

การศึกษาหัวจ่ายอากาศต่อลักษณะทางอุทกพลศาสตร์ของการฟลูอิดิซ์แบบหมุนวน
ในเบดทรงกรวย ชีวมวล-ของแข็ง

STUDY OF AIR DISTRIBUTOR ON SWIRLING FLUIDIZED HYDRODYNAMIC
CHARACTERISTICS IN A CONICAL BIOMASS-SOLID BED



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

การศึกษาหัวจ่ายอากาศต่อลักษณะทางอุทกพลศาสตร์ของการฟลูอิดิไดซ์แบบหมุนวน

ในเบดทรงกรวย ชีวมวล-ของแข็ง

STUDY OF AIR DISTRIBUTOR ON SWIRLING FLUIDIZED HYDRODYNAMIC CHARACTERISTICS
IN A CONICAL BIOMASS-SOLID BED



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเกษตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY OF AIR DISTRIBUTOR ON SWIRLING FLUIDIZED HYDRODYNAMIC
CHARACTERISTICS IN A CONICAL BIOMASS-SOLID BED



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN AGRICULTURAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2013

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2556
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

หัวข้อปริญญาานิพนธ์ การศึกษาหัวจ่ายอากาศต่อลักษณะทางอุทกพลศาสตร์ของการฟลูอิดซ์แบบ
หมุนวนในเบดทรงกรวย ซีวมวล-ของแข็ง

Study of air distributor on swirling fluidized hydrodynamic
characteristics in a conical biomass-solid bed

นักศึกษาผู้จัดทำ นายธนฤช ทองดีเลิศ รหัสนักศึกษา 53010617
นายนันท์พัฒน์ บัญญัติ รหัสนักศึกษา 53010836
นายบัญชา สุขเทพ รหัสนักศึกษา 53010877

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเกษตร)

หลักสูตร วิศวกรรมเกษตร

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา 2556

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ดร. รัชดาภรณ์ แก้วกล้า	Sithaporn Kaewkla

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การศึกษาห้วงอากาศต่อลักษณะทางอุทกพลศาสตร์ของการฟลูอิดซ์แบบหมุนวนในเบตทรงกรวย ชีวมวล-ของแข็ง		
นักศึกษาผู้จัดทำ	นายธนภุช ทองดีเลิศ	53010617	
	นายนันท์พัฒน์ บัญญัติ	53010836	
	นายบัญชา สุขเทพ	53010877	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร. รัชดาภรณ์ แก้วกล้า		

ปีการศึกษา 2556

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและศึกษาห้วงอากาศต่อลักษณะทางอุทกพลศาสตร์ของการฟลูอิดซ์แบบหมุนวนในเบตทรงกรวย ชีวมวล-ของแข็ง

การฟลูอิดซ์ อากาศ-ทราย ในเบตทรงกรวย ซึ่งใช้ห้วงกระจายลม 3 แบบ ในการทดสอบ คือ แบบที่ 1 มีลักษณะเป็นแผ่นกลม หนา 1.5 cm เจาะรูเอียง 45 องศา ซ้อนกัน 4 วง แบบที่ 2 มีลักษณะเป็นทรงกระบอกกลวงยื่นออกมาจากแผ่นรูปร่างกลมโดยยื่นออกมา 3 cm มีรูโดยรอบ จำนวน 2 ชั้น เจาะเยื้องศูนย์รอบทรงกระบอก แบบที่ 3 จะมีลักษณะเป็นใบพัด 12 ใบ หนา 15 องศา กับแนวระดับ ซึ่งห้วงกระจายลมทั้ง 3 แบบนี้ทำให้เกิดการหมุนวน ผลกระทบของคุณสมบัติเบต: ทรายขนาด 300-1180 μm ความสูงของเบต 5-15 cm และ ชีวมวลที่ใช้ในการทดสอบ คือ ฟางข้าว ถูกใช้ในการทดสอบ นอกเหนือจากนี้พฤติกรรมและลักษณะทางอุทกพลศาสตร์ของชีวมวล-ทราย ผสมกันในการฟลูอิดซ์แบบหมุนวนเป็นอีกวัตถุประสงค์หนึ่งในการศึกษาด้วย ในการทดสอบทั้งหมด แรงดันตกคร่อมเบต (Δp) ต่อความเร็วที่ผ่านห้วงกระจายลม (u) จะถูกแสดงด้วย $\Delta p-u$ โคเอแฟมของเบตที่เท่ากันแต่ขนาดของทรายและสัดส่วนของชีวมวลแตกต่างกันจะได้ค่า Δp ที่ความเร็วเดียวกันจะมีความแตกต่างกัน จากการทดลองพบว่าพฤติกรรมของการฟลูอิดซ์เบตแบบหมุนวนสามารถแบ่งออกได้เป็น 5 ช่วง คือ ช่วงเบตหยุดนิ่ง ช่วงเบตบางส่วนเริ่มเคลื่อนที่ ช่วงเบตด้านบนเกิดฟองอากาศในขณะที่เบตด้านล่างเกิดการหมุน และ ช่วงเบตหมุนวนอย่างสมบูรณ์

Thesis Title	Study of air distributor on swirling fluidized hydrodynamic characteristics in a conical biomass-solid bed		
Authors	Thanakrit	Thongdeelert	53010617
	Nantapat	Banyat	53010836
	Buncha	Suktep	53010877
Thesis Advisor	Dr. Rachadaporn Kaewklum		
Year	2013		

Abstract

This project was to study of air distributor on swirling fluidized hydrodynamic characteristics in a conical biomass-solid bed.

Characteristics of fluidization in 'cold' air-sand conical beds has three distributors used to experimental, the first has thickness of 1.5 cm and a circular hole inclination of 45 degrees. Hole is circular stacked 4 layers. The second characteristics of a cylindrical high 3 cm. Hole is cylinder stacked 2 layers. The last is annular spiral distributors consisted of 12 blades with 15 degree to horizontal axis were used as swirl generator. Effect of the bed properties: sand particles size (of 300-1180 μm) bed height (of 5-15 cm) and biomass (of straw) were focus of this study. In addition to these effect, the behavior and hydrodynamic characteristics of biomass-sand mixture flow in a conical swirling fluidized bed combustion also were aimed of this project. For particular operating condition, the pressure drop across the bed (Δp) was measured versus superficial velocity at lower bed basic (u). The Δp - u diagrams were compared between the same static bed height with different particle size and mass fraction have Δp difference at the same speed. Five hydrodynamic regimes of the bed behavior are found: Fix bed, partially fluidized bed, fully fluidized bed, fully fluidized bed, fully fluidized with partial swirling and fully swirling fluidized bed regimes.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยดี คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ ดร.รัชดาภรณ์ แก้วกล้า อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้กรุณาให้แนวคิด คำแนะนำ ให้ข้อเสนอแนะ ติดตามความก้าวหน้าในการดำเนินงาน และการดูแลเอาใจใส่เป็นอย่างดีในการทำปริญญานิพนธ์

ขอขอบคุณอาจารย์ประจำหลักสูตรวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ผู้ให้ความรู้และให้แนวคิดต่างๆที่เป็นประโยชน์การดำเนินงาน

ขอขอบพระคุณ คุณจิตรราพร กังสวัสดิ์ ได้ให้ความช่วยเหลือทางด้านธุรการ นายอภัย คำทั้ง และ นายกฤษณ์ ผลโพธิ์ เจ้าหน้าที่อาคารปฏิบัติการวิศวกรรมเกษตรที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำในการประกอบชุดทดสอบและอำนวยความสะดวกในเรื่องเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ

สุดท้ายนี้ คณะผู้จัดทำ ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ผู้ซึ่งเลี้ยงดู พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษา และให้กำลังใจ ดูแลเอาใจใส่เสมอมา ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งใจเป็นอย่างมาก

นายธนกฤษ ทองดีเลิศ
นายนันทพัฒน์ บัญญัติ
นายบัญชา สุขเทพ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
ศัพท์เฉพาะ	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของการทำโครงการ	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 เตาฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนวน	3
2.1.1 Vortexing fluidized-bed combustors (VFBC)	3
2.1.2 Swirling fluidized-bed combustor (SFBC)	4
2.1.3 Cyclonic fluidized-bed combustor (Ψ -FBC)	4
2.2 การจัดหมวดหมู่อนุภาคของ Geldart	5
2.3 ฟลูอิดเซชัน (Fluidization)	7
2.4 การฟลูอิดไคซ์ของก๊าซ - ของแข็ง	8
2.4.1 รูปแบบการฟลูอิดไคซ์เบดแบบดั้งเดิม	8
2.5 อิทธิพลต่างๆที่ส่งผลต่อลักษณะทางอุทกพลศาสตร์	10
2.5.1 อิทธิพลของมุมกรวย	10
2.5.2 อิทธิพลของความสูงเบด	11
2.5.3 อิทธิพลของขนาดอนุภาค	12
2.5.4 อิทธิพลของหัวจ่ายอากาศ	12

2.6 การหมุนวน (Swirling)	13
2.7 รูปแบบหัวจ่ายอากาศที่ทำให้เกิดการหมุน	14
2.7.1 เตา “Torbed”	14
2.7.2 ระบบหัวจ่ายสองหัว	16
2.7.3 ระบบหัวจ่ายอากาศ 4 หัวฉีด	17
2.7.4 หัวจ่ายอากาศแบบใบพัด	18
2.8 ทฤษฎีมาโนมิเตอร์ (Manometer)	19
2.8.1 U-Tube Manometer	19
2.8.2 คุณลักษณะที่สำคัญของ U-Tube Manometer	21
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงาน	22
3.1 การติดตั้งอุปกรณ์ทดลองตาฟลูอิดซ์เบดแบบไม่มีการเผาไหม้	22
3.1.1 ตัวเตาเผา	23
3.1.2 พัดลมป้อนอากาศ	23
3.1.3 อุปกรณ์วัดค่า	24
3.1.4 หัวจ่ายอากาศ	24
3.2 การออกแบบหัวจ่ายอากาศแบบหมุนวน	24
3.2.1 หัวจ่ายอากาศแบบที่ 1	24
3.2.2 หัวจ่ายอากาศแบบที่ 2	25
3.2.3 หัวจ่ายอากาศแบบที่ 3	26
3.3 การจัดเตรียมทรายที่ใช้เป็นเบดและฟางข้าว	26
3.4 ขั้นตอนการทดลอง	28

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ทางอุทกพลศาสตร์	30
4.1 ผลกระทบหัวจ่ายอากาศต่อ $\Delta p-u$ ไดอะแกรม	30
4.1.1 หัวจ่ายอากาศแบบที่ 1	30
4.1.2 หัวจ่ายอากาศแบบที่ 2	31
4.1.3 หัวจ่ายอากาศแบบที่ 3	31
4.2 $\Delta p-u$ ไดอะแกรม ในการทดสอบอุทกพลศาสตร์ของอากาศ-ทราย	34
4.2.1 ผลกระทบของความสูงเบตต่อ $\Delta p-u$ ไดอะแกรม	34
4.2.2 ผลกระทบของขนาดทรายต่อ $\Delta p-u$ ไดอะแกรม	34
4.2.3 ผลกระทบของลักษณะหัวจ่ายอากาศ	36
4.2.4 ผลกระทบของสัดส่วนซีเมนต์ต่อ $\Delta p-u$ ไดอะแกรม	36
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	38
5.1 สรุปผลการทดลอง	38
5.2 ข้อเสนอแนะ	38
เอกสารอ้างอิง	40
ภาคผนวก	43
ภาคผนวก ก รายละเอียดหัวจ่ายอากาศที่ทำารออกแบบ	44

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	คุณสมบัติของเบต	27
3.2	คุณสมบัติของฟางข้าว	27
3.3	ขั้นตอนการทดลองโดยใช้ทรายเป็นเบต	28
3.4	การผสมเบต (ทรายกับฟางข้าว)	29



สารบัญรูป

รูปที่	คำอธิบายรูป	หน้า
2.1	รูปแบบเทคโนโลยีเตาเผาใหม่แบบฟลูอิดซ์เบด	3
2.2	ลักษณะเตาฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนวน ชนิด Ψ -FBC	4
2.3	รูปแบบหลักของการฟลูอิดซ์เซชั่น	5
2.4	การจัดหมวดหมู่อนุภาคของ Geldart	6
2.5	ผลกระทบความเร็วที่ผ่านหัวจ่ายอากาศต่อความดันตกคร่อมเบดของการฟลูอิดซ์แบบดั้งเดิม	8
2.6	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมเบดต่อความเร็วที่ผ่านหัวจ่ายอากาศของการฟลูอิดซ์แบบหมุนวน	10
2.7	อิทธิพลของมุมกรวยต่อการฟลูอิดซ์	11
2.8	อิทธิพลของความสูงเบดต่อการฟลูอิดซ์	11
2.9	อิทธิพลของหัวจ่ายอากาศต่อกราฟ $\Delta p-u$ ไดอะแกรมของเบดทรงกรวยที่เบดขนาด	12
2.10	โมโนกราฟแสดงความแตกต่างของหัวจ่ายอากาศระหว่าง Four-nozzle และ Annular spiral	13
2.11	ผลการทดลองการฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนวน, ความดันตกคร่อมเบด	15
2.12	เตา Torbed	15
2.13	การฟลูอิดซ์แบบหมุนวนโดยการจ่ายของเหลวในส่วนล่างของเบดในแนวสัมผัส	16
2.14	แผนภาพระบบจ่ายอากาศแบบสี่หัวฉีด	17
2.15	แผนภาพระบบการจ่ายลมสองหัวต่อหัวฉีด	17
2.16	หัวจ่ายอากาศแบบใบพัด โดยอากาศไหลในทิศทางเข็มนาฬิกา	18
2.17	อุปกรณ์ทดลองที่ทำให้เกิดการฟลูอิดซ์แบบหมุนวน	18
2.18	การต่อ U-Tube เข้ากับจุดวัดความดันทั้ง 2 ด้าน	19
2.19	การต่อ U-Tube เข้ากับจุดวัดความดัน 1 ด้าน	20
2.20	ค่าแรงตึงผิวของของเหลวที่เติมใน U-Tube	21
3.1	การติดตั้งอุปกรณ์ทดลองเตาฟลูอิดซ์เบด	22
3.2	อุปกรณ์ในการทดลอง (มิลลิเมตร)	23
3.3	การออกแบบหัวจ่ายอากาศแบบที่ 1 (3 มิติ)	25

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	คำอธิบายรูป	หน้า
3.4	การออกแบบหัวจ่ายอากาศแบบที่ 2 (3 มิติ)	25
3.5	การออกแบบหัวจ่ายอากาศแบบที่ 3 (3 มิติ)	26
3.6	ลักษณะของทรายขนาด 300-500 μm , 500-600 μm และ 850-1180 μm	26
3.7	ฟางข้าวที่ทำการย่อย	27
4.1a	หัวจ่ายอากาศแบบที่ 1 ที่ใช้ในการทดลองจริง	30
4.1b	ผลกระทบของหัวจ่ายอากาศแบบที่ 1 ต่อ $\Delta p-u$ ไตอะแกรม ที่ขนาดทราย 850-1180 μm	30
4.2a	หัวจ่ายอากาศแบบที่ 2	32
4.2b	ผลกระทบของหัวจ่ายอากาศแบบที่ 2 ต่อ $\Delta p-u$ ไตอะแกรม ที่ขนาดทราย 850-1180 μm	32
4.2c	ผลกระทบของหัวจ่ายอากาศแบบที่ 2 ต่อ $\Delta p-u$ ไตอะแกรม ที่ขนาดทราย 500-600 μm	32
4.2d	ผลกระทบของหัวจ่ายอากาศแบบที่ 2 ต่อ $\Delta p-u$ ไตอะแกรม ที่ขนาดทราย 300-500 μm	32
4.3a	หัวจ่ายอากาศแบบที่ 3 ที่ใช้ในการทดลองจริง	33
4.3b	ผลกระทบของหัวจ่ายอากาศแบบที่ 3 ต่อ $\Delta p-u$ ไตอะแกรม ที่ขนาดทราย 850-1180 μm	33
4.4	ผลกระทบของความสูงเบต ต่อ $\Delta p-u$ ไตอะแกรมในการฟลูอิด์เบตทรงกรวย แบบหมุนวนที่ขนาดทราย (a) 300-500 μm และ (b) 850-1180 μm	35
4.5	ผลกระทบของขนาดทราย ต่อ $\Delta p-u$ ไตอะแกรมในการฟลูอิด์เบตทรงกรวย แบบหมุนวนที่ขนาดทราย 300-500 μm , 500-600 μm และ 850-1180 μm	35
4.6	การเปรียบเทียบผลกระทบ $\Delta p-u$ ไตอะแกรม ของหัวจ่ายอากาศทั้ง 3 แบบ ที่เบตสูง 15 เซนติเมตร	36
4.7	ผลกระทบของสัดส่วนชีวมวลต่อ $\Delta p-u$ ไตอะแกรมในการฟลูอิด์เบตทรงกรวย แบบหมุนวนที่ขนาดทราย 850-1180 μm ที่เบตสูง 10 เซนติเมตร	37

ศัพท์เฉพาะ

BH	=	ความสูงของเบด, cm
d_p	=	เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาคเบด, μm
h	=	ความสูงของของไหลใน U-tube manometer, cm
M_b	=	น้ำหนักของเบด, kg
Δp	=	ความดันตกคร่อมเบด, kPa
Δp_{max}	=	ความดันตกคร่อมเบดสูงสุด (Bubbling), kPa
p_{mf}	=	ความดันตกคร่อมต่ำสุดของการเกิดฟลูอิด์เบดแบบสมบูร์น, kPa
p_{msf}	=	ความดันตกคร่อมต่ำสุดของการเกิดฟลูอิด์เบดแบบหมุนวน, kPa
u	=	ความเร็วในการฟลูอิด์ของตัวกลาง, m/s
u_{mf}	=	ความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิด์, m/s
u_{mf}	=	ความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิด์เบดแบบสมบูร์น, m/s
u_{msf}	=	ความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิด์เบดแบบหมุนวน, m/s

สัญลักษณ์กรีก :

α	=	มุมกรวย, °
ρ_g	=	ความหนาแน่นของก๊าซ, kg/m^3
ρ_p	=	ความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง, kg/m^3
ρ_1	=	ความหนาแน่นของเหลวในท่อ, kg/m^3
ρ_2	=	ความหนาแน่นของอากาศในท่อ, kg/m^3

ตัวอักษรย่อ :

BFB	=	การฟลูอิด์เบดแบบฟองอากาศ (Bubbling fluidized-bed)
CFB	=	การฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียน (Circulating fluidized-bed)
BFBC	=	เตาฟลูอิด์เบดแบบฟองอากาศ (Bubbling)
CFBC	=	เตาฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียน (Circulating)

- VFBC = เตาฟลูอิดซ์เบดแบบวอร์เทค (Vortexing)
SFBC = เตาฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนวน (Swirling)
 Ψ -FBC = เตาฟลูอิดซ์เบดแบบไซโคลน



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

ปัจจุบัน การใช้พลังงานของโลกประกอบด้วย เชื้อเพลิงฟอสซิล ซึ่งได้แก่ น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ และถ่านหินมีปริมาณรวมกันถึงร้อยละ 95 และอีกร้อยละ 2 มาจากพลังงานนิวเคลียร์ ส่วนที่เหลือร้อยละ 3 นำมาจากพลังงานหมุนเวียนอื่นๆ [1] จากการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นจำนวนมาก มีการคาดการณ์ว่าเชื้อเพลิงชนิดนี้จะขาดแคลนในไม่ช้า และจากปัญหาด้านความปลอดภัยของพลังงานนิวเคลียร์ ทำให้พลังงานหมุนเวียนเริ่มเข้ามามีบทบาทมากขึ้น จึงมีการพัฒนาการใช้งานพลังงานหมุนเวียนแบบต่างๆ ให้เกิดประโยชน์สูงสุด และไม่ทำลายสิ่งแวดล้อม สำหรับประเทศไทย มีพลังงานหมุนเวียนที่เหมาะสมคือ พลังงานจากชีวมวล เช่น วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร อาทิ แกลบ ชานอ้อย และขี้เลื่อย เป็นต้น

ในรอบ 10 ปี เทคโนโลยีการเผาไหม้แบบฟลูอิดไคซ์เบด (Fluidized-bed) ถูกใช้งานอย่างแพร่หลายในกระบวนการเปลี่ยนรูปพลังงาน เนื่องจากมีข้อดีคือ ให้ประสิทธิภาพทางความร้อนสูง สามารถเลือกใช้เชื้อเพลิงได้หลากหลายชนิด อุณหภูมิที่ได้มีความสม่ำเสมอ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ฉะนั้นเทคโนโลยีการเผาไหม้แบบฟลูอิดไคซ์เบดจึงเป็นทางเลือกที่ดีสำหรับการนำชีวมวลมาแปลงเป็นเชื้อเพลิง [2-6] มีการศึกษาและงานวิจัยมากมายเกี่ยวกับวิธีการเผาไหม้ฟลูอิดไคซ์เบดแบบดั้งเดิม อันประกอบไปด้วย Bubbling fluidized-bed (BFB) และ Circulating fluidized-bed (CFB) จากวิธีการเผาไหม้แบบดั้งเดิมนั้นได้มีการพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ โดยการทำให้อนุภาคของก๊าซ-ของแข็งมีการหมุนวนภายในเตา การหมุนวนของอนุภาคก๊าซ-ของแข็งภายในเตามีส่วนดีคือเพิ่มระยะเวลาการเผาไหม้ของอนุภาคภายในห้องเผาไหม้ และช่วยลดการสูญเสียของอนุภาคที่ยังสามารถเผาได้ [7-9]

