

การศึกษารูปแบบ และขนาดทางออกของเตาเผาแบบไซโคลน

โดยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

The Study of Characteristic and Outlet Dimension of Cyclone

Combustion Chamber Using Computational Fluid Dynamics

มานิตา ผสมประโยชน์ เกียรติฟ้า ตั้งใจจิต

ศูนย์วิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทน ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการศึกษารูปแบบ และขนาดทางออกของเตาเผาแบบไซโคลนสำหรับเผาไหม้เชื้อเพลิงกากส่าเหล้าในห้องปฏิบัติการ เพื่อหารูปแบบเตาเผาแบบไซโคลนที่มีซี่เก้าปลิวน้อยที่สุด โดยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) ด้วยโปรแกรม ANSYS Fluent version 15.0 แบบจำลองเตาเผาแบบไซโคลนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร ความกว้างของห้องเผาไหม้ 100 เซนติเมตร พบว่าแบบจำลองเตาเผาแบบไซโคลนที่มีทรงกระบอกกลวงสำหรับดักซี่เก้าปลิวมีอุณหภูมิเฉลี่ยภายในห้องเผาไหม้สูงกว่า แต่จำนวนซี่เก้าปลิวที่หลุดออกจากเตาเผามากกว่าแบบจำลองเตาเผาแบบไซโคลนที่มีกรวยตัดสำหรับดักซี่เก้าปลิว ดังนั้นเตาเผาแบบไซโคลนที่เหมาะสมสำหรับเผาไหม้เชื้อเพลิงกากส่าเหล้าที่สุดคือเตาเผาแบบไซโคลนที่มีกรวยตัดสำหรับดักซี่เก้าปลิวที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกรวยตัด 8-12 เซนติเมตร และยื่นเข้าสู่ห้องเผาไหม้ 5-10 เซนติเมตร

คำสำคัญ : เตาเผาแบบไซโคลน, เชื้อเพลิงกากส่าเหล้า, วิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

Abstract

This article studies characteristic and appropriate outlet diameter of cyclone combustion chamber for the slop fuel in the laboratory to find cyclone combustion model with the least fly ash, using CFD of the ANSYS Fluent v.15.0. Cyclone combustion model is 30 cm in diameter and 100 cm in width of combustion chamber. The results showed that average temperature in combustion chamber and the amount of fly ash in cyclone chamber model with hollow cylinder for trap fly ash is higher than cyclone chamber model with cone cut for trap fly ash. Therefore, the cyclone chamber model with cone cut for trap fly ash suitable for burning slop fuel is diameter 8-12 cm and extends into cyclone chamber 5-10 cm.

Keywords : Cyclone combustion chamber, Slop fuel, Computational Fluid Dynamics (CFD)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. บทนำ

ปัจจุบันประเทศไทยมีการเจริญทางอุตสาหกรรมในอัตราสูง ก่อให้เกิดแนวโน้มปริมาณของเสียที่เกิดจากโรงงานอุตสาหกรรมในแต่ละปีมากขึ้น โดยเฉพาะอุตสาหกรรมเครื่องดื่มน้ำแอลกอฮอล์ที่มีการใช้กากน้ำตาลเป็นวัตถุดิบ มีน้ำเสียหลักจากกระบวนการผลิตคือน้ำกากส่าเหล่านี้ ซึ่งไม่สามารถปล่อยทิ้งสู่แหล่งน้ำโดยตรง ต้องได้รับการบำบัดก่อน เช่นระบบบ่อบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน, ระบบเตาเผา ปัจจุบันการบำบัดน้ำกากส่าเหล่านี้ ระบบเตาเผาจะใช้เตาเผาแบบโดยตรง ซึ่งหลังจากการเผาไหม้จะเกิดขึ้นจำนวนมากเป็นภาระค่าใช้จ่ายในการจัดการ เพื่อลดของเสียจากกระบวนการผลิต และเพิ่มความสามารถในการนำไปใช้ประโยชน์ จึงทำการศึกษา นำกากส่าเหล่านี้มาพัฒนาเป็นเชื้อเพลิงทดแทนหรือลดปริมาณเชื้อเพลิงหลักในหม้อไอน้ำ และลดปริมาณขี้เถ้าปิว

