

## การออกแบบและสร้างชุดทดสอบเตาฟลูอิดไดซ์เบดแบบห้องเผาไหม้ผนังสองชั้นชนิด เบดหมุนวน

### Design and Construct on Double Wall Combustion Chamber with Swirling Fluidized-Bed Combustor

กษมา ศิริสมบูรณ์, ปรเมศร์ อารมย์ดี\*, และ สุปรีชา หัสชู

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์  
อำเภอ เมือง จังหวัด นครปฐม 73000

\*ติดต่อ: porametr@gmail.com, 0-3425-9025, 0-3421-9367

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบ สร้าง และทดสอบเตาฟลูอิดไดซ์เบดแบบห้องเผาไหม้สองชั้นชนิดเบดหมุนวน โดยใช้โปรแกรมจำลองอุณหพลศาสตร์ของไหลในการออกแบบเตาซึ่งมีการจำลองห้องเผาไหม้ 3 ลักษณะคือ แบบพื้นที่หน้าตัดเล็กทางด้านบน (แบบที่ 1) แบบพื้นที่หน้าตัดใหญ่ทางด้านบน (แบบที่ 2) และแบบพื้นที่หน้าตัดคงที่ (แบบที่ 3) มีการป้อนอากาศ 4 ส่วน โดยใช้สัดส่วนอากาศ 3 สัดส่วนคือ i) 0.5 0.2 0.2 0.1, ii) 0.4 0.2 0.2 0.1 และ iii) 0.3 0.3 0.2 0.2 และกำหนดสภาวะที่ใช้ในการจำลองจากการเผาไหม้แกลบในอัตราการป้อน 60 kg/h ที่ปริมาณอากาศส่วนเกิน 60% ผลจากการจำลองพบว่า เตาที่มีพื้นที่หน้าตัดของห้องเผาไหม้คงที่ (แบบที่ 3) และอัตราส่วนการแบ่งการป้อนอากาศในกรณีนี้ i) 0.5 0.2 0.2 0.1 เหมาะสมสำหรับการนำมาใช้ที่สุุดจึงดำเนินการสร้างเตาในลักษณะดังกล่าวและทำการทดลองป้อนอากาศซึ่งใช้ทรายซิลิกาเป็นวัสดุเบด ที่มีขนาดอนุภาค 3 ขนาดคือ 300–500, 500–700 และ 700–1000  $\mu\text{m}$  กำหนดความสูงเบดที่ 20 cm จากผลการทดลองพบว่า วัสดุเบดที่มีขนาดต่างกันส่งผลให้ค่าความเร็วผิวเผินที่ทำให้เกิดการฟลูอิดไดซ์ ( $u_{mf}$ ) และความดันตกคร่อมของเบดที่ความเร็วดังกล่าว ( $\Delta p_{mf}$ ) ต่างกันโดยเบดอนุภาคขนาดเล็กจะมีค่า  $u_{mf}$  และ  $\Delta p_{mf}$  ที่น้อยกว่า

**คำหลัก:** เตา; ฟลูอิดไดซ์เบด; แบบจำลองอุณหพลศาสตร์ของไหล

#### Abstract

This research aims to design, construct, and test on double wall combustion chamber with swirling fluidized-bed combustor. The computational fluid dynamics (CFD) simulation software was used to design the proposed combustor for 3 different types of combustion chamber those are the smaller cross-sectional area at the top of the chamber (type 1), the bigger cross-sectional area at the top of the chamber (type 2), and the constant cross-sectional area chamber (type 3). For all types of the combustion chamber, the air injection was separated into 4 main parts using 3 different air injection ratios i) 0.5 0.2 0.2 0.1, ii) 0.4 0.2 0.2 0.1, and iii) 0.3 0.3 0.2 0.2, which the simulating condition was determined when firing rice husk at fuel feedrate of 60 kg/h with excess air of 60%. From the simulating results, the constant cross-sectional area chamber (type 3) with the air injection ratio of i) 0.5 0.2 0.2 0.1 was the most appropriate

## AEC-121

operating condition, therefore, the combustor was constructed and tested for cold-state experiment under the selected condition. After all experimental equipment was set-up, the cold-state tests were done by using silica sand of 3 different particle sizes of 300–500, 500–700, and 700–1000  $\mu\text{m}$  as the bed material at fixed static bed height of 20 cm, From the experimental results, it was found that the different size range of bed material affects to the superficial velocity ( $u_{mf}$ ) and pressure drop at the superficial velocity ( $\Delta p_{mf}$ ), which the smaller bed particle led to the less  $u_{mf}$  and  $\Delta p_{mf}$ .