จากข้อมูลดังกล่าวสิ่งสำคัญคือ การทำให้ก๊าซ-ของแข็งมีการหมุนวนภายในห้องเผาไหม้ โครงการนี้จึงมุ่งออกแบบหัวจ่ายอากาศ และศึกษาลักษณะทางอุทกพลศาสตร์ของการฟลูอิดไคซ์แบบหมุนวนในเบดทรงกรวย โดยใช้อุปกรณ์ทดลองฟลูอิดไคซ์เบดแบบไม่มีการเผาไหม้ และศึกษาพฤติกรรมเบดจากชนิดหัวจ่ายอากาศ ขนาดและความสูงเบด แล้ววิเคราะห์ความดันตกคร่อมเบดกับความเร็วลมที่ผ่านหัวจ่ายอากาศ ประโยชน์จากการศึกษาด้วยอุปกรณ์ทดลองฟลูอิดไคซ์เบดแบบไม่มีการเผาไหม้ ทำให้ทราบพฤติกรรมเบดก่อนทำการเผาด้วยเตาจริง เมื่อได้ผลจากการทดลองแล้ว จึงสามารถทำการออกแบบลักษณะหัวจ่ายอากาศให้เหมาะสมกับเตาขนาดจริงได้

1.2 วัตถุประสงค์

1. ออกแบบลักษณะทิวจำลองอากาศเพื่อเพิ่มความสามารถในการทำให้เกิดการฟลูอิดซ์แบบหมุนวน
2. เพื่อศึกษาลักษณะการฟลูอิดซ์ของเบตขนาดต่างๆในช่วงที่เกิดการหมุนวน
3. เพื่อศึกษาพฤติกรรมของเบตโดยที่เบตมีอนุภาคและความสูงต่างกัน

1.3 ขอบเขตของการทำโครงการ

1. ศึกษาลักษณะทางอุทกพลศาสตร์ของการฟลูอิดซ์แบบหมุนวน ในเบตทรงกรวย
2. เลือกใช้ทรายเป็นเบต โดยขนาดของทรายจะอยู่ในช่วง Geldart B และ D type ตามการจัดหมวดหมู่อนุภาคของ Geldart
3. ซิวมวลที่ใช้ผสมกับเบตคือฟางข้าว ที่อัตราส่วนมวล 5% และ 10%
4. ใช้อุปกรณ์ทดลองเตาฟลูอิดซ์เบตแบบไม่มีการเผาไหม้ในการทดลอง โดยเลือกใช้กรวยเตาที่มีมุม 40°
5. ความสูงของเบตที่เลือกใช้ในการทดลองคือ 5, 10 และ 15 เซนติเมตร

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถพัฒนาการฟลูอิดซ์ในช่วงที่เกิดการหมุนวนให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น
2. ทราบลักษณะทางอุทกพลศาสตร์ของการฟลูอิดซ์แบบหมุนวน จาก $\Delta p-u$ ไดอะแกรม
3. เป็นแนวทางให้กับผู้ที่จะทำการพัฒนาเทคโนโลยีการเผาไหม้ฟลูอิดซ์เบตแบบหมุนวนได้นำไปพัฒนาต่อยอดต่อไป

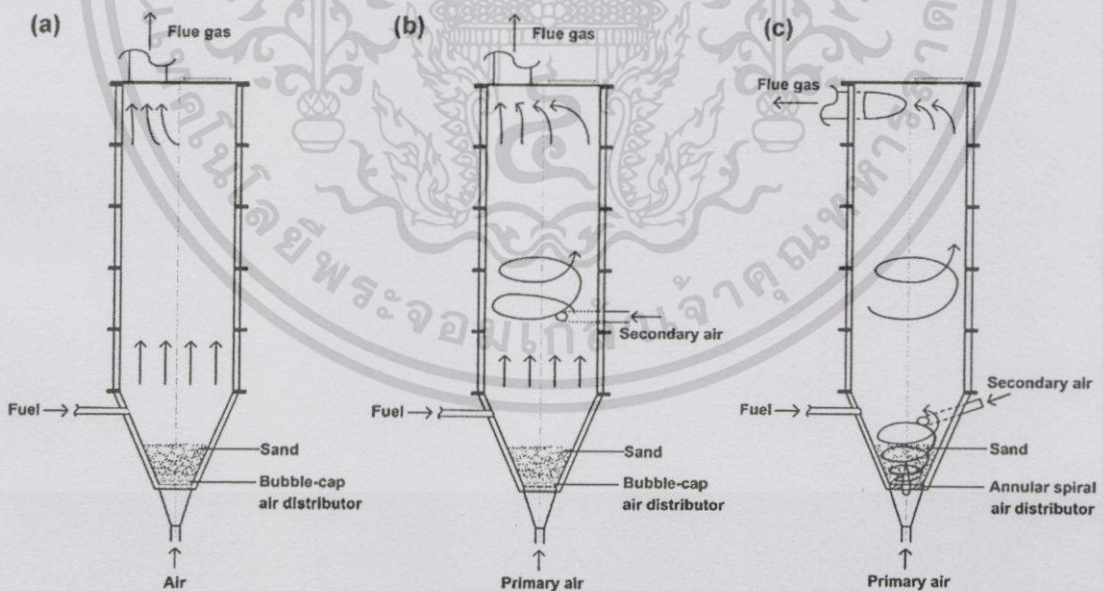
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เตาฟลูอิด์เบดแบบหมุนวน

เตาฟลูอิด์เบดแบบหมุนวนถูกพัฒนามาจากเตาฟลูอิด์เบดแบบดั้งเดิมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ โดยปกติเตาฟลูอิด์เบดเหมาะสำหรับการนำวัสดุชีวมวลมาเป็นเชื้อเพลิง แต่ปัญหาจากการเผาไหม้ชีวมวลคือมีปริมาณขี้เถ้าสูง ซึ่งการทำให้ก๊าซ-ของแข็ง มีการหมุนวนภายในเตาจะช่วยเพิ่มระยะเวลาเชื้อเพลิงให้อยู่ภายในเตานานขึ้น ทำให้เชื้อเพลิงถูกเผาได้นานขึ้น และเชื้อเพลิงไม่หลุดลอยออกจากเตาเนื่องจากแรงเหวี่ยงของลม สามารถแบ่งแบ่งวิธีการเผาไหม้แบบหมุนวนออกเป็น 3 กลุ่มประกอบไปด้วย Vortexing, Swirling และ Cyclonic fluidized-bed combustors [9-11]

2.1.1 Vortexing fluidized-bed combustors (VFBC) [9]

เตาฟลูอิด์เบดแบบหมุนวนในกลุ่ม VFBC มีหลักการจ่ายอากาศคือ อากาศปฐมภูมิ (Primary air) ถูกจ่ายผ่านหัวจ่ายอากาศทำให้ก๊าซ-ของแข็งลอยตัวขึ้น และมีการจ่ายอากาศทุติยภูมิ (Secondary air) ในแนวขวางเพื่อทำให้อนุภาคที่ลอยเกิดการหมุนวน (ดังรูปที่ 2.1b)



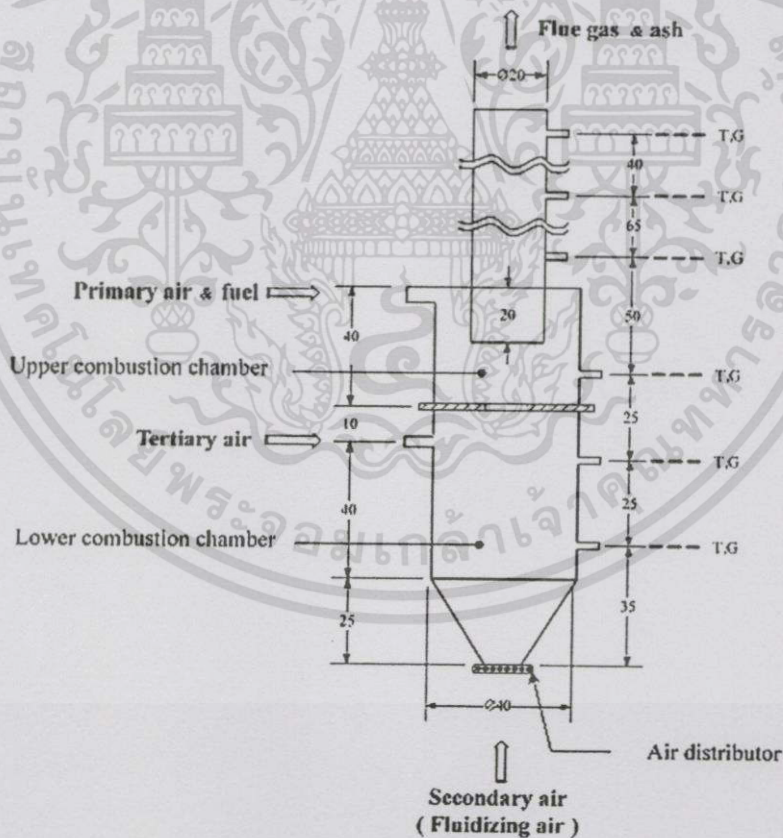
รูปที่ 2.1 รูปแบบเทคโนโลยีเตาเผาไหม้แบบฟลูอิด์เบด a) เตาฟลูอิด์เบดแบบดั้งเดิม b) เตาฟลูอิด์เบดแบบหมุนวน VFBC c) เตาฟลูอิด์เบดแบบหมุนวน SFBC [5]

2.1.2 Swirling fluidized-bed combustor (SFBC)[10]

จากเตาในกลุ่ม VFBC มีการพัฒนาเพื่อลดอุปกรณ์ในเตาเผา โดยใช้เพียงอากาศปฐมภูมิเพียงอย่างเดียวในการทำให้ก๊าซ-ของแข็งเกิดการหมุน อากาศถูกทำให้หมุนวนตั้งแต่บริเวณหัวจ่ายอากาศ ฉะนั้นสิ่งสำคัญในกลุ่ม SFBC คือการออกแบบหัวจ่ายอากาศอย่างไรให้ก๊าซ-ของแข็งภายในเตาหมุนวนได้ดี (ดังรูปที่ 2.1c)

2.2.3 Cyclonic fluidized-bed combustor (Ψ -FBC)[11]

รูปแบบตาฟลูอิดเบดที่มีความซับซ้อนที่สุด เนื่องจากต้องใช้อากาศสามส่วนในการทำงาน ประกอบไปด้วยอากาศปฐมภูมิ อากาศทุติยภูมิ และอากาศตติยภูมิ (Tertiary air) อากาศปฐมภูมิจ่ายอากาศและเชื้อเพลิงด้านบนของเตาในแนวสัมผัส (Tangential) ทำให้อุณหภูมิเกิดการหมุนวน อากาศทุติยภูมิเป็นการจ่ายอากาศขึ้นไปในแนวตั้งเพื่อมีการผสมกันของเชื้อเพลิงได้ดี อากาศตติยภูมิเป็นการจ่ายอากาศในแนวสัมผัสเช่นเดียวกับอากาศปฐมภูมิ โดยอากาศตติยภูมิช่วยสร้างการหมุนวนบริเวณชั้นล่างของเตา (ดังรูปที่ 2.2)

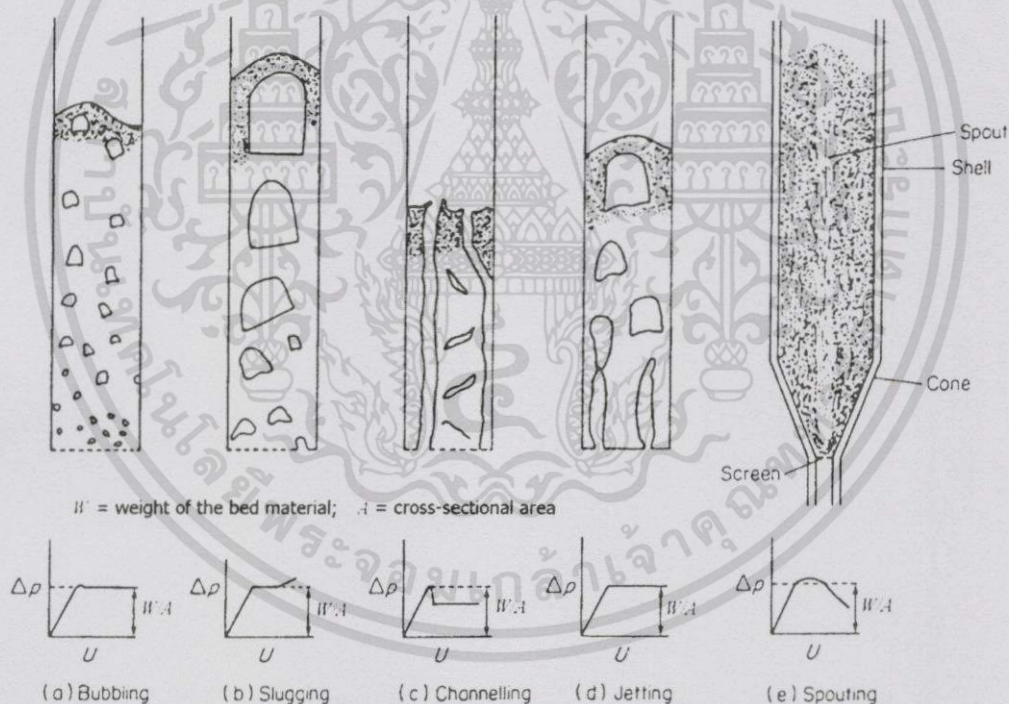


รูปที่ 2.2 ลักษณะเตาฟลูอิดเบดแบบหมุนวน ชนิด Ψ -FBC [11]

2.2 การจัดหมวดหมู่อนุภาคของ Geldart [12]

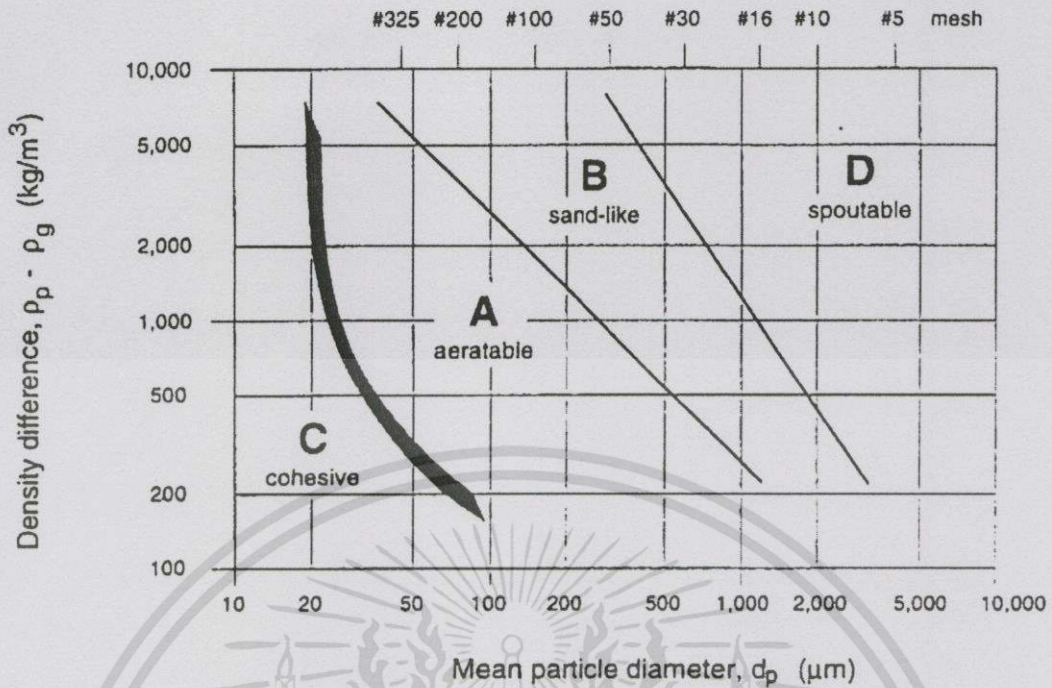
งานวิจัยส่วนใหญ่เป็นการศึกษาผลกระทบระหว่างอนุภาคของวัสดุที่เป็นเบด (bed material) และอากาศตัวกลาง (gas medium) โดยศึกษาสภาพแวดล้อมที่ต่างกันของทั้งความเร็วของอากาศและลักษณะของขนาดอนุภาค จะเห็นพฤติกรรมที่เกิดขึ้นในรูปแบบที่ต่างกัน ดังรูป 2.3 แสดงให้เห็นรูปแบบลักษณะการเกิดฟลูอิดิซ์เซชัน (bubbling, slugging, channelling, jetting and spouting) ซึ่งขึ้นอยู่กับแรงดันตกคร่อมเบด และความเร็วของอากาศ

พื้นฐานการวิเคราะห์ของ bed fluidization จำแนกได้จากลักษณะความหนาแน่นของอนุภาคของอากาศและขนาดของอนุภาค รูปที่ 2.4 The Geldert's particle classification แสดงให้เห็นลักษณะที่แตกต่างกัน ระหว่างขนาดของอนุภาคเชื้อเพลิง และอนุภาควัสดุที่เป็นเบด (bed material) สามารถจำแนกอนุภาคออกได้ 4 ลักษณะ ประกอบด้วย กลุ่ม A, B, C และ D



รูปที่ 2.3 รูปแบบหลักของการฟลูอิดิซ์เซชัน [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 การจัดหมวดหมู่อนุภาคของ Geldart [12]

กลุ่ม C ประกอบด้วยอนุภาคซึ่งมีขนาดเล็กละเอียดและความหนาแน่นต่ำที่สุด เป็นกลุ่มที่มีแรงยึดเกาะระหว่างอนุภาคสูง จึงเกิดเป็นลักษณะ channeling (ดังรูปที่ 2.3 c)

กลุ่ม A มีอนุภาคใหญ่กว่ากลุ่ม C อนุภาคในกลุ่มนี้สามารถทำให้เกิดการฟลูอิดซ์ได้ง่ายและเป็นการไหลแบบราบรื่นในอัตราเร็วของอากาศที่ต่ำ (smooth fluidization) ที่ความเร็วของอากาศสูงกว่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่แบบฟองอากาศ (Minimum Bubbling) วัสดุเบดเปลี่ยนเป็นช่วงของการเคลื่อนที่แบบฟองอากาศ (ดังรูปที่ 2.3 b)

กลุ่ม B เป็นกลุ่มที่มีลักษณะคล้ายทราย (Sand-like particle) โดยปกติแล้วในกลุ่มนี้ใช้เป็นวัสดุเบดในเตาเผาฟลูอิดซ์เบดแบบฟองอากาศ สามารถสังเกตเห็นพฤติกรรมของฟองอากาศที่เกิดขึ้นได้เมื่อความเร็วอากาศนั้นมากกว่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดซ์เซชัน ที่ปกติแล้วฟองอากาศจะลอยขึ้นอย่างรวดเร็ว (ดังรูปที่ 2.3 a)

กลุ่ม D ประกอบด้วยอนุภาคที่มีขนาดใหญ่และมีความหนาแน่นมาก ต้องการความเร็วที่ทำให้เกิดการฟลูอิดซ์มากกว่ากลุ่มอื่น ลักษณะของรูปแบบในกลุ่ม D ประกอบด้วยหลายลักษณะ โดยทั่วไปเป็นฟองอากาศ แต่ในบางครั้งจะเกิดการฟุ้งในรูปแบบที่คล้ายน้ำพุ (ดังรูปที่ 2.3 e)

2.3 ฟลูอิดเซชัน (Fluidization) [14]