จากการศึกษาพบว่าควรเลือกเตาเผาแบบไซโคลนสำหรับเผาไหม้เชื้อเพลิงกากส่าเหล่านี้ เนื่องจากอากาศจะเข้าสู่เตาเผาในแนวสัมผัสกับผนังของห้องเผาไหม้ ทำให้เชื้อเพลิงเกิดการเคลื่อนที่แบบปั่นป่วนในห้องเผาไหม้ เพิ่มเวลาของเชื้อเพลิงและอากาศให้อยู่ในเตาได้มากขึ้น [1] ห้องเผาไหม้แบบไซโคลนสามารถทำอุณหภูมิภายในเตาเผาสูงถึง 1650°C ทำให้ขี้เถ้าหลอมละลายกลายเป็นขี้เถ้าเหลว 30-50% และเหลือขี้เถ้าปนออกมากับแก๊สร้อนหรือขี้เถ้าปิว เพียง 70-50% ขี้เถ้าเหลวสามารถปล่อยออกทางด้านล่างของเตาเผาได้ [2] การเพิ่มอากาศในการเผาไหม้จะทำให้อุณหภูมิการเผาไหม้ภายในเตาเผาลดลง เมื่อเทียบกับค่าใช้จ่ายในการเพิ่มปริมาณอากาศในการเผาไหม้ ควรเพิ่มอากาศเป็น 130-140% ของอากาศตามทฤษฎี [3]-[4] การผสมของเชื้อเพลิงที่เหมาะสมและระยะเวลาการเผาไหม้ที่เพียงพอสามารถทำให้เกิดการเผาไหม้ที่มีประสิทธิภาพ ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนในขี้เถ้าและขี้เถ้าปิวน้อย [5]

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

ศึกษารูปแบบ และขนาดทางออกของเตาเผาแบบไซโคลนสำหรับเผาไหม้เชื้อเพลิงกากส่าเหล่านี้ เพื่อหารูปแบบทางออกของเตาเผาแบบไซโคลนสำหรับเผาไหม้เชื้อเพลิงกากส่าเหล่านี้ที่มีขี้เถ้าปิวออกจากเตาเผาน้อยที่สุด โดยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD)

3. วิธีการวิจัย

3.1 การสร้างแบบจำลองเตาเผาแบบไซโคลน

3.1.1 แบบจำลองเตาเผาแบบไซโคลนที่มี

ทรงกระบอกกลวงสำหรับดักขี้เถ้าปิว

สร้างแบบจำลองเตาเผาแบบไซโคลนที่มีทรงกระบอกกลวงสำหรับดักขี้เถ้าปิวรูปที่ 1 สำหรับเผาไหม้เชื้อเพลิงกากส่าเหล่านี้ ทำการเปลี่ยนแปลงขนาดทรงกระบอกกลวงสำหรับดักขี้เถ้าปิวของเตาเผาไซโคลนดังตารางที่ 1

3.1.2 การสร้างแบบจำลองเตาเผาแบบไซโคลนที่มีกรวยตัดสำหรับดักขี้เถ้าปิว

สร้างแบบจำลองเตาเผาแบบไซโคลนที่มีกรวยตัดสำหรับดักขี้เถ้าปิวรูปที่ 2 สำหรับเผาไหม้เชื้อเพลิงกากส่าเหล่านี้ ทำการเปลี่ยนแปลงขนาดกรวยตัดสำหรับดักขี้เถ้าปิวของเตาเผาไซโคลนดังตารางที่ 2