**Keywords:** *Combustor; Fluidized-bed; Computational fluid dynamics simulation.*

### 1. บทนำ

ในปัจจุบันมูลค่าการใช้พลังงานของไทยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทุกปี โดยมูลค่าการนำเข้าพลังงานเพิ่มขึ้นในเชื้อเพลิงทุกประเภท [1] อย่างไรก็ตาม ประเทศไทยเป็นประเทศกสิกรรมซึ่งจะมีวัสดุเหลือใช้หลังจากการแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรเทียบเท่าน้ำมันดิบถึง 8.49 ล้านตัน/ปี [2] หากนำชีวมวลดังกล่าวมาแปรรูปเป็นพลังงานจะสามารถลดอัตราการนำเข้าเชื้อเพลิงรวมถึงปัญหาทางด้านมลพิษที่เกิดจากการกำจัดวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรอย่างผิดวิธี

เตาฟลูอิดไดซ์เบดจัดว่าเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพสูงสุดสำหรับการแปรรูปของพลังงานชีวมวล [3–7] ให้เป็นพลังงานความร้อน โดยสามารถจำแนกออกเป็น 2 ประเภทหลักๆ ได้แก่เตาฟลูอิดไดซ์เบดชนิดฟองอากาศ (bubbling fluidized-bed combustor) และเตาฟลูอิดไดซ์เบดชนิดหมุนเวียน (circulating fluidized-bed combustor) ซึ่งในปัจจุบันได้มีการนำหลักการฟลูอิดไดซ์เบดชนิดเหล่านี้มาประยุกต์ใช้กับเตาทั้งสองประเภทที่กล่าวมา เช่นการทำให้เบดเกิดการเคลื่อนที่แบบฟองอากาศ (bubbling), การแบ่งอากาศออกเป็นชั้นโดยทำให้เบดเกิดการเคลื่อนที่แบบฟองอากาศทางด้านล่าง (ด้วยอากาศปฐมภูมิ) ก่อนจะทำให้ป้อนอากาศทุติยภูมิเพื่อให้เกิดลมหมุนวน (vortexing) หลังจากบริเวณที่เกิดการเผาไหม้ และการทำให้วัสดุเบดเกิดการหมุนวน (swirling) [8] โดยเตาฟลูอิดไดซ์เบดชนิดหมุนเวียนวัสดุเบดจะมีการเคลื่อนที่จากส่วนล่างของเตาขึ้นสู่ด้านบนโดยมีแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางซึ่งจะเกิดการไหลแบบปั่นป่วนทำให้เกิดการคลุกเคล้าที่ดีของวัสดุเบด เชื้อเพลิง และ

อากาศ ทำให้สามารถเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลได้หลากหลายชนิด (แตกต่างกันทางคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพ) อย่างไรก็ตามในการเผาไหม้เชื้อเพลิงดังกล่าวจะพบปัญหาทางด้านมลพิษที่สำคัญได้แก่ NO, CO, และ  $C_xH_y$  จากงานวิจัยที่ผ่านมาจะพบว่าในการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลโดยใช้เบดชนิดหมุนวนอากาศส่วนเกินที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 50–60% [8–10] ซึ่งหากมีการแบ่งสัดส่วนการป้อนของอากาศออกเป็นชั้น โดยให้อากาศมีการหมุนวน (ใช้วงแหวนวอร์เทค) เหนือบริเวณที่มีการเผาไหม้จะสามารถช่วยหน่วงเวลาของอนุภาคต่างๆที่เกิดขึ้นในการเผาไหม้ให้อยู่ภายในเตาได้นานขึ้นโดยเฉพาะอนุภาคขนาดใหญ่ที่ยังเผาไหม้ไม่หมดไม่หลุดออกไปจากเตา [11,12] ซึ่งมีส่วนสำคัญในการช่วยลดก๊าซมลภาวะหลักดังกล่าว

