_s

โดยการบรรจุทรายประมาณ 25 มิลลิเมตร ลงในกระบอกตวงขนาด 10 มิลลิเมตรอย่างไม่เป็นระเบียบ แล้วบันทึกค่าปริมาตรของทรายที่บรรจุลงในกระบอกตวง จากนั้นเติมสารนอร์มอลเฮกเซน (N-hexane) ความเข้มข้น 90 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ที่ทราบปริมาตรแน่นอนลงไปผสมกับทราย บันทึกผลของปริมาตรหลังการผสมไว้ นำไปคำนวณหาสัดส่วนช่องว่าง

$$\epsilon_m = \frac{V_v + V_h - V_n}{V_v} \quad (3.1)$$

จากนั้นนำค่าสัดส่วนช่องว่างไปหาความกลมโดยใช้ตารางของ Kunii และ Levenspiel [1] ในรูป 2.6 โดยเลือกใช้เส้น Normal packing สามารถหาค่าความกลมของทรายได้

3.1.2 การหาความหนาแน่นของทราย และซีลี้อยู่

นำทราย และซีลี้อยู่ มาจำนวนหนึ่งซึ่งน้ำหนักและวัดปริมาตร โดยการบรรจุทราย และซีลี้อยู่ที่ทราบน้ำหนักในกระบอกตวงขนาด 50 มิลลิเมตร เติมน้ำที่ทราบปริมาตรแน่นอนและมีปริมาตรท่วมทรายลงไปผสมกับทราย บันทึกปริมาตรของน้ำ ทำการหาผลต่างปริมาตรน้ำเมื่อเริ่มต้นและสุดท้าย นำค่าที่ได้ไปคำนวณหาความหนาแน่น และใช้ n-hexane แทนน้ำสำหรับซีลี้อยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน $P_{สื่อ}$ ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ (3.2) การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 การหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของทราย โดยใช้ตะแกรงร่อน

โดยนำทรายที่ใช้เป็นเบด จำนวนหนึ่งมาชั่งเพื่อหาน้ำหนัก ใส่ในชุดเครื่องสั่นที่มีตะแกรงรูเปิดขนาดใหญ่-เล็ก เรียงจากบนลงล่าง ให้เครื่องทำงานเป็นเวลา 10 นาที ชั่งตัวอย่างที่อยู่บนตะแกรงที่มีรูเปิดเล็กที่สุด เปรียบเทียบกับเมื่อให้เครื่องทำงานต่อไปอีก 5 นาที ชั่งตัวอย่างที่อยู่บนตะแกรงชั้นเดิม ถ้ามวลแตกต่างกันไม่เกิน 0.2 % จะถือว่าการแยกขนาดสมบูรณ์ เมื่อการแยกเสร็จสมบูรณ์ ให้ชั่งตัวอย่างที่อยู่บนตะแกรงแต่ละชั้นแล้วบันทึกผล เพื่อนำมาคำนวณหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยวัสดุ

$$d_p = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{X_i}{d_{pi}} \right)} \quad (3.3)$$

3.1.4 การหาความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดซ์ (Minimum fluidization velocity, U_{mf})

ในการหาความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดซ์นั้น สามารถทำการหาได้ 2 วิธี คือ จากการทดลอง และจากการคำนวณทางทฤษฎี ซึ่งขั้นตอนการดำเนินงานนี้ ได้ใช้วิธีการคำนวณทางทฤษฎีมาใช้ในการหาความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดซ์เบด

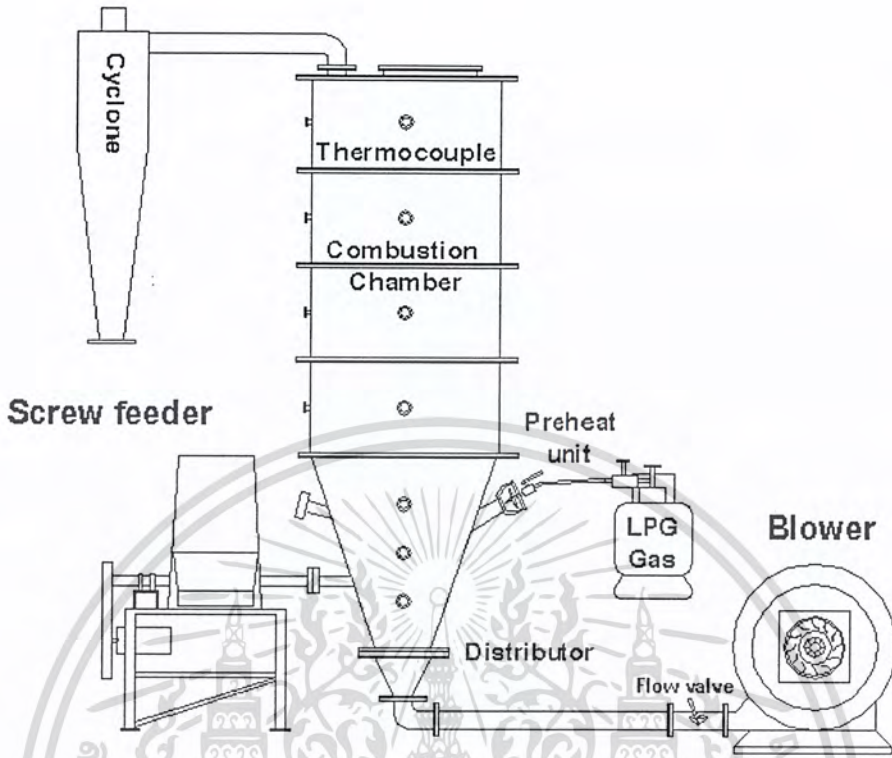
$$\frac{1.75}{\phi_s \varepsilon_{mf}^3} \cdot \left(\frac{d_p U_{mf} \rho_g}{\mu} \right)^2 + \frac{150(1 - \varepsilon_{mf})}{\phi_s^2 \varepsilon_{mf}^3} \cdot \left(\frac{d_p U_{mf} \rho_g}{\mu} \right) = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2} \quad (3.4)$$

เมื่อทราบค่าสัดส่วนช่องว่าง ความกลม ความหนาแน่น และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ซึ่งเป็นสมบัติทางกายภาพของทรายที่ใช้เป็นเบดแล้ว นำค่าที่ได้ไปคำนวณหาความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดซ์ ตามสมการที่ 3.4

3.2 การออกแบบเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด

ในการสร้างเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบด มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างเตาเผาโดยใช้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเป็นเชื้อเพลิงและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม ในส่วนของแหล่งพลังงานความร้อนร่วม โดยมีส่วนประกอบสำคัญอยู่ 7 ส่วน คือ ตัวเตาเผา แผ่นกระจายลม พัดลมป้อนอากาศ สำหรับการเผาไหม้ ระบบป้อนเชื้อเพลิงขี้เลื่อย ระบบอุ่นเบดพร้อมหัวเผา ระบบเครื่องแยกฝุ่นแบบไซโคลน และระบบวัดอุณหภูมิ ดังรูปที่ 3.1 รายละเอียดของส่วนประกอบมีดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



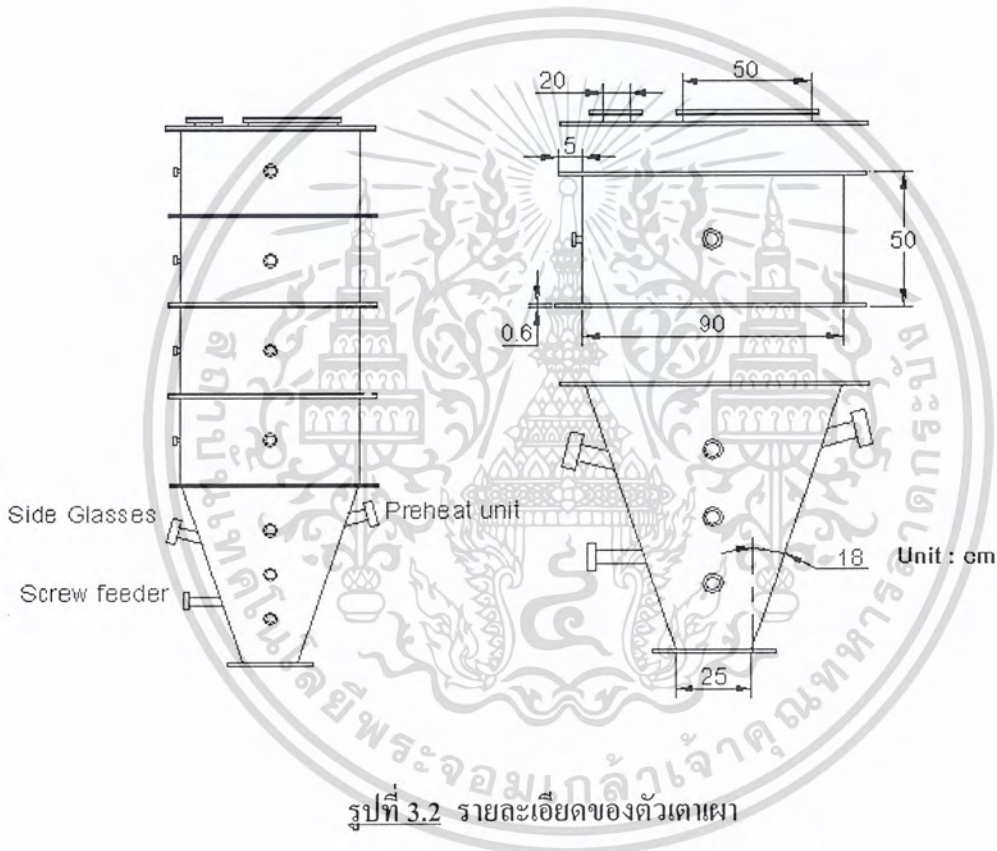
รูปที่ 3.1 รายละเอียดส่วนประกอบของเตาเผา

3.2.1 ตัวเตาเผา

การคำนวณพื้นที่หน้าตัดภายในเตาได้จากกรคำนวณหาปริมาณอากาศที่เหมาะสมในการฟลูอิดไดซ์ ซึ่งควรมีค่าประมาณ 3-5 เท่าของความเร็วต่ำสุดที่ใช้ในการเกิดฟลูอิดไดซ์ ในการสร้างใช้ค่า 4.5 เท่าของความเร็วต่ำสุดที่ใช้ในการฟลูอิดไดซ์ ค่ารวมพื้นที่หน้าตัดจากการไหลอากาศต่อปริมาณอากาศที่ใช้ในการฟลูอิดไดซ์เฉลี่ยที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ได้พื้นที่หน้าตัดทรงกระบอก ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเตา 90 เซนติเมตร ความสูงของเตาคำนวณจากผลรวมความสูงหลุดลอยส่งผ่านปริมาณ 4.5 เท่าของความสูงเบดขณะฟลูอิดไดซ์

ในการจัดสร้างเตาเผา แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่หนึ่ง เป็นรูปทรงกรวยตัด มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กสุด 25 เซนติเมตร และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่สุด 90 เซนติเมตร โดยมีมุมเอียง 18 องศา นับจากแกนตั้ง มีความสูง 1.0 เมตร ในส่วนของกรวยตัดได้จัดทำท่อส่งตา สำหรับคุณภาพการทำงานภายในตัวเตาเผา ท่อต่อยื่นออกมาสำหรับต่อกับระบบป้อนเชื้อเพลิงจำนวน 2 ท่อ ที่ระดับความสูง 40 และ 60 เซนติเมตรนับจากปลายกรวยตัด และท่อต่อยื่นสำหรับต่อกับระบบอุณหมาตร ส่วนที่สองเป็นรูปทรงกระบอก มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเตาเผา 90 เซนติเมตรแบ่งออกเป็น 4 ท่อน ท่อนละ 50 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ผ่านการอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์ หากมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อเจ้าของลิขสิทธิ์

เซนติเมตร มีความสูงรวม 2.0 เมตร ฝาเตาเป็นแผ่นเหล็กหนา 4.5 มิลลิเมตร ทำช่องสำหรับต่อไซโคลน เป็นทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า 8×20 เซนติเมตร และทำช่องสำหรับลงไปตรวจสอบสภาพภายในเตา มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 เซนติเมตร ผนังเตาสร้างจากแผ่นเหล็กหนา 4.5 มิลลิเมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลางทำแผ่นประกบสำหรับยึดนอตกว้างออกจากตัวเตา 5 เซนติเมตร รูสำหรับใส่เนื้อยึดตัวเตาแต่ละท่อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร ความสูงของตัวเตาเผาทั้งหมด 3.0 เมตร การคำนวณออกแบบพื้นที่หน้าตัดเตาเผา ความสูงของเตาเผา แสดงในหัวข้อ ข.1-ข.6 ในภาคผนวก ข. รายละเอียดของตัวเตาเผาแสดง ดังรูปที่ 3.2



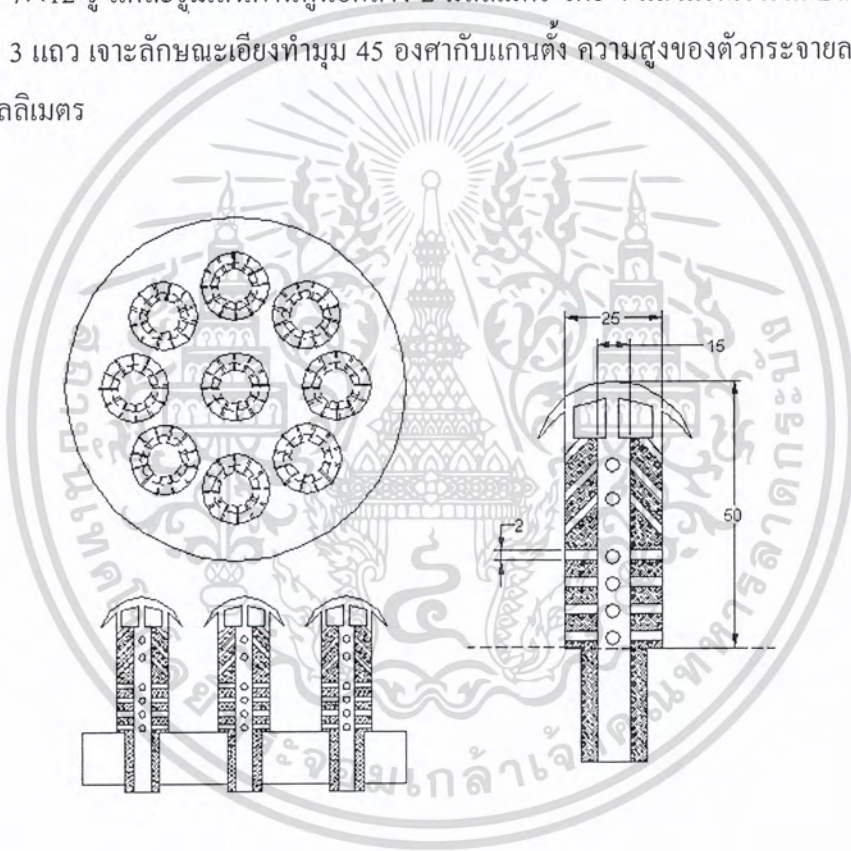
รูปที่ 3.2 รายละเอียดของตัวเตาเผา

3.2.2 แผ่นกระจายลม

ในการออกแบบแผ่นกระจายลม มีวัตถุประสงค์เพื่อให้เป็นแผ่นกระจายลมที่สามารถกระจายลมสม่ำเสมอ มีความดันลดเบดต่ำ ในการออกแบบแผ่นกระจายลมที่ใช้สำหรับเตาเผาทำจากแผ่นเหล็กวงกลมหนา 2 เซนติเมตร มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 เซนติเมตร แผ่นกระจายลมติดอยู่เหนือกล่องลม มีหน้าแปลนยึดส่วนล่างสุดของเตา โดยมีท่อส่งลมจากพัดลมเป่าอากาศและสามารถถอดออกได้เพื่อให้สามารถปรับปรุงและพัฒนาแผ่นกระจายได้ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบตัวกระจายลมเป็นลักษณะ Nozzle stand pipes ผสมกับ Bubble caps แผ่นกระจายลมที่ใช้สำหรับเตาเผาทำจากแผ่นเหล็กหนา 2 เซนติเมตร ประกอบ Nozzle stand pipes ผสมกับ Bubble caps 9 หัว ลักษณะการเรียงตัวของตัวกระจายลม มีการจัดเรียงคือ มีตัวกระจายลม 1 หัว อยู่ที่จุดศูนย์กลางของแผ่นกระจายลม และตัวกระจายลมอีกจำนวน 8 หัว เรียงเป็นวงกลมล้อมรอบตัวกระจายลมหัวแรก มีระยะห่างระหว่างหัวอันแรกกับหัวที่ล้อมรอบ 12 เซนติเมตร ลักษณะของตัวกระจายลมเป็นท่อเหล็กมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 15 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 25 มิลลิเมตร ปลายเปิด มีหมวกครอบบริเวณปากท่อเพื่อป้องกันทรายไหลย้อนกลับเข้าไปในท่อกล่องลม ซึ่งแต่ละหัวจะรูตามแนวเส้นรอบวง 7×12 รู แต่ละรูมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร โดย 4 แถวแรกเจาะลักษณะตั้งฉากกับแกนตั้ง และอีก 3 แถว เจาะลักษณะเอียงทำมุม 45 องศา กับแกนตั้ง ความสูงของตัวกระจายลมวัดจากพื้นเตาเท่ากับ 50 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.3 แผ่นกระจายลม