3.2 เงื่อนไขการวิเคราะห์แบบจำลองเตาเผาแบบไซโคลน

แบบจำลองเตาเผาแบบไซโคลนได้ทำการศึกษาจำนวนเอลิเมนต์ที่เหมาะสม ได้แก่ 1.5, 1.8, 2.0, 2.3 ล้านเอลิเมนต์ พบว่า 2.0 ล้านเอลิเมนต์เหมาะสมที่สุด ทำการเผาไหม้แบบไม่มีการถ่ายเทความร้อนสู่สิ่งแวดล้อม โดย

(1) เชื้อเพลิงกากส่าเหล่านี้ 3 กรัม/วินาที รวมกับน้ำมันดีเซล 1 กรัม/วินาที ที่มีส่วนประกอบดังตารางที่ 3 ค่า Air fuel ratio เท่ากับ 5.4

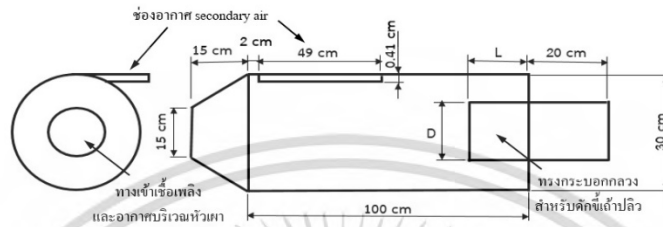
(2) ปริมาณอากาศเข้าสู่ห้องเผาไหม้ 100% ของอากาศตามทฤษฎี อากาศเข้าสู่ห้องเผาไหม้แบ่งเป็น 2 ส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

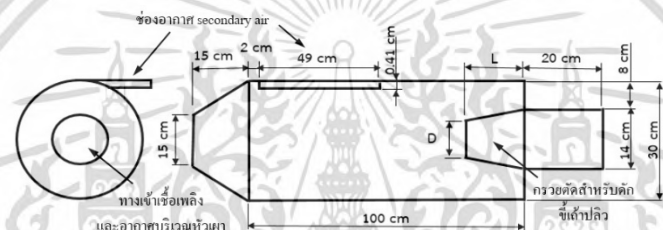
คืออากาศเข้าสู่ห้องเผาไหม้บริเวณหัวเผา 2.32 กรัม/วินาที และอากาศเข้าสู่ห้องเผาไหม้บริเวณ secondary air 19.28 กรัม/วินาที ความเร็วอากาศ secondary air 8.2 เมตร/วินาที

(4) ขี้เถ้าในเชื้อเพลิงกากส่าเหล่านี้มีขนาดอนุภาค คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กที่สุด, ใหญ่ที่สุด และเฉลี่ยที่ 2.27, 116.21 และ 29.74 ไมโครเมตร ตามลำดับ

(3) อุณหภูมิเชื้อเพลิงกากส่าเหล่านี้ให้มีอุณหภูมิ 90°C ก่อนเข้าสู่หัวเผา และอากาศก่อนเข้าห้องเผาไหม้บริเวณ Secondary Air ให้มีอุณหภูมิ 250°C



รูปที่ 1 แสดงขนาดแบบจำลองเตาเผาแบบไซโคลนที่มีทรงกระบอกกลางสำหรับดักขี้เถ้าปลิว



รูปที่ 2 แสดงขนาดแบบจำลองเตาเผาแบบไซโคลนที่มีกรวยตัดสำหรับดักขี้เถ้าปลิว

ตารางที่ 1 แสดงตัวแปรที่ใช้วิเคราะห์แบบจำลองเตาเผาแบบไซโคลนที่มีทรงกระบอกกลางสำหรับดักขี้เถ้าปลิว

model	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
D (cm)	18	18	18	18	18	18	16	16	16	16	16	16	14	14	14	14	14	14
L (cm)	0	5	10	15	20	25	0	5	10	15	20	25	0	5	10	15	20	25