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ การออกแบบ สร้าง และทดสอบเตาฟลูอิดไดซ์เบดแบบห้องเผาไหม้สองชั้นชนิดเบดหมุนวนที่สามารถนำพาอนุภาคที่ยังเผาไหม้ไม่หมดตกกลับลงมาเผาไหม้อีกครั้ง โดยการป้อนอากาศแบบ 2 เฟส คือ อากาศที่ทำฟลูอิดไดซ์เบดและอากาศที่สร้างกระแสลมวน (จากวงแหวนวอร์เทค) โดยใช้โปรแกรมจำลองอุณหพลศาสตร์ของไหลในการออกแบบเตา แล้วทำการทดสอบพฤติกรรมฟลูอิดไดซ์เบด ( $\Delta p - u$ ) ของเตาที่สร้างขึ้นเพื่อนำไปใช้ในการทดลองเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลในอนาคตต่อไปของเตาที่สร้างขึ้น

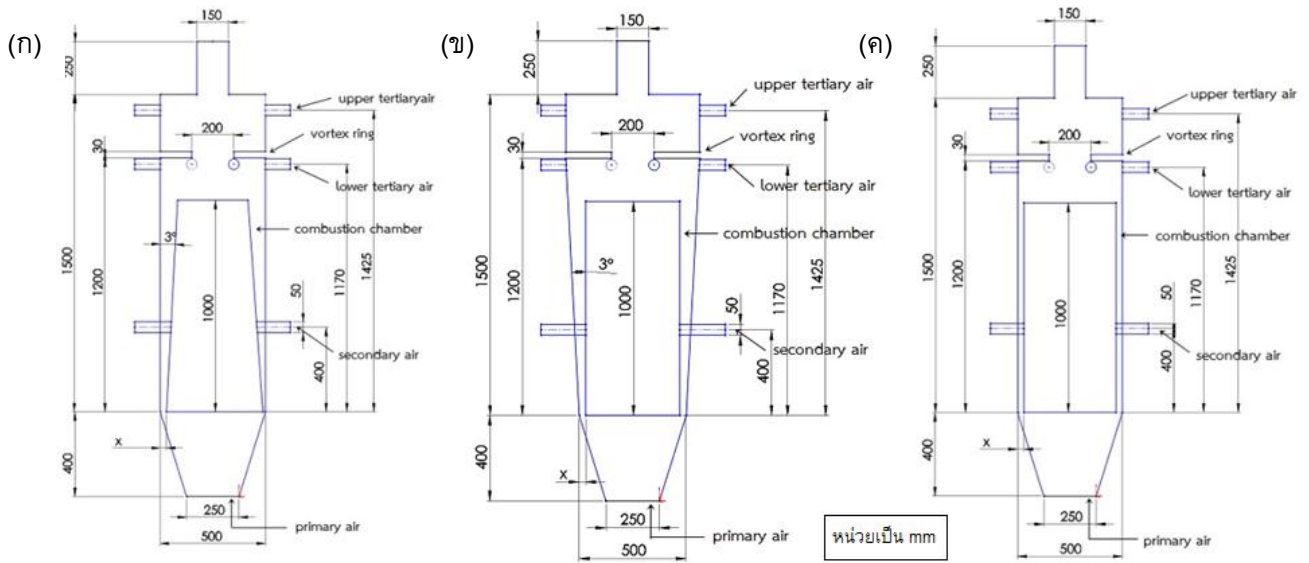
### 2. หลักการและทฤษฎี

**2.1 การคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics) และแบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulence Model) สำหรับใช้ออกแบบเตา**

## AEC-121

การคำนวณพลศาสตร์ของไหลมีสมการหลักที่สำคัญ  
คือ สมการสภาวะต่อเนื่อง สมการโมเมนตัม และสมการ

พลังงาน ซึ่งทั้งหมดมีพื้นฐานตามหลักฟิสิกส์อันได้แก่กฎ



รูปที่ 1 แบบร่างเตาฟลูอิดไดซ์เบดแบบห้องเผาไหม้ผนังสองชั้นชนิดเบดหมุนวนและตำแหน่งการจ่ายอากาศที่ใช้ในการจำลองทางอุณหพลศาสตร์ของไหล (ก) เตาแบบที่ 1, (ข) เตาแบบที่ 2 และ (ค) เตาแบบที่ 3