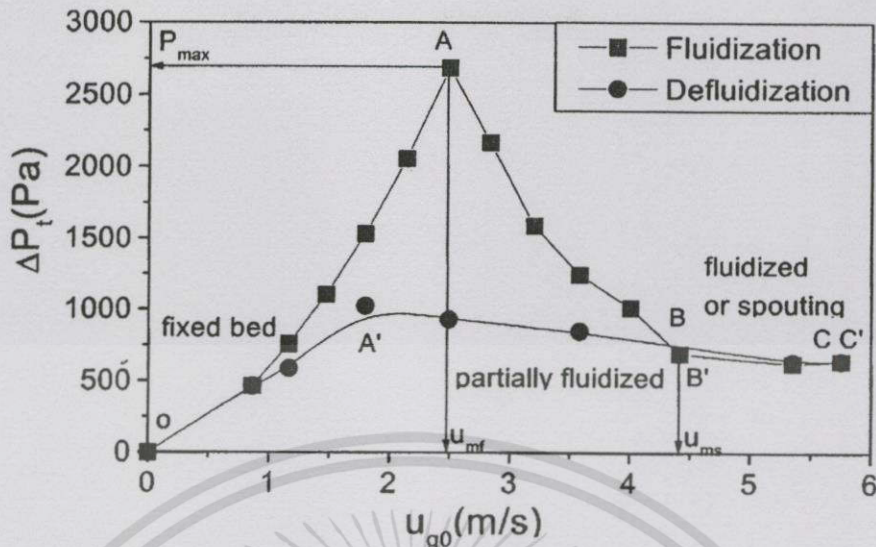
สภาวะฟลูอิดซ์ คือ สภาวะที่อนุภาคของแข็งซึ่งรูปร่างลักษณะเป็นเม็ดหรือชิ้น อยู่ในสภาพคล้ายกับของไหล เช่น สามารถเคลื่อนได้อย่างอิสระ มีลักษณะการไหลคล้ายของไหล เช่นการไหลแบบปั่นป่วน โดยการให้สัมผัสกับก๊าซหรือของเหลว ซึ่งในระหว่างนี้อาจมีการถ่ายเทมวลสารหรือการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้น

หลักการทำให้ฟลูอิดเซชัน คือ การปล่อยของไหลผ่านเข้าทางด้านล่างของหอซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกระบอกที่ภายในบรรจุด้วยอนุภาคของแข็ง เมื่อความเร็วของของไหลที่ไหลผ่านอนุภาคของแข็งมีค่ามากพอ อนุภาคของแข็งก็เคลื่อนที่กระจายตัวภายในหอ และแขวนลอยอยู่กับของไหล ซึ่งในสภาวะที่อนุภาคของแข็งจะมีคุณสมบัติคล้ายกับของไหล ซึ่งฟลูอิดเซชันนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ ฟลูอิดเซชันของของเหลว (liquid-solid fluidization) และก๊าซฟลูอิดเซชัน (gas – solid fluidization)

ลำดับขั้นตอนของการเกิดฟลูอิดเซชันเริ่มจากการปล่อยให้ของไหลไหลผ่านอนุภาคของแข็งทางด้านล่างด้วยอัตราการไหลน้อยๆของไหลก็จะไหลผ่านช่องว่างระหว่างอนุภาคที่อยู่นิ่งซึ่งเรียกว่าเบดนิ่ง (fixed bed) และเมื่อเพิ่มอัตราการไหลขึ้นอนุภาคของแข็งก็จะเริ่มแยกออกจากกันซึ่งบางส่วนจะเริ่มสั่นและบางส่วนจะเคลื่อนที่ในบริเวณจำกัด เรียกว่า เบดขยายตัว (expanded bed) เมื่ออัตราเร็วของของไหลเพิ่มขึ้นอีกจนถึงจุดที่อนุภาคทั้งหมดแขวนลอยอยู่ในของไหล ซึ่งอนุภาคของแข็งจะเริ่มเคลื่อนที่แบบปั่นป่วน เรียกจุดนี้ว่า ความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดเซชัน (minimum fluidization velocity; u_{mf})

การเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลที่สูงกว่าความเร็วต่ำสุดของการฟลูอิดเซชันในระบบก๊าซ-ของแข็ง จะมีพฤติกรรมแตกต่างไปจากระบบของเหลว-ของแข็ง คือ จะมีฟองก๊าซเกิดขึ้น เมื่ออัตราการไหลมากขึ้นจะมีความปั่นป่วนมากขึ้น ซึ่งแตกต่างจากระบบฟลูอิดซ์ของแข็งกับของเหลวที่อัตราการไหลสูงกว่าความเร็วต่ำสุดของการฟลูอิดซ์ การขยายตัวของชั้นของแข็งจะสม่ำเสมอและมีความต่อเนื่อง เรียกว่า ฟลูอิดซ์สม่ำเสมอ (smooth fluidization) และเมื่ออัตราการไหลสูงขึ้นจนถึงความเร็วสุดท้ายของการเกิดฟลูอิดซ์ของของแข็งแล้ว ของแข็งที่อยู่ชั้นบนก็จะถูกพัดพาออกไปจากเบดพร้อมกับของไหล

เบด (Bed) หมายถึง อาณาเขตของอนุภาคของแข็งในหอทดลองทั้งหมดตั้งแต่ตัวกระจายของไหล (Distributor) จนถึงระดับสูงสุดคือผิวหน้าของเม็ดของแข็ง ไม่ว่าเม็ดของแข็งนั้นจะอยู่นิ่งหรือเคลื่อนไหวด้วยของไหล



รูปที่ 2.5 ผลกระทบความเร็วที่ผ่านหัวจ่ายอากาศต่อความดันตกคร่อมเบดของการฟลูอิดซ์แบบดั้งเดิม [15]

2.4 การฟลูอิดซ์ของก๊าซ - ของแข็ง

2.4.1 รูปแบบการฟลูอิดซ์เบดแบบดั้งเดิม [15-18]

มีการศึกษาพฤติกรรมของการฟลูอิดซ์แบบดั้งเดิม (Bubbling) และลักษณะทางอุทกพลศาสตร์การฟลูอิดซ์เบดทั้งแบบของเหลว-ของแข็ง และแบบก๊าซ-ของแข็ง รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะทางอุทกพลศาสตร์ของเบดทรงกรวย จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมเบดและความเร็วที่ผ่านหัวจ่ายอากาศ พบช่วงการไหลที่แตกต่างกันดังนี้

1) ช่วงเบดนิ่ง (Fixed-bed regime, O \rightarrow A) ช่วงนี้เกิดขึ้นขณะที่ความเร็วลมยังต่ำอยู่ อากาศพยายามไหลผ่านเบด โดยช่องว่างและความสูงเบดไม่มีการเปลี่ยนแปลง จากรูปที่ 2.5 ความดันตกคร่อมเบดเพิ่มขึ้นตามความเร็วลมที่มากขึ้น ($d(\Delta p)/du > 0$) ณ ตำแหน่ง A คือตำแหน่งที่ความเร็วลมที่ผ่านหัวจ่ายลมถึงความเร็วการฟลูอิดซ์ต่ำสุด (minimum fluidization velocity, u_{mf}) และความดันตกคร่อมเบดมีค่าสูงที่สุด (Δp_{max})

2) ช่วงฟลูอิดซ์เบดบางส่วน (Partially fluidized-bed regime, A \rightarrow B) จากรูปที่ 2.5 ณ ตำแหน่ง A เมื่อความเร็วลมมีมากพอ จะเกิดขึ้นช่องว่างที่ใหญ่พอให้เบดบริเวณหัวจ่ายอากาศมีการยกตัวขึ้น ขณะที่ความสูงเบดไม่มีการเปลี่ยนแปลง ในช่วงนี้เมื่อเพิ่มความเร็วที่ผ่านหัวจ่ายอากาศ ความดันตกคร่อมเบดจะมีค่าลดลง ($d(\Delta p)/du < 0$) จนกระทั่งขึ้นช่องว่างดังกล่าวเกิดบริเวณชั้นบนของเบด

ความดันตกคร่อมเบตจึงเริ่มคงที่ ณ ตำแหน่ง B คือตำแหน่งที่ความดันตกคร่อมเบตเริ่มคงที่ ความเร็วที่ตำแหน่งนี้เรียกว่าความเร็วต่ำสุดของการฟลูอิดิซึ่มบูรณ์ (minimum velocity of fully fluidization, u_{mf})

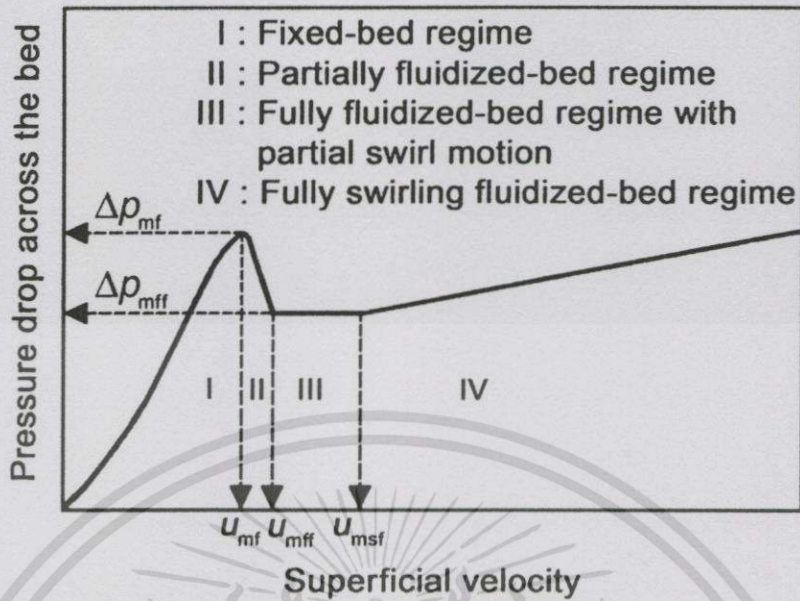
3) ช่วงฟลูอิดิซึ่มบูรณ์ (Fully fluidized-bed regime, B \rightarrow C) เบตเข้าสู่ช่วงการฟลูอิดิซึ่มบูรณ์เมื่อ $u > u_{mf}$ ในช่วงนี้ทุกอนุภาคตลอดช่วงความสูงเบตมีการเคลื่อนที่อย่างอิสระ โดยลมพาอนุภาคเบตเคลื่อนที่จากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบน และพฤติกรรมชั้นบนสุดของเบตมีลักษณะคล้ายการเกิดฟองอากาศ (Bubble)

2.4.2 รูปแบบการฟลูอิดิซึ่มบูรณ์แบบหมุนวน [6,10]

รูปแบบการฟลูอิดิซึ่มบูรณ์แบบหมุนวนพัฒนามาจากรูปแบบการฟลูอิดิซึ่มบูรณ์แบบตั้งเดิม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ Rachadaporn Kaewklum และ Vladimir I. Kuprianov [10] ทำการทดลองและศึกษาเตาเผาฟลูอิดิซึ่มบูรณ์แบบหมุนวน โดยใช้หัวจ่ายอากาศแบบใบพัด จากการวิเคราะห์กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมเบตและความเร็วที่ผ่านหัวจ่ายอากาศ พบว่าที่ความเร็วที่ผ่านหัวจ่ายอากาศต่ำ ($u < u_{msf}$) ลักษณะทางอุทกพลศาสตร์การฟลูอิดิซึ่มบูรณ์แบบหมุนวนมีความคล้ายกับการฟลูอิดิซึ่มบูรณ์แบบตั้งเดิม ในขณะที่ความเร็วที่ผ่านหัวจ่ายอากาศมีค่ามาก ($u > u_{msf}$) ลักษณะทางอุทกพลศาสตร์มีความแตกต่างออกไป รูปที่ 2.6 แสดงช่วงการฟลูอิดิซึ่มบูรณ์แบบหมุนวน สามารถแบ่งเป็น 4 ช่วงประกอบไปด้วย I) ช่วงเบตนิ่ง II) ช่วงฟลูอิดิซึ่มบูรณ์บางส่วน III) ช่วงฟลูอิดิซึ่มบูรณ์พร้อมการหมุนวนบางส่วน และ IV) ช่วงฟลูอิดิซึ่มบูรณ์โดยสมบูรณ์ ในหัวข้อนี้จะขออธิบายส่วนที่มีความแตกต่างจากการฟลูอิดิซึ่มบูรณ์แบบตั้งเดิมนี้นี้

III) ช่วงฟลูอิดิซึ่มบูรณ์พร้อมการหมุนวนบางส่วน

เป็นช่วงที่ $u > u_{mf}$ และเกิดในช่วงความเร็วสั้นๆ [10] พฤติกรรมของเบตช่วงนี้คล้ายกับการฟลูอิดิซึ่มบูรณ์แบบตั้งเดิมแตกต่างที่ลักษณะการเคลื่อนที่ของฟองอากาศ โดยในชั้นบนสุดของเบตมีการเคลื่อนที่แบบฟองอากาศ ในขณะที่ชั้นล่างเบตบริเวณเหนือหัวจ่ายอากาศมีการเกิดฟองอากาศที่มีการเคลื่อนที่แบบหมุนวนในแนวสัมผัสวง (tangential) เมื่อมีการเพิ่มความเร็ว u ฟองอากาศที่จากเดิมหมุนวนในชั้นล่างเบตเริ่มเคลื่อนที่ในชั้นเบตที่สูงขึ้น จนกระทั่งความเร็ว u ถึงความเร็วการฟลูอิดิซึ่มบูรณ์แบบหมุนวนต่ำสุด (minimum velocity of fully swirling-fluidization; u_{msf}) จึงเริ่มเข้าสู่ช่วงฟลูอิดิซึ่มบูรณ์แบบหมุนวนสมบูรณ์



รูปที่ 2.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมเบดต่อความเร็วที่ผ่านหัวจ่ายอากาศของการฟลูอิดซ์แบบหมุนวน [10]

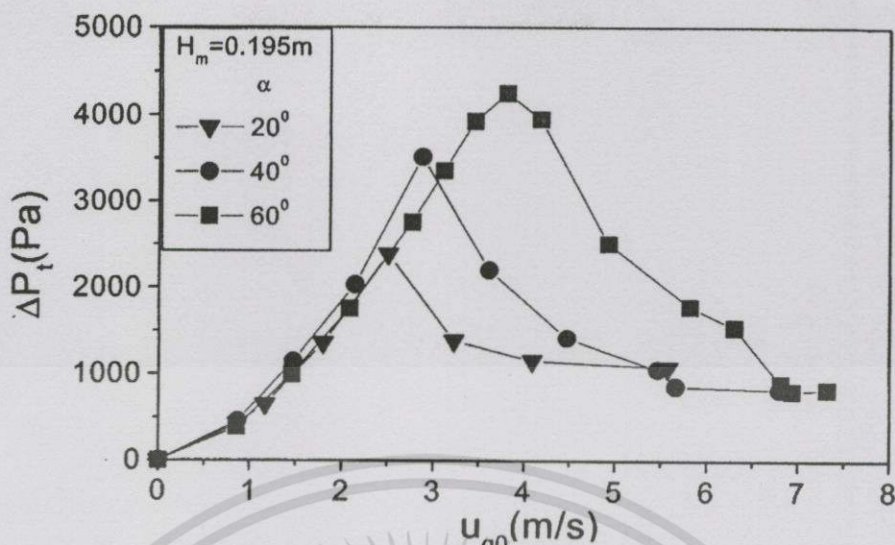
IV) ช่วงฟลูอิดซ์แบบหมุนวนโดยสมบูรณ์

ในช่วงนี้อากาศเบดโดยรวมมีการเคลื่อนที่แบบหมุนวน ที่ $u > u_{msf}$ ความชันของกราฟมีค่าเพิ่มขึ้น ($d(\Delta p)/u > 0$) เนื่องจากลมที่ผ่านหัวจ่ายจ่ายอากาศมีการเสียดสีกับผนังทรงกรวย การหมุนวนของเบดจะเห็นได้ชัดเมื่อความเร็ว u มีค่ามากขึ้น แต่ความเร็วที่มากเกินไปส่งผลให้อากาศเข้าไปในระบบการเผาไหม้มากเกินไปจนทำให้เกิดปัญหาอากาศส่วนเกิน [19]

2.5 อิทธิพลต่างๆที่ส่งผลต่อลักษณะทางอุทกพลศาสตร์

2.5.1 อิทธิพลของมุมกรวย (Effect of cone angle, α) [16]

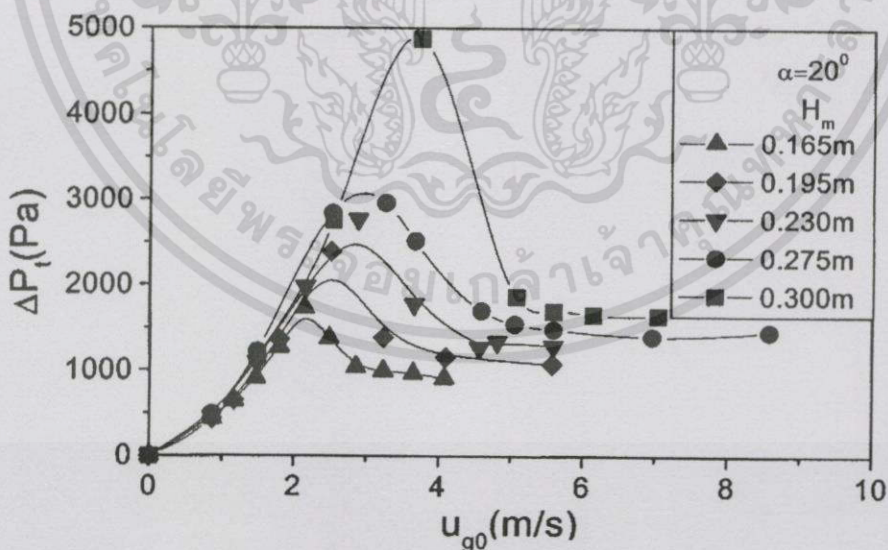
รูปที่ 2.7 แสดงความแตกต่างของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมเบดต่อความเร็วที่ผ่านหัวจ่ายอากาศ ($\Delta p-u$) จากการทดลองโดยใช้ความสูงเบด 0.195 m มีตัวแปรคือองศาของมุมกรวยที่ 20° , 40° และ 60° จากรูปจะเห็นว่าค่าความดันตกคร่อมเบดที่สูงที่สุด (Δp_{max}) ของแต่ละมุมกรวยที่แตกต่างกัน โดย Δp_{max} มีค่าเพิ่มขึ้นตามองศาของมุมกรวยที่มากขึ้น เมื่อความเร็วที่ผ่านหัวจ่ายอากาศมากกว่าความเร็วต่ำสุดของการฟลูอิดซ์สมบูรณ์ ($u > u_{mff}$) ที่มุมกรวย 20° จะคล้ายกับลักษณะการฟลูอิดซ์แบบ Slugging ที่ 40° คล้ายแบบ Bubbling และที่ 60° คล้ายแบบ Spouting



รูปที่ 2.7 อิทธิพลของมุมกรวยต่อการฟลูอิดซ์[16]

2.5.2 อิทธิพลของความสูงเบด (Effect of static bed height, BH) [16]

ความสูงเบดส่งผลต่อลักษณะทางอุทกพลศาสตร์ โดยความสูงเบดที่เพิ่มขึ้นทำให้ u_{mf} และ p_{mf} มีค่าเพิ่มขึ้น (รวมทั้ง u_{mf} และ p_{mf} เพิ่มขึ้น) รูปที่ 2.8 เป็นตัวอย่างความสูงเบดที่ระดับต่างๆโดยใช้มุมกรวย 20° และเบดขนาด 1.81×10^{-3} m พบว่าที่เบดสูง 0.3 m มีค่า p_{mf} มากกว่า เบดสูง 0.165 m อย่างชัดเจน



รูปที่ 2.8 อิทธิพลของความสูงเบดต่อการฟลูอิดซ์[15]

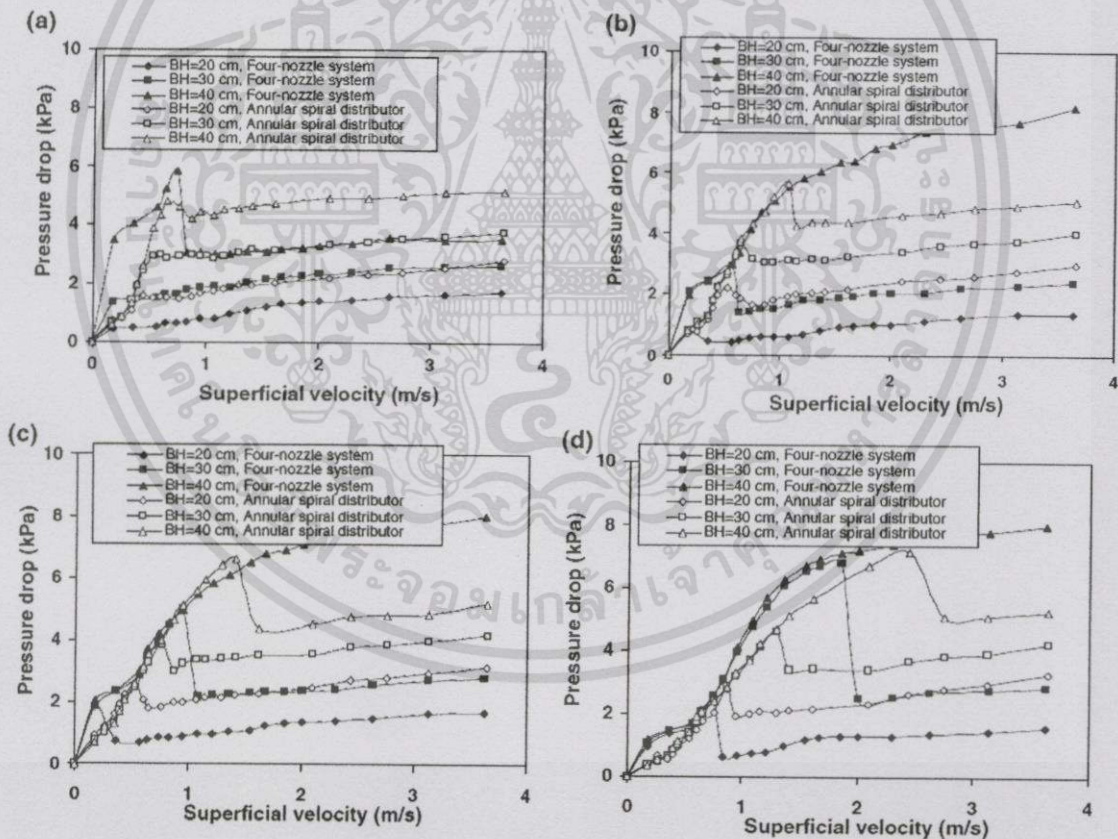
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.3 อิทธิพลของขนาดอนุภาค (Effect of sand particle size, d_p) [6]