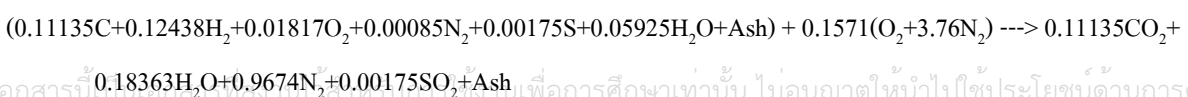
ตารางที่ 2 แสดงตัวแปรที่ใช้วิเคราะห์แบบจำลองเตาเผาแบบไซโคลนที่มีกรวยตัดสำหรับดักขี้เถ้าปลิว

model	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15			
D (cm)	12	12	12	12	12	10	10	10	10	10	8	8	8	8	8			
L (cm)	5	10	15	20	25	5	10	15	20	25	5	10	15	20	25			

ตารางที่ 3 แสดงส่วนประกอบของเชื้อเพลิงกากส่าเหล่านี้และน้ำมันดีเซล

		C	H ₂	O ₂	N ₂	S	H ₂ O	Ash
กากของเสียแบบเหลว	% wt	15.874	3.925	19.380	0.7927	1.566	35.550	22.912
น้ำมันดีเซล	% wt	86	13.1	0	0	0.9	0	-

สมการการเผาไหม้เชื้อเพลิงกากส่าเหล่านี้ 3 g/s รวมกับน้ำมันดีเซล 1 g/s



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การวิเคราะห์โดยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิง

คำนวณ (CFD)

การวิเคราะห์โดยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) โดยโปรแกรม ANSYS Fluent v. 15.0 การทำนายการเผาไหม้จำเป็นต้องใช้สมการพลังงาน, สมการการไหลแบบปั่นป่วน สมการแบบจำลอง $k-\epsilon$, สมการการเผาไหม้ สมการแบบจำลอง non-premixed combustion [6] และสมการ swirl no. [7] เป็นค่าเปรียบเทียบความรุนแรงของการเกิดการไหลหมุนเหวี่ยงแบบไซโคลน การไหลที่มีการหมุนเหวี่ยงแบบไซโคลนค่า swirl no. > 0.5 ดังสมการนี้

$$S = \frac{\int r w \vec{v} \cdot d\vec{A}}{\bar{R} \int u \vec{v} \cdot d\vec{A}} \quad (1)$$

$$\bar{R} = \frac{A}{P} \quad (2)$$

S = swirl no., \bar{R} = hydraulic radius (m), A = cross section area of flow (m^2), P = wetted perimeter (m)

4. ผลการวิจัย

4.1 การกระจายตัวของอนุภาคน้ำมันในเตาเผา

แบบจำลอง A1-A18 และแบบจำลอง B1-B15 การกระจายตัวของอนุภาคน้ำมันสูงมีลักษณะคล้ายกันทุกแบบจำลอง ดังตัวอย่างแบบจำลอง A9 รูปที่ 3(ก) และ B8 รูปที่ 5(ก) การกระจายตัวของอนุภาคน้ำมันสูงเกิดขึ้นมากบริเวณส่วนท้ายของห้องเผาไหม้ แนวโน้มอนุภาคน้ำมันภายในห้องเผาไหม้ของแบบจำลอง A1-A18 จะลดลงตามความยาวของทรงกระบอกกลางที่ขึ้นเข้าสู่ห้องเผาไหม้ และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกระบอกกลางตามลำดับ เนื่องจากเมื่อเตาเผาแบบไซโคลนมีทรงกระบอกกลางขึ้นเข้าสู่ห้องเผาไหม้มากขึ้น และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกระบอกกลางและทางออกของห้องเผาไหม้ลดลง ทำให้พื้นที่สำหรับการเผาไหม้ลดลง อนุภาคน้ำมันภายในห้องเผาไหม้จึงลดลง ดังรูปที่ 4(ก) ส่วนแบบจำลอง B1-B15 จะลดลงตามความยาวของกรวยตัดที่ขึ้นเข้าสู่ห้องเผาไหม้ตามลำดับ เนื่องจากเมื่อเตาเผา