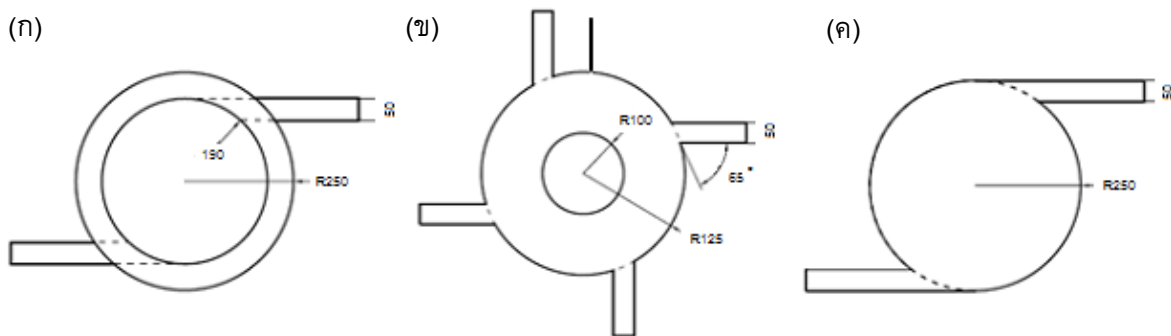
การอนุรักษ์มวลกฎข้อที่สองของนิวตัน ( $\Sigma F = ma$ ) และกฎการอนุรักษ์พลังงาน ซึ่งสำหรับการวิเคราะห์การไหลที่มีความปั่นป่วนมาก (มีเลขเรโนลด์สูง) จะใช้แบบจำลองความปั่นป่วน k- $\epsilon$  (k- $\epsilon$  Turbulence Model) ที่พิจารณาในส่วนของการไหลเพียงอย่างเดียว

### 2.2 การทดสอบการเกิดฟลูอิดไดซ์เซชันแบบ Cold-state

ฟลูอิดไดซ์เซชันคือสภาวะที่กลุ่มอนุภาคของแข็งถูกเปลี่ยนให้มีพฤติกรรมคล้ายของไหล เกิดจากการเพิ่มความเร็วอากาศจนถึงสภาวะที่น้ำหนักของเบดเท่ากับแรงเสียดทานของการไหลที่กระทำต่ออนุภาค

ของแข็งส่งผลให้อนุภาคลอยตัวอย่างอิสระในลักษณะที่เหมือนกับของไหล โดยในการทำการทดสอบนั้นค่าความแตกต่างของความดันจะสามารถคำนวณได้จากการเก็บค่าความสูงของระดับน้ำในเครื่องมือวัด (U-Tube Manometer) ไปคำนวณในสมการที่ (1) จากนั้นจะสามารถคำนวณหาค่าอัตราการไหลโดยนำความดันตกคร่อมแผ่นออริฟิสไปคำนวณในสมการที่ (2) สมการคำนวณค่าความดัน

$$\Delta p = p_1 - p_2 = (\rho)g\Delta z \quad (1)$$



รูปที่ 2 ลักษณะท่อกระจายอากาศ (ก) ท่อบริเวณผนังเตาชั้นในตามแนวเส้นสัมผัส (ทุติยภูมิ)

## AEC-121

(ข) ท่อไต้หวันแหวนวอร์เทคสัมผัสกับผนังเตาทำมุม  $65^\circ$  (ตติยภูมิส่วนล่าง)

(ค) ท่อเหนือวงแหวนวอร์เทคในแนวเส้นสัมผัสผนังเตา (ตติยภูมิส่วนบน)

$\Delta p$  = ค่าความแตกต่างความดัน (Pa)

$\rho$  = ค่าความหนาแน่นของน้ำ (1000 kg/m<sup>3</sup>)

$g$  = ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก (9.81 m/s<sup>2</sup>)

$\Delta z$  = ค่าความแตกต่างความสูงระดับน้ำ (m)