สำหรับท่อส่งลมสำหรับส่งลมเข้าแผ่นกระจายลม ประกอบด้วยท่อลมหลัก กล่องลมขยาย ข้อต่อ 90 องศา และท่อตรง ซึ่งท่อลมหลักเป็นท่อเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว มีความยาว 2.5 เมตร ต่อจากพัดลมเป่าอากาศเข้ามายังท่อส่งลมเข้าท่อกล่องลมขยาย ไปไปยังแผ่นกระจายลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 ระบบป้อนเชื้อเพลิง

ระบบป้อนเชื้อเพลิงเป็นระบบป้อนเชื้อเพลิงเข้าเตาเผาด้านข้างเป็นเครื่องมือที่ทำด้วยถังรูปสี่เหลี่ยมขนาด 43.50×32.0 เซนติเมตร สูง 40 เซนติเมตร ด้านล่างของกรวยเป็นเกลียวลำเลียงมีลักษณะครึ่งวงกลม มีเกลียวลำเลียงแบบเต็มใบ ยาว 60 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางของเกลียวลำเลียง 4 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางของแกนเพลลา 2.54 เซนติเมตร ระยะพิทช์ 4 เซนติเมตร ส่วนขับเคลื่อนประกอบอยู่ด้านหลังของถังรูปสี่เหลี่ยม เกลียวลำเลียงขับเคลื่อนด้วยเกียร์มอเตอร์ ขนาด 1 แรงม้า มีระบบส่งกำลังด้วยสายพาน ทดความเร็วรอบด้วยมู่เลย์ สามารถป้อนเชื้อเพลิงในอัตรา 80, 130 และ 210 กิโลกรัมต่อชั่วโมง



รูปที่ 3.4 ระบบป้อนเชื้อเพลิง

3.2.4 ระบบป้อนอากาศ

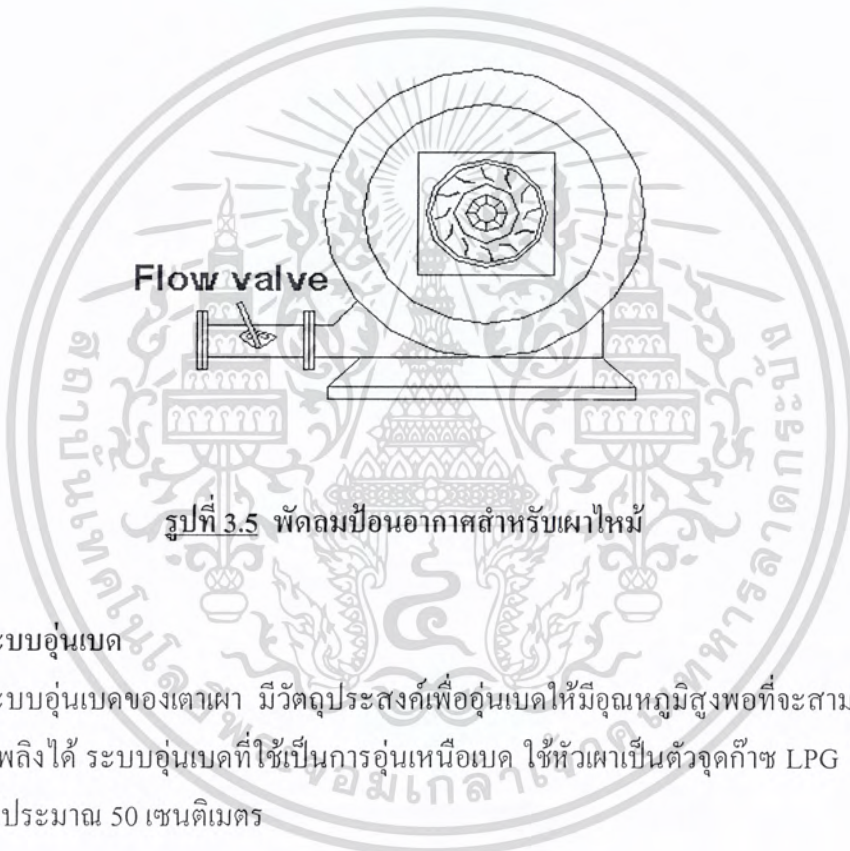
การออกแบบระบบป้อนอากาศต้องทราบความดันลดของระบบเตาเผาทั้งหมด ซึ่งประกอบด้วยความดันลดของแผ่นกระจายลม ความดันลดของเบด ความดันลดไซโคลอน และความดันลดจากระบบท่อต่างๆ ซึ่งในการคำนวณถือว่าความดันลดไซโคลอนและระบบท่อต่างๆน้อยมาก

ระบบป้อนอากาศที่ใช้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน

- ก. อากาศที่ทำให้เบดทรายเกิดการฟลูอิดไดซ์
- ข. อากาศสำหรับผสมกับ LPG ในการอุ่นเบดก่อนการเผาไหม้

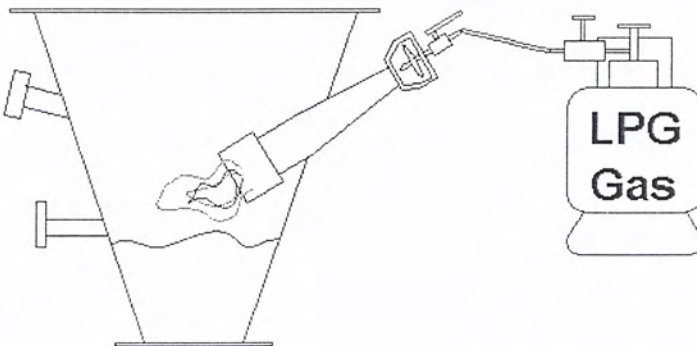
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการคำนวณการออกแบบ (ภาคผนวก ข.7) พบว่าต้องใช้อากาศในการฟลูอิดไดซ์ที่ 23.61 ลูกบาศก์เมตรต่ออนาที ความดันลดจากระบบต่างๆ ของเตาเผาประมาณ 74.48 เซนติเมตรน้ำ ซึ่งเป็นความดันลดที่มีค่าสูงและจากอัตราการไหลที่ออกแบบไว้ให้มีอัตราการไหล 879.44 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส จึงใช้พัดลม(Force draft fan) ที่สามารถทำความดันและมีปริมาณลมที่กำหนดระบบป้อนอากาศโดยการ ใช้พัดลมเป่าเป็นเครื่องมือที่ใช้ป้อนอากาศเข้าทางด้านล่างของเตาเผา พัดลมเป่าอากาศสามารถผลิตอากาศให้มีอัตราการไหลสูงสุด 40 CMM และสร้าง ความดันของพัดลมที่มากที่สุดเท่ากับ 76.2 เซนติเมตรน้ำ มอเตอร์ที่ใช้ขับพัดลมเป็นชนิด 3 เฟส ขนาด 25 แรงม้า



3.2.5 ระบบอุ่นเบด

ระบบอุ่นเบดของเตาเผา มีวัตถุประสงค์เพื่ออุ่นเบดให้มีอุณหภูมิสูงพอที่จะสามารถเกิดการเผาไหม้กับเชื้อเพลิงได้ ระบบอุ่นเบดที่ใช้เป็นการอุ่นเหนือเบด ใช้หัวเผาเป็นตัวจุดก๊าซ LPG โดยมีความยาวของเปลวไฟประมาณ 50 เซนติเมตร

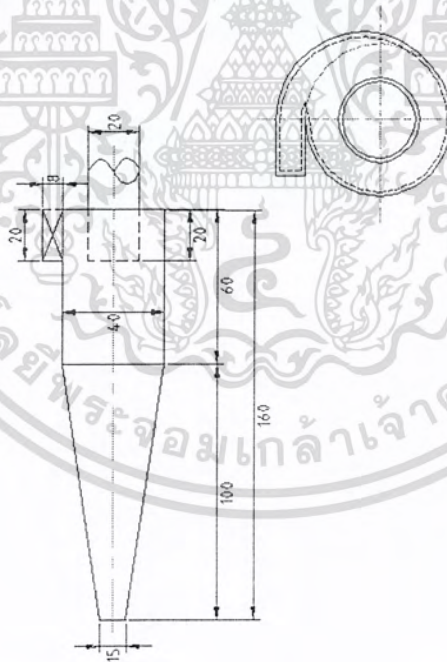


รูปที่ 3.6 ระบบอุ่นเบดแบบเหนือเบด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.6 ระบบเครื่องแยกฝุ่น

ระบบเครื่องแยกฝุ่นเป็นแบบไซโคลน ใช้สำหรับดักฝุ่นและเถ้าที่เกิดจากการเผาไหม้หรือทรายละเอียดที่ปลิวออกมาจากกระแสบรรยากาศร้อน โดยมีหลักการ คือ อากาศร้อนซึ่งมี เถ้าและฝุ่นทรายที่เคลื่อนที่เข้ามาสัมผัสกับผนังด้านบนของท่อกลมตรงกลาง การเคลื่อนที่ของเถ้าและฝุ่นทรายที่อยู่ในกระแสบรรยากาศร้อนภายในไซโคลน จะได้รับแรงหนีศูนย์กลาง แรงดึงดูดของโลก และแรงทางอากาศพลศาสตร์ ซึ่งแรงหนีศูนย์กลางทำให้เถ้าและฝุ่นทราย เคลื่อนที่ออกไปตามแนวรัศมีไปยังผนังไซโคลนด้านใน ส่วนแรงดึงดูดของโลกจะทำให้เถ้าและฝุ่นทรายเคลื่อนที่ต่ำลง โดยมีลักษณะการเคลื่อนที่เป็นเกลียวลงสู่ด้านล่าง โดยไซโคลนเดิมที่ได้ทำการคำนวณและออกแบบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไซโคลนเท่ากับ 30 เซนติเมตรมีท่อทางเข้าเป็นท่อสี่เหลี่ยมขนาด 6×15 เซนติเมตร มีความสูง 120 เซนติเมตร และได้มีการแก้ไขโดยการขยายขนาดท่อทางเข้าและออกให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเป็น 8×20 เซนติเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 เซนติเมตร ท่อทางออกมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 20 เซนติเมตร ความสูง 160 เซนติเมตร เพื่อเพิ่มปริมาณการดักเถ้าและฝุ่นทรายได้ดียิ่งขึ้น และสามารถดักจับวัสดุอื่นๆ ได้เมื่อมีการปรับปรุงและพัฒนาเตาเผาต่อไป ไซโคลนแสดงดังรูป 3.7



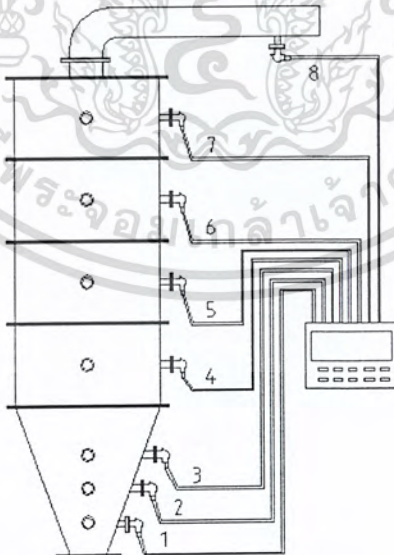
รูปที่ 3.7 ระบบเครื่องแยกฝุ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.7 ระบบวัดอุณหภูมิ

ในการติดตั้งระบบวัดอุณหภูมิของเตาเผา มีจุดประสงค์เพื่อให้สามารถทราบอุณหภูมิช่วงต่างๆ ภายในเตาที่ตำแหน่งต่างๆ ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิของเตาเผาในบริเวณต่างๆ นั้นเป็นเทอร์โมคัปเปิ้ล ชนิด K แบบ Chromel-Alumel สามารถวัดอุณหภูมิในช่วง 0-1,200 องศาเซลเซียส ต่อเข้ากับเครื่องบันทึกอุณหภูมิแบบดิจิทัล (Digital data logger) วัดอุณหภูมิที่เบด และเหนือเบดที่ความสูงระยะต่างๆ ดังรูปที่ 3.8 ทำการวัดอุณหภูมิภายในเตาเผาทั้งหมดจำนวน 8 จุด โดยจำนวน 3 จุดใช้วัดอุณหภูมิของเตาในส่วนของทรงกรวย อีกจำนวน 4 จุดใช้วัดอุณหภูมิของเตาเผาในส่วนของทรงกระบอก และอีกจำนวน 1 จุดใช้วัดอุณหภูมิที่ทางออกของเตาเผา โดยตำแหน่งของจุดวัดอุณหภูมิมีดังนี้

- จุดที่ 1 วัดอุณหภูมิในเบดที่ระยะ 20 เซนติเมตร เหนือแผ่นกระจายลม
- จุดที่ 2 วัดอุณหภูมิเหนือเบดที่ระยะ 40 เซนติเมตร เหนือแผ่นกระจายลม
- จุดที่ 3 วัดอุณหภูมิเหนือเบดที่ระยะ 60 เซนติเมตร เหนือแผ่นกระจายลม
- จุดที่ 4 วัดอุณหภูมิเหนือเบดที่ระยะ 125 เซนติเมตร เหนือแผ่นกระจายลม
- จุดที่ 5 วัดอุณหภูมิเหนือเบดที่ระยะ 175 เซนติเมตร เหนือแผ่นกระจายลม
- จุดที่ 6 วัดอุณหภูมิเหนือเบดที่ระยะ 225 เซนติเมตร เหนือแผ่นกระจายลม
- จุดที่ 7 วัดอุณหภูมิเหนือเบดที่ระยะ 275 เซนติเมตร เหนือแผ่นกระจายลม
- จุดที่ 8 วัดอุณหภูมิที่ทางออกของเตาเผา