แบบไซโคลนมีกรวยตัดที่ขึ้นเข้าสู่ห้องเผาไหม้มากขึ้น ทำให้พื้นที่สำหรับการเผาไหม้ลดลง อนุภาคน้ำมันภายในห้องเผาไหม้จึงลดลง ดังรูปที่ 6(ก)

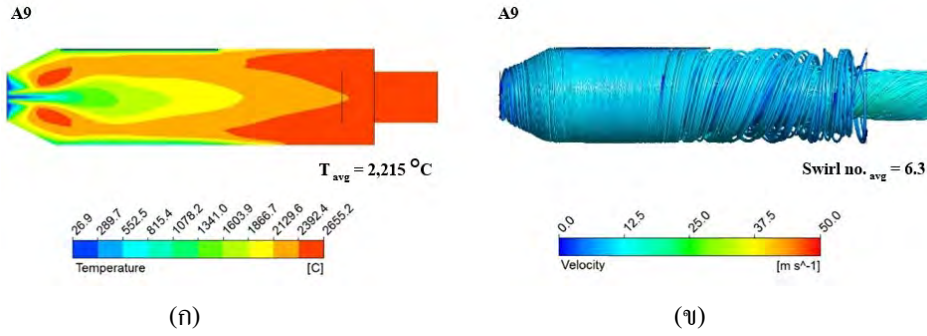
4.2 ลักษณะการไหลภายในเตาเผา และค่า swirl number

แบบจำลอง A1-A18 และแบบจำลอง B1-B15 ลักษณะการไหลภายในเตาเผาคล้ายกันทุกแบบจำลอง ดังตัวอย่างแบบจำลอง A9 รูปที่ 3(ข) และแบบจำลอง B8 รูปที่ 5(ข) มีการไหลหมุนเหวี่ยงแบบไซโคลน แบบจำลอง A1-A18 มีค่า swirl no. เฉลี่ย 5.8-6.8 ส่วนแบบจำลอง B1-B15 มีค่า swirl no. เฉลี่ย 7.4-8.1 แบบจำลองเตาเผาที่มีรูปแบบคล้ายคลึงกับ cyclone separator ซึ่งมีค่า swirl no. ประมาณ 3-7 [8]-[10] แต่แบบจำลอง B1-B15 มีค่า swirl no. มากกว่าเนื่องจากเกิดการไหลหมุนเหวี่ยงแบบไซโคลนรุนแรงมากกว่า

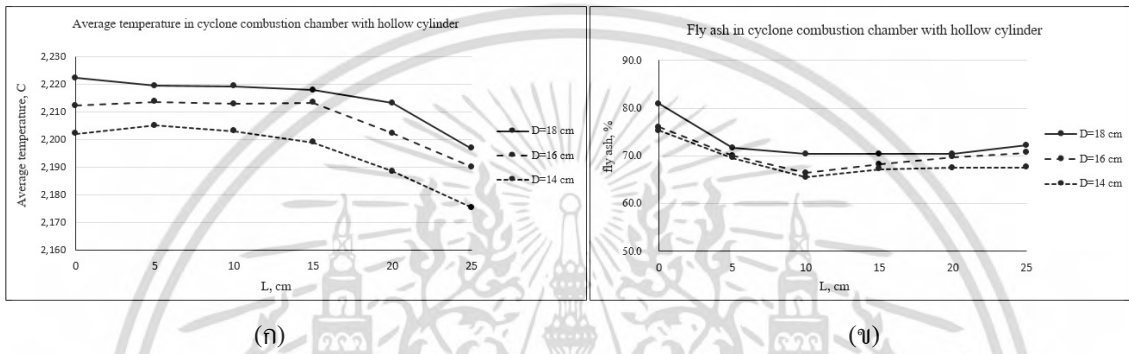
4.3 ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของอนุภาคน้ำมันโดยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD)