สมการคำนวณค่าอัตราการไหล

$$Q = A_2 \sqrt{\frac{2(P_2 - P_1) / \rho_{air}}{1 - (A_2 / A_1)^2}} \quad (2)$$

$Q$  = อัตราการไหลในท่อผ่านออริฟิส (m<sup>3</sup>/s)

$A_1$  = พื้นที่หน้าตัดของท่ออากาศชั้นต้น (m<sup>2</sup>)

$A_2$  = พื้นที่ช่องว่างของไบพัด (m<sup>2</sup>)

$\rho_{air}$  = ค่าความหนาแน่นของอากาศ (1.1774 kg/m<sup>3</sup>)

### 3. การสร้างแบบจำลองของเตาและผลของการทดสอบโดยใช้โปรแกรมทางอุณหพลศาสตร์ของไหล

#### 3.1 การสร้างแบบจำลองและการทดสอบ

ในการสร้างแบบจำลองของเตาซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลางหลังหัวกระจายอากาศขนาด 250 mm จะใช้อัตราการป้อน

ตารางที่ 1 เงื่อนไขและขอบเขตในการจำลอง

รายละเอียดเงื่อนไข	กลุ่มของเงื่อนไขหลัก	เงื่อนไขที่เลือกใช้
ข้อกำหนดเงื่อนไขขอบเขต	แบบจำลองเป็นลักษณะ	3D
	แบบจำลองการไหล	Turbulence
	Model	k-ε Model
	Velocity (m/s)	ตารางที่ 2
เงื่อนไขวัสดุ	ของไหล	อากาศ
	Material	solid
เงื่อนไขขอบเขต	Inlet	Velocity Inlet
	Wall-Solid	Wall
	Outlet	Pressure Outlet
การควบคุมการหาคำตอบ	วิธีการหาคำตอบ	SIMPLE
	การดีสครีตไทเซชัน	Second Order Upwind