รูปที่ 2.9 แสดงผลการศึกษาลักษณะทางอุทกพลศาสตร์ของการฟลูอิดไซในเบตทรงกรวย ในรูปดังกล่าวแสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างของขนาดอนุภาคเบตที่ขนาด 180-300 μm (a), 300-500 μm (b), 500-600 μm (c) และ 850-1180 μm (d) ตามลำดับ โดยยกตัวอย่างจากการจ่ายอากาศผ่านหัวจ่ายอากาศแบบใบพัด และที่เบตสูง 30 cm เปรียบเทียบระหว่างเบตขนาด 300-500 μm และ 500-600 μm (รูปที่ 2.9b-2.9c) พบว่าความเร็วการฟลูอิดไซต่ำสุด (u_{mf}) มีความแตกต่างกัน โดยที่เบตขนาด 300-500 μm u_{mf} อยู่ที่ 0.6 m/s ขณะที่เบตขนาด 500-600 μm u_{mf} อยู่ที่ 0.8 m/s

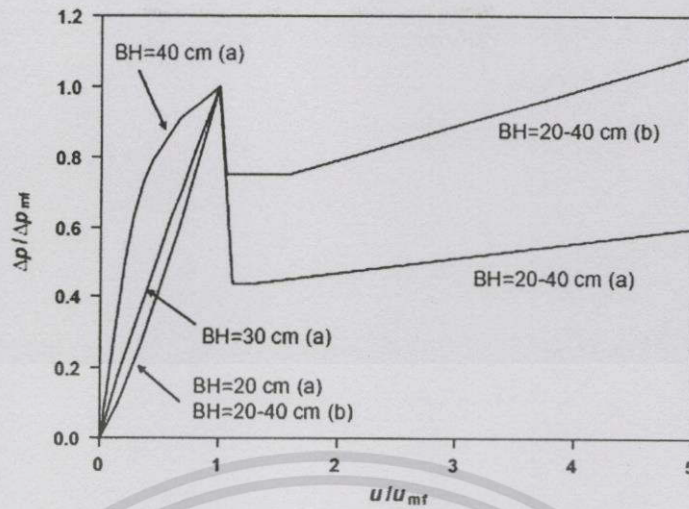
2.5.4 อิทธิพลของหัวจ่ายอากาศ (Effect of air distributors) [6]

หัวจ่ายอากาศเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อลักษณะทางอุทกพลศาสตร์ รูปที่ 2.10 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมเบตสัมผัส ($\Delta p/\Delta p_{mf}$) ต่อความเร็วที่ผ่านหัวจ่ายอากาศสัมผัส (u/u_{mf}) เป็นการสรุปผลการทดลองจากรูปที่ 2.9 เปรียบเทียบลักษณะทางอุทกพลศาสตร์ของหัวจ่ายอากาศ 2 แบบ คือ แบบ 4 หัวฉีด (Four-nozzle) และแบบใบพัด (Annular spiral)



รูปที่ 2.9 อิทธิพลของหัวจ่ายอากาศต่อกราฟ $\Delta p-u$ โดอะแกรมของเบตทรงกรวยที่เบตขนาด

a) 180-300 μm b) 300-500 μm c) 500-600 μm d) 850-1180 μm [6]



รูปที่ 2.10 โมนิกราฟแสดงความแตกต่างของหัวจ่ายอากาศระหว่าง
a) Four-nozzle และ b) Annular spiral [6]

ที่เบตขนาด 300-1180 μm เบตสูง 20-40 cm และมีมุมกรวย 40° พบว่าในช่วงเบตนี้แบบ Four-nozzle มีความชันกราฟที่มากกว่า ที่ช่วงการฟลูอิด์เบตบางส่วน แบบ Annular spiral มีค่า $\Delta p_{mf}/\Delta p_{mf}$ มากกว่าในขณะที่ u_{mf}/u_{mf} น้อยกว่าแบบ four-nozzle ช่วงการฟลูอิด์เบตแบบสมบูรณ annular spiral ให้ช่วงที่กว้างกว่า four-nozzle ($u/u_{mf} \leq u/u_{mf} \leq u/u_{mf}$) ที่ช่วงการฟลูอิด์เบตแบบหมุนวน หัวจ่ายอากาศทั้ง 2 ชนิด มีแนวโน้มความชันของกราฟคล้ายกัน

2.6 การหมุนวน (Swirling)

Binod Sreenivasan et al. [20] ได้ทำการศึกษาการหมุนวนของเบตที่เกิดขึ้นในเตาแบบ swirling fluidized-bed โดยใช้หัวจ่ายอากาศแบบ 60 ใบ มุมเอียง 12° ในขณะที่เพิ่มอัตราการไหลของอากาศจะเจอช่วงต่างๆดังนี้

1. Bubbling

2. Wave motion ในช่วงแรกเริ่ม จะเกิดสุมขึ้นตามเบต เบตบางส่วนจะหมุนไปตามลักษณะของเตา ในขณะที่บางส่วนยังอยู่นิ่งอยู่ จากนั้นเขตการหมุนวนจะเริ่มขยายตัวขึ้นและเริ่มพาส่วนที่อยู่นิ่งเคลื่อนที่ไปด้วย จนในที่สุดส่วนที่อยู่นิ่งก็ค่อยลดลงเรื่อยๆจนหายไปที่สุดในที่สุด

3. Two-layer fluidization ในส่วนนี้จะแบ่งออกเป็นสองชั้น ชั้นบนกับชั้นล่าง ชั้นล่างจะเกิดการหมุนวนแต่ขณะที่ชั้นบนจะเกิดเป็นbubbling เนื่องจากความเร็วของอากาศจะเสียไปกับการเชื่อมชั้นทั้งสอง

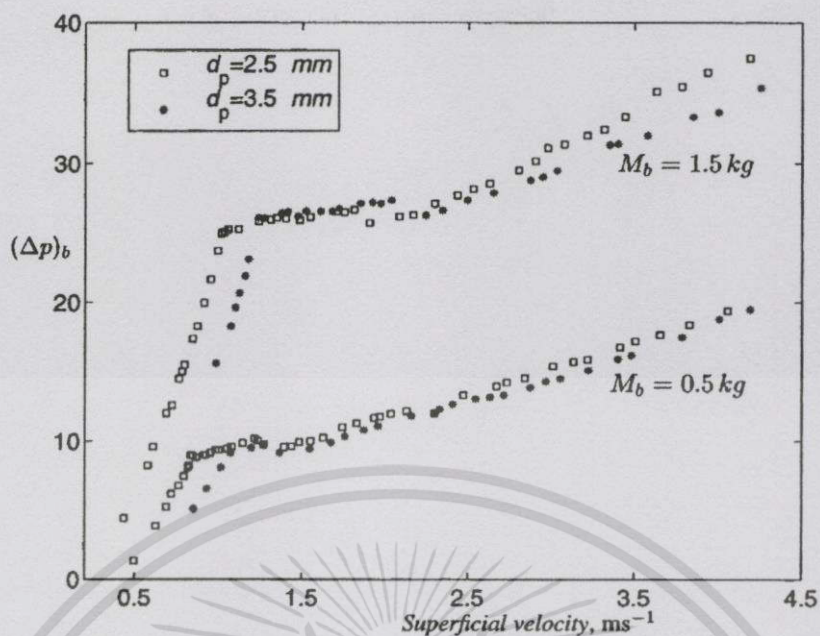
4. Stable swirling ในการเพิ่มความเร็วของอากาศ ช่วงของการหมุนวนจะขยายกว้างขึ้นและเกิดการหมุนวนอย่างเต็มที่ ในส่วนของการหมุนวน เบนจะมีลักษณะการหมุนคล้ายกับการหมุนของของไหล ความสูงของเบนที่ผนังเตาจะสูงกว่าความสูงของเบนในส่วนตรงกลาง ในการหมุนของของไหลในเตา มวลทั้งหมดจะถูกบังคับให้หมุนด้วยความเร็วเชิงมุมเท่ากัน เมื่อความเร็วของอนุภาคสูงเกิดแรงเหวี่ยงเต็มที่ หัวจ่ายอากาศจะทำหน้าที่ลดความดันตกคร่อมเบน (Bed pressure drop) ในรูปที่ 2.11 แสดงค่าความดันตกคร่อม (Δp) ที่วัดได้ สำหรับสองอนุภาคที่มีขนาดแตกต่างกัน โดยอนุภาคที่มีขนาดเล็ก ความหนืดและการสูญเสียพลังงานจลน์จะมาก ด้วยเหตุนี้ความดันตกคร่อมในช่วงนี้จึงสูง เมื่อพิจารณาจากช่วงของการเกิด Wave motion ค่าความดันตกคร่อมจะไม่คงที่ เนื่องจากที่ความสูงของเบนจะขึ้นและลดลงอย่างต่อเนื่องระหว่างค่าต่ำสุดและค่าสูงสุด ในโซนนี้จะมีค่าไม่แน่นอนระหว่าง bubbling และ stable swirling จึงไม่สามารถใช้เป็นแบบจำลองได้ ในช่วงของการหมุนวนแบบสมบูรณ์ (fully swirling) จะเป็นช่วงหลักที่เราสนใจ ค่าความดันตกคร่อมจะเพิ่มขึ้นด้วยอัตราการไหลของอากาศซึ่งหมายความว่า การเพิ่มน้ำหนักของเบนต้องมีการลดแรงลงด้วยการเพิ่มความเร็ว โดยแรงเนื่องจากแรงเสียดทานที่ผนังเตาจากแรงเหวี่ยงของเบนที่กระทำกับผนังเตา แรงนี้จะเพิ่มขึ้นด้วยความเร็วและแรงที่ต้านการเคลื่อนที่ขึ้นของอนุภาคในระหว่างเบนมีการขยายตัว จากข้อมูลข้างต้นจึงใช้ความดันตกคร่อมในช่วง swirling ในการใช้งาน

รูปที่ 2.11 แสดงผลการทดลองการฟลูอิดซ์เบนแบบหมุนวน โดยใช้เบนคือ pvc ทรงกลมขนาด 2.5 มิลลิเมตร และ 3.5 มิลลิเมตร เปรียบเทียบที่เบนหนัก (M_b) 0.5 กิโลกรัม และ 1.5 กิโลกรัม พบว่าน้ำหนักเบนมีผลต่อกราฟ $\Delta p-u$ ไดอะแกรม มากกว่าขนาดเบน โดยที่เบนหนัก 0.5 กิโลกรัม u_{msf} เท่ากับ 2.12 m/s ขณะที่เบนหนัก 1.5 กิโลกรัม u_{msf} เท่ากับ 3.03 กิโลกรัม

2.7 รูปแบบหัวจ่ายอากาศที่ทำให้เกิดการหมุน

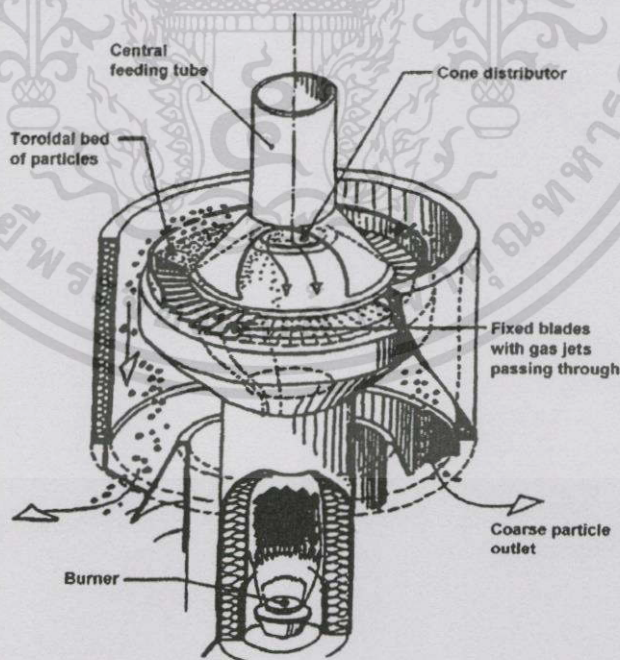
2.7.1 เตา “Torbed”

J.Shu, et al. (2000) [21] ได้ศึกษาเรื่องเตา Torbed นับเป็นการบุกเบิกการใช้เทคนิค การแยกชั้นอนุภาคของเบนด้วยก๊าซโดยใช้หัวจ่ายอากาศแบบใบมีด จ่ายอากาศให้แก่เบนจนอนุภาคเบนเกิดการฟลูอิดซ์ เริ่มจากจ่ายอากาศจากด้านล่างของเตาโดยใช้หัวจ่ายอากาศ ทำให้เบนซึ่งมีลักษณะเป็น



รูปที่ 2.11 ผลการทดลองการฟลูอิด์เบดแบบหมุนวน, ความดันตกคร่อมเบด
ในหน่วยมิลลิเมตรน้ำ [20]

ของแข็งมีพฤติกรรมเคลื่อนที่คล้ายของไหล กระจายอากาศไปเรื่อยๆจนทลายเกิดการฟุ้งกระจายภายในเตาฟลูอิด์ (ความเร็วลมนั้นเป็นตัวทำให้ของแข็งในทอเกิดการลอยตัวอย่างอิสระจนเป็นเหมือนของไหล) จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาฟลูอิด์ได้ดีขึ้นซึ่งจะทำให้เกิดการเผาไหม้ได้อย่างสมบูรณ์ ดังรูปที่ 2.12



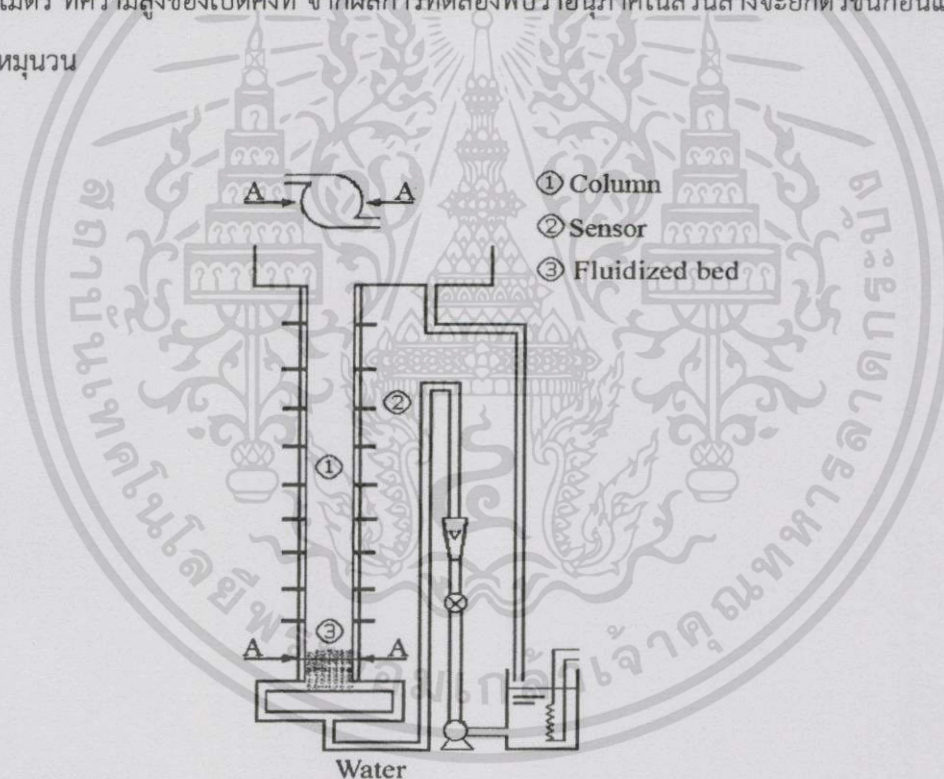
รูปที่ 2.12 เตา Torbed [21]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลที่ได้คือเกิดการไหลสี่แบบคือ (1) fixed-bed, (2) bubbling fluidization, (3) turbulent fluidized-bed และ (4) fast fluidized-bed regimes จากการทดลองแบบไม่มีการเผาไหม้ผ่านเตา Torbed โดยใช้เบตคือลูกแก้ว อะลูมินาขนาดขนาดละเอียด และอะลูมินาขนาดใหญ่ จำนวน 1 กิโลกรัม พบความเร็วการฟลูอิดซ์ต่ำสุดคือ 0.5, 0.18 และ 1.1 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ

2.7.2 ระบบหัวจ่ายสองหัว

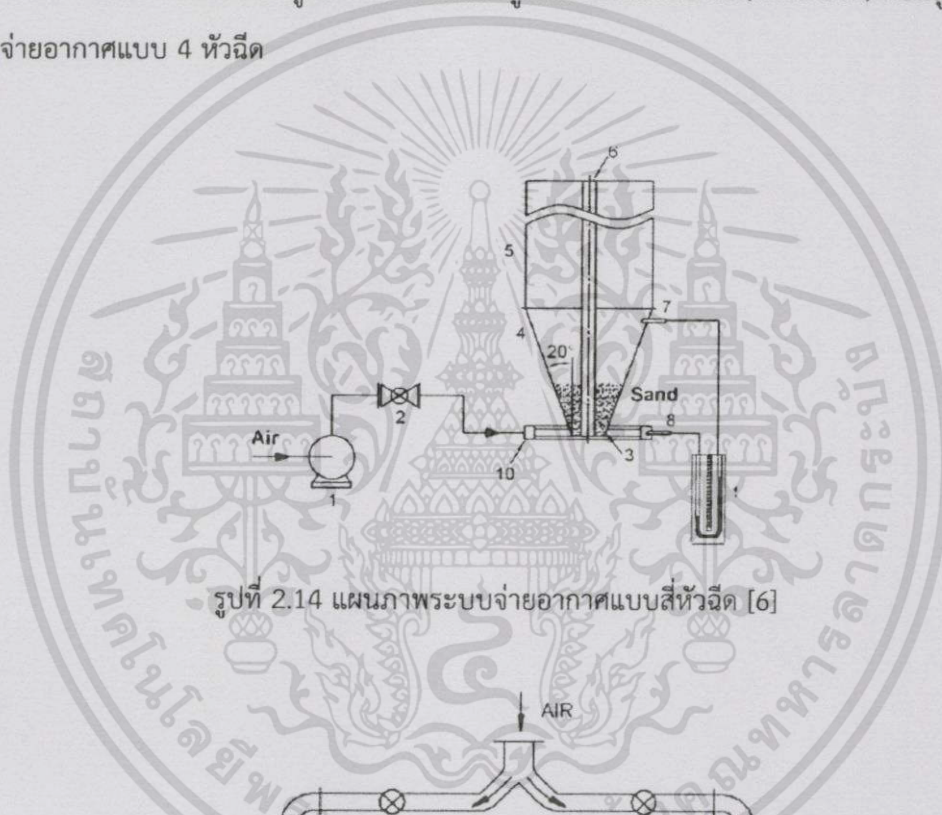
Bando, et al. (2000) [22] ได้ทำการศึกษาในเรื่องการไหลและการถ่ายเทความร้อนในการฟลูอิดซ์เบตแบบหมุนวน แบบใช้ของแข็ง-ของเหลว ซึ่งของเหลวที่ใช้คือน้ำ โดยใช้ระบบสองหัวฉีดในการจ่ายของเหลวเพื่อให้เกิดการหมุนวน จากรูปที่ 2.13 แสดงให้เห็นรายละเอียดการออกแบบเตากับการฟลูอิดซ์เบต ตลอดจนการจ่ายน้ำ พฤติกรรมและลักษณะของการฟลูอิดซ์แบบหมุนวนเมื่อเทียบกับการฟลูอิดซ์แบบปกติโดยใช้ขนาดของอนุภาค 0.1 และ 0.2 มิลลิเมตรและใช้ความสูงของเบต 0.1 และ 0.2 เมตร ที่ความสูงของเบตคงที่ จากผลการทดลองพบว่าอนุภาคในส่วนล่างจะยกตัวขึ้นก่อนแล้วจึงเกิดการหมุนวน