การเคลื่อนที่ของอนุภาคน้ำมันภายในเตาเผาของแบบจำลอง A1-A18 และแบบจำลอง B1-B15 มีจำนวนอนุภาคน้ำมันที่หลุดออกจากเตาเผาประมาณ 73% และ 62% ตามลำดับ แนวโน้มจำนวนอนุภาคน้ำมันที่หลุดของแบบจำลอง A1-A18 ลดลงตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกระบอกกลางตามลำดับ เนื่องจากเมื่อเตาเผาแบบไซโคลนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกระบอกกลางและทางออกของห้องเผาไหม้ลดลง ทำให้มีพื้นที่สำหรับการหมุนเหวี่ยงอนุภาคน้ำมันให้ถูกสกัดติดกับผนังเตามากขึ้น และที่ความชื้นไปได้ที่จะเกิดการหลอมละลายของขี้เถ้ากลายเป็นขี้เถ้าเหลวภายในเตาเผา จำนวนอนุภาคน้ำมันที่หลุดจึงลดลงดังรูปที่ 4 (ข) ส่วนแบบจำลอง B1-B15 จะเพิ่มขึ้นตามความยาวของกรวยตัดที่ขึ้นเข้าสู่ห้องเผาไหม้ตามลำดับ เนื่องจากเมื่อเตาเผาแบบไซโคลนมีกรวยตัดที่ขึ้นเข้าสู่ห้องเผาไหม้มากขึ้น ทำให้อนุภาคน้ำมันถูกหมุนเหวี่ยงสกัดติดกับผนังเตาได้ไม่ดี จำนวนอนุภาคน้ำมันที่หลุดจึงเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 6(ข)

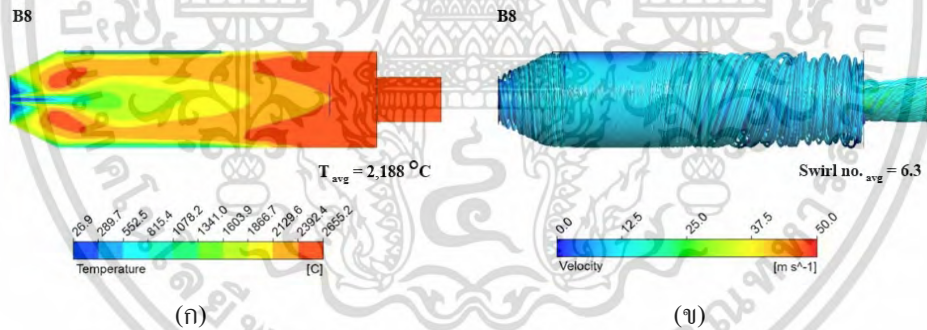
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



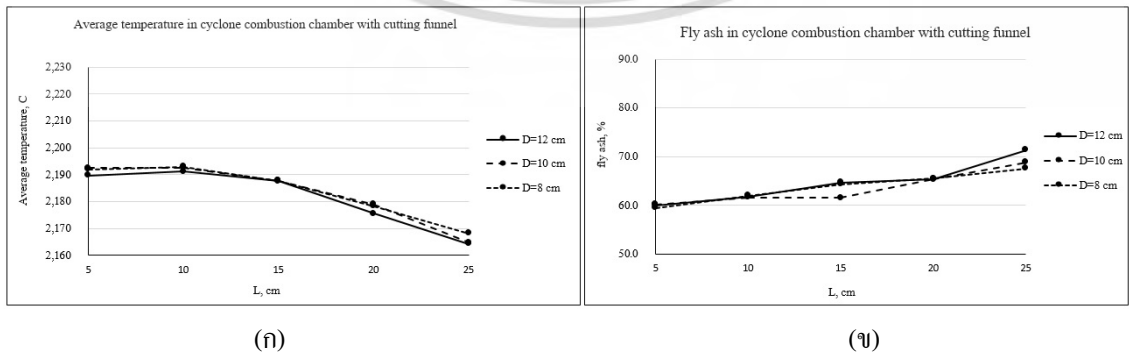
รูปที่ 3 แสดงตัวอย่างแบบจำลอง A9 (ก) การกระจายตัวของอุณหภูมิ (ข) ลักษณะการไหล และค่า swirl no. ของแบบจำลองเตาเผาแบบไซโคลนที่มีทรงกระบอกกลวงสำหรับดักขี้เถ้าปลิว