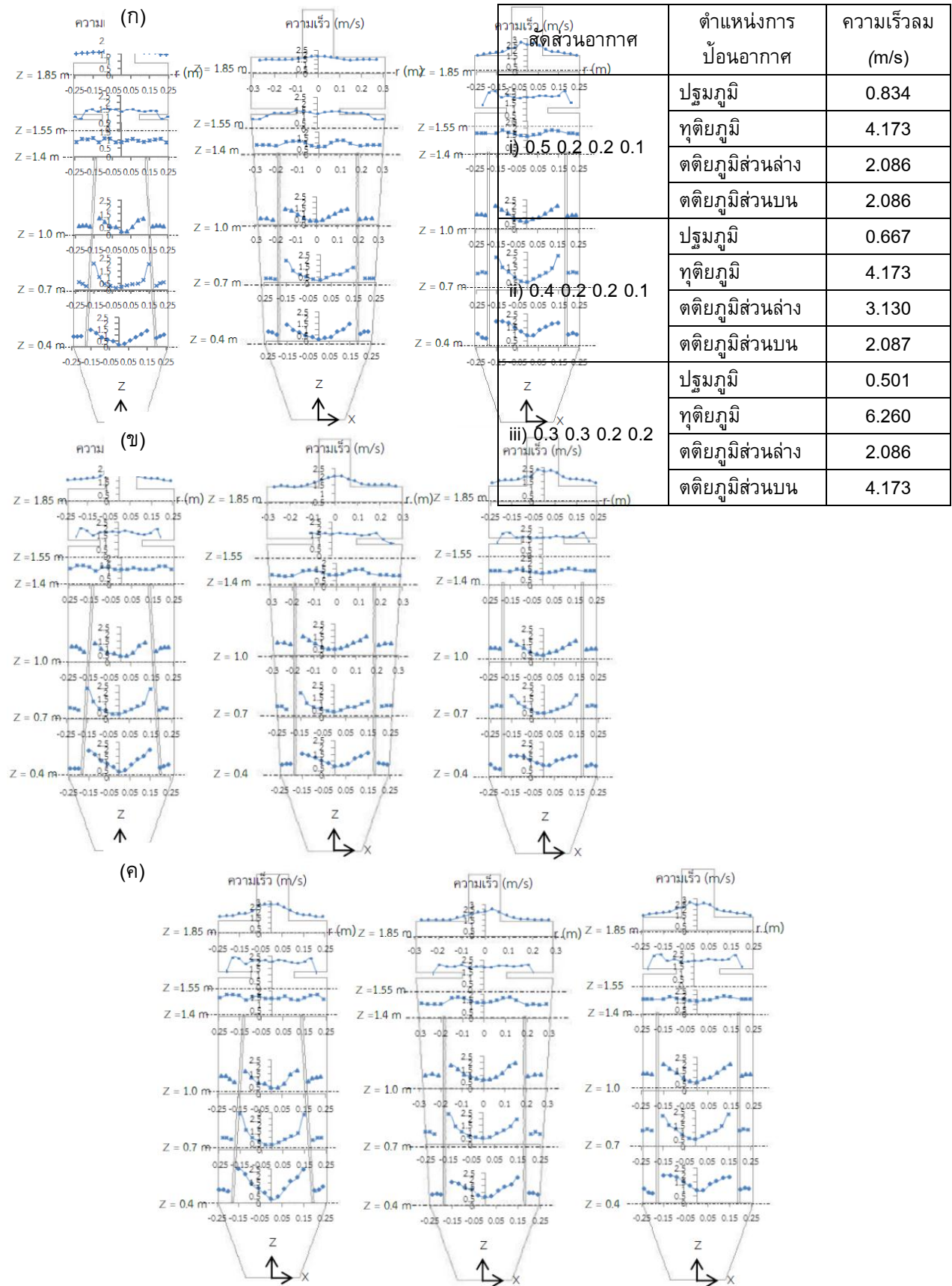
อากาศรวมเท่ากันทุกท่อ และจำลองลักษณะของผนังเตาชั้นใน ทั้งหมด 3 ลักษณะได้แก่ แบบพื้นที่หน้าตัดเล็กทางด้านบน (แบบที่ 1) แบบพื้นที่หน้าตัดใหญ่ทางด้านบน (แบบที่ 2) และแบบพื้นที่หน้าตัดคงที่ (แบบที่ 3) ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยเตาที่จำลองทั้งหมดจะมีการวางท่อป้อนอากาศเช่นเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อป้อนอากาศตติยภูมิและตติยภูมิทั้งหมดมีขนาด 50 mm และใช้สัดส่วนการป้อนอากาศ ทั้งหมด 3 สัดส่วน คือ i) 0.2 0.2 0.2 0.1, ii) 0.4 0.2 0.2 0.1 และ iii) 0.3 0.3 0.2 0.2 เพื่อพิจารณาเลือกลักษณะของเตารวมถึงสัดส่วนการป้อนอากาศที่เหมาะสมที่สุดในการสร้างชุดทดลองต่อไป โดยในการศึกษาพฤติกรรมการไหลของอากาศภายในเตา จะใช้โปรแกรมจำลองอุณหพลศาสตร์ของไหลซึ่งการกำหนดเงื่อนไขรวมถึงขอบเขตของการจำลองได้แสดงดังตารางที่ 1 และความเริ่มลมสำหรับใช้ในการจำลองที่ตำแหน่งป้อนอากาศต่างๆ (คำนวณจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลชนิดแกลบที่อากาศส่วนเกิน 60%) ได้แสดงในตารางที่ 2

#### 3.2 ผลการจำลองโดยใช้โปรแกรมทางอุณหพลศาสตร์ของไหล

กราฟความเร็วอากาศของเตาลักษณะต่างๆ ในแต่ละสภาวะการจำลองได้แสดงในรูปที่ 3 จากผลการ

# AEC-121

ตารางที่ 2 ความเร็วลมที่ใช้ในการจำลองตามสัดส่วน  
ของอากาศ ณ ตำแหน่งการป้อนอากาศต่างๆ





## AEC-121

คร่อมเบด ( $\Delta p$ ) ในเวลาเดียวกัน โดยการทดลองจะเริ่มต้นเก็บข้อมูลตั้งแต่วัสดุเบดหยุดหนึ่ง ไปจนถึงมีความเร็วที่ประมาณ  $3u_{mf}$