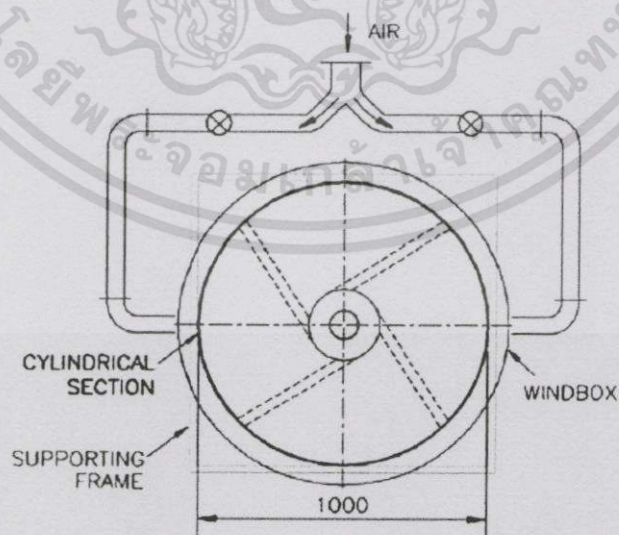
รูปที่ 2.13 การฟลูอิดซ์แบบหมุนวนโดยการจ่ายของเหลวในส่วนล่างของเบตในแนวสัมผัส [22]

2.7.3 ระบบหั่วจ่ายอากาศ 4 หัวฉีด

R.keawklum (2009) [6] ทำการทดลองการฟลูอิดิซ์แบบหมุนวนในเบดทรงกรวย โดยใช้หั่วจ่ายอากาศแบบ 4 หัวฉีด เบดที่ใช้ในการทดลองคือทรายขนาด 180-300, 300-500, 500-600 และ 850-1180 ไมโครเมตร ที่เบดสูง 20, 30 และ 40 เซนติเมตร พบช่วงการไหลดังนี้ (1) Fixed-bed (2) Partially fluidized-bed (3) Fully fluidized-bed (4) Fully swirling fluidized-bed รูปที่ 2.14 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง โดยเตาส่วนล่างเป็นรูปทรงกรวยตัด และมีมุมกรวย 40° เตาด้านบนเป็นทรงกระบอกติดกับส่วนบนของเตาทรงกรวย มีความสูง 1.5 เมตร รูปที่ 2.15 แสดงลักษณะหั่วจ่ายอากาศแบบ 4 หัวฉีด ลมถูกส่งผ่านท่อลมและถูกกักเก็บโดยกล่องลม(wind box) ก่อนถูกจ่ายเข้าสู่หั่วจ่ายอากาศแบบ 4 หัวฉีด



รูปที่ 2.14 แผนภาพระบบจ่ายอากาศแบบสี่หัวฉีด [6]

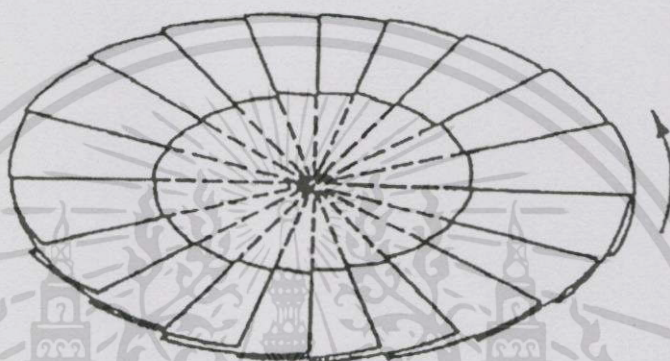


รูปที่ 2.15 แผนภาพระบบการจ่ายลมสองหัวต่อหัวฉีด [6]

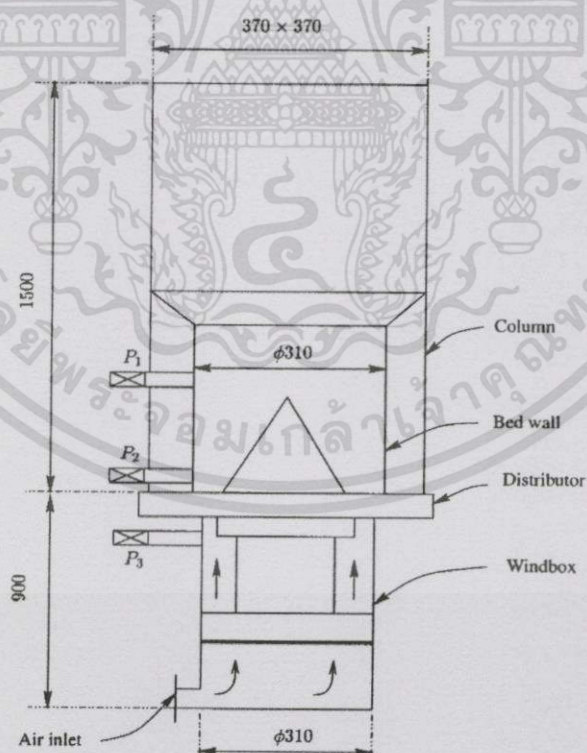
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.4 หัวจ่ายอากาศแบบใบพัด

Binod Sreenivasan et al. [20] ศึกษาและทดสอบการไหลแบบหมุนวนของเบดโดยใช้หัวจ่ายอากาศที่มีลักษณะคล้ายใบพัด มีใบเอียง 12° จำนวน 60 ใบ และมีการติดตั้งกรวยตรงกลางหัวจ่ายอากาศเพื่อป้องกันการเกิด Dead zone รูปที่ 2.16 แสดงการจัดเรียงใบของหัวจ่ายอากาศแบบใบพัดวางซ้อนกัน และมีช่องว่างพอให้เกิดการบังคับลมให้หมุนในทิศทวนเข็มนาฬิกา รูปที่ 2.17 แสดงรายละเอียดการติดตั้งอุปกรณ์ทดลองฟลูอิดส์เบดแบบหมุนวน โดยใช้หัวจ่ายอากาศแบบใบพัด ผังนี้จัดทำจากแก้วทรงกระบอก ติดตั้งบริเวณเหนือหัวจ่ายอากาศ



รูปที่ 2.16 หัวจ่ายอากาศแบบใบพัด โดยอากาศไหลในทิศทวนเข็มนาฬิกา [20]



รูปที่ 2.17 อุปกรณ์ทดลองที่ทำให้เกิดการฟลูอิดส์แบบหมุนวน (มิลลิเมตร) [20]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

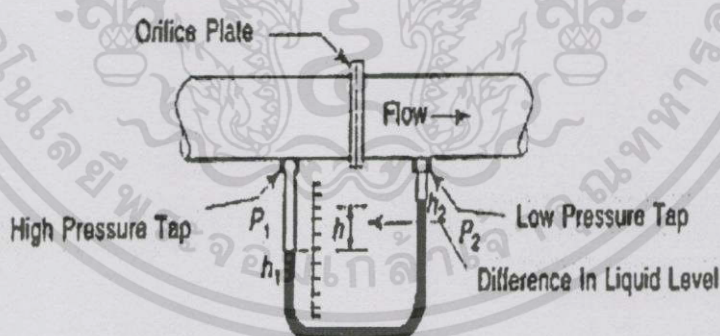
2.8 ทฤษฎีมาโนมิเตอร์ (Manometer) [23]

มาโนมิเตอร์เป็นอุปกรณ์วัดความดันเกจอย่างง่ายที่สุด โดยวัดที่ค่าความดันต่ำๆ มาโนมิเตอร์อาศัยหลักการ สมดุลความดัน ระหว่างน้ำหนักของของเหลวภายในหลอดทั้ง 2 ข้าง ดังนั้นการตอบสนองการวัดของมาโนมิเตอร์ ขึ้นอยู่กับการเคลื่อนไหวของของเหลวในหลอดแก้ว มาโนมิเตอร์มีด้วยกันหลายรูปแบบ แต่ละแบบมีข้อดี ข้อเสียและการใช้งานที่แตกต่างกัน ดังต่อไปนี้จะแสดงเฉพาะรายละเอียดของมาโนมิเตอร์รูปตัวยู

2.8.1 U-Tube Manometer

U-Tube Manometer เป็นมาโนมิเตอร์ที่มีรูปแบบง่ายที่สุดในบรรดาแบบทั้งหลาย ลักษณะโครงสร้าง เป็นหลอดแก้วรูปตัว U และต้องเติมของเหลวเข้าไป ซึ่งที่นิยมใช้ที่สุดคือ น้ำ, ปรอท เนื่องจากว่าทั้ง 2 ชนิดมีค่า น้ำหนักจำเพาะ (Specific weight) คงที่เมื่ออุณหภูมิจะเปลี่ยนแปลงก็ตาม โดยอาจปล่อยปลายด้านหนึ่งไว้กับบรรยากาศและปลายด้านหนึ่งต่อเข้ากับจุดวัดความดัน หรืออาจต่อปลายทั้งสองเข้ากับจุดวัดความดันก็ได้

1. หลักการในกรณีที่ต้อง U-Tube เข้ากับจุดวัดความดันทั้ง 2 ด้าน แสดงดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 การต่อ U-Tube เข้ากับจุดวัดความดันทั้ง 2 ด้าน [23]

อธิบายได้ด้วยสมการ (2.1) และ (2.2)

$$P_1 - P_2 = (\rho - \rho_1) (h_1 - h_2) g \quad (2.1)$$

$$\Delta P = (\rho - \rho_1) g h \quad (2.2)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของของเหลวใน U-Tube [m^3/kg]

ρ_1 คือ ความหนาแน่นของของเหลวในท่อ (Main Pipe) [m^3/kg]

h คือ ความสูงแตกต่างที่เกิดจากความดันทั้ง 2 ด้านของมาโนมิเตอร์ [m]

g คือ แรงโน้มถ่วงของโลก [m/s^2]

2. ในกรณีที่ต่อ U-Tube เข้ากับจุดวัดความดัน 1 ด้าน อีกด้านหนึ่งปล่อยอิสระกับบรรยากาศ แสดงดังรูปที่ 2.19

อธิบายได้ด้วยสมการ (2.3) และ (2.4)

$$P_1 - P_2 = (\rho - \rho_1) (h_1 - h_2) g \quad (2.3)$$

$$\Delta P = (\rho - \rho_1) g \Delta h \quad (2.4)$$

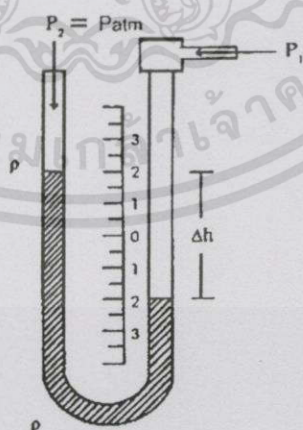
เมื่อ P_2 คือ ความดันบรรยากาศ [Pa]

ρ คือ ความหนาแน่นของของเหลวใน U-Tube [m^3/kg]

ρ_1 คือ ความหนาแน่นของอากาศ [m^3/kg]

และเมื่อเทียบ ρ กับ ρ_1 แล้ว ρ_1 มีค่าน้อยมาก จึงให้เท่ากับ 0

$$\text{ดังนั้น} \quad \Delta P = \rho g \Delta h \quad (2.5)$$



รูปที่ 2.19 การต่อ U-Tube เข้ากับจุดวัดความดัน 1 ด้าน [23]

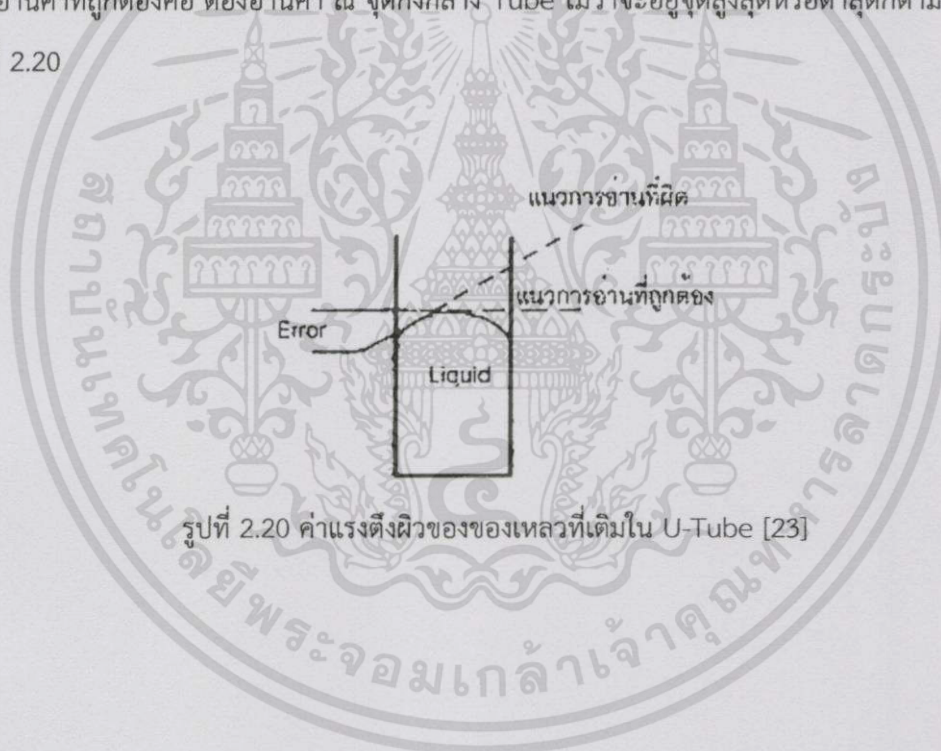
จากสมการจะพบว่า ΔP แปรผันตรงกับค่า Δh และค่า ρ ดังนั้นสมการออกแบบหรือเลือกใช้งาน มาโนมิเตอร์ จึงต้องคำนึงถึงตัวแปร 2 ตัว เป็นหลัก เช่น หลอดแก้วที่มีความสูง 1 เมตร ใช้ของเหลวที่เป็นน้ำ จะสามารถวัดความดันได้ในย่าน 0-98.066 mbar หากใช้ของเหลวเป็นปรอท จะสามารถวัดความดันได้ในย่าน 0-1329 mbar

2.8.2 คุณลักษณะที่สำคัญของ U-Tube Manometer

1. มีค่าคลาดเคลื่อน ประมาณ 10.3% ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวิธีการอ่านค่าด้วย โดยอาจมีค่าความผิดพลาดที่เกิดจากผู้ทำการทดลอง

2. ค่าความบริสุทธิ์ของของเหลว, อุณหภูมิ, ความดันบรรยากาศ ที่เปลี่ยนแปลงไป ต่างส่งผลต่อค่าความหนาแน่นของของไหล จึงต้องนำมาคำนวณเพื่อชดเชยค่าความคลาดเคลื่อนด้วย

3. ผลของค่าแรงตึงผิวของของเหลวที่เติมใน U-Tube จะทำให้การอ่านค่าผิดพลาดได้ การอ่านค่าที่ถูกต้องคือ ต้องอ่านค่า ณ จุดกึ่งกลาง Tube ไม่ว่าจะอยู่จุดสูงสุดหรือต่ำสุดก็ตาม แสดงดังรูปที่ 2.20



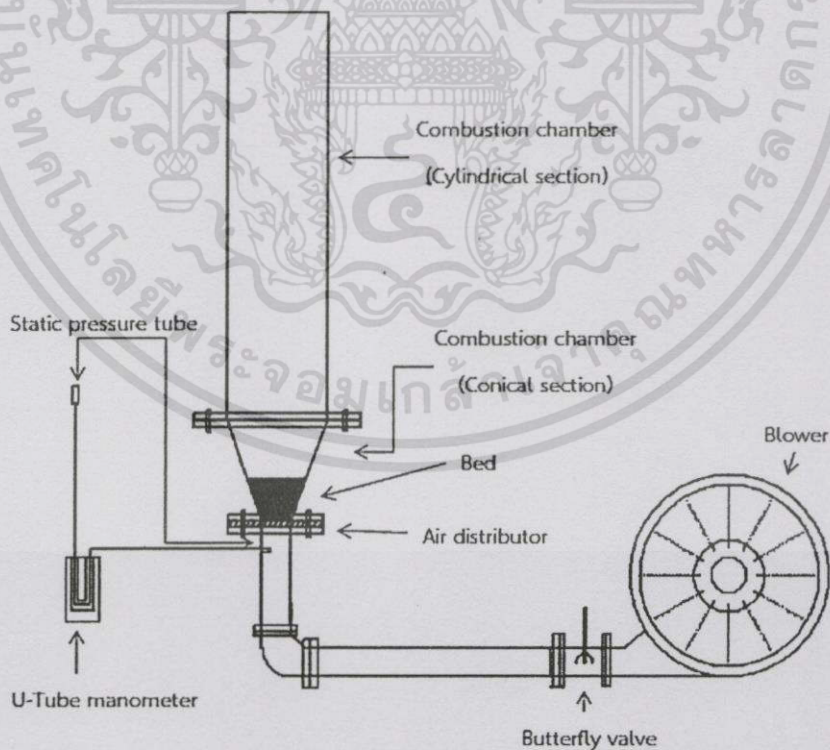
รูปที่ 2.20 ค่าแรงตึงผิวของของเหลวที่เติมใน U-Tube [23]

ขั้นตอนการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงานแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ส่วนแรกเป็นการติดตั้งอุปกรณ์ทดลองเตาฟลูอิดไคซ์เบดแบบไม่มีการเผาไหม้ ส่วนที่สองคือการออกแบบหัวจ่ายอากาศแบบหมุนวนของอุปกรณ์ทดลองเตาฟลูอิดไคซ์เบด ส่วนที่สามเป็นการจัดเตรียมทรายที่ใช้เป็นเบด และเศษฟางข้าว และส่วนสุดท้ายคือขั้นตอนการทดลอง ซึ่งจะกล่าวในรายละเอียดต่อไป

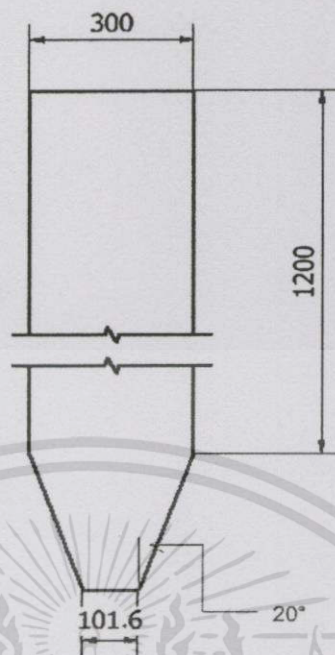
3.1 การติดตั้งอุปกรณ์ทดลองฟลูอิดไคซ์เบดแบบไม่มีการเผาไหม้

ในการสร้างอุปกรณ์ทดลองเตาฟลูอิดไคซ์เบดแบบไม่มีการเผาไหม้ มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษาพฤติกรรมและลักษณะทางอุทกพลศาสตร์ของวัสดุเบด โดยมีส่วนประกอบสำคัญอยู่ 4 ส่วนประกอบไปด้วย ชุดทดลองฟลูอิดไคซ์เบด พัดลมป้อนอากาศ อุปกรณ์วัดค่า และหัวจ่ายอากาศ รูปที่ 3.1 แสดงรายละเอียดของการติดตั้งอุปกรณ์ทดลองเตาฟลูอิดไคซ์เบด มีส่วนประกอบดังนี้



รูปที่ 3.1 การติดตั้งอุปกรณ์ทดลองเตาฟลูอิดไคซ์เบด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 ชุดทดลองการฟลูอิดซ์เบด

3.1.1 ชุดทดลองการฟลูอิดซ์เบด

ชุดทดลองการฟลูอิดซ์เบดทำจากอะคริลิกใสหนา 3 มิลลิเมตร เนื่องจากต้องการให้เห็นพฤติกรรมของเบดขณะทำการทดลอง โดยชุดทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่อยู่ด้านล่างสำหรับการบรรจุเบด เป็นรูปกรวยตัดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กสุด 10 เซนติเมตร และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่สุด 30 เซนติเมตร โดยมีมุมเอียง 20 องศา นับจากแกนตั้ง มีความสูง 30 เซนติเมตร และส่วนที่ติดอยู่ด้านบนเป็นรูปทรงกระบอก มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในในเตาเผา 30 เซนติเมตร ความสูง 1.2 เมตร ความสูงของชุดทดลองทั้งหมด 1.5 เมตร รายละเอียดของชุดทดลองการฟลูอิดซ์เบด แสดงดังรูปที่ 3.2

3.1.2 พัดลมป้อนอากาศ

การเลือกใช้ระบบป้อนอากาศต้องคำนึงถึงความดันลดลงของระบบเตาทั้งหมด ซึ่งประกอบด้วย ความดันสูญเสียของหัวจ่ายอากาศ ความดันสูญเสียของเบด และความดันสูญเสียจากระบบท่อต่างๆ จึงใช้พัดลม (Blower) ที่สามารถทำความดันและมีปริมาณลมที่กำหนดระบบป้อนอากาศได้ โดยการใช้พัดลมเป่าเป็นเครื่องมือ ใช้ป้อนอากาศป้อนเข้าทางด้านล่างของเตาเผา มอเตอร์ที่ใช้ขับพัดลมเป็นชนิด 3 เฟส ขนาด 25 แรงม้า อัตราการไหล 1400 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที และมีความเร็ว 2900 รอบต่อนาที