รูปที่ 3.8 ตำแหน่งของ Thermocouple ต่อเข้ากับตัวเตาเผา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

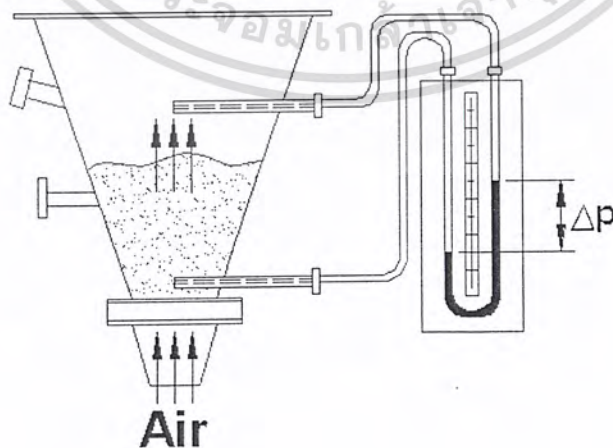
3.3 การทดสอบหาค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดซ์เบดจากการทดลอง

ทำการทดสอบโดยนำทรายที่ใช้เป็นเบด มาใส่ในทรงกรวยตัดซึ่งทำจากสังกะสีหนา 2 มิลลิเมตร และมีช่องสำหรับสังเกตการเคลื่อนไหวนของทรายในทรงกรวยตัดดังกล่าว ทรงกรวยตัดต่อเข้ากับพัดลมเป่าอากาศ ดังรูปที่ 3.9 ด้านบนและล่างของทรงกรวยตัดมีท่อยาวต่อกับมาโนมิเตอร์ (Manometer) โดยในการทดสอบเก็บข้อมูล ดังนี้

1. ความเร็วของอากาศ โดยการอ่านจากเครื่องมีวัด หรือจาก Calibration curve หน่วยวัดเป็น เซนติเมตรต่อวินาที

2. ความแตกต่างของความดัน หรือความดันลดเกิดจากการไหลของอากาศผ่านทรงกรวยตัด ตั้งแต่จุดแรกถึงจุดสุดท้ายที่ต่อเข้ากับมาโนมิเตอร์ โดยวัดจากระดับของน้ำในมาโนมิเตอร์ ความดันจุดนี้เป็นความดันลดที่เกิดขึ้นเนื่องจากการไหลของอากาศผ่านทรงกรวยตัด ซึ่งประกอบด้วย ท่อที่อยู่ระหว่างจุดที่ต่อเข้าสู่มาโนมิเตอร์ แผ่นกระจายลม และอนุภาคทรายที่บรรจุในทรงกรวยตัดเหนือแผ่นกระจายลม

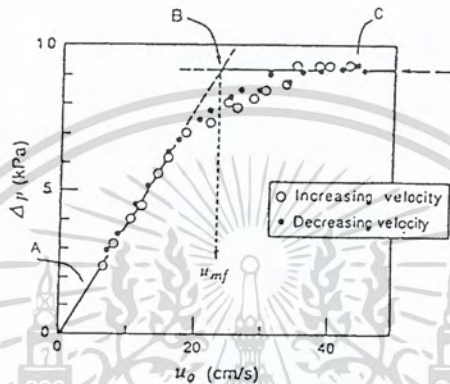
เนื่องจากความดันลดที่วัดได้เป็นความแตกต่างของความดัน 2 จุด ที่วัดได้จากการไหลของอากาศ ในการหาความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดซ์เบดนั้นจำเป็นต้องใช้ความดันลดของการไหลของอากาศผ่านกลุ่มอนุภาคทรายเท่านั้น จึงจำเป็นต้องหาความดันลดที่เกิดจากการไหลผ่านจุด 2 จุด โดยไม่มีอนุภาคทราย แล้วทำการทดลองด้วยขั้นตอนเช่นเดียวกับที่มีอนุภาคทรายอยู่ ถ้าต้องการทราบค่าความดันลดของการไหลของอากาศผ่านกลุ่มอนุภาคทราย หาได้จากความดันลดของการไหลของอากาศผ่านกลุ่มอนุภาคทรายลบด้วยความดันลดของการไหลของอากาศผ่าน โดยไม่มีกลุ่มอนุภาคทราย



รูปที่ 3.9 อุปกรณ์ทดสอบหาค่าความดันลดผ่านเบด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.10 จาก A ถึง B จะได้กราฟเส้นตรง ซึ่งเป็นลักษณะของการเปลี่ยนแปลงความดันลดของการไหลของอากาศผ่านอนุภาคทรายที่อยู่กับที่ ในช่วง B ถึง C จะเป็นช่วงที่มีความดันลดคงที่ ถ้าลากเส้นตรงผ่านจุดที่มีความดันลดคงที่ และเส้นตรงผ่านจุดที่เมื่ออนุภาคอยู่ในสภาพอยู่กับที่เส้นตรงทั้งสองจะไปตัดที่จุดๆ หนึ่ง จากจุดนี้ถ้าลากเส้นตรงมาตัดแกนความเร็ว ค่าของความเร็วที่อ่านได้ ณ จุดนี้คือความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไลซ์เบด

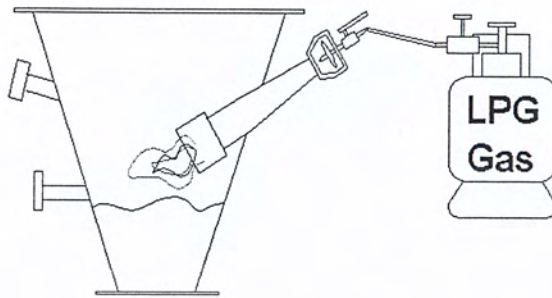


รูปที่ 3.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดกับความเร็ว

3.4 การทดสอบระบบอุ้นเบด

ในการทดสอบระบบอุ้นเบดนั้น ขั้นตอนแรกเป็นการจ่อระบบอุ้นเบดโดยจุดไฟจากช่องผสมอากาศกับก๊าซหุงต้มจากนั้นค่อยๆเพิ่มปริมาณก๊าซหุงต้ม จนเกิดเปลวไฟในส่วนของตัวเองโดยสังเกตจากช่องส่องตาของตัวเอง จากนั้นจึงเพิ่มความดันของก๊าซหุงต้มจนถึงระดับหนึ่งโดยสังเกตสีของเปลวไฟเป็นสีฟ้า ต่อไปเป็นขั้นตอนเพิ่มปริมาณอากาศ โดยเปิดระบบป้อนอากาศ ให้มีปริมาณอากาศในเพียงพอโดยสังเกตจากเปลวไฟ จากนั้นเริ่มทำการเก็บข้อมูลอุณหภูมิตามตำแหน่งต่างๆ ของตัวเอง จากการทดสอบระบบอุ้นเบดใช้เวลาในการอุ้นเบดประมาณ 80 นาที ในการอุ้นเบดให้มีอุณหภูมิประมาณ 350 องศาเซลเซียส

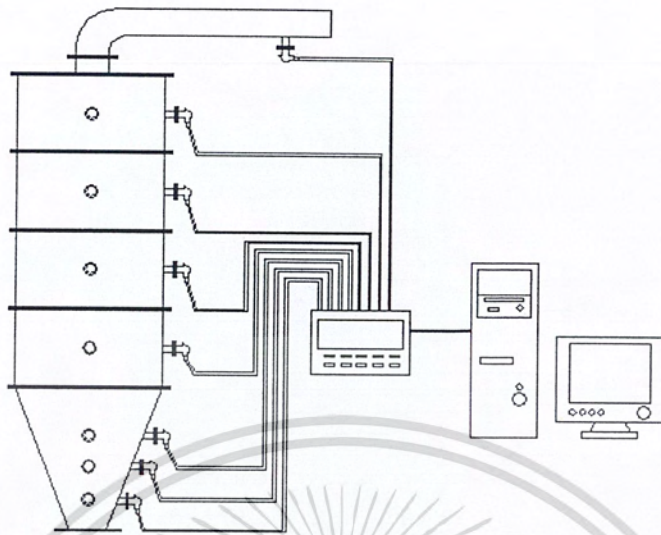
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 ระบบอุ่นเบด

3.5 การจัดเตรียมการทดสอบการทำงานของเตาเผา

ในการจัดเตรียมการทดสอบการทำงานของเตาเผา ขั้นตอนแรกเป็นการตรวจสอบระบบต่างๆ ของเตาเผา ในตัวเตาเผาต้องตรวจสอบสภาพภายในเตา การรั่วซึมของอากาศตามรอยต่อ ระดับทรายที่ใช้เป็นเบด ในระบบอุ่นเบดตรวจสอบดูรอยต่อตามอุปกรณ์ต่างๆ การรั่วซึมของก๊าซหุงต้ม สภาพของอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบป้อนเชื้อเพลิง ตรวจสอบอัตราการป้อนเชื้อเพลิง การหล่อลื่นของอุปกรณ์ที่เคลื่อนที่ ระบบส่งถ่ายกำลัง ในระบบป้อนอากาศ ตรวจสอบรอยรั่วซึมจากข้อต่อต่างๆ ของท่อส่งลม ระบบไฟ ในระบบวัดอุณหภูมิตรวจสอบตัววัดอุณหภูมิ การต่อสายไฟของตัววัดอุณหภูมิกับอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นๆ เมื่อทำการตรวจสอบสภาพการทำงานของระบบต่างๆ แล้ว ทำการต่อระบบวัดอุณหภูมิกับอุปกรณ์ดิจิทัลในการเก็บข้อมูลของอุณหภูมิตามจุดต่างๆ ของตัวเตาเผา ในการเก็บข้อมูลในการศึกษาต่อไป ดังรูป



รูปที่ 3.12 อุปกรณ์การทดสอบการทำงานของเตาเผา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

ข้อมูลและผลการทดลองแบ่งเป็น 4 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นผลการทดลองการหาสมบัติของทรายที่ใช้เป็นเบด ได้แก่ ความพรุนและความหนาแน่นของทราย ส่วนที่สองเป็นผลการทดลองหาสมบัติของซีลีย์ที่ใช้เป็นเชื้อเพลิง ส่วนที่สามเป็นผลการทดลองหาค่าความดันลดผ่านเบด เพื่อใช้ในการหาค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไดเซชัน (Minimum velocity fluidization) และส่วนที่สี่เป็นผลการทดลองการอุ้มนเบด

4.1 ผลการวิเคราะห์ค่าสมบัติทางกายภาพของทรายที่ใช้เป็นเบด

สมบัติของทรายที่ใช้เป็นเบด หาได้จากการทดลองในหัวข้อ 3.1 คือ สัดส่วนช่องว่างและความหนาแน่น (Void fraction and density) ในการทดลองได้ใช้ทรายสองขนาด ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย 0.3 และ 0.5 มม. โดยทำการทดลองตัวอย่างละ 5 ครั้ง แล้วนำผลที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย ได้ผลการทดลองดังตาราง 4.1 และ 4.2

ตารางที่ 4.1 ค่าสัดส่วนช่องว่างและความหนาแน่นของทรายขนาดเล็กที่ใช้เป็นเบด

No.	Sand & Space (ml) (A)	Normal Hexane (ml) (B)	After mixed (ml) (C)	Space (ml) A+B-C=D (D)	Weight (g) (W)	ϵ D/A	ρ (g/ml) W / (A-D)
1.	99	68.5	125	42.5	141.894	0.429	2.511
2.	100	67.0	125	42.0	143.903	0.420	2.481
3.	100	67.5	125	42.5	143.848	0.425	2.502
4.	100	64.0	125	39.0	141.818	0.390	2.325
5.	100	69.0	125	44.0	142.255	0.440	2.500
Total average at side dia. 0.3 mm of sand						$\Sigma=0.421$	$\Sigma=2.472$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ค่าสัดส่วนช่องว่างและความหนาแน่นของทรายขนาดใหญ่ที่ใช้เป็นเบด

No.	Sand & Space (ml) (A)	Normal Hexane (ml) (B)	After mixed (ml) (C)	Space (ml) A+B-C=D (D)	Weight (g) (W)	ϵ D/A	ρ (g/ml) W / (A-D)
1.	125	73.0	150	48.0	200	0.38	2.60
2.	118	78.0	150	46.0	200	0.39	2.78
3.	122	74.0	150	46.0	200	0.38	2.63
4.	124	78.0	150	52.0	200	0.42	2.78
5.	122	74.0	150	46.0	200	0.38	2.63
Total average at side dia. 0.5 mm of sand						$\Sigma=0.39$	$\Sigma=2.68$

จากการทดลองทั้ง 2 ขนาดเม็ดทราย ได้ค่าเฉลี่ยของค่าสัดส่วนช่องว่าง คือ 0.4 และค่าความหนาแน่นของทราย คือ 2.58 g/ml



รูปที่ 4.1 ตัวอย่างของทรายที่นำมาทดสอบหาสมบัติทางกายภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการวิเคราะห์ค่าสมบัติทางกายภาพของขี้เลื่อย

- ผลของค่าสัดส่วนช่องว่างและความหนาแน่น (Void fraction and density) โดยนำขี้เลื่อยมาทดลองซ้ำกัน 5 ครั้ง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย ได้ผลดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าสัดส่วนช่องว่างและความหนาแน่นของขี้เลื่อย

No.	Sawdust & Space (ml) (A)	Normal Hexane (ml) (B)	After mixed (ml) (C)	Space (ml) A+B-C=D (D)	Weight (g) (W)	ϵ D/A	ρ (g/ml) W / (A-D)
1.	100	106.0	125	81.0	20.954	0.81	1.103
2.	100	103.0	125	78.0	20.767	0.78	0.944
3.	100	106.5	125	81.5	20.017	0.82	1.082
4.	100	111.0	125	86.0	19.793	0.86	1.414
5.	100	110.0	125	85.0	21.015	0.85	1.401
Total average of density and space of sawdust						$\Sigma=0.823$	$\Sigma=1.189$

- ผลการทดลองหาค่าสมบัติของขี้เลื่อยอย่างละเอียด (Ultimate analysis) โดยใช้ขี้เลื่อยทั้งหมด 2 ตัวอย่าง ส่งไปทำการวิเคราะห์ที่กรมวิทยาศาสตร์บริการ ได้ผลดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของขี้เลื่อย

องค์ประกอบทางเคมี (% โดยน้ำหนัก)	ชนิดของตัวอย่าง	
	Sample 1	Sample 2
Carbon	38.2	37.9
Hydrogen	7.4	7.4
Oxygen	53.7	54.2
Nitrogen	0.11	0.10
Sulphur	0.01	0.01
Ash	0.55	0.38
Moisture	26.2	26.9
Calorific value, kJ/kg	15309	15290

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพียง 15309 ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไป 15290 ละเอียดนโยบายด้านราคา
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ตัวอย่างของซีลี้อยู่ที่ใช้ทำการทดลอง