รูปที่ 4 แสดง (ก) กราฟแสดงอุณหภูมิเฉลี่ยภายในห้องเผาไหม้ (ข) กราฟแสดงจำนวนขี้เถ้าปลิว ของแบบจำลองเตาเผาแบบไซโคลนที่มีทรงกระบอกกลวงสำหรับดักขี้เถ้าปลิว



รูปที่ 5 แสดงตัวอย่างแบบจำลอง B8 (ก) การกระจายตัวของอุณหภูมิ (ข) ลักษณะการไหล และค่า swirl no. ของแบบจำลองเตาเผาแบบไซโคลนที่มีกรวยตัดสำหรับดักขี้เถ้าปลิว



รูปที่ 6 แสดง (ก) กราฟแสดงอุณหภูมิเฉลี่ยภายในห้องเผาไหม้ (ข) กราฟแสดงจำนวนขี้เถ้าปลิว ของแบบจำลองเตาเผาแบบไซโคลนที่มีกรวยตัดสำหรับดักขี้เถ้าปลิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

จากการสร้างแบบจำลองเตาเผาแบบไซโคลน ทำนายการเผาไหม้เชื้อเพลิงกากส่าเหล่าที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร ความกว้างของห้องเผาไหม้ 100 เซนติเมตร พบว่าแบบจำลองเตาเผาแบบไซโคลนที่มีทรงกระบอกกลางสำหรับดักขี้เถ้าปลิวมีอุณหภูมิเฉลี่ยภายในห้องเผาไหม้สูงกว่า แต่จำนวนขี้เถ้าปลิวที่หลุดออกจากเตาเผา มากกว่าแบบจำลองเตาเผาแบบไซโคลนที่มีกรวยตัดสำหรับดักขี้เถ้าปลิว สำหรับการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกากส่าเหล่านี้นั้นเน้นในส่วนของดักขี้เถ้าปลิว จึงสามารถสรุปได้ว่าเตาเผาแบบไซโคลนที่มีกรวยตัดสำหรับดักขี้เถ้าปลิวเหมาะสมสำหรับเผาไหม้เชื้อเพลิงกากส่าเหล่าที่สุด ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกรวยตัด 8-12 เซนติเมตร และยื่นเข้าสู่ห้องเผาไหม้ 5-10 เซนติเมตร เนื่องจากอุณหภูมิเฉลี่ยภายในห้องเผาไหม้สูง และจำนวนขี้เถ้าปลิวที่หลุดออกจากเตาเผาน้อย

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ บริษัท ไทยเบฟเวอเรจ เอ็นเนอร์ยี่ จำกัด ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยและกากส่าเหล่า ศูนย์วิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทน และภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ให้ความอนุเคราะห์ห้องปฏิบัติการ และคอมพิวเตอร์ประสิทธิภาพสูง

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Pirker et al., "Application of a hybrid Lattice Boltzmann-Finite Volume turbulence model to cyclone short-cut flow," *Power Technology*, Vol.235, pp.572-580, Feb., 2013.
- [2] Christof Lanzerstorfer, "Cyclone fly ash from a grate-fired biomass combustion plant: Dependence of the concentration of various

components on the particle size," *Fuel Processing Technology*, Vol.131, pp.382-388, Mar., 2015.

- [3] S.Y. Luo* et al., "Experimental study on oxygen-enriched combustion of biomass micro fuel," *Energy*, Vol.34, pp.1880-1884, Nov., 2009.
- [4] Piotr Warzecha and Andrzej Boguslawski, "Simulations of pulverized coal oxy-combustion in swirl burner using RANS and LES methods," *Fuel Processing Technology*, Vol.