3.1.3 อุปกรณ์วัดค่า

การวัดค่าความดันตกคร่อมเบต(Δp) และความเร็วที่ผ่านหัวจ่ายอากาศ(u) เพื่อนำมาเขียนกราฟ $\Delta p-u$ โดอะแกรม ในขณะการทดลอง ความดันตกคร่อมเบตที่ใช้คือความดันสถิต โดยด้านหนึ่งติดกับผิวท่อลม ขณะที่อีกด้านเป็นปลายเปิด ถูกวัดโดยใช้ U-tube มาโนมิเตอร์ และใช้มาตรวัดความเร็วรุ่น testo-435 ในการวัดความเร็วลม

3.1.4 หัวจ่ายอากาศ

ในการออกแบบหัวจ่ายอากาศ ตามวัตถุประสงค์เพื่อให้เป็นหัวจ่ายอากาศที่สามารถจ่ายอากาศสม่ำเสมอ มีความดันตกคร่อมต่ำ ลักษณะหลักของหัวจ่ายอากาศที่ทำการออกแบบ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว มีขอบเขตเป็นรูปวงกลม และมีกรวยติดอยู่กลางหัวจ่ายอากาศเพื่อป้องกันการเกิดปัญหาทรายกอง(Dead zone)ระหว่างทำการทดลอง โดยหัวจ่ายอากาศติดอยู่เหนือท่อส่งลม มีหน้าแปลนยึดระหว่างท่อลมและเตาทรงกรวยตัด โดยหัวจ่ายอากาศสามารถถอดออกจากระบบได้เพื่อให้สามารถปรับปรุงและพัฒนาหัวจ่ายอากาศได้ต่อไป

สำหรับท่อส่งลมเข้าหัวจ่ายอากาศ ประกอบด้วยท่อลมหลัก ท่อข้อต่อ 90 องศา และท่อตรง ซึ่งท่อลมหลักเป็นท่อเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว มีความยาว 1.7 เมตร ต่อจากพัดลมเป่าอากาศเข้ามายังท่อส่งลมแล้วผ่านข้อต่อ 90 องศา เข้าท่อส่งลมแนวตั้งไปยังหัวจ่ายอากาศ(ดังรูปที่ 3.1)

3.2 การออกแบบหัวจ่ายอากาศแบบหมุนวน

หัวจ่ายอากาศที่ทำการออกแบบมีลักษณะต่างกัน ซึ่งในการศึกษาทดลองครั้งนี้ ทำการออกแบบหัวจ่ายอากาศทั้งหมด 3 แบบ เพื่อต้องการทราบว่าหัวจ่ายอากาศแต่ละแบบมีความแตกต่างกันอย่างไร และแบบใดเหมาะสมในการใช้งาน โดยขอเรียกชื่อหัวจ่ายอากาศทั้ง 3 แบบ ประกอบไปด้วย หัวจ่ายอากาศแบบที่ 1(รูปที่ 3.3) หัวจ่ายอากาศแบบที่ 2 (รูปที่ 3.4) และหัวจ่ายอากาศแบบที่ 3 (รูปที่ 3.5) รายละเอียดเพิ่มเติมศึกษาได้ที่ ภาคผนวก ก

3.2.1 หัวจ่ายอากาศแบบที่ 1

หัวจ่ายอากาศแบบที่ 1 เป็นหัวจ่ายอากาศแบบแรกที่ทำกรออกแบบและสร้างขึ้น จากแนวความคิดที่ต้องการการออกแบบที่ไม่ซับซ้อน รูปที่ 3.3 แสดงลักษณะหัวจ่ายอากาศแบบที่ 1 โดยหัวจ่ายอากาศแบบที่ 1 มีลักษณะเป็นแผ่นกลมหนา 15 มิลลิเมตร เจาะรูเอียง 45° ทัวทั้งแผ่น แบ่งเป็น



รูปที่ 3.3 การออกแบบหัวจ่ายอากาศแบบที่ 1 (3 มิติ)

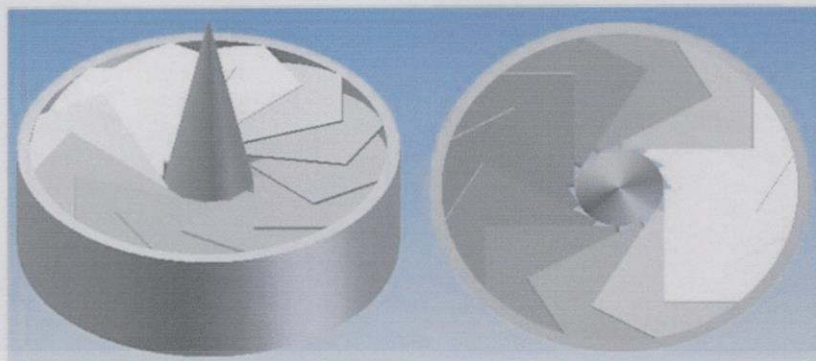
4 ชั้นจากแกนกลาง ชั้นในสุด มีขนาดรู 5.5 มิลลิเมตร จำนวน 12 รู ชั้นที่สองขนาด 7.5 มิลลิเมตร จำนวน 12 รู ชั้นที่สามขนาด 6.2 มิลลิเมตร จำนวน 24 รู และชั้นนอกสุดขนาด 5.5 มิลลิเมตร

3.3.2 หัวจ่ายอากาศแบบที่ 2

หัวจ่ายอากาศแบบที่ 2 ออกแบบเพื่อต้องการศึกษาลักษณะทางอุทกพลศาสตร์ และพฤติกรรมเบด หากทำการจ่ายอากาศจากด้านข้าง รูปที่ 3.4 แสดงลักษณะหัวจ่ายอากาศแบบที่ 2 โดยลมเคลื่อนที่จากด้านล่างเข้าสู่พื้นที่ว่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 43 มิลลิเมตร สูง 30 มิลลิเมตร แล้วกระจายออกด้านข้างที่มีลักษณะเป็นรูเอียงศูนย์ มีรูขนาด 7.5 มิลลิเมตรหนา 10 มิลลิเมตร จำนวนสองชั้นซ้อนกัน ชั้นละ 10 รู



รูปที่ 3.4 การออกแบบหัวจ่ายอากาศแบบที่ 2 (3 มิติ)



รูปที่ 3.5 การออกแบบหัวจ่ายอากาศแบบที่ 3 (3 มิติ)

3.3.3 หัวจ่ายอากาศแบบที่ 3

หัวจ่ายอากาศแบบที่ 3 มีลักษณะเป็นใบพัด โดยแต่ละใบทำจากเหล็กแผ่นยาว 70 มิลลิเมตรหนา 1 มิลลิเมตร นำมาตัดให้มีมุมเอียง 15° จำนวน 12 ใบ ติดรอบกรวย ใบพัดถูกรอบโดยท่อทรงกระบอกขนาด 4 นิ้ว สูง 30 มิลลิเมตร รูปที่ 3.5 แสดงลักษณะหัวจ่ายอากาศแบบที่ 3 ลมจ่ายเข้าทางด้านล่างหัวจ่ายอากาศ และถูกรีดผ่านช่องว่างระหว่างใบที่ติดกัน ทำให้เกิดลมที่มีลักษณะเป็นแผ่นเคลื่อนที่รอบกรวยในทิศทางเดียวกัน

3.3 การจัดเตรียมทรายที่ใช้เป็นเบดและฟางข้าว

เบดที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้คือทรายที่มีความหนาแน่น 2650 kg/m^3 [24] โดยประมาณ ขนาดที่ใช้ทำการศึกษาทั้งหมด 3 ขนาด ประกอบไปด้วยขนาด 300-500, 500-600 และ 850-1180 ไมโครเมตร (แสดงดังรูปที่ 3.6) สามารถแบ่งตามการจัดหมวดหมู่อนุภาคของ Geldart



รูปที่ 3.6 ลักษณะของทรายขนาด 300-500 μm , 500-600 μm และ 850-1180 μm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของเบด

วัสดุ	ขนาดอนุภาค (d_p , μm)	ความหนาแน่น (ρ_p , kg/m^3)	ความสูงเบด (cm)
ทราย	300-500	2650	5,10,15
	500-600		5,10,15
	850-1180		5,10,15

ตรงกับกลุ่ม B และ D ความสูงเบดที่ใช้ในการศึกษาคือ 5, 10 และ 15 เซนติเมตร คุณสมบัติของทราย แสดงดังตารางที่ 3.1

เบดอีกชนิดที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้คือทรายผสมกับซีเมนต์ วัสดุซีเมนต์ที่ทำการผสมกับทรายในการทดลองนี้คือฟางข้าว โดยการนำฟางข้าวมาย่อยผ่าน เครื่องย่อยจนได้ขนาดโดยเฉลี่ย 1-2 เซนติเมตร (รูปที่ 3.7) ความหนาแน่นของฟางข้าวคือ 120 kg/m^3 [25] อัตราส่วนของฟางข้าวที่ใช้ผสมกับทรายคือ 0, 0.05 และ 0.1 ตามลำดับ คุณสมบัติของฟางข้าว แสดงดังตารางที่ 3.2

3.4 ขั้นตอนการทดลอง

การทดลองเพื่อศึกษาลักษณะทางอุทกพลศาสตร์ของการฟลูอิดซ์ในเบดทรงกรวยของ หัวจ่ายอากาศแต่ละแบบ การทดลองทั้งหมดใช้เบดเป็นทรายขนาด 300-500, 500-600 และ



รูปที่ 3.7 ฟางข้าวที่ทำการย่อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของฟางข้าว

วัสดุ	อัตราส่วนมวล	ความหนาแน่น (ρ_p , kg/m ³)	ความสูงเบด (cm)
ฟางข้าว	0	120	5,10,15
	0.05		5,10,15
	0.1		5,10,15

850-1180 ไมโครเมตร และทุกการทดลองจะทดลองที่เบดสูง 5, 10 และ 15 เซนติเมตร การทดลองที่ใช้เบดทรายผสมชีวมวลทดลองเฉพาะหั่วจ่ายอากาศแบบที่ 3 เท่านั้น โดยมีอัตราส่วนมวล 0, 0.05 และ 0.1 จากนั้นจึงทำการเก็บค่าจากความดันตกคร่อมเบด และความเร็วที่ผ่านหั่วจ่ายอากาศขณะทดลองแล้วนำมาสร้างกราฟ $\Delta p-u$ ในลำดับต่อไป

ตารางที่ 3.3 แสดงการรายละเอียดการทดลองหาความดันตกคร่อมเบดของหั่วจ่ายอากาศทั้ง 3 แบบ โดยใช้ทรายขนาด 300-500, 500-600 และ 850-1180 ไมโครเมตร ที่ความสูงเบด 5, 10 และ 15 เซนติเมตร เพื่อศึกษาว่าหั่วจ่ายอากาศที่ทำการออกแบบลักษณะใดทำให้เกิดการฟลูอิดซ์แบบหมุนวนได้ดีที่สุด

ตารางที่ 3.4 แสดงรายละเอียดการผสมเบดระหว่างทรายและฟางข้าวที่สัดส่วนต่างๆ คือ 0 (ทรายเพียงอย่างเดียว), 0.05 (ทราย 95% ฟางข้าว 5% โดยน้ำหนัก) และ 0.1 (ทราย 90% ฟางข้าว 10%) โดยใช้ทรายทั้ง 3 ขนาด 3 ความสูง และใช้หั่วกระจายลมแบบที่ 3 ในการทดลองเท่านั้น

ตารางที่ 3.3 ขั้นตอนการทดลองโดยใช้ทรายเป็นเบด

ชนิดหั่วจ่ายอากาศ	ขนาดทราย (μm)	ความสูงเบด (cm)
1	300-500, 500-600 และ 850-1180	5
2		10
3		15

ตารางที่ 3.4 การผสมเบต (ทรายกับฟางข้าว)

สัดส่วนชีวมวล	ขนาดทราย (μm)	ความสูงเบต (cm)
0	300-500, 500-600 และ 850-1180	5
0.05		10
0.1		15



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ทางอุทกพลศาสตร์

4.1 ผลกระทบหัวจ่ายอากาศต่อ $\Delta p-u$ ไตอะแกรม

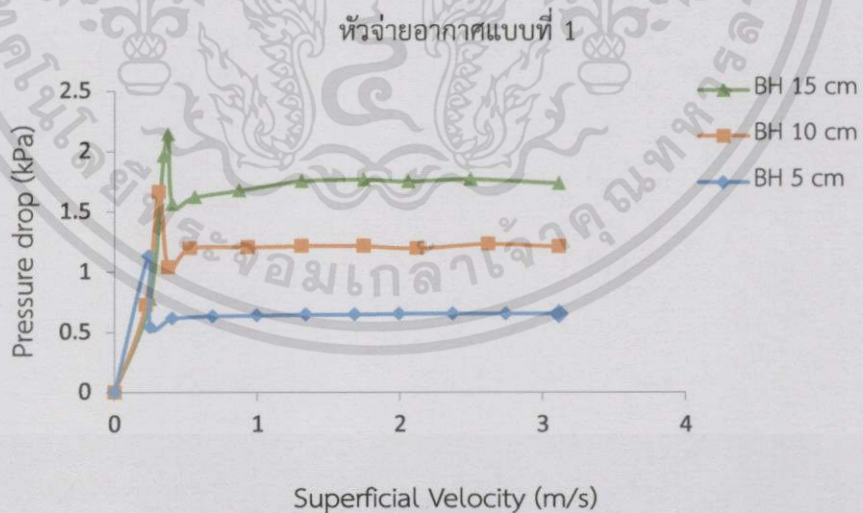
ในการศึกษาอุทกพลศาสตร์ของอากาศ-ทราย เราได้ทำการออกแบบหัวจ่ายอากาศที่มีลักษณะแตกต่างกันทั้งหมด 3 แบบ ซึ่งในแต่ละหัวจ่ายอากาศมีข้อดี-ข้อเสีย ดังนี้

4.1.1 หัวจ่ายอากาศแบบที่ 1

(a)



(b)



รูปที่ 4.1 (a) หัวจ่ายอากาศแบบที่ 1 ที่ใช้ในการทดลองจริง, (b) ผลกระทบของหัวจ่ายอากาศแบบที่ 1 ต่อ $\Delta p-u$ ไตอะแกรม ที่ขนาดทราย 850-1180 μm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

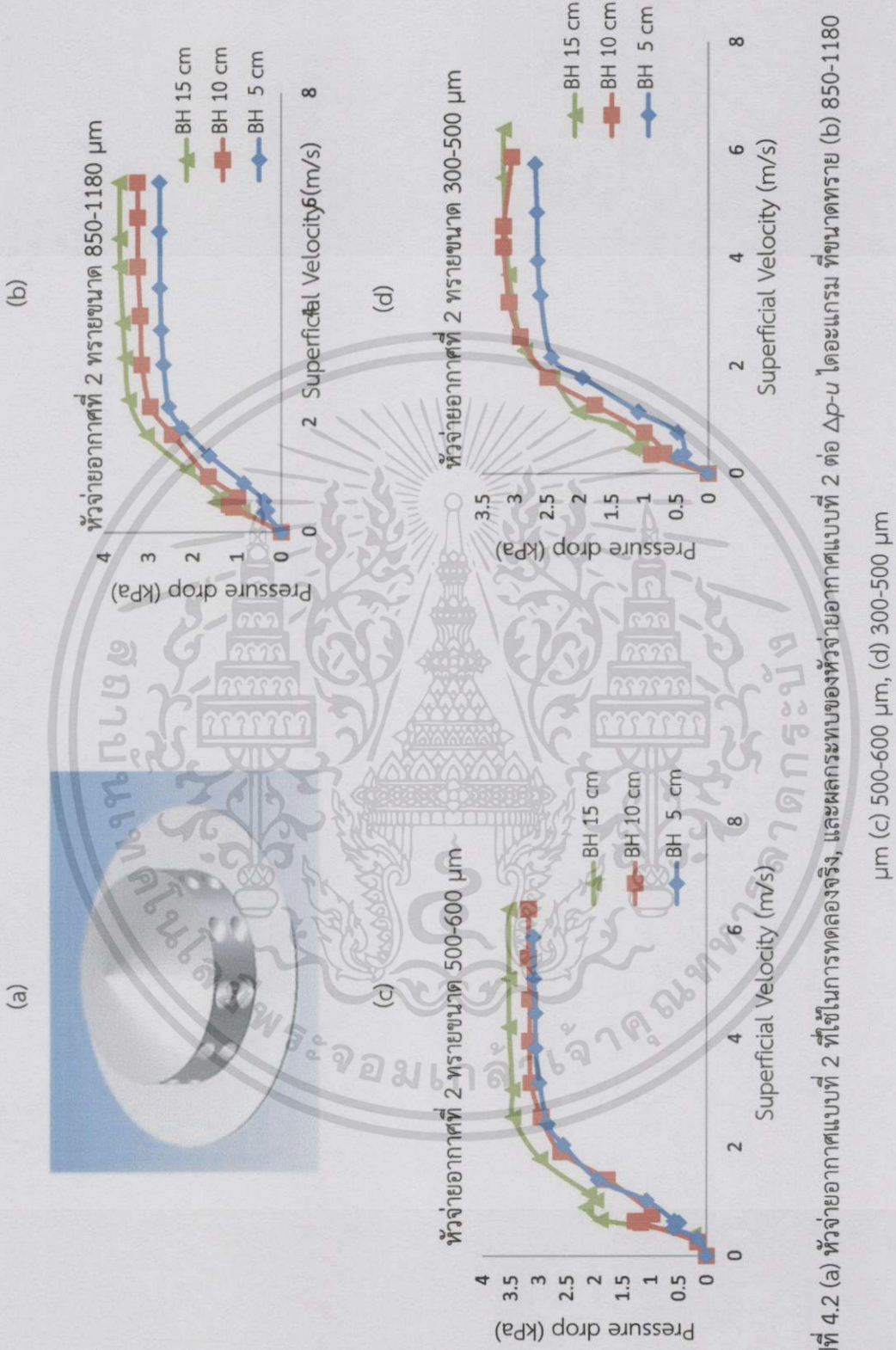
จากรูปที่ 4.1a แสดงหัวจ่ายอากาศแบบที่ 1 ที่ใช้ในการทดลองจริง ส่วนในรูปที่ 4.1b แสดงผลกระทบของหัวจ่ายอากาศแบบที่ 1 โดยแสดงในรูปของ $\Delta p-u$ ไดอะแกรม ซึ่งเปรียบเทียบความสูงของเบต 5, 10 และ 15 เซนติเมตร ใช้ทรายที่มีขนาด 850-1180 μm จากการทดสอบพบว่า ความสูงของเบตมีผลทำให้ความดันตกคร่อมเพิ่มขึ้นและในช่วงที่เบตหมุนวนอย่างสมบูรณ์มีความดันตกคร่อมคงที่เนื่องจากความเร็วของอากาศที่ใช้ในการทดลองมีความเร็วน้อยจึงทำให้ความดันตกคร่อมมีค่าคงที่ โดยเห็นได้ชัดเจนที่สุดที่ความสูงเบต 15 และ 20 เซนติเมตร ข้อจำกัดของหัวจ่ายอากาศแบบที่ 1 คือ หัวจ่ายอากาศเป็นแบบรูทำให้ทรายขนาด 300-500 μm และ 500-600 μm ร่วงลงสู่ด้านล่างของหัวจ่ายอากาศ จึงไม่สามารถทดสอบทรายทั้ง 2 ขนาดได้ ในการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น เราได้ทำการออกแบบหัวจ่ายอากาศแบบที่ 2 โดยเปลี่ยนรูไปอยู่ด้านข้างแทนเพื่อไม่ให้ทรายร่วงลงสู่ด้านล่าง

4.1.2 หัวจ่ายอากาศแบบที่ 2

ในการทดสอบอุทกพลศาสตร์โดยใช้หัวกระจายอากาศแบบที่ 2 แสดงในรูปที่ 4.2a แสดงหัวจ่ายอากาศแบบที่ 2 ที่ใช้ในการทดลองจริง เนื่องจากหัวจ่ายอากาศแบบที่ 1 พบปัญหาทรายร่วงลงสู่ด้านล่างของหัวจ่ายอากาศ ในการออกแบบหัวจ่ายอากาศที่ 2 เราจึงเปลี่ยนรูมาอยู่ด้านข้างแทนเพื่อเป็นการแก้ปัญหา โดยนำแท่งทรงกระบอกกลวงมาเจาะรูด้านข้างมีมุมเอียงในแนวระนาบ จากรูปที่ 4.2b-4.2d ทดลองที่ขนาดทรายแตกต่างกัน พบว่าลักษณะอุทกพลศาสตร์ของอากาศ-ทราย มีรูปแบบของการฟลูอิดไดซ์คล้าย Slugging (อ้างอิงจากรูปที่ 2.1) ซึ่งขอบเขตของการศึกษาได้ทำการศึกษาฟลูอิดแบบหมุนวน (swirling) ทำให้หัวจ่ายอากาศแบบที่ 2 ไม่สามารถนำมาใช้ในการทดสอบนี้ได้ ในการแก้ไขปัญหานี้ เราจึงออกแบบหัวจ่ายอากาศแบบที่ 3 ให้มีลักษณะเหมือนใบพัดเพื่อป้องกันทรายร่วงลงสู่ด้านล่างของหัวจ่ายอากาศและเพื่อให้ได้กราฟที่ออกมามีลักษณะ swirling