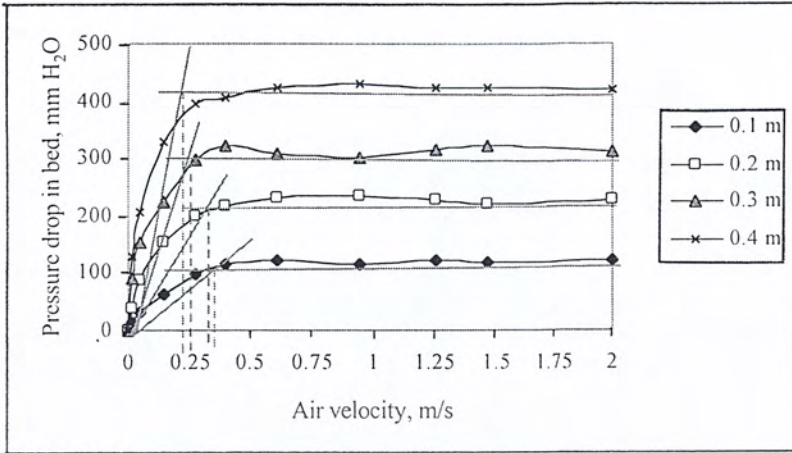
4.3 การทดลองหาค่าความดันลดของเบด

ในการทดลองได้นำแบบกรวยจำลองมาทำการทดลองหาค่าความดันที่แตกต่างขณะผ่านเบดที่มีความเร็วลมต่างๆ กัน เพื่อหาค่าความเร็วลมต่ำสุดของการเกิดการฟลูอิดไดซ์ของเบด โดยในการทดลองได้ใช้กรวยที่มีขนาดความเอียงต่างๆ กันสามขนาด คือ ขนาดที่มีความเอียงของกรวย 15 องศา 20 องศา และ 30 องศา และได้ทดลองใช้กับทรายที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 0.5 mm โดยแต่ละกรวยนั้นได้ทำการทดลองใช้กับทรายที่มีความสูงแตกต่างกัน คือ 10,20,30,40 cm วัดจากพื้นของกรวย

4.3.1 ผลการทดลอง

ขั้นตอนในการทดลองนั้นได้ทดลองหาค่าความดันลดโดยหาค่าความสูงที่แตกต่างของน้ำในสายยางซึ่งแต่ละปลายของสายยางได้วางไว้ที่ตำแหน่งเหนือเบดกับได้เบดดังรูปที่ 3.9 ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.3, 4.4 และ 4.5

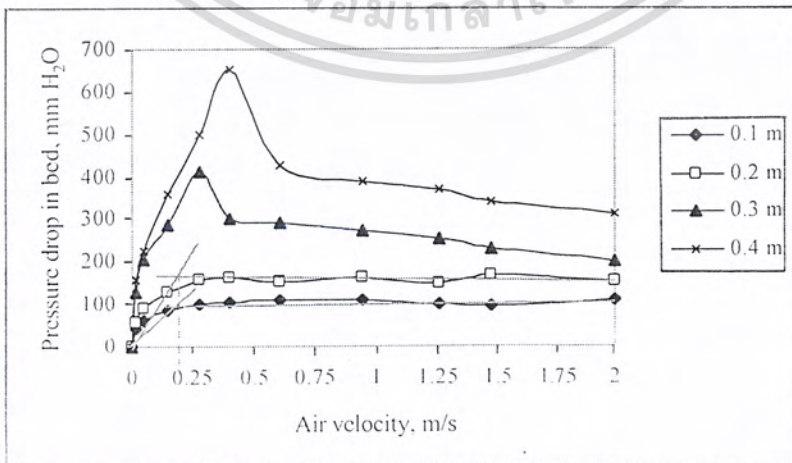
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 ผลการทดลองหาค่าความดันลดผ่านเบดที่มุมเอียงของกรวย 15 องศา



รูปที่ 4.4 ผลการทดลองหาค่าความดันลดผ่านเบดที่มุมเอียงของกรวย 22 องศา



เอกสารนี้เป็นรูปที่ 4.5 ผลการทดลองหาค่าความดันลดผ่านเบดที่มุมเอียงของกรวย 30 องศา โยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองดังรูป 4.3–4.5 สามารถหาความเร็วต่ำสุดของการฟลูอิดไดซ์ได้โดยการลากเส้นของเบตนิ่งตัดกับเส้นของเบตขณะฟลูอิดไดซ์ ที่จุดตัดนั้นลากเส้นตั้งลงมาตัดกับแกนความเร็ว จะได้ค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดซ์ ซึ่งจากการทดลองใช้มุมกรวยทั้งสามขนาดกับความสูงของทรายทั้งสิ้นค่าสามารถสรุปค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดซ์ได้ดังตารางที่ 4.5



รูปที่ 4.6 การทดลองหาค่าความดันลดผ่านเบต

ตารางที่ 4.5 ความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดซ์ที่ได้จากการทดลอง

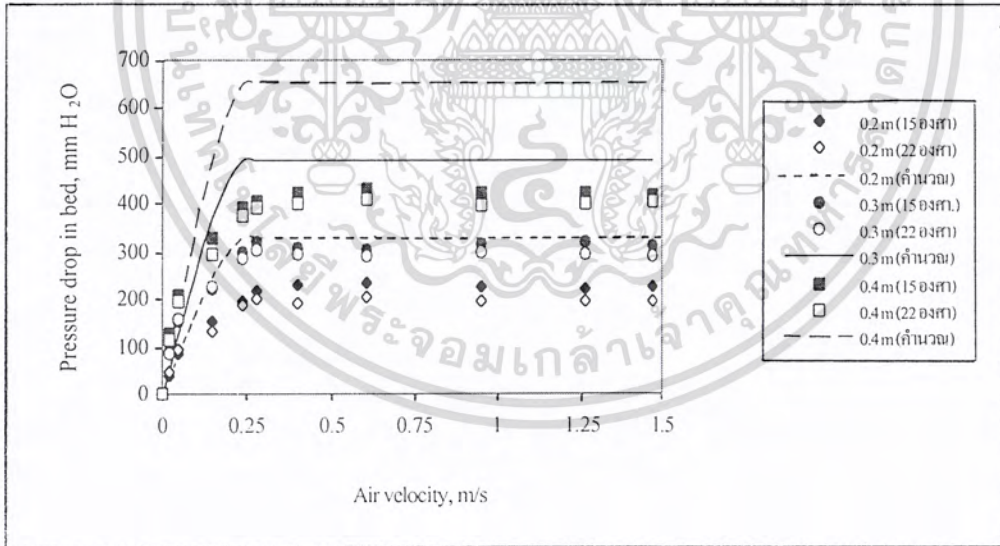
ความสูงทราย \ มุมกรวย	15°	22°	30°
10	35	25	20
20	33	23	20
30	25	23	-
40	23	20	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 วิจัยรณัผลการทดลอง

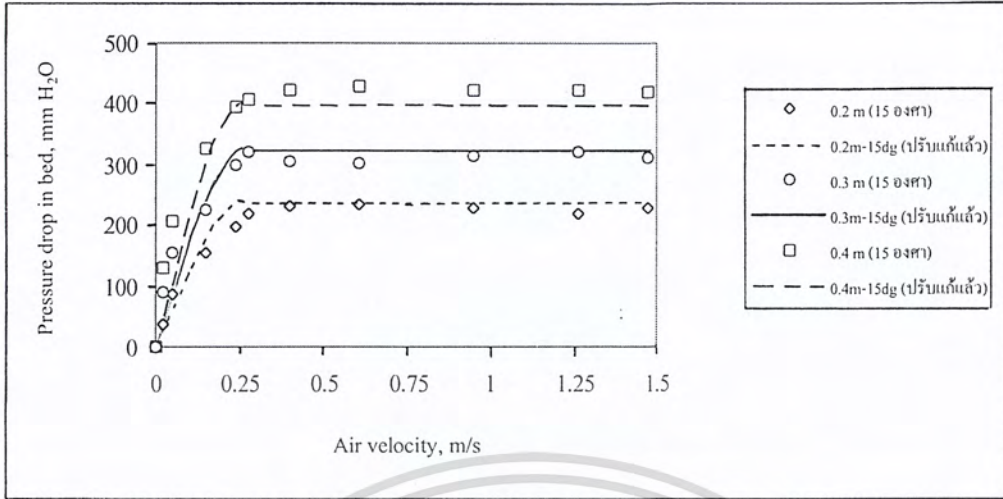
จากค่าที่ได้จากการทดลองพบว่าที่มุมกรวย 30 องศา ที่ความสูงเบด 30 และ 40 เซนติเมตร ไม่สามารถหาค่าความเร็วต่ำสุดได้ เนื่องจากเกิดปรากฏการณ์ Spouted bed ขึ้น และเมื่อนำค่าที่คำนวณได้จากสมการของ Ergun ในภาคผนวก ข.2 มาเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองพบว่าค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าสูงกว่า คูได้จากรูปที่ 4.7

สาเหตุที่ค่าจากการคำนวณมีค่ามากกว่าค่าจากการทดลอง เพราะสมการที่ใช้คำนวณหาค่าความเร็วต่ำสุดของ Ergun นั้นเป็นการคำนวณจากส่วนของเตาที่เป็นทรงกระบอก (Cylinder) แต่ในการทดลองได้ใช้ส่วนของเตาเป็นทรงกรวย (Conical shaped) เนื่องจากในสมการของ Ergun ค่าความดันลดขณะผ่านเบดนั้น ขึ้นอยู่กับปริมาตรของเบดที่ใส่เข้าไป ซึ่งในทรงกระบอกจะมีค่าปริมาตรต่างจากทรงกรวยที่ความสูงเท่ากัน จึงได้ทำการปรับแก้ค่าที่ได้จากสมการการคำนวณที่เป็นทรงกระบอกมาเป็นการคำนวณที่เป็นทรงกรวยโดยใช้ตัวประกอบแก้ไข (Correction factor) มาคูณและได้ผลที่ปรับค่าแล้วมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองดังรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9

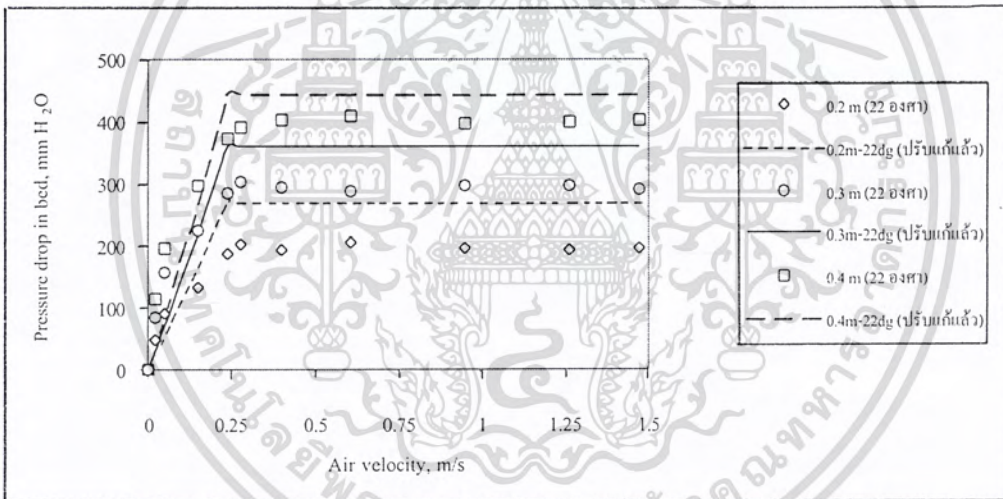


รูปที่ 4.7 ผลการทดลองความดันลด(Pressure drop)เปรียบเทียบกับค่าจากการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบค่าที่ปรับแก้แล้วที่มุมกรวย 15 องศา กับค่าที่ได้จากการทดลอง

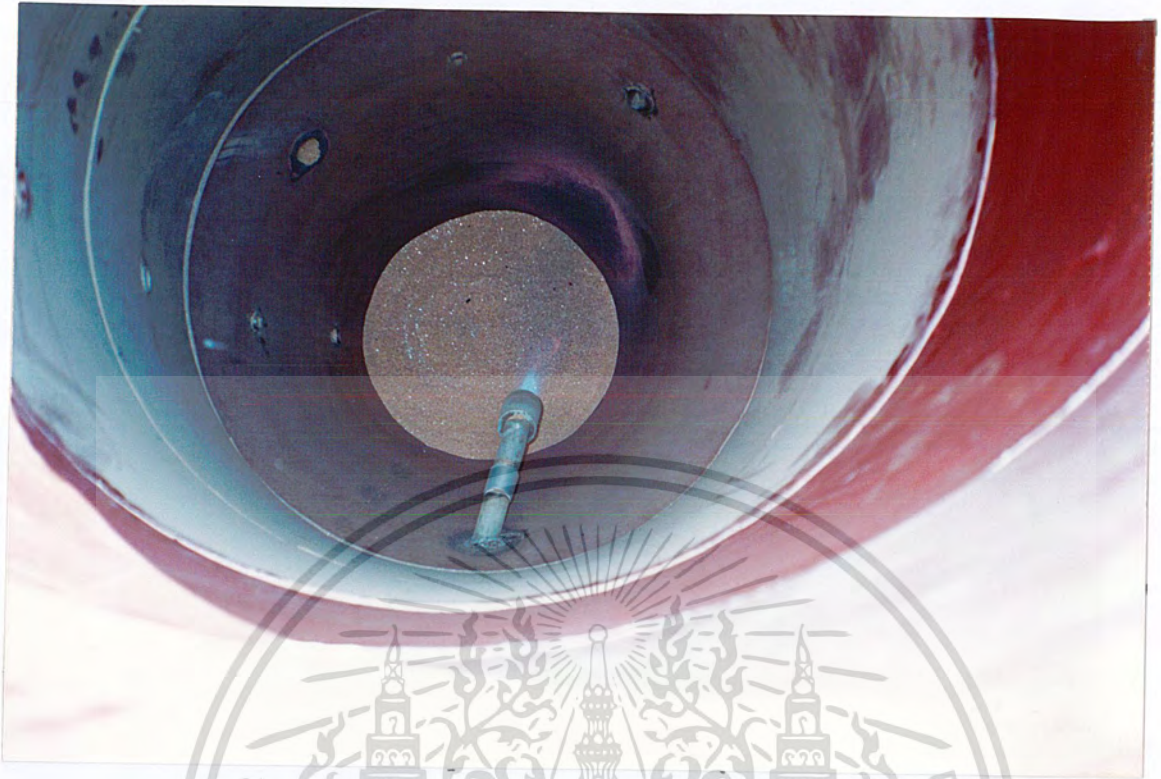


รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบค่าที่ปรับแก้แล้วที่มุมกรวย 22 องศา กับค่าที่ได้จากการทดลอง