### 4.2 ผลการทดสอบพฤติกรรมของวัสดุเบดเมื่อเกิดการฟลูอิดไดเซชัน

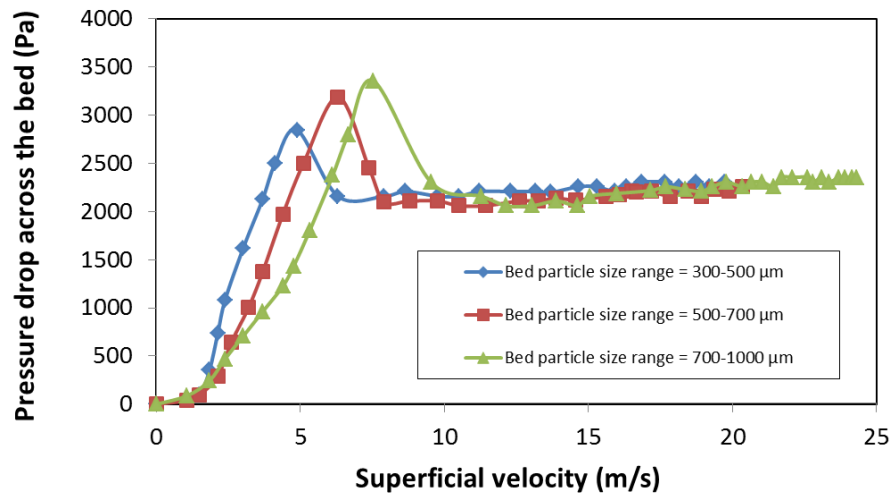
ผลทดสอบพฤติกรรมการไหลของเบดภายในเตาฟลูอิดไดซ์เบดแบบห้องเผาไหม้สองชั้นชนิดเบดหมุนวน โดยใช้ขนาดของเบดที่ 300–500, 500–700 และ 700–1000  $\mu\text{m}$  ได้แสดงดังรูปที่ 5 จากผลการทดลองพบว่าวัสดุเบดขนาดเล็กจะเกิดการฟลูอิดไดเซชันได้ง่ายกว่าวัสดุเบดที่มีขนาดใหญ่ โดยค่า  $u_{mf}$  ของวัสดุเบดทั้ง 3 ขนาดมีค่าเท่ากับ 4.88, 6.30 และ 7.54 m/s ตามลำดับ ทั้งนี้ความดันตกคร่อมเบดของวัสดุเบดขนาดเล็กจะมีค่าน้อยกว่าในวัสดุเบดที่มีขนาดใหญ่อีกด้วย โดยจะมีค่า  $\Delta p_{mf}$  ของวัสดุเบดทั้ง 3 ขนาดเท่ากับ 2.84, 3.19 และ 3.36 kPa ตามลำดับ อย่างไรก็ตามในการใช้วัสดุเบดทั้ง 3 ขนาด เมื่อทำการเพิ่มอัตราการป้อนอากาศเข้าไปอย่างต่อเนื่องจะทำให้ค่าความดันตกคร่อมเบดมีค่าลดลง และหลังจากนั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีการฟลูอิดไดซ์เซชันของเตาชนิดเบดหมุนวน [9]

### 5. สรุปผลการทดลอง

จากการออกแบบเตาฟลูอิดไดซ์เบดแบบห้องเผาไหม้สองชั้นชนิดเบดหมุนวน โดยใช้โปรแกรมจำลอง