4.1.3 หัวจ่ายอากาศแบบที่ 3

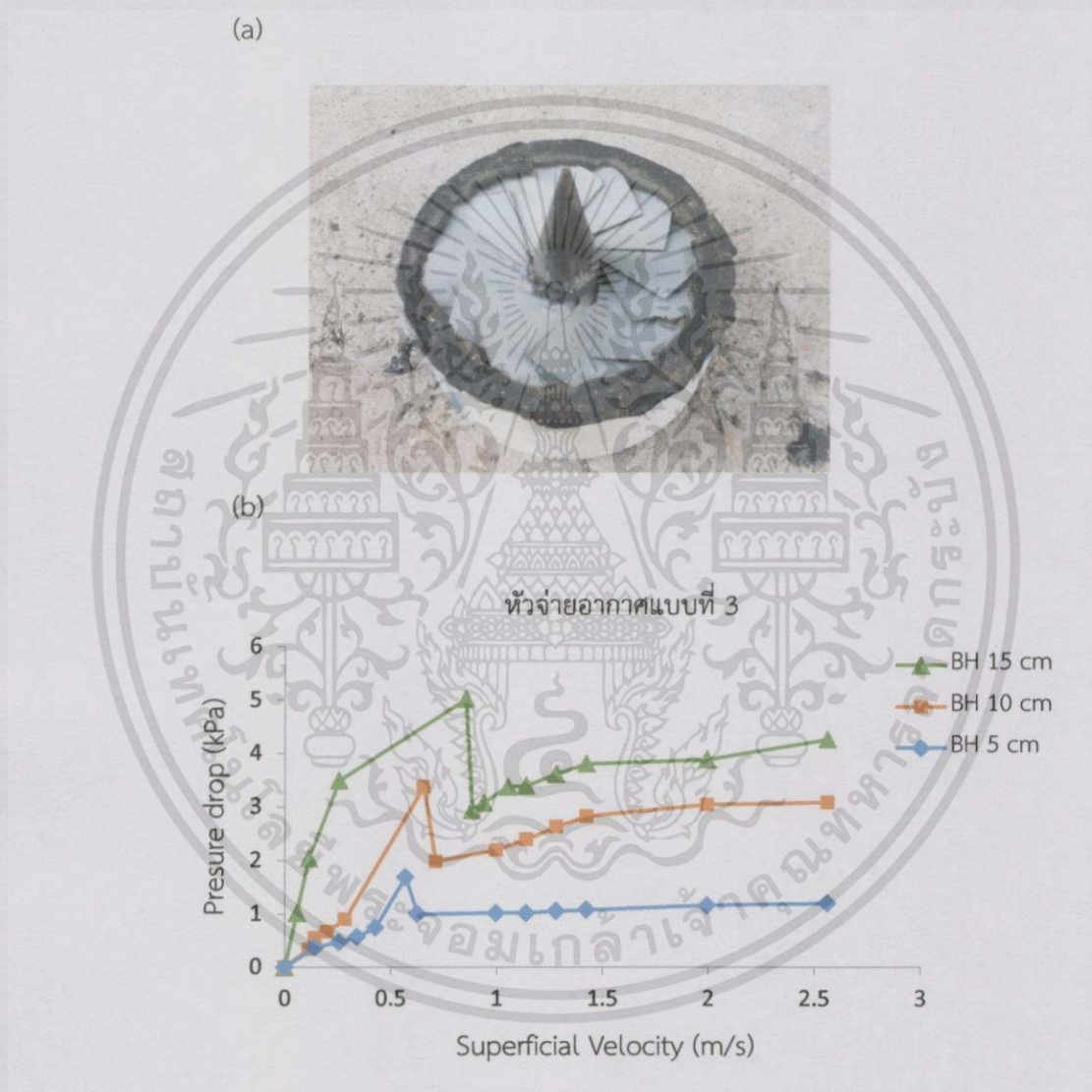
ในการทดสอบหัวจ่ายอากาศแบบที่ 3 โดยใช้เบตขนาด 300-500 μm , 500-600 μm และ 850-1180 μm ทดสอบที่ความสูงเบต 5, 10 และ 15 เซนติเมตร แสดงผลดังรูป 4.3 พบว่าที่เบตขนาด 850-1180 μm หัวจ่ายอากาศแบบที่ 3 มีค่าใกล้เคียงกับหัวจ่ายอากาศแบบที่ 1 คือ ขนาดและความสูงของเบตมีผลต่อค่าทางอุทกพลศาสตร์ของการฟลูอิดแบบหมุนวน โดยที่ความดันตกคร่อมจะเพิ่มขึ้นเมื่อ



รูปที่ 4.2 (a) หัวจ่ายอากาศแบบที่ 2 ที่ใช้ในการทดลองจริง, และผลกระทบทของหัวจ่ายอากาศแบบที่ 2 ต่อ Δp -u โดยแแกรม ที่ขนาดทราย (b) 850-1180 μm (c) 500-600 μm , (d) 300-500 μm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสูงของเบตสูงชั้นและเบตมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งในการทดสอบทั้งหมดใช้หัวจ่ายอากาศแบบที่ 3 เป็นหลัก เนื่องจากมากทรายไม่ร่วงลงสู่ด้านล่างของหัวจ่ายอากาศ ดังนั้นในการทดลองลักษณะทางอุทกพลศาสตร์นี้ได้เลือกใช้หัวจ่ายอากาศแบบที่ 3 ในการทดลอง ซึ่งการที่เราต้องการทดสอบทรายขนาด 300-500 μm และ 500-600 μm เพราะจากการงานวิจัยของต่างประเทศไม่สามารถทำให้ทราย 2 ขนาดนี้เกิดการหมุนวนได้ เราจึงต้องการที่จะทดลองเพื่อทราบถึงสาเหตุและการแก้ไขปัญหาต่อไปในอนาคต



รูปที่ 4.3 (a) หัวจ่ายอากาศแบบที่ 3 ที่ใช้ในการทดลองจริงและ, (b) ผลกระทบของหัวจ่ายอากาศแบบที่ 3 ต่อ $\Delta p-u$ ไตอะแกรม ที่ขนาดทราย 850-1180 μm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 กราฟ $\Delta p-u$ ในการทดสอบอุทกพลศาสตร์ของอากาศ-ทราย

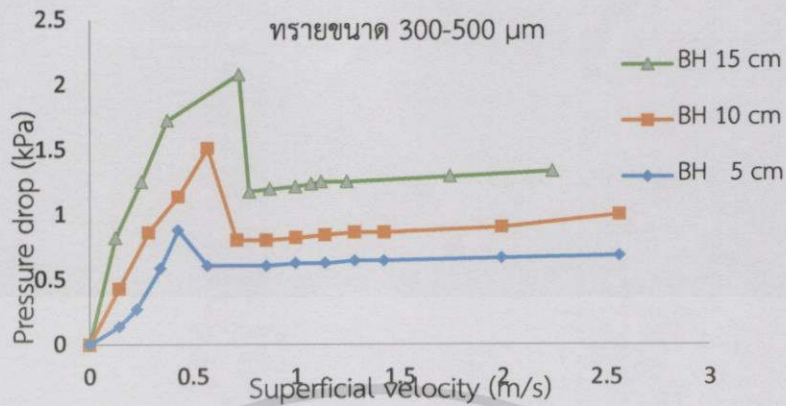
4.2.1 ผลกระทบของความสูงเบตต่อกราฟ $\Delta p-u$

ผลกระทบของความสูงเบตแสดงอยู่ในรูปของ $\Delta p-u$ ไดอะแกรม โดยทำการเปรียบเทียบความสูงของเบต 5, 10 และ 15 เซนติเมตร และใช้ทรายขนาด 300-500 μm (จากรูปที่ 4.4a) และ 850-1180 μm (จากรูปที่ 4.4b) เป็นเบต แล้วใช้หัวจ่ายอากาศแบบที่ 3 ในการทดสอบ จากการทดสอบพบว่า ความสูงของเบตมีผลต่ออุทกพลศาสตร์ของทราย จากรูปที่ 4.4(a และ b) ความดันตกคร่อมเบตจะเพิ่มสูงขึ้นในช่วงของการฟลูอิดส์บางส่วนจะสังเกตเห็นได้ชัดมาก โดยที่ความดันตกคร่อมที่เพิ่มสูงขึ้นมาจากความสูงของเบตที่เพิ่มขึ้นและขนาดของทรายที่มีขนาดใหญ่ เช่น ที่ความสูงของเบต 15 เซนติเมตร สามารถเห็นค่าความดันตกคร่อมที่เพิ่มสูงขึ้นได้อย่างชัดเจน และในส่วนของเบตเกิดการหมุนวนอย่างสมบูรณ์ ความดันตกคร่อมเบตจะมีความลาดชันขึ้นและจะเห็นได้ชัดเจนเมื่อความเร็วของอากาศมีค่าสูงขึ้น ส่วนในทรายขนาด 300-500 μm จะมีแนวโน้มคล้ายกับขนาด 850-1180 μm แต่ค่าความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นจะมีค่าต่ำกว่า

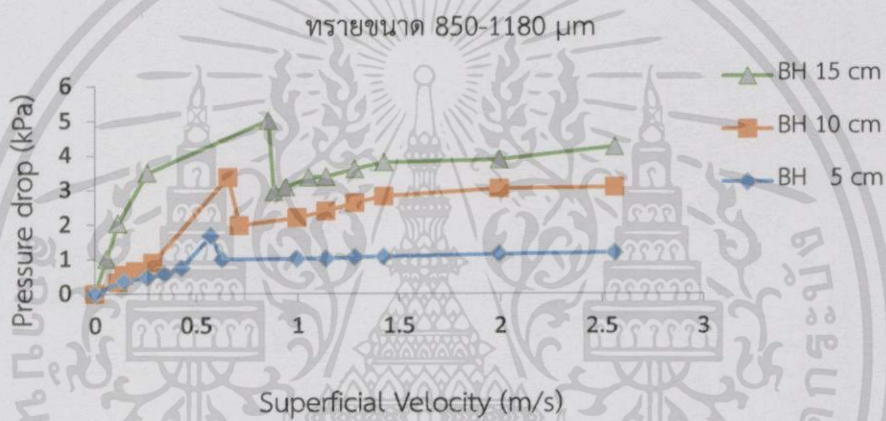
4.2.2 ผลกระทบของขนาดทรายต่อ $\Delta p-u$ ไดอะแกรม

เมื่อเรานำผลที่ได้จากการทดสอบอุทกพลศาสตร์มาทำการเขียนกราฟเพื่อแสดงผลกระทบของขนาดทราย ดังรูปที่ 4.5 ทำการทดสอบที่เบตมีความสูง 15 เซนติเมตร และใช้หัวจ่ายอากาศแบบที่ 3 ผลการทดสอบพบว่า ทรายขนาด 850-1180 μm มีผลทำให้ค่าความดันตกคร่อมสูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดทราย 300-500 μm และ 500-600 μm เนื่องจากขนาดอนุภาคของทรายที่มีขนาดใหญ่และมีมวลมาก ทำให้ค่าความดันตกคร่อมและความเร็วของอากาศเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของทรายเพิ่มขึ้น โดยที่ทรายทั้ง 3 ขนาดมีแนวโน้มคล้ายกันตามรูปที่ 4.5

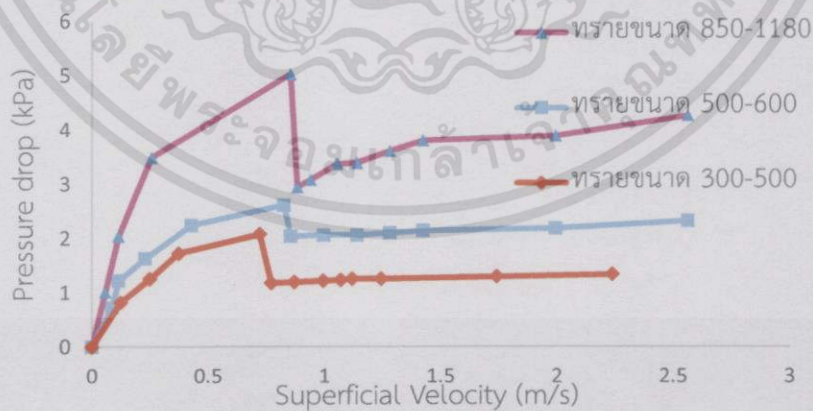
(a)



(b)

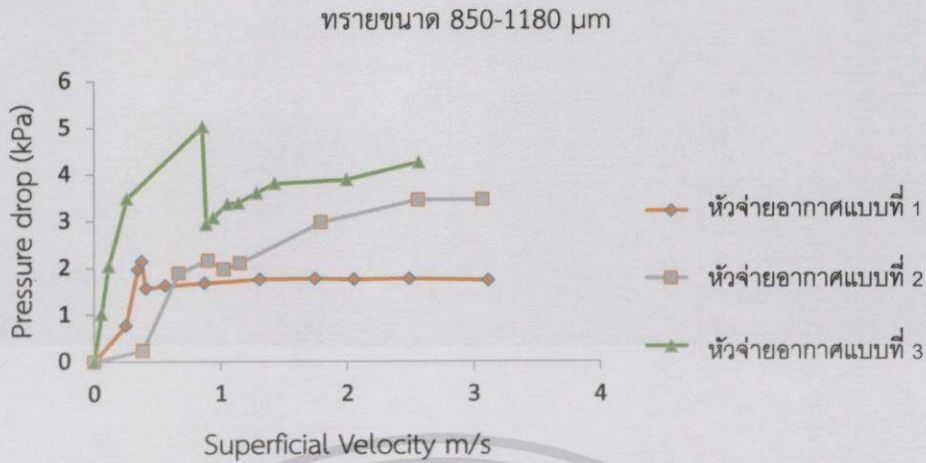


รูปที่ 4.4 ผลกระทบของความสูงเบด ต่อ $\Delta p-u$ โดยเอกรวม ในการฟลูอิดซ์เบดทรงกรวยแบบหมุนวน ที่ขนาดทราย (a) 300-500 μm (b) 850-1180 μm



รูปที่ 4.5 ผลกระทบของขนาดทราย ต่อ $\Delta p-u$ โดยเอกรวม ในการฟลูอิดซ์เบดทรงกรวยแบบหมุนวนที่ ขนาดทราย 300-500 μm , 500-600 μm และ 850-1180 μm สำหรับความสูงเบด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบผลกระทบ $\Delta p-u$ โดยแกรม ของหัวจ่ายอากาศทั้ง 3 แบบ ที่เบดสูง 15 เซนติเมตร

4.2.3 ผลกระทบของลักษณะหัวจ่ายอากาศ

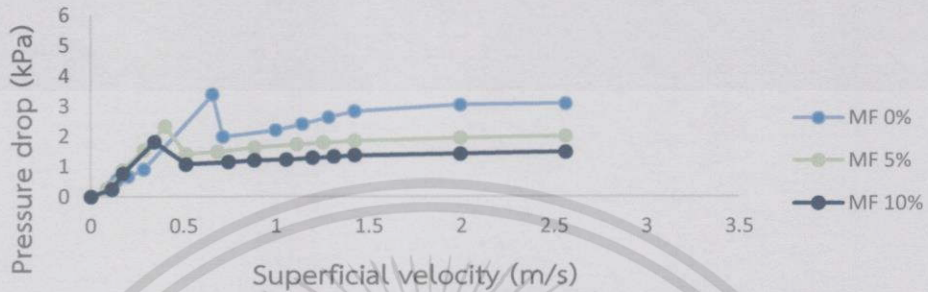
รูปที่ 4.6 แสดงการเปรียบเทียบผลกระทบ $\Delta p-u$ โดยแกรม ของหัวจ่ายอากาศทั้ง 3 แบบ ที่เบดสูง 15 เซนติเมตร และใช้ทรายขนาด 850-1180 μm จะเห็นว่าที่ความเร็วน้อยกว่า 0.5 m/s หัวจ่ายอากาศแบบที่ 2 มีความดันตกคร่อมเบดน้อยที่สุด ถัดมาเป็นหัวจ่ายอากาศแบบที่ 1 และ 3 ตามลำดับ แต่ถ้าสังเกตจาก u_{mf} พบว่าหัวจ่ายอากาศแบบที่ 1 สามารถทำให้เบดเริ่มเคลื่อนที่ได้เร็วที่ ความดันตกคร่อมเบดต่ำกว่าหัวจ่ายอากาศแบบที่ 2 และ 3 ตามลำดับ เมื่อความเร็วเพิ่มจนเบดเริ่มหมุนวนหัวจ่ายอากาศแบบที่ 2 มีแนวโน้มที่ความชันของกราฟจะมากกว่าหัวแบบอื่นๆ

4.2.4 ผลกระทบของสัดส่วนชีวมวลต่อ $\Delta p-u$ โดยแกรม

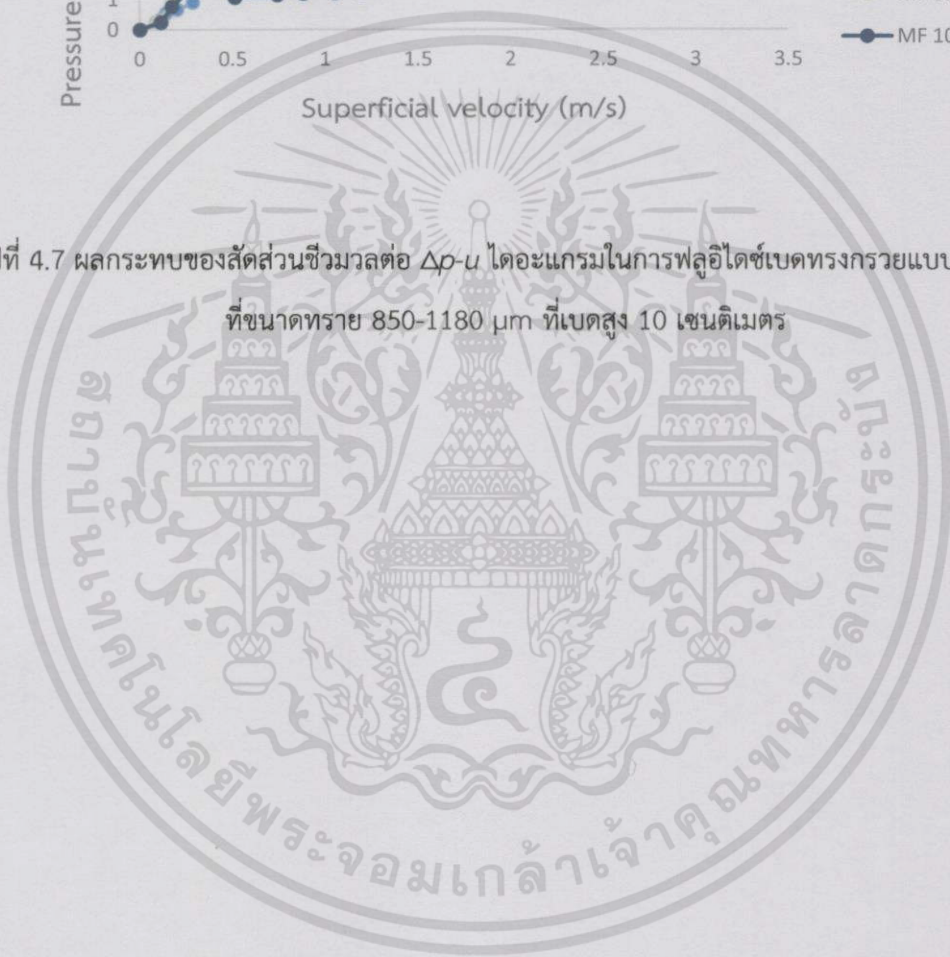
รูปที่ 4.7 แสดงผลกระทบของสัดส่วนชีวมวลของฟางข้าวที่ 0%, 5% และ 10% โดยที่ฟางข้าวมีความยาวโดยเฉลี่ยประมาณ 1-2 เซนติเมตร ทำการทดสอบที่เบดขนาด 850-1180 μm และเบดสูง 10 เซนติเมตร จากการทดสอบพบว่า ลักษณะการเกิดฟลูอิดซ์แบบหมุนวนของสัดส่วนชีวมวล (5% และ 10%) คล้ายกับการทดสอบฟลูอิดซ์แบบหมุนวนของทรายล้วน(0%) แต่ความดันตกคร่อมของเบดผสมชีวมวล และความเร็ว ณ ตำแหน่งความดันเดียวกันมีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับเบดอย่างเดียว

เนื่องจากชีวมวลมีขนาดใหญ่ และมีความหนาแน่นต่ำกว่าทราย ทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคต่ำและเมื่อนำมาผสมกับทรายอากาศจึงสามารถลอยผ่านได้ง่ายเมื่อเทียบกับการใช้ทรายเพียงอย่างเดียว

หัวจ่ายอากาศแบบที่ 3



รูปที่ 4.7 ผลกระทบของสัดส่วนชีวมวลต่อ $\Delta p-u$ โคเออร์เรลชันในการฟลูอิดิเซชันแบบหมุนวน ที่ขนาดทราย 850-1180 μm ที่เบตสูง 10 เซนติเมตร



สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาช่วงของการเกิดอุทกพลศาสตร์และลักษณะของการฟลูอิดซ์แบบหมุนวนของอากาศ-ทราย ในเตาเผาทรงกรวยมุม 40° โดยใช้ทรายขนาด 300-500 μm , 500-600 μm และ 850-1180 μm และทดสอบที่เบดสูง 5, 10 และ 15 เซนติเมตร โดยใช้หัวจ่ายอากาศ 3 แบบ สรุปผลการทดสอบได้ว่า

5.1 สรุปผลการทดลอง

1. หัวกระจายอากาศที่ออกแบบทั้ง 3 แบบ สามารถสรุปได้ดังนี้

- หัวจ่ายอากาศแบบที่ 1 สามารถทดสอบขนาดทราย 850-1180 μm ได้เพียงขนาดเดียว เนื่องจากลักษณะของหัวจ่ายอากาศเป็นรู จึงทำให้ทรายที่มีขนาดเล็กกว่าร่วงลงสู่ด้านล่างของหัวจ่ายอากาศ โดยทรายขนาดเล็ก (300-600 μm) อยู่ใน Geldart กลุ่ม B ที่เหมาะสมเป็นเบดสำหรับเตาฟลูอิดซ์เบดแบบพองอากาศ [12]

- หัวจ่ายอากาศแบบที่ 2 ได้ทำการแก้ไขปัญหาจากหัวจ่ายอากาศแบบที่ 1 โดยนำรูมาอยู่ด้านข้างแทน แต่รูปกราฟของการฟลูอิดซ์เป็นแบบ slugging ซึ่งในงานวิจัยนี้ศึกษาการฟลูอิดซ์แบบหมุนวน (swirling) เท่านั้น จึงไม่สามารถใช้หัวกระจายอากาศแบบที่ 2 ในการทดสอบได้

- หัวจ่ายอากาศแบบที่ 3 เป็นหัวจ่ายอากาศที่แก้ปัญหารายร่วงลงด้านล่างและรูปแบบของกราฟเป็นแบบหมุนวน จึงใช้หัวจ่ายอากาศแบบที่ 3 ตลอดการทดสอบ ซึ่งการทดสอบที่ได้จากหัวจ่ายอากาศที่ 3 เป็นที่น่าพอใจ

2. ความสูงเบดมีผลต่อ $\Delta p-u$ โดอะแกรม ในทุกการทดสอบ

3. สัดส่วนของชีวมวลในการทดสอบยังไม่ได้ผลเป็นที่น่าพอใจ เนื่องจากแบบจำลองของกรวยในการทดสอบไม่สมมาตร

5.2 ข้อเสนอแนะ

- ในการทดสอบพบว่า ควรทำการทดสอบในเตาเผาขนาดจริงหรือได้มาตรฐาน เนื่องจากแบบจำลองที่ทำการทดสอบไม่ได้มาตรฐาน ทำให้ค่าที่ได้ไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบกับแหล่งข้อมูลอื่นๆ ได้

- จากการออกแบบหัวจ่ายอากาศทั้ง 3 แบบ ควรที่จะพัฒนาหัวจ่ายอากาศแบบที่ 1 ต่อ เพราะจากการทดลองที่ทราบขนาด 850-1180 μm พบว่าความดันตกคร่อมที่ได้มีค่าน้อยกว่าหัวจ่ายอากาศแบบที่ 2 และ 3 ซึ่งหมายถึงความเร็วอากาศที่ใช้ก็น้อยตามไปด้วย แนวทางในการพัฒนาควรลดมุมของรูให้น้อยลงเพื่อป้องกันทรายร่วง ที่เราไม่สามารถทำได้เนื่องจากเครื่องมือไม่เอื้ออำนวยทำให้ไม่สามารถพัฒนาต่อได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ. 2542, มิถุนายน. พลังงาน และทางเลือกการใช้เชื้อเพลิงของประเทศไทย. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.eppo.go.th/doc/doc-alterfuel.html>
- [2] Yu, C.J., Tang, Z.F., Zeng L.Y., Chen, C. and Gong B., 2014. Experimental determination of agglomeration tendency in fluidized bed combustion of biomass by measuring slip resistance. *Fuel* 128. (P 14-16). Hangzhou: Zhejiang University.
- [3] Ninduangdee, P., Kuprianov, V.I., 2014. Combustion of palm kernel shell in a fluidized bed: Optimization of biomass particle size and operating conditions. *Energy Conversion and Management*. Pathum Thani: Thammasart University.
- [4] Francisco José dos Santos, Leonardo Goldstein Jr. 2008. Experimental aspects of biomass fuels in a bubbling fluidized bed combustor. *Chemical Engineering and Processing* 47. (P 1541-1549).
- [5] Arromdee, P., Kuprianov, V.I., 2012. A comparative study on combustion of sunflower shells in bubbling and swirling fluidized-bed combustors with a cone-shaped bed. *Chemical Engineering and Processing* 62. (P 26-38). Pathum Thani: Thammasart University.
- [6] Kaewklum, R., Kuprianov, V.I., Peter L. Douglas. 2009. Hydrodynamics of air-sand flow in a conical swirling fluidized bed : A comparative study between tangential and axial air entries. *Chemical Engineering and Processing* 50. (P 2999-3006). Pathum Thani: Thammasart University.
- [7] Qian, F.P., Chyang, C.S., and Jim Tso. 2011. Combustion and NO emission of high nitrogen content biomass in a pilot-scale vortexing fluidized bed combustor. *Bioresource Technology* 102. (P 1892-1898). Taiwan.

- [8] Qian, F.P., Chyang, C.S, and Yen W., 2009. Effects of acetic acid injection and operating conditions on NO emission in a vortexing fluidized bed combustor using Response surface methodology. *Energy & Fuels* 23. (P 3592- 3599). Chung-Li: Chung Yuan Christian University.
- [9] Lin, C. H., Teng J.T. and Chyang C. S., 1996. Evaluation of the combustion efficiency and emission of pollutants by coal Particles in a vortexing fluidized bed, Taiwan: Chung Yuan Christian University.
- [10] Kaewklum, R., Kuprianov, V.I., 2010. Experimental studies on a novel swirling fluidized-bed combustor using an annular spiral air distributor. *Fuel* 89. (P 43-52). Pathum Thani: Thammasart University.
- [11] Madhiyanon, T., Lapirattanakun, A., Sathitruangsak, P., Sophonronarit, S., 2006. A novel cyclonic fluidized-bed combustor (Ψ -FBC): Combustion and thermal efficiency, temperature distributions, combustion intensity, and emission of pollutants. *Combustion and Flame* 146. (P 232-245). Bangkok: Mahanakorn University of Technology.
- [12] Geldart, D., 1973. Types of Fluidization. *Powder Technology* 7. (P 285-292). Yorks: University of Bradford
- [13] Geldart, D., 1986. Types of Fluidization. Yorks: University of Bradford
- [14] มาพิชิต แยมไสย, สุรพงษ์ พันธุ์โพธิ์. 2548. การบำบัดไอระเหยโทลูอินโดยใช้กระบวนการฟลูอิดไอโซโทดคะตาไลซิสและกระบวนการโฟโตไลซิส. ปรินูญานินพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต. [ออนไลน์]. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.
- [15] Sau, D.C., Mohanty, S., Biswal, K.C., 2008. Prediction of critical fluidization velocity and maximum bed pressure drop for binary mixture of regular particles in gas– solid tapered fluidized beds. *Chemical Engineering and Processing* 47. (P 2114-2120).

- [16] Jing, S., Hu, Q.Y., Wang, J.F., Jin, Y., 2000. Fluidization of coarse particles in gas-solid conical beds. *Chemical Engineering and Processing* 39. (P 379-387). Beijing: Tsinghua University.
- [17] Khani, M.H., 2011. Models for prediction of hydrodynamic characteristics of gas-solid tapered and mini-tapered fluidized beds. *Powder Technology* 205. (P 224-230). Nuclear Science and Technology Research Institute.
- [18] Peng, Y. and Fan, L.T., 1997. Hydrodynamic characteristics of fluidization in liquid- solid tapered beds. *Chemical engineering science* 52. (P 2277-2290). Manhattan: Kansas State University.
- [19] ศ.ดร. สมชาติ ฉันทศิริวรรณ. 2011. วิศวกรรมโรงไฟฟ้า. [สื่ออิเล็กทรอนิกส์]. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- [20] Binod S., Vijay R. Raghavan, 2002. Hydrodynamics of a swirling fluidised bed. *Chemical Engineering and Processing* 41. (P 99-106).
- [21] Shu, j., Lakshmanan, V.I., Dodson, C.E., 2000. Hydrodynamic study of a toroidal fluidized bed reactor. *Chemical Engineering and Processing* 39. (P499-506)
- [22] Bando, Y., Suzuki, R., Tanaka and Nakamura, M., 2000. Flow and heat transfer characteristics in liquid-solid swirl fluidized bed using centrifugal force. *Journal of Chemical Engineering of Japan* 33 (P 296-299).
- [23] เครื่องมือวัดความดัน. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.bookclubman.com/pressure%20example-1.htm>
- [24] Agriinfo.in. Density of Soil: Bulk Density and Particle Density. 2011. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.agriinfo.in/?page=topic&superid=4&topicid=271>
- [25] Liu, Z.Q., Xu, A.X., Zhao T., 2011 .Energy from Combustion of Rice Straw: Status and Challenges to China. *Energy and Power Engineering* 3. (P 325-331). Changsha: Central South University

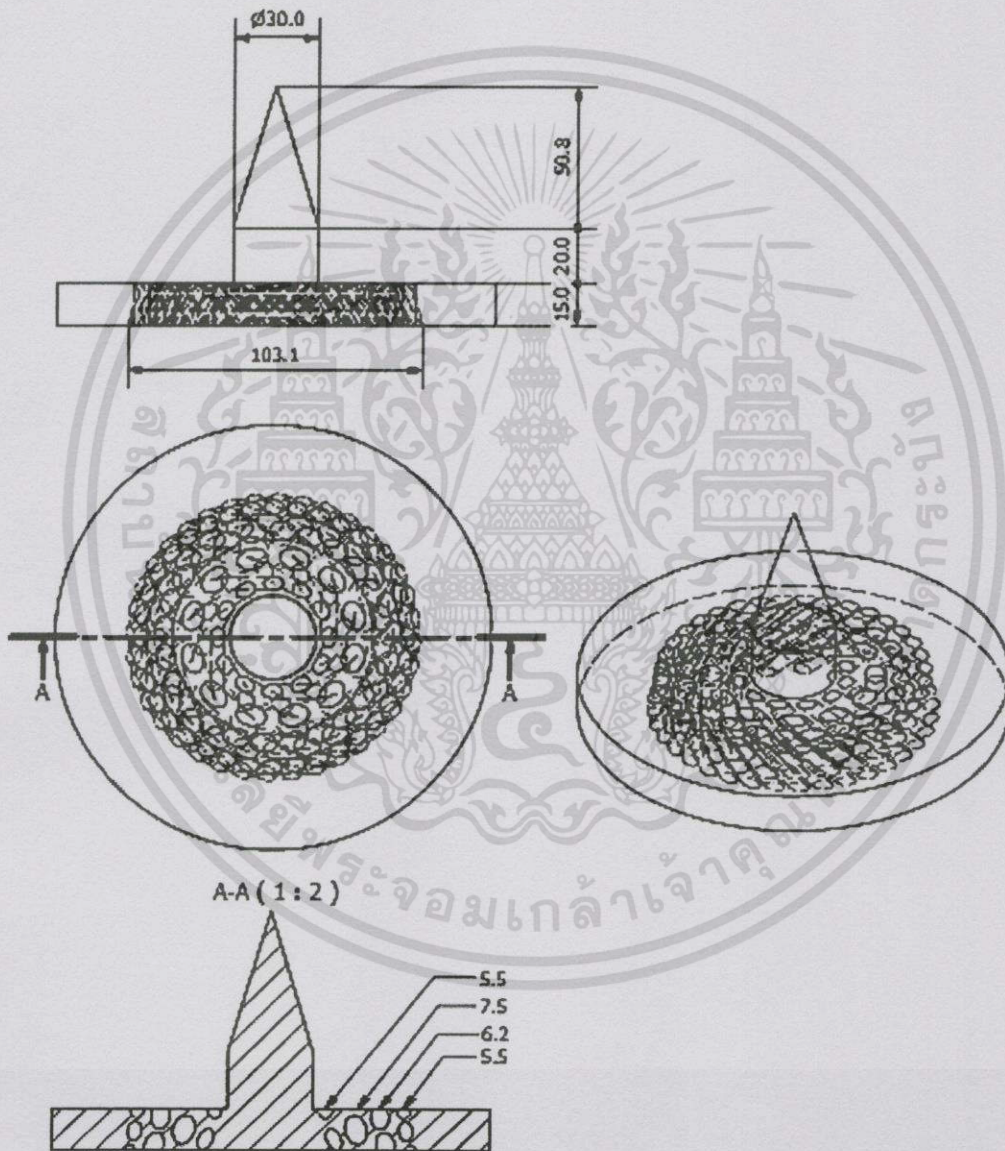


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

รายละเอียดหัวจ่ายอากาศที่ออกแบบ

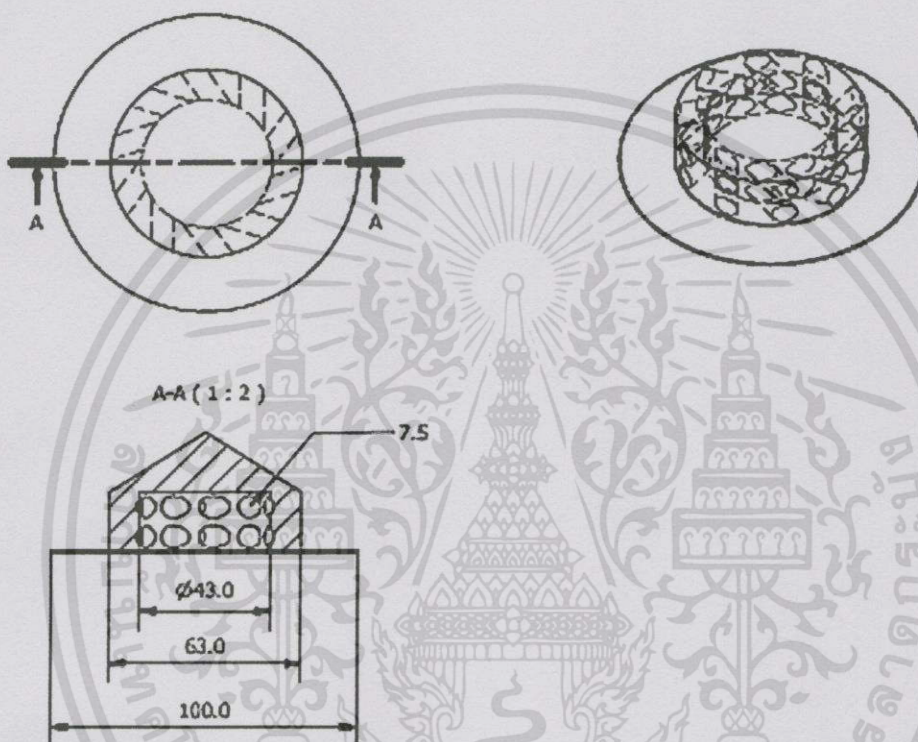
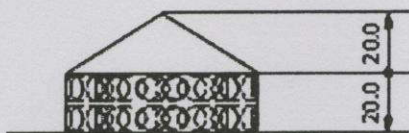
1 การออกแบบหัวจ่ายอากาศแบบที่ 1 (2 มิติ)



หมายเหตุ : หน่วยมิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

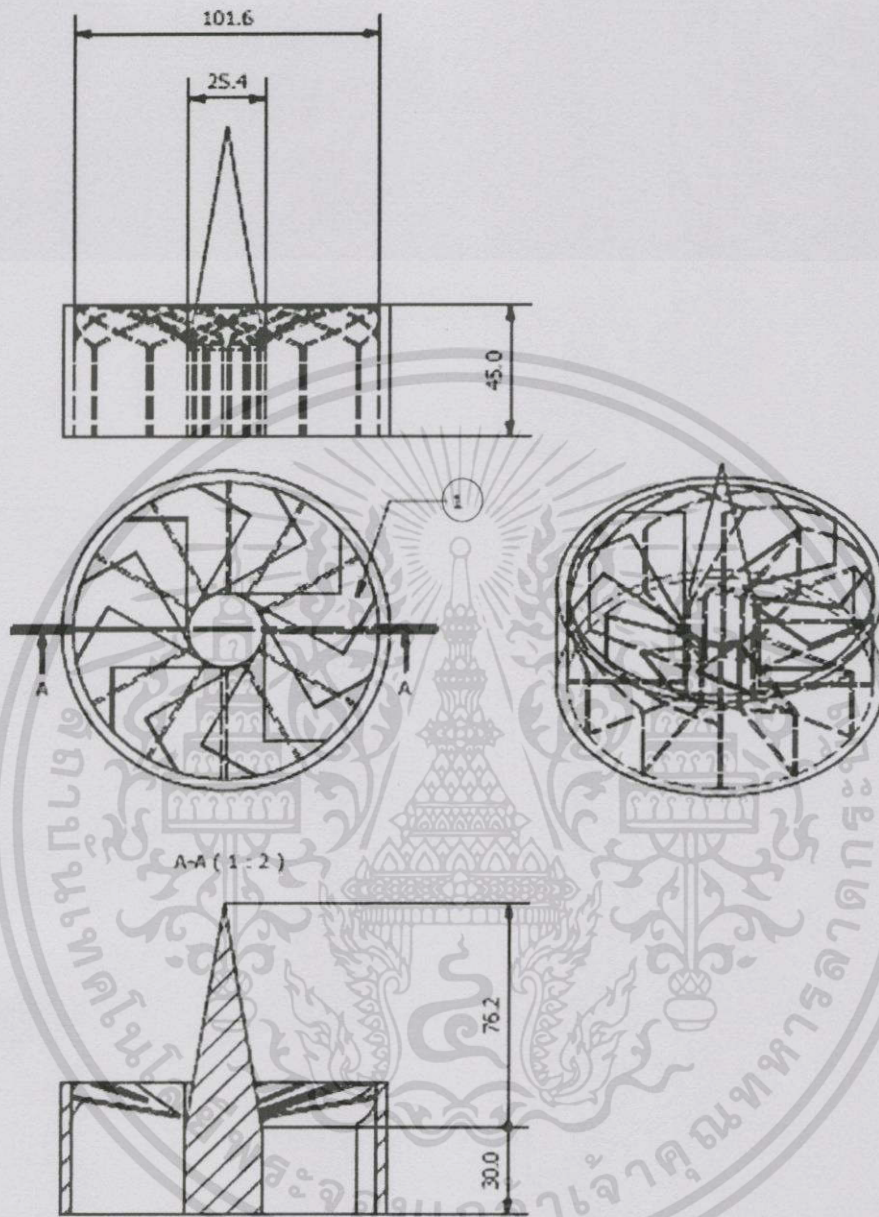
2 การออกแบบหัวจ่ายอากาศแบบที่ 2 (2 มิติ)



หมายเหตุ : หน่วยมิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3 การออกแบบหัวจ่ายอากาศแบบที่ 3 (2 มิติ)

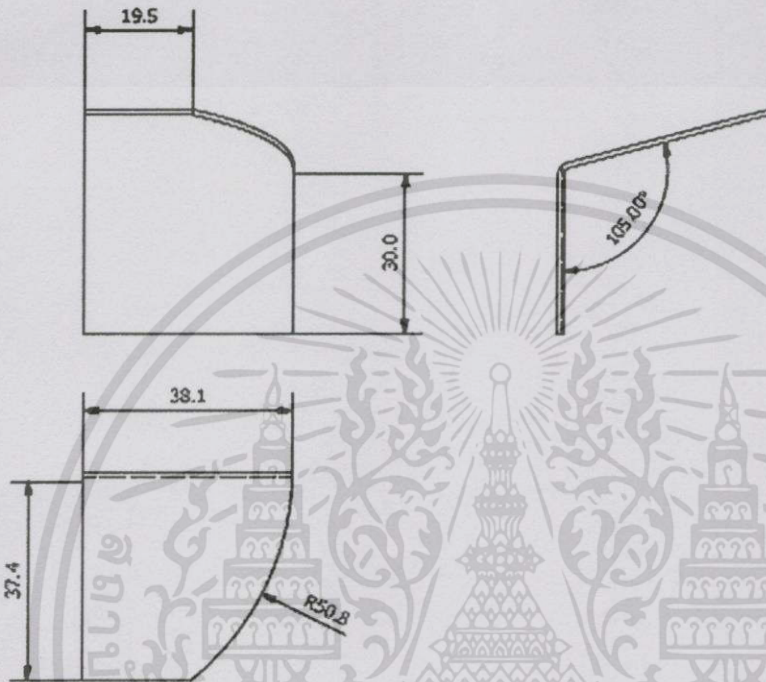


หมายเหตุ : หน่วยมิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบขยาย

1



หมายเหตุ : หน่วยมิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้