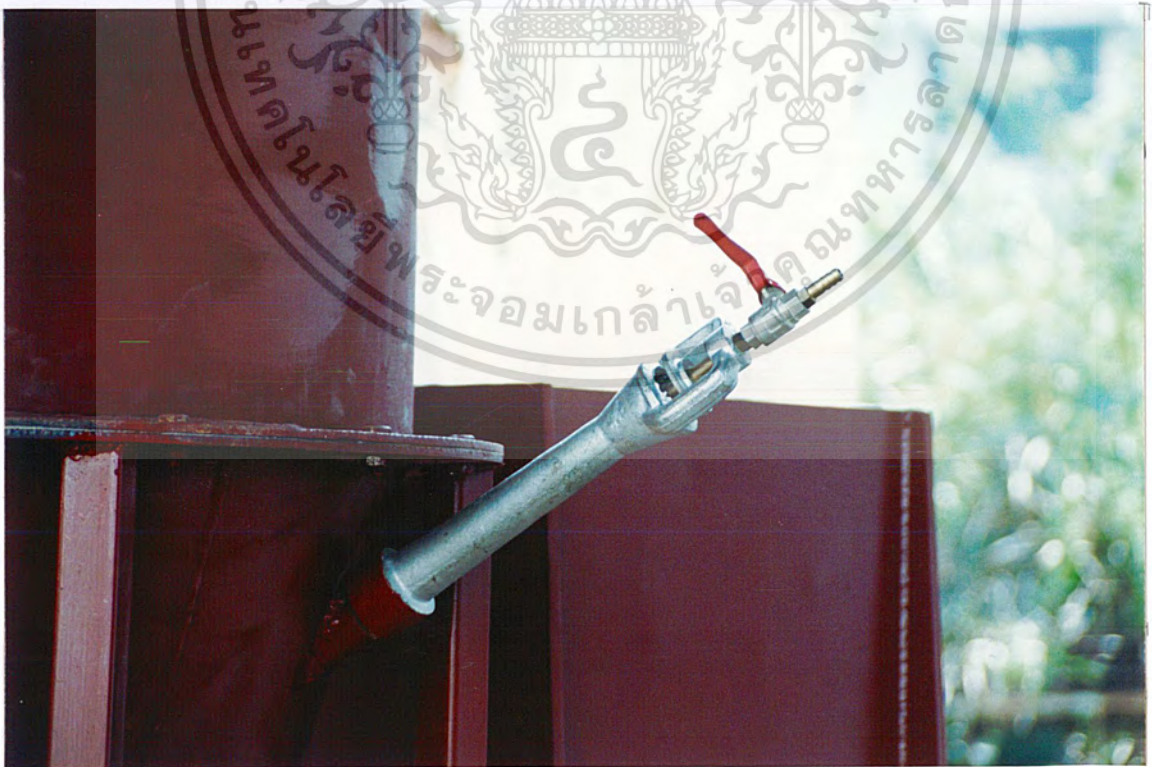
4.4 ผลการทดลองการอุ้มนวด

4.4.1 หลักการ

โดยการใช้หัวเผาจำนวน 1 หัวเผาอยู่ที่เหนือเบดโดยเอียงทำมุม 45 องศาที่ระนาบ (รูปที่ 4.11) ระยะห่างจากหัวเผาสูงจากเบดประมาณ 15 เซนติเมตรและให้หัวเผานั้นมีที่ปรับอากาศเพื่อผสมกับแก๊ส LPG ในการเผาไหม้ และที่ตัวของถัง LPG ควรจะมีวาล์วปรับความดันเพื่อปรับความดันที่เหมาะสมของแก๊สในการเผาไหม้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 ลักษณะหัวเผาด้านในเตา



รูปที่ 4.11 ลักษณะหัวเผาด้านนอกเตา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2 การทดลองการจุด

เริ่มแรกต้องเปิดวาล์วที่ถังแก๊ส LPG เพื่อให้แก๊สนั้นไหลมาตามสายที่ต่ออยู่กับหัวเผา แล้วปรับความดันที่วาล์วให้พอดีกับการที่จะจุดไฟ ต้องไม่มากไปเพราะจะทำให้แก๊สผสมกับอากาศไม่พอ ทำให้ไม่ติดไฟ จากนั้นก็ทำการจุดโดยการให้เปลวไฟหรือสะเก็ดไฟโดยให้เปลวไฟนั้นเข้าไปทางช่องอากาศที่มีไว้สำหรับปรับอากาศเข้าตรงใกล้วาล์วเปิดปิดตรงหัวเผา เมื่อไฟติดแล้วก็ทำการปรับเปลวไฟที่เข้าไปในเตาให้พอเหมาะ ในการทดลองนั้นได้ทำการปรับเปลวไฟโดยปรับที่วาล์วปรับความดันและที่ปรับอากาศเข้าตรงหัวเผา โดยดูเปลวไฟได้จาก Sight glass ที่ทำไว้อีกด้านหนึ่งของเตาปรับจนเปลวไฟเป็นสีน้ำเงินตรงกลางและมีสีแดงอยู่รอบๆ (Neutral flame) เพราะเป็นเปลวไฟที่เกิดจากการที่แก๊ส LPG ผสมกับอากาศได้สมดุลกันจึงให้ความร้อนได้สูงที่สุดเมื่อได้เปลวไฟที่ต้องการแล้วจึงทำการเปิด Blower เพื่อให้ทรายที่เป็นเบดเกิดการเคลื่อนที่(รูปที่ 4.12) เพื่อให้ความร้อนแผ่กระจายไปยังเบดได้ทั่วถึงและรวดเร็วแต่ยังไม่ควรให้ทรายเกิดการฟลูอิดไดซ์เบดเต็มตัวเพราะการเคลื่อนแบบปั่นป่วนนั้นทำให้ทรายไปสัมผัสกับหน้าตัดของหัวเผาจึงไม่มีอากาศเข้ามาทางหัวเผา ซึ่งจะทำให้เปลวไฟดับได้ เมื่อทำการทดลองจนอุณหภูมิภายในเตาเพิ่มขึ้นถึงอุณหภูมิที่ทำให้ทรายที่อมความร้อนอยู่นั้นเกิดการจุดติดเองได้เมื่อป้อนเชื้อเพลิงที่เป็นขี้เลื่อยเข้าไปซึ่งมีค่าสูงถึงประมาณ 350 องศา ก็ทำการดับไฟที่ใช้ในการอุ่นเบดแล้วเปิดอากาศที่ใช้ในการทำให้ทรายเคลื่อนที่นั้นเพิ่มขึ้นจนทรายเกิดการฟลูอิดไดซ์เต็มตัว แล้วจึงทำการป้อนเชื้อเพลิงต่อไปได้

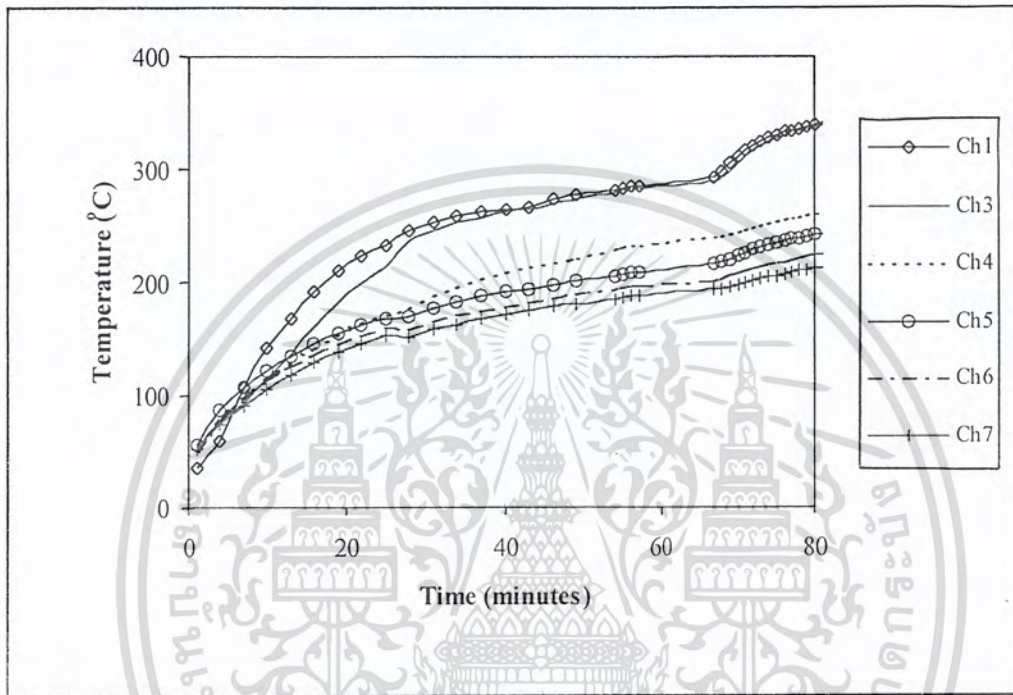


รูปที่ 4.12 ลักษณะเปลวไฟขณะอุ่นเบด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.3 ผลการทดลอง

ในการทดลองวัดอุณหภูมิ โดยการวัดจาก Thermocouple ที่ใส่เข้าไปตามตำแหน่งต่างๆ ของเตาทั้งหมด 8 ตัว ดังรูปที่ 3.8 แล้วอ่านค่าออกมาทางเครื่องบันทึกค่าอุณหภูมิ (Data logger) ซึ่งอ่านค่าออกมาทุกๆ 5 วินาที นำผลที่ได้นำมาเขียนเป็นกราฟ ดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในการอุ่นเบด

ก่อนทำการจุดเตาอุณหภูมิของ Thermocouple ทุกตัวจะมีอุณหภูมิปกติ คือเท่ากับอุณหภูมิของอากาศขณะนั้น พอเริ่มจุดเตาจะทำให้อุณหภูมิที่ตำแหน่งของ Thermocouple ตัวที่หนึ่ง สอง และสาม จะเริ่มขยับก่อนเพราะว่าตำแหน่งทั้งสามนั้นอยู่ในตำแหน่งที่เบดเกิดการฟลูอิดไดซ์ไหลผ่าน พอเวลาผ่านไปประยะหนึ่ง Thermocouple อุณหภูมิที่ตำแหน่งอื่นจะเริ่มเพิ่มขึ้น แต่อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะเพิ่มขึ้นช้ากว่าในสามตำแหน่งแรกตามระยะห่างจากเบด ตำแหน่งที่อยู่ห่างจากบริเวณไหลวนของเบดมากกว่า อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นช้ากว่าตำแหน่งที่อยู่ใกล้บริเวณไหลวนของเบดขณะฟลูอิดไดซ์ จากรูปจะสังเกตเห็นได้ว่า เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 30 นาที ตำแหน่งที่หนึ่ง สอง และสามจะเริ่มใกล้เคียงกัน เพราะว่าขณะที่เบดเกิดการฟลูอิดไดซ์จะมีการถ่ายเทพลังงานระหว่างอนุภาคด้วยกันทำให้อุณหภูมิทุกจุดในบริเวณที่เกิดการฟลูอิดไดซ์มีค่าใกล้เคียงกัน อุณหภูมิที่ตำแหน่งอื่นๆ ก็จะเพิ่มขึ้นตาม แต่จะไม่สูงเท่ากับสามตำแหน่งแรก เพราะว่าไม่ได้อยู่ในบริเวณที่เกิดการฟลูอิดไดซ์ แต่อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นนี้เกิดจากอากาศร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ของแก๊ส LPG กับอากาศแล้วลอยขึ้นมาจากห้องเผาไหม้ จากการทดลองพบว่าระบบการอุ่นเบดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถอุ่นเบคได้อุณหภูมิเบคถึง 350 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาดังสิ้น 80 นาที เฉลี่ยนาทีละประมาณ 4 องศา

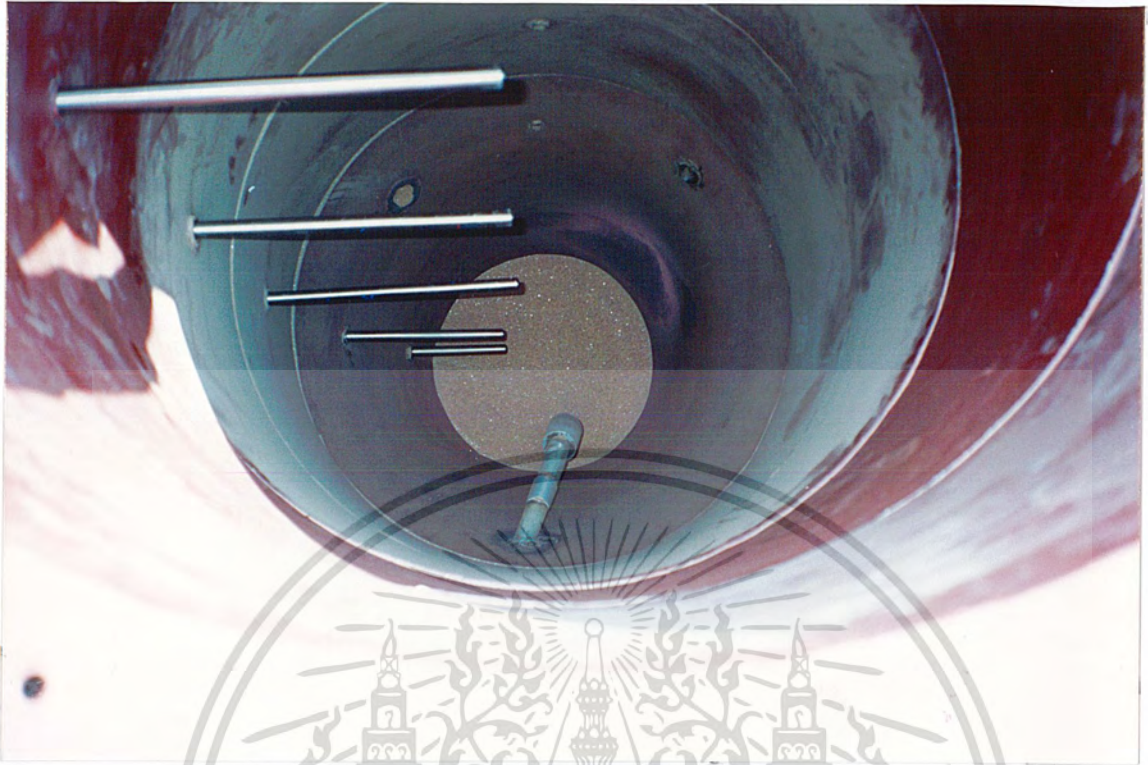
4.4.4 วิจารณ์ผลการทดลอง

ในการทดลองนั้นอุณหภูมิภายในตัวเตาวัดไปนั้นมีอัตราการเพิ่มขึ้นที่ช้ามาก ทำเสียค่าใช้จ่ายและใช้เวลาในการอุ่นมากกว่าปกติ มีอยู่หลายสาเหตุที่ทำให้เกิดเหตุการณ์แบบนี้ แต่มีอยู่สาเหตุหนึ่งที่มีผลกระทบมากที่สุดคือ การเกิดความร้อนสูญเสียที่ผนังด้านนอกเตา ข้อเสนอแนะในการทำการทดลองอุ่นเบคครั้งต่อไปเพื่อให้ได้อุณหภูมิภายในเตาสูงและเพิ่มขึ้นเร็วกว่านี้ คือ ควรทำการหุ้มฉนวนรอบๆ ตัวเตา เพื่อลดความร้อนสูญเสียที่ผนังเตา และควรเพิ่มปริมาณทรายที่ใช้เป็นเบคให้สูงขึ้น เพื่อให้เบคสามารถสัมผัสกับเปลวไฟจากหัว Burner ได้มากขึ้น



รูปที่ 4.14 ส่วนของ Thermocouple ที่อยู่ด้านนอกเตา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 ส่วนของThermocouple ที่อยู่ด้านในเตา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษา

5.1 สรุปผลการทดลอง

ข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญในการออกแบบเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด มี 2 ส่วน คือ สมบัติทางกายภาพของวัสดุที่ใช้เป็นเบด ได้แก่ ความพรุน ความกลม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย และความหนาแน่น นอกจากนี้ยังมีสมบัติทางกายภาพของอากาศที่ใช้ในการฟลูอิดไดซ์ ได้แก่ อุณหภูมิ ความหนืด ความหนาแน่น ในการหาขนาดเตาเผา ค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดการฟลูอิดไดซ์เป็นข้อมูลเบื้องต้นที่จำเป็นต้องทราบ ซึ่งจากการทดลองพบว่าค่า U_{mf} นั้น ไม่ขึ้นกับความสูงของเบดและมุมเอียงของกรวย แต่ขึ้นอยู่กับสมบัติทางกายภาพของทรายที่ใช้เป็นเบด ค่าที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณ รายละเอียดการคำนวณดูได้จากภาคผนวก ข. 2