อุณหภูมิศาสตร์ของไหลโดยมีการจำลองห้องเผาไหม้ 3 ลักษณะคือ แบบพื้นที่หน้าตัดเล็กทางด้านบน (แบบที่ 1) แบบพื้นที่หน้าตัดใหญ่ทางด้านบน (แบบที่ 2) และแบบพื้นที่หน้าตัดคงที่ (แบบที่ 3) และใช้สัดส่วนการป้อนอากาศ 3 สัดส่วน คือ i) 0.5 0.2 0.2 0.1, ii) 0.4 0.2 0.2 0.1 และ iii) 0.3 0.3 0.2 0.2 สามารถสรุปผลจากการจำลองได้ว่า ลักษณะเตาแบบผนังขนานมีความเหมาะสมที่สุด เนื่องจากลักษณะการไหลของอากาศภายในเตาบริเวณช่องว่างระหว่างผนังเตามีความเร็วสูงที่สุดซึ่งมีแนวโน้มทำให้เชื้อเพลิงกลับลงมาเผาไหม้อีกครั้งได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับเตาอีก 2 ลักษณะ และพบว่า การป้อนอากาศทั้ง 3 สัดส่วนมีผลต่อพฤติกรรมการไหลของอากาศภายในเตาใกล้เคียงกัน แต่ที่สัดส่วนการป้อนอากาศ 0.5 0.2 0.2 0.1 สามารถทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์เซชันได้ง่ายกว่าเนื่องจากมีสัดส่วนการป้อนอากาศปฐมภูมิสูงที่สุด จึงนำเตาและสัดส่วนการป้อนอากาศดังกล่าวมาสร้างเพื่อทดลองพฤติกรรมการเกิดฟลูอิดไดซ์เซชันที่สภาวะ cold-state ซึ่งจะทำการศึกษาพฤติกรรมการเกิดฟลูอิดไดซ์เซชันของวัสดุเบดทั้งหมด 3 ขนาด ได้แก่ขนาด 300–500, 500–700 และ 700–1000  $\mu\text{m}$  จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าวัสดุเบดขนาดเล็ก (300–500  $\mu\text{m}$ ) มีค่า  $u_{mf}$  และ  $\Delta p_{mf}$  ที่ต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอีก 2 ขนาดในระดับความสูงเบดหนึ่งเดียวกัน จึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ฟลูอิดไดซ์เซชันในเตาที่ได้ทำสร้างขึ้นจากการออกแบบมากที่สุด

## AEC-121



รูปที่ 5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\Delta p-u$  โดยใช้ทรายขนาด 300–500, 500–700 และ 700–1000  $\mu\text{m}$  เป็นวัสดุเบดที่ความสูงเบดหนึ่งเท่ากับ 20 cm

### 6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำการวิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ นครปฐม สำหรับเงินทุนสนับสนุนงานวิจัย

ขอขอบคุณนายชนุดร์ มีเฉย, นายรัช ปีมณี, นายธนัช ควรพิณิช และนายอนุชา พักนิกรณ์ สำหรับความทุ่มเทกำลังกายและกำลังใจในการจำลอง สร้างและทดสอบเตาฟลูอิดไดซ์เบดที่ใช้ในงานวิจัยนี้

### 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน (1999). "Biomass Energy in Asia: A Study on Selected Technologies and Policy Options, December 1999."
- [2] กระทรวงพลังงาน (2011). "EPPO STATS - Energy Statistics of Thailand 2011."
- [3] Kunii, D. and Levenspiel, O. (1991). *Fluidization Engineering*. Butterworths, 2nd edn, Massachusetts.
- [4] Permchart, W. and Kuprianov, V.I. (2004). Emission performance and combustion efficiency of a conical fluidized-bed combustor firing various biomass fuels. *Bioresource Technology*, 92: 83–91.

[5] Tillman, D.A., Rossi, A. J., Kitto, W.D. (1981). *Wood combustion*. New York: Academic Press.

[6] สมรัฐ เกิดสุวรรณ. (2547). การเผาไหม้และการควบคุมมลพิษ. ปทุมธานี. บริษัท สกายบุ๊กส์จำกัด.

[7] Leckner, B. and Karlsson, M. (1993). Gaseous emissions from circulating fluidized-bed combustion of wood. *Biomass and Bioenergy*, 4: 379–389.

[8] Arromdee, P. and 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: Process Intensification*, 62: 26–38.

[9] Kaewklum, R. and Kuprianov, V.I. (2010). Experimental studies on a novel swirling fluidized-bed combustor using an annular spiral air distributor. *Fuel*, 89: 43–52.

[10] Chakritthakul, S. and Kuprianov, V.I. (2011). Co-firing of eucalyptus bark and rubberwood sawdust in a swirling fluidized-bed combustor using an axial flow swirler. *Bioresource Technology*, 102: 8268–8278.

[11] Madhiyanon, T., Piriyanroj, N., and Soponronnarit, S. (2008). Cold flow behavior



## AEC-121

study in novel cyclonic fluidized-bed combustor.  
*Energy Conversion and Management*, 49: 1202–1210.

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