ส่วนการออกแบบส่วนล่างของเตาให้เป็นรูปกรวย (Conical shaped) จะเกิดผลดี คือ ช่วยให้ความดันตกคร่อมผ่านเบดนั้นมีค่าลดลง ซึ่งจะช่วยให้สามารถลดขนาดของพัดลมเป่าอากาศสำหรับเผาไหม้ได้ นอกจากนี้ปริมาณทรายที่ลดลงดังกล่าว จะช่วยลดเวลาในการอุ่นเบดลงได้ด้วย จากการศึกษาแบบจำลองของทรงกรวยที่มุมต่างๆ พบว่ามุมกรวยที่มีค่ามากหรือที่ความสูงของเบดมากขึ้น ดังเช่นในกรณีของมุม 30 องศาที่ความสูงของเบด 30 และ 40 เซนติเมตร จะเกิดปรากฏการณ์ Spouted bed ดังนั้นในการออกแบบตัวเตาในขั้นตอนต่อไปของโครงการ ค่ามุมเอียงของกรวยที่มุม 30 องศาจึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาสร้าง ส่วนมุม 15 องศา และ 22 องศา นั้น ปรากฏว่าการฟลูอิดไดซ์เข้ันไม่แตกต่างกัน และด้วยเหตุผลทางสัดส่วนที่เหมาะสมในการก่อสร้างเตา จึงเลือกมุมกรวยที่ 18 องศา มาใช้ในการออกแบบ เนื่องจากทำให้สัดส่วนของความสูงกรวยต่อความสูงทรงกระบอกมีค่าเป็น 1 ต่อ 2

5.2 ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

1. จากการทดลองระบบอุ่นเบดในขณะที่ยังไม่ได้มีการหุ้มฉนวนตัวเตา พบว่าต้องใช้เวลาในการอุ่นเบดนาน และอุณหภูมิที่ได้ก็ยังมีค่าสูงไม่เพียงพอต่อการเผาไหม้จริง เนื่องจากมีการสูญเสียความร้อนที่ผนังเตามาก จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องหุ้มฉนวนตัวเตาเพื่อลดความร้อนสูญเสียดังกล่าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ในการทดลองอุโมงค์ได้ใช้ทรายที่มีความสูง 20 เซนติเมตร ทำให้อุณหภูมิตั้งขึ้นช้ามาก คาดว่าถ้าเพิ่มความสูงเบดขึ้นอีก จะทำให้เปลวไฟสัมผัสกับเบดมากขึ้น อุณหภูมิเบดน่าจะเพิ่มขึ้นได้เร็วกว่านี้
3. ในการอุโมงค์นั้นควรปรับเปลวไฟที่หัวเผาให้เป็นเปลวไฟสีฟ้าหรือเปลวไฟสีน้ำเงิน โดยไม่ควรเปิดวาล์วให้อากาศ (Primary air) ไหลเข้าเดามากจนเกินไป
4. ในการอุโมงค์ควรอุ้มให้เบดมีอุณหภูมิมากกว่า 500 องศาเซลเซียสขึ้นไป ก่อนป้อนขี้เถ้าเข้าไปเผาไหม้ในเตา ทั้งนี้เพื่อให้ขี้เถ้าสามารถเผาไหม้ได้อย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะในกรณีที่มีขี้เถ้ามีความชื้นสูง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก

การคำนวณสมบัติทางกายภาพต่างๆ ของทรายที่ใช้เป็นเบดและซีล้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

การคำนวณสมบัติทางกายภาพต่างๆ ของทรายที่ใช้เป็นเบด และซีล้อย

ในการหาสมบัติต่างๆ ของทรายที่ใช้เป็นเบด ได้แก่ การหาสัดส่วนช่องว่าง(Void fraction) ความกลม(Sphericity) ความหนาแน่น(Density) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของทราย ส่วนการหาสมบัติของซีล้อย ได้แก่ ความหนาแน่น

ก.1 การคำนวณหาสมบัติทางกายภาพของทรายที่ใช้เป็นเบด

ก.1.1 การหาสัดส่วนช่องว่าง, \mathcal{E}_m และความกลม, ϕ_s ของทราย

ขนาดของทรายที่ใช้ อยู่ในช่วง mesh 10-100

$$\text{ปริมาตรของทราย + ช่องว่าง} = 25.0 \text{ ml}$$

$$\text{ปริมาตรของ Hexane} = 20.0 \text{ ml}$$

$$\text{ปริมาตรหลังผสม} = 35.0 \text{ ml}$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} \text{สัดส่วนช่องว่างของเบด } \mathcal{E}_m &= \frac{v_v - v_h - v_n}{v_v} \\ &= \frac{25 - 20 - 35}{25} \\ \mathcal{E}_m &= 0.4 \end{aligned}$$

จาก Kunii และ Levenspiel [1] รูปที่ 2.6 เส้น normal packing เมื่อ $\mathcal{E}_m = 0.4$ ได้ความกลม $\phi_s = 0.9$

ก.1.2 การหาความหนาแน่นของทราย, ρ_s

ขนาดของทรายที่ใช้ อยู่ในช่วง mesh 10-100

$$\text{น้ำหนักของทราย} = 57.527 \text{ g}$$

$$\text{ผลต่างปริมาตรน้ำเมื่อเริ่มต้นและสุดท้าย} = 22.85 \text{ ml}$$

ดังนั้น

$$\text{ความหนาแน่นของทราย} = \frac{57.52}{22.85} = 2.5175 \text{ g/ml}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.1.3 การหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของทราย, d_p
ขนาดของทรายที่ใช้ อยู่ในช่วง mesh 10-100

ตารางที่ ก.1 ผลการทดลองหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของทราย

เบอร์ตะแกรง	รูตะแกรง(mm)	มวลวัสดุ (gm)	x_i	d_{pi}	$\frac{x_i}{d_{pi}}$
16	1.18	-	-	-	-
20	0.85	24.87	0.0687	1.015	0.0677
30	0.6	64.65	0.1785	0.725	0.2462
40	0.425	91.54	0.2527	0.5125	0.4931
45	0.355	19.81	0.0547	0.39	0.1403
50	0.30	59.65	0.1647	0.3275	0.5029
80	0.18	63.28	0.1747	0.24	0.7279
100	0.15	20.52	0.0566	0.165	0.3430
Pan	-	17.91	0.0494	0.075	0.6587
Σ		362.23	1.0000	-	3.1798

ดังนั้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของทราย $d_p = \frac{1}{\sum_i^n \left(\frac{x_i}{d_{pi}} \right)} = \frac{1}{3.1798} = 0.314$ มิลลิเมตร

ก.2 การคำนวณหาสมบัติทางกายภาพของซีเมนต์

น้ำหนักของซีเมนต์ = 20.767 g

ผลต่างปริมาตร n-hexane เมื่อเริ่มคั่นและสุดท้าย = 19.00 ml

ดังนั้น ความหนาแน่นของซีเมนต์ = $\frac{20.767}{19.00} = 1.1028$ g/ml

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

การคำนวณออกแบบเตาเผาชีวมวลแบบฟลูอิดไดซ์เบด

ในการคำนวณออกแบบเตาเผาชีวมวลแบบฟลูอิดไดซ์เบด มีลำดับการคำนวณดังนี้

1. การคำนวณอัตราส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิง (Air/Fuel ratio)
2. การคำนวณความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดซ์
3. การคำนวณความเร็วสุดท้ายของฟลูอิดไดซ์
4. การคำนวณอัตราการไหลของอากาศที่ทางเข้าและทางออกของเตาเผา
5. การคำนวณพื้นที่หน้าตัดที่เหมาะสมของเตาเผา
6. การคำนวณความสูงของเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบด
7. การคำนวณระบบป้อนอากาศ
8. การคำนวณระบบป้อนเชื้อเพลิง
9. การคำนวณระบบเครื่องแยกฝุ่น

ข. 1. การคำนวณอัตราส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิงที่เหมาะสมของเตาเผา

การคำนวณหาอัตราส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิงจากปฏิกิริยาเคมี โดยเชื้อเพลิงที่ใช้ในการคำนวณเป็นขี้เลื่อย ซึ่งมีสมบัติดังนี้

คาร์บอน(C) = 45.00 %

ไฮโดรเจน(H) = 6.00 %

ไนโตรเจน(N) = 0.10 %

ซัลเฟอร์(S) = 0.07 %

ออกซิเจน(O) = 45.00 %

(หน่วย เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

จากสมการการคำนวณอัตราส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิงตามทฤษฎี, AF_t โดยไม่มีปริมาณอากาศส่วนเกิน

$$\begin{aligned} AF_t &= 11.466 \cdot C + 34.224 \cdot H + 4.302 \cdot S - 4.310 \cdot O \\ \text{แทนค่า} \quad &= 11.466(0.45) + 34.224(0.06) + 4.302(0.0007) - 4.310(0.45) \end{aligned}$$

$$AF_t = 5.2766 \frac{\text{kg air}}{\text{kg fuel}}$$

เอกสารนี้เป็นใช้ จากที่ส่วนเกิน, E 100% ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงจริง, AFa

$$AFa = (1 + E) AFt$$

แทนค่า

$$= (1 + 1) \cdot 5.2766$$

$$AFa = 10.5533 \text{ kg air / kg fuel}$$

ข.2 การคำนวณความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดซ์, U_{mf}

ขนาดของทรายที่ใช้ ที่อยู่ในช่วง mesh 10-100

สัดส่วนช่องว่าง $\mathcal{E}_{mf} = 0.43$

ค่าความกลสม $\phi_s = 0.9$

ความหนาแน่น $\rho_s = 2.52 \text{ g/cm}^3$

ขนาดเฉลี่ยของทราย $d_p = 0.06 \text{ cm}$

ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก $g = 980.665 \text{ g/cm} \cdot s$

อากาศที่ทางเข้าอุณหภูมิ 35°C มีสมบัติดังนี้

$$\rho_{g(a, 35^\circ\text{C})} = 1.2 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$$

$$\mu_{(a, 35^\circ\text{C})} = 1.884 \times 10^{-4} \text{ g/cm} \cdot s$$

อากาศที่ทางเข้าอุณหภูมิ 950°C มีสมบัติดังนี้

$$\rho_{g(a, 950^\circ\text{C})} = 0.29 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$$

$$\mu_{(a, 950^\circ\text{C})} = 4.746 \times 10^{-4} \text{ g/cm} \cdot s$$

จากสมการ

$$\frac{1.75}{\phi_s \mathcal{E}_{mf}^3} \cdot \left(\frac{d_p U_{mf} \rho_g}{\mu} \right)^2 + \frac{150(1 - \mathcal{E}_{mf})}{\phi_s^2 \mathcal{E}_{mf}^3} \cdot \left(\frac{d_p U_{mf} \rho_g}{\mu} \right) = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2}$$

ที่อุณหภูมิ 35°C คำนวณหา

$$U_{mf(a, 35^\circ\text{C})} = 31.590 \text{ cm/s}$$

ที่อุณหภูมิ 950°C คำนวณหา

$$U_{mf(a, 950^\circ\text{C})} = 15.463 \text{ cm/s}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.3 การคำนวณความเร็วสุดท้ายของฟลูอิดไดซ์, U_t

ขนาดของทรายที่ใช้อยู่ในช่วง mesh 10-100

ค่าความกลม $\phi_s = 0.9$

ขนาดเฉลี่ยของทราย $d_m = 0.01 \text{ cm}$

ความหนาแน่น $\rho_s = 2.52 \text{ g/cm}^3$

จาก

$$Re = \frac{\rho U d}{\mu}$$

$$U_t = \frac{g(\rho_s - \rho_g)^2 d_m^2}{18\mu}$$

สำหรับ $Re < 0.4$

$$U_t = d_m \left| \frac{4(\rho_s - \rho_g)^2 g^2}{255 \rho_s \mu} \right|^{1/3}$$

สำหรับ $0.4 < Re < 500$

$$U_t = \left| \frac{3.11 g_c (\rho_s - \rho_g) \cdot d_m}{\rho_g} \right|^{1/2}$$

สำหรับ $500 < Re < 200,000$

จาก

$$Re = \frac{\rho U d}{\mu}$$

$$= \frac{1.2 \times 10^{-3} (31.590)(0.01)}{1.884 \times 10^{-4}}$$

$$Re = 2.012$$

$$U_t = d_m \left| \frac{4(\rho_s - \rho_g)^2 g_c^2}{255 \rho_s \mu} \right|^{1/3}$$

ดังนั้น

$$= 0.01 \left| \frac{4(2.52 - 1.2 \times 10^{-3})^2 \cdot 980.665^2}{225(2.52)(1.884 \times 10^{-4})} \right|^{1/3}$$

$$U_t = 78.2855 \text{ cm/s}$$

ข.4 การคำนวณอัตราการไหลของอากาศที่ทางเข้าและทางออกของเตาเผา

อัตราการไหลของอากาศที่ทางเข้า, Q_1 (อุณหภูมิ 35°C) ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราการป้อน, FFR = 100 kg/hr

อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง, AFa = 10.5533 kg Air/kg Fuel

จะได้ อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 100 kg ต้องการอากาศ = $100(10.5533) = 1055.33$ kg/hr

$$Q_1 = \frac{FFR \cdot AFa}{\rho_s}$$

$$= \frac{100(10.5533)}{10^3(1.2 \times 10^{-3})}$$

ดังนั้น อัตราการไหลของอากาศที่ทางเข้า $Q_1 = 879.4419 \text{ m}^3/\text{hr}$

อัตราการไหลของอากาศที่ทางออก, Q_2 (อุณหภูมิ 950°C)

จาก กฎของก๊าซ ที่ปริมาตรคงที่

$$\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2}$$

$$Q_2 = Q_1 \cdot \frac{T_2}{T_1}$$

$$= 879.4419 \cdot \frac{273 + 950}{273 + 35}$$

ดังนั้น อัตราการไหลของอากาศที่ทางออก $Q_2 = 3492.07 \text{ m}^3/\text{hr}$

ข.5 การคำนวณพื้นที่หน้าตัดที่เหมาะสมของเตาเผา

การคำนวณพื้นที่หน้าตัด ที่เหมาะสมของเตาเผา จาก $Q = A \cdot U_f$ หรือ $A = \frac{Q}{U_f}$

การคำนวณ : ให้ปริมาณอากาศที่เหมาะสมมีค่า, $U_f = 4.5 \cdot U_{mf}$

ที่อุณหภูมิ 35°C

$$U_f = 4.5 \cdot U_{mf}$$

$$= \frac{4.5(31.5903)}{100}$$

$$U_f = 1.4216 \text{ m/s}$$

แทนค่า

$$A = \frac{879.4419}{1.4216(3600)}$$

$$A = 0.1718 \text{ m}^2$$

จาก

$$A = \frac{\pi}{4} D^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$D = 0.4617 \text{ m}$$

ที่อุณหภูมิ 950°C

$$U_f = 4.5 \cdot U_{mf}$$

$$U_f = \frac{4.5(15.4635)}{100}$$

$$U_f = 0.6958 \text{ m/s}$$

แทนค่า

$$A = \frac{3492.07}{0.6958(3600)}$$

$$A = 1.3940 \text{ m}^2$$

จาก

$$A = \frac{\pi}{4} D^2$$

$$D = 1.3323 \text{ m}$$

หาพื้นที่หน้าตัดที่เหมาะสม

$$D_a = \left(\frac{D_1 + D_2}{2} \right)$$

$$D_a = \left(\frac{0.4617 + 1.3323}{2} \right)$$

ดังนั้น พื้นที่หน้าตัดของเตาเผาที่เหมาะสม $D_a = 0.9000 \text{ m}$

ข.6 การคำนวณความสูงของเตาเผาฟลูอิดไดซ์

ข.6.1 การคำนวณความสูงของเบดขณะฟลูอิดไดซ์ และขณะฟลูอิดไดซ์ด้วยความเร็วต่ำสุด

กำหนดให้

ความสูงของเบดนิ่ง, $L = 0.40 \text{ m}$

สัดส่วนช่องว่างของเบดนิ่ง, $\mathcal{E}_m = 0.40$

$$\mathcal{E}_{mf} = 0.43$$

จาก

$$\frac{L_{mf}}{L} = \frac{1 - \mathcal{E}_m}{1 - \mathcal{E}_{mf}}$$

$$L_{mf} = L \cdot \frac{(1 - \mathcal{E}_m)}{(1 - \mathcal{E}_{mf})}$$

$$= 0.4 \cdot \frac{(1 - 0.4)}{(1 - 0.43)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ $L_{mf} = 0.4208 \text{ m}$ เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาความสัมพันธ์ระหว่าง L_{mf} กับ L_f จาก Kunii และ Levenspile [1]

หน่วยอังกฤษ :

$$\frac{L_f}{L_{mf}} = \frac{10.978(U_f - U_{mf})^{0.738} \cdot d_p^{1.006} \cdot \rho_s^{0.376}}{U_{mf}^{0.137} \cdot \rho_g^{0.126}} + 1$$

คำนวณที่อุณหภูมิ 35°C $L_f = 0.6302$

คำนวณที่อุณหภูมิ 950°C $L_f = 0.5838$

ดังนั้นค่าเฉลี่ย $L_a = \left(\frac{0.6302 + 0.5838}{2} \right)$

$$L_a = 0.6070$$

ข.6.2 การคำนวณความสูงหลอดลอยตั้งผ่านของเตาเผา

$$TDH \geq 4.5 \cdot L_a$$

$$\geq 4.5(0.6070)$$

$$TDH \geq 2.7315$$

ค่าความสูงทั้งหมดของเตาเผา

$$TCH \geq TDH + L_a$$

$$\geq 2.7315 + 0.6070$$

$$TCH \geq 3.0005$$

ในการออกแบบสร้างจึงให้ความสูงทั้งหมดของเตา = 3.00 เมตร เพื่อความสะดวก

ข.7 การคำนวณระบบป้อนอากาศ

ข.7.1 การคำนวณความดันลดทั้งหมดของระบบ

ในการคำนวณระบบป้อนอากาศ สิ่งสำคัญที่จะต้องทราบคือ ความดันลดของระบบเตาเผาทั้งหมด ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$\frac{\Delta P_b}{L_{mf}} = (1 - \epsilon_{mf}) (\rho_s - \rho_g) \frac{g}{g_c}$$

เมื่อ $\rho_{g @ 35^\circ C} = 1.20 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^2$

$$\rho_s = 2.52 \text{ g/cm}^2$$

$$L_{mf} = 15.4635 \text{ cm/s}$$

$$\epsilon_{mf} = 0.43$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$g = 980.665 \frac{cm}{s^2}$$

$$g_c = 1$$

แทนค่าลงใน

$$\frac{\Delta P_b}{L_{mf}} = (1 - \varepsilon_{mf}) (\rho_s - \rho_g) \frac{g}{g_c}$$

ดังนั้น

$$\Delta P_b = 5928.24 \text{ Pa}$$

จากการออกแบบทั่วไปกำหนดให้

$$\Delta P_d = 12\% \Delta P_b$$

ดังนั้น

$$\Delta P_d = 0.12 \Delta P_b$$

$$\Delta P_d = 711.3885 \text{ Pa}$$

ความดันตกทั้งหมดของเตาเผา

$$\Delta P = \Delta P_b + \Delta P_d$$

$$\Delta P = 6639.63 \text{ Pa}$$

การออกแบบเพื่อ ค่าความปลอดภัย, SF 10%

$$\Delta P_a = (1 + SF) \Delta P$$

ดังนั้นความดันตกทั้งหมดของเตาเผา

$$\Delta P_a = 74.4779 \text{ cmH}_2\text{O}$$

ข.7.2 การคำนวณอัตราการไหลของอากาศ

จาก

$$AFR = \frac{FFR \cdot AFa}{\left(\frac{\rho_{(a, 35^\circ C)} + \rho_{(a, 950^\circ C)}}{2} \right) \cdot 10^3 \cdot 60}$$

ดังนั้น อัตราการไหลของอากาศ $AFR = 23.6092 \text{ CMM}$

ในการใช้งานจริง จึงเลือกใช้พัดลม

$$\Delta P_a = 76.20 \text{ cmH}_2\text{O}$$

$$AFR = 40.00 \text{ CMM}$$

ข.8 การคำนวณระบบป้อนเชื้อเพลิง

ในระบบป้อนเชื้อเพลิง เชื้อเพลิงที่ใช้เป็นขี้เถื้อย ระบบป้อนเชื้อเพลิงจึงเป็นระบบเกลียวลำเลียง โดยเกลียวลำเลียงจะป้อนขี้เถื้อยจากตัวเตาเผาข้างของส่วนรูปกรวยตัดด้านบนลงมาข้างเบคโดยประมาณซึ่งมีการคำนวณดังนี้
กำหนดให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น $FFR = 100 \frac{kg}{hr}$ ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกลียวลำเลียง $D = 0.004 \text{ m}$

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแกนเพลลา $d_s = 0.0254 \text{ m}$

ระยะพิทช์เกลียวลำเลียง $Pt = 0.04 \text{ m}$

ความหนาแน่นเชื้อเพลิง $\gamma = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

ปริมาตรที่ขนถ่ายซีลื้อยคำนวณจาก

$$V = \frac{\pi}{4} (D^2 - d_s^2) \cdot \frac{Pt}{4}$$

$$= \frac{\pi}{4} (0.04^2 - 0.0254^2) \cdot \frac{0.04}{4}$$

$$V = 2.999 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

ปริมาณความจุของเกลียวลำเลียงขนถ่ายคำนวณจาก

$$C = \frac{FFR}{60 \cdot \gamma}$$

$$= \frac{100}{60(1000)}$$

$$C = 1.667 \times 10^{-3} \text{ m}^3 / \text{min}$$

ความเร็วของเกลียวลำเลียงขนถ่ายคำนวณจาก

$$\text{rpm} = \frac{C}{V}$$

$$= \frac{1.667 \times 10^{-3}}{2.999 \times 10^{-5}}$$

$$\text{rpm} = 55.561 \text{ rpm}$$

ข.9 ระบบเครื่องแยกฝุ่น

ในการออกแบบเครื่องแยกฝุ่น ใช้ความเร็วลมที่ทางเข้า $V = 15 \text{ m/s}$

จากปริมาณอากาศที่อุณหภูมิ $950 \text{ }^\circ\text{C}$ ที่ทางเข้า เครื่องแยกฝุ่น

$$Q = 3492.1 \text{ m}^3 / \text{hr}$$

ดังนั้น พื้นที่หน้า $Q = A \cdot V$ และ $A = \frac{\pi}{4} D^2$

ดังนั้น

$$D^2 = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{Q}{V}$$

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot \left(\frac{Q}{3600}\right)}{\pi \cdot V}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot (3492.1 / 3600)}{\pi(15)}}$$

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องแยกฝุ่น $D = 0.28 \text{ m}$

โปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณดังกล่าวข้างต้นนั้น แสดงโดยใช้โปรแกรม MathCAD 2000 ดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FLUIDIZED BED COMBUSTOR DESIGN PROGRAM

Sub Program :-

1. Air/Fuel Ratio : AFa
2. Minimum Fluidization Velocity : U_{mf}
3. Terminal Fluidization Velocity : U_t
4. Air Flow Rate at Inlet (Q₁) and Outlet (Q₂) of Combustor
5. Cross Sectional Area of Combustor
6. Total Combustor Height : TCH
7. Blower
8. Fuel Supply System
9. Design of Cyclone

1. Air/Fuel Ratio , AFa , kg air/kg fuel

Insert chemical composition of fuel (% by weight), decimal)

C := 0.45 O := 0.45 H := 0.06 S := 0.0007 E := 1.00 (Excess air, decimal)

AF_t := 11.466·C + 34.224·H + 4.302·S - 4.31·O AF_t = 5.27665

AF_a := (1 + E)·AF_t AF_a = 10.5533

2. Minimum Fluidization Velocity , U_{mf} , cm/s

Insert properties of sand

ε := 0.4

φ := 4.9242ε⁴ - 16.288ε³ + 20.208ε² - 12.265ε + 3.4893

ρ := 2.52 (g·cm⁻³)

d := 0.06 (cm)

d_m := 0.01 (cm)

g := 980.665 (cm·s⁻²)

Insert properties of air

At combustor inlet :-

t₁ := 35 (celcius)

ρ_{g1} := 1.2·10⁻³ (g·cm⁻³)

μ₁ := 1.884·10⁻⁴ (g·cm⁻¹·s⁻¹)

At combustor outlet :-

t₂ := 950 (celcius)

ρ_{g2} := 0.29·10⁻³ (g·cm⁻³)

μ₂ := 4.746·10⁻⁴ (g·cm⁻¹·s⁻¹)

From Wen & YU (1966)

K := 24.5098

$$\varepsilon_{mf} := \sqrt[3]{\frac{1.75}{K \cdot \phi}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$i := 1..2$

$$U_{mf_i} := \frac{\left[\left[150 \cdot \frac{(1 - \epsilon_{mf})}{(\epsilon_{mf})^3 \cdot \phi} \right] \cdot \left(\frac{d \cdot \rho_{g_i}}{\mu_i} \right) \right] + \sqrt{\left[\left[150 \cdot \frac{(1 - \epsilon_{mf})}{(\epsilon_{mf})^3 \cdot \phi} \right] \cdot \left(\frac{d \cdot \rho_{g_i}}{\mu_i} \right) \right]^2 - 4 \cdot \frac{1.75}{(\epsilon_{mf})^3 \cdot \phi} \cdot \left(\frac{d \cdot \rho_{g_i}}{\mu_i} \right)^2 \cdot \frac{[d^3 \cdot \rho_{g_i} \cdot (\rho_{g_i} - \rho) \cdot g]}{(\mu_i)^2}}{2 \cdot \frac{1.75}{(\epsilon_{mf})^3 \cdot \phi} \cdot \left(\frac{d \cdot \rho_{g_i}}{\mu_i} \right)^2}$$

3. Terminal Fluidization Velocity, U_t , cm/s

$$Re := d_m \cdot U_{mf_1} \cdot \frac{\rho_{g_1}}{\mu_1}$$

$$U_t := d_m \cdot \frac{[4g^2 \cdot (\rho - \rho_{g_1})^2]^{\frac{1}{3}}}{(225 \cdot \rho_{g_1} \cdot \mu_1)^{\frac{1}{3}}} \quad \dots\dots\dots 0.4 < Re < 500$$

4. Air Flow Rate at Inlet (Q_1) and Outlet (Q_2) of Combustor, m^3/hr

Insert Fuel Feed Rate, FFR

$$FFR := 100 \quad (\text{kg} \cdot \text{hr}^{-1})$$

$$Q_1 := FFR \cdot \frac{AFa}{(\rho_{g_1} \cdot 10^3)}$$

$$Q_2 := Q_1 \cdot \frac{(t_2 + 273)}{(t_1 + 273)}$$

5. Cross Sectional Area of Combustor, m^2

$$U_{f_i} := 4.5 \cdot U_{mf_i} \quad (U_f = 3 - 5 \text{ time of } U_{mf} \text{ [Assume } U_f = 4.5 U_{mf}])$$

$$A_i := \frac{Q_i}{(U_{f_i}) \cdot 10^{-2} \cdot 3600}$$

$$D_i := \sqrt{(4) \cdot \frac{A_i}{\pi}}$$

$$D_a := \frac{(D_1 + D_2)}{2} \quad (\text{m})$$

6. Total Combustor Height, TCH, m

$$L := 0.40 \quad \dots\dots\dots (\text{Bed height, m})$$

$$L_{mf} := \frac{L \cdot (1 - \epsilon)}{(1 - \epsilon_{mf})}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Lf_1 := Lmf \cdot \left[(1) + \frac{10.978 \cdot [(Uf_1 \cdot 0.0328) - (Umf_1 \cdot 0.0328)]^{0.738} \cdot (d \cdot 0.0328)^{1.006} \cdot (\rho \cdot 62.428)^{0.376}}{(Umf_1 \cdot 0.0328)^{0.137} \cdot (\rho_{g1} \cdot 62.428)^{0.126}} \right] \dots (\text{English Unit})$$

$$Lfa := \frac{(Lf_1 + Lf_2)}{2}$$

$$TDH := 4 \cdot Lfa \quad \dots \dots \dots (TDH \geq Lfa \text{ [Assume } TDH = 4.5 \cdot Lfa])$$

$$TCH := TDH + Lfa \quad \dots \dots \dots (TCH \geq TDH + Lfa)$$

7. Blower (ΔPt in $cm H_2O$) (Calculate at inlet air temperature , t_1)

$$gc := 1$$

$$\Delta Pb := Lmf \cdot \left[(1 - \epsilon mf) \cdot (\rho \cdot 10^3 - \rho_{g1} \cdot 10^3) \right] \cdot \left(\frac{g \cdot 10^{-2}}{gc} \right) \dots \dots \dots (S.I. Unit)$$

$$\Delta Pd := 0.12 \cdot \Delta Pb \quad \dots \dots \dots (\Delta Pd \geq 10\% \text{ of } \Delta Pb \text{ [Assume } \Delta Pd = 15\% \Delta Pb])$$

$$\Delta P := \Delta Pb + \Delta Pd$$

$$SF := 0.10 \quad \dots \dots \dots (\text{Safety Factor for the other accessories , decimal})$$

$$\Delta Pt := \frac{[(1 + SF) \cdot \Delta P]}{98.0638} \quad (cm H_2O)$$

$$AFR := \frac{(FFR \cdot AFa)}{\left[\frac{(\rho_{g1} + \rho_{g2})}{2} \right] \cdot 10^3 \cdot 60} \quad (CMM)$$

8. Fuel Supply System

$$D := 0.04 \quad (\text{Diameter of screw, m})$$

$$ds := 0.0254 \quad (\text{Diameter of shaft, m})$$

$$Pt := 0.04 \quad (\text{Screw pitch, m})$$

$$\gamma := 1000 \quad (\text{Density of Fuel, kg/m}^3)$$

$$V := \pi \cdot (D^2 - ds^2) \cdot \frac{Pt}{4} \quad (\text{Feed volume})$$

$$C := \frac{FFR}{\gamma \cdot 60} \quad (\text{Capacity required of screw feeder, m}^3/\text{min})$$

$$rpm := \frac{C}{V} \quad (\text{Revolution of screw feeder, rpm})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. Design of Cyclone

$V := 15$ (Standard velocity of flue gas in cyclone 15-28 m/s)

$$D_c := \sqrt{\left(\frac{4}{\pi}\right) \cdot \frac{\left(\frac{Q_2}{3600}\right)}{V}} \quad (\text{m})$$

Results :-

$Da = 0.90001$ (Cross Sectional Area of Combustor , m^2)

$TCH = 3.03502$ (Total Combustor Height , m)

$\Delta Pt = 74.47793$ (Pressure of Blower , in $\text{cm H}_2\text{O}$)

$AFR = 23.60918$ (Air flow rate of Blower , CMM)

$\text{rpm} = 55.56077$ (Revolution of screw feeder , rpm)

$D_c = 0.28695$ (Diameter of cyclone , m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ผลการทดลองหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของทรายที่ใช้เป็นเบด

ตารางที่ ค.1 ผลการทดลองการหาขนาดวัสดุปริมาณมวล (ขนาดเล็ก ครั้งที่ 1)

เบอร์ตะแกรง	รูตะแกรง (mm)	มวลวัสดุ (gm)	X_i	\bar{D}_{pi}	$\frac{x_i}{\bar{D}_{pi}}$
16	1.18	-	-	-	-
20	0.85	24.87	0.0687	1.015	0.0677
30	0.6	64.65	0.1785	0.725	0.2462
40	0.425	91.54	0.2527	0.5125	0.4931
45	0.355	19.81	0.0547	0.39	0.1403
50	0.30	59.65	0.1647	0.3275	0.5029
80	0.18	63.28	0.1747	0.24	0.7279
100	0.15	20.52	0.0566	0.165	0.3430
Pan	-	17.91	0.0494	0.075	0.6587
$\Sigma =$		362.23	1.0000	-	3.1798

$$d_p = \frac{1}{\sum \left(\frac{x_i}{\bar{D}_{pi}} \right)} = 0.3145$$

ตารางที่ ค.2 ผลการทดลองการหาขนาดวัสดุปริมาณมวล (ขนาดเล็ก ครั้งที่ 2)

เบอร์ตะแกรง	รูตะแกรง (mm)	มวลวัสดุ (gm)	X_i	\bar{D}_{pi}	$\frac{x_i}{\bar{D}_{pi}}$
16	1.18	-	-	-	-
20	0.85	25.29	0.0704	1.015	0.0694
30	0.6	57.25	0.1594	0.725	0.2199
40	0.425	98.54	0.2744	0.5125	0.5354
45	0.355	27.91	0.0777	0.39	0.1992
50	0.30	50.62	0.1410	0.3275	0.4305
80	0.18	62.39	0.1738	0.24	0.7242
100	0.15	21.06	0.0587	0.165	0.3558
Pan	-	15.99	0.0445	0.075	0.5933
$\Sigma =$		359.05	1.0000	-	3.1277

$$d_p = \frac{1}{\sum \left(\frac{x_i}{\bar{D}_{pi}} \right)} = 0.3197$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.3 ผลการทดลองการหาขนาดวัสดุปริมาณมวล (ขนาดเล็ก ครั้งที่ 3)

เบอร์ตะแกรง	รูตะแกรง (mm)	มวลวัสดุ (gm)	X_i	\bar{D}_{pi}	$\frac{x_i}{\bar{D}_{pi}}$
16	1.18	-	-	-	-
20	0.85	22.08	0.0621	1.015	0.0612
30	0.6	54.08	0.1521	0.725	0.2098
40	0.425	89.41	0.2515	0.5125	0.4907
45	0.355	24.06	0.0677	0.39	0.1736
50	0.30	50.78	0.1428	0.3275	0.4360
80	0.18	73.32	0.2063	0.24	0.8596
100	0.15	23.31	0.0656	0.165	0.3976
Pan	-	18.45	0.0519	0.075	0.6920
$\Sigma =$		355.49	1.0000	-	3.3205

$$d_p = \frac{1}{\sum \left(\frac{x_i}{\bar{D}_{pi}} \right)} = 0.3011$$

ตารางที่ ค.4 ผลการทดลองการหาขนาดวัสดุปริมาณมวล (ขนาดเล็ก ครั้งที่ 4)

เบอร์ตะแกรง	รูตะแกรง (mm)	มวลวัสดุ (gm)	X_i	\bar{D}_{pi}	$\frac{x_i}{\bar{D}_{pi}}$
16	1.18	-	-	-	-
20	0.85	22.33	0.0614	1.015	0.0605
30	0.6	57.13	0.1569	0.725	0.2164
40	0.425	105.83	0.2908	0.5125	0.5674
45	0.355	18.85	0.0518	0.39	0.1328
50	0.30	53.5	0.1470	0.3275	0.4489
80	0.18	66.13	0.1817	0.24	0.7571
100	0.15	21.93	0.0603	0.165	0.3655
Pan	-	18.23	0.0501	0.075	0.6680
$\Sigma =$		363.93	1.0000	-	3.2166

$$d_p = \frac{1}{\sum \left(\frac{x_i}{\bar{D}_{pi}} \right)} = 0.3109$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.5 ผลการทดลองการหาขนาดวัสดุปริมาณมวล (ขนาดเล็ก ครั้งที่ 5)

เบอร์ตะแกรง	รูตะแกรง (mm)	มวลวัสดุ (gm)	X_i	\bar{D}_{pi}	$\frac{x_i}{\bar{D}_{pi}}$
16	1.18	-	-	-	-
20	0.85	21.88	0.0604	1.015	0.0595
30	0.6	54.41	0.1502	0.725	0.2072
40	0.425	98.36	0.2716	0.5125	0.5299
45	0.355	22.47	0.0620	0.39	0.1589
50	0.30	51.58	0.1432	0.3275	0.4373
80	0.18	73.39	0.2026	0.24	0.8442
100	0.15	21.56	0.0595	0.165	0.3606
Pan	-	18.26	0.0504	0.075	0.6720
$\Sigma =$		362.19	1.0000	-	3.2696
					$d_p = \frac{1}{\sum \left(\frac{x_i}{\bar{D}_{pi}} \right)} = 0.3058$

ตารางที่ ค.6 ผลการทดลองการหาขนาดวัสดุปริมาณมวล (ขนาดใหญ่ ครั้งที่ 1)

เบอร์ตะแกรง	รูตะแกรง (mm)	มวลวัสดุ (gm)	X_i	\bar{D}_{pi}	$\frac{x_i}{\bar{D}_{pi}}$
16	1.18	-	-	-	-
20	0.85	87.26	0.2185	1.015	0.2153
30	0.6	111.72	0.2798	0.725	0.3859
40	0.425	94.93	0.2378	0.5125	0.4640
45	0.355	26.58	0.0666	0.39	0.1707
50	0.30	38.65	0.0967	0.3275	0.2953
80	0.18	31.09	0.0778	0.24	0.3242
100	0.15	4.78	0.0120	0.165	0.0727
Pan	-	4.31	0.0108	0.075	0.1440
$\Sigma =$		399.32	1.0000	-	2.0721
					$d_p = \frac{1}{\sum \left(\frac{x_i}{\bar{D}_{pi}} \right)} = 0.4826$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.7 ผลการทดลองการหาขนาดวัสดุปริมาณมวล (ขนาดใหญ่ ครั้งที่ 2)

เบอร์ตะแกรง	รูตะแกรง (mm)	มวลวัสดุ (gm)	X_i	\bar{D}_{pi}	$\frac{x_i}{\bar{D}_{pi}}$
16	1.18	-	-	-	-
20	0.85	78.63	0.2467	1.015	0.2431
30	0.6	91.84	0.2881	0.725	0.3974
40	0.425	72.76	0.2283	0.5125	0.4455
45	0.355	21.63	0.0679	0.39	0.1741
50	0.30	22.91	0.0721	0.3275	0.2202
80	0.18	23.10	0.0724	0.24	0.3016
100	0.15	3.90	0.0122	0.165	0.0739
Pan	-	3.89	0.0122	0.075	0.1627
$\Sigma =$		318.74	1.0000	-	2.0185
$d_p = \frac{1}{\sum \left(\frac{x_i}{\bar{D}_{pi}} \right)} = 0.4950$					

ตารางที่ ค.8 ผลการทดลองการหาขนาดวัสดุปริมาณมวล (ขนาดใหญ่ ครั้งที่ 3)

เบอร์ตะแกรง	รูตะแกรง (mm)	มวลวัสดุ (gm)	X_i	\bar{D}_{pi}	$\frac{x_i}{\bar{D}_{pi}}$
16	1.18	-	-	-	-
20	0.85	69.13	0.2192	1.015	0.2158
30	0.6	85.10	0.2696	0.725	0.3719
40	0.425	74.04	0.2346	0.5125	0.4577
45	0.355	23.43	0.0742	0.39	0.1903
50	0.30	26.68	0.0845	0.3275	0.2580
80	0.18	28.37	0.0899	0.24	0.3745
100	0.15	4.46	0.0141	0.165	0.0854
Pan	-	4.36	0.0139	0.075	0.1853
$\Sigma =$		315.60	1.0000	-	2.1389
$d_p = \frac{1}{\sum \left(\frac{x_i}{\bar{D}_{pi}} \right)} = 0.4670$					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.9 ผลการทดลองการหาขนาดวัสดุปริมาณมวล (ขนาดใหญ่ ครั้งที่ 4)

เบอร์ตะแกรง	รูตะแกรง (mm)	มวลวัสดุ (gm)	X_i	\bar{D}_{pi}	$\frac{x_i}{\bar{D}_{pi}}$
16	1.18	-	-	-	-
20	0.85	72.04	0.2279	1.015	0.2245
30	0.6	86.85	0.2748	0.725	0.3790
40	0.425	73.14	0.2314	0.5125	0.4515
45	0.355	24.98	0.0790	0.39	0.2026
50	0.30	26.89	0.0851	0.3275	0.2598
80	0.18	26.51	0.0839	0.24	0.3496
100	0.15	2.90	0.0096	0.165	0.0557
Pan	-	2.71	0.0085	0.075	0.1146
$\Sigma =$		316.02	1.0000	-	2.0373

$$d_p = \frac{1}{\sum \left(\frac{x_i}{\bar{D}_{pi}} \right)} = 0.4910$$

ตารางที่ ค.10 ผลการทดลองการหาขนาดวัสดุปริมาณมวล (ขนาดใหญ่ ครั้งที่ 5)

เบอร์ตะแกรง	รูตะแกรง (mm)	มวลวัสดุ (gm)	X_i	\bar{D}_{pi}	$\frac{x_i}{\bar{D}_{pi}}$
16	1.18	-	-	-	-
20	0.85	81.47	0.2159	1.015	0.2127
30	0.6	104.44	0.2768	0.725	0.3818
40	0.425	87.79	0.2327	0.5125	0.4540
45	0.355	27.11	0.0718	0.39	0.1841
50	0.30	32.45	0.0861	0.3275	0.2629
80	0.18	34.14	0.0906	0.24	0.3775
100	0.15	5.94	0.0157	0.165	0.0952
Pan	-	3.91	0.0104	0.075	0.1386
$\Sigma =$		377.25	1.0000	-	2.1068

$$d_p = \frac{1}{\sum \left(\frac{x_i}{\bar{D}_{pi}} \right)} = 0.4750$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์วัชรระ เพิ่มชาติ อาจารย์ที่ปรึกษา และ ดร.วิภา เจียรระโนวชิระ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ได้กรุณาให้แนวคิด และคำแนะนำในการทำปริญญานิพนธ์ ตลอดจนการแก้ปัญหาต่างๆ ให้ความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง อันเป็นประโยชน์แก่ปริญญานิพนธ์ ขอขอบพระคุณ Assoc. Prof. Dr. Vladimir KOUPRIANOV จากสถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร ที่ได้ให้ข้อเสนอแนะ และแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ภัทรชัย วิชัยยะ และ อาจารย์วุฒ อุคมเพทายกุล กรรมการสอบปริญญานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำและตรวจสอบปริญญานิพนธ์ ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น รวมทั้งคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเกษตรทุกท่าน

คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณ คุณจิตรภาพ กิ่งสวัสดิ์ คุณพัชรา เอ็มอำไพวงศ์ และคุณน้อย ประทีป ได้ให้ความช่วยเหลือทางธุรการ ตลอดจนนายอภิย์ คำทัง และนายเข้ม สมรูป เจ้าหน้าที่อาคารปฏิบัติการ วิศวกรรมเกษตรให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำในการประกอบเตาเผาและอำนวยความสะดวกในเรื่องเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ

สุดท้ายนี้ คณะผู้จัดทำ ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ที่เป็นกำลังใจในการทำงานปริญญานิพนธ์นี้จนสำเร็จ คณะผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงใคร่ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. D. Kunii, and O. Levenspiel, "Fluidization Engineering", John Wiley and Sons, New York, 519 p., 1977.
2. J.R. Howard, "Fluidized Beds Combustion and Applications", Applied Science, London, 367 p., 1983.
3. เสรีย์ ตู้อู่ประกาย, "การศึกษาและออกแบบเตาเผาจากตะกอนแบบฟลูอิดไดซ์เบด", วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม, คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 87 หน้า, 2540.
4. สมศักดิ์ คำรงค์เลิศ, "ฟลูอิดไดซ์เบด", สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 255 หน้า, 2528.
5. อภิชัย เทอดเทียนวงศ์, "เตาเผาชีวมวลแบบฟลูอิดไดซ์เบด", วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 231 หน้า, 2528.
6. S. Suwanayuen, T. Chayawattana, Y. Surachpakorn, C. Tangsathitkulchai, and S. Tia, "Combustion of Rice Hull in A Fluidised Bed Furnace", ASEAN Journal Science Technology & Development, Vol. 9, No. 2, pp. 107-115, 1992.
7. V.I. Kouprianov, T. Utistham, S. Boonmun, W. Jatanakul and B. Suttisonk, "Experimental Investigation of Sawdust Burning in a Conical Fluidized Bed Combustor", The 6th National Chemical Engineering Conference, Bangkok, November, 1996.
8. W. Weizhang, "Fluidized-Bed Combustion of Rice Husk for Energy and Pozzolana", Master Thesis of Engineering, School of Energy, Asian Institute of Technology, 61 p., 1987.
9. S. Vanichseni, C. Benyajati, and A. Lovongsin, "Fluidized Bed Combustion of Rice Husk in Thailand", Proceedings of The 2nd ASEAN Fluidized Bed Combustion Design Workshop, Laguna, Phillipines, November, 1989.
10. ศูนย์อนุรักษ์พลังงานแห่งประเทศไทย, "วารสารพลังงาน ฉบับเชื้อเพลิงชีวมวล", ปีที่ 9, ฉบับที่ 43, หน้า 15-32, 2541.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11. S.C. Bhattacharya, Z. Alikhani, and S. Narendra, "Fluidized Bed Combustion of Paddy Husk", International Symposium / Workshop on Renewable Energy Sources, March, Pakistan, pp. 113-120, 1983.
12. สมศรี จรุงเรือง และ เบญจวรรณ โชคพิพัฒน์ผล, "การศึกษาและการออกแบบไซโคลนเพื่อลดปริมาณอนุภาคในก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้", วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา, ปีที่ 9, ฉบับที่ 1, หน้า 63-71, 2541.
13. Raymond A. Kulwiec, "Materials Handling Handbook", John Wiley and Sons, New York, pp. 882-899, 1985.
14. Robert F. Boehm, "Design Analysis of Thermal Systems", John Wiley and Sons, New York, pp. 24-26, 1987.
15. M. M. El-Wakil, "Power Plant Technology", McGraw-Hill Inc., Singapore, pp. 105-160, 1984.
16. ชัชวีร์ ไทยสุชาติ, พรนภา จักรวิชัยธำรง และ เสาวนีย์ พรหมช่วย, "การออกแบบและทดลองเครื่องอบแห้งชนิดฟลูอิดไดซ์เบด", ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเกษตร, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, หน้า 19-24, 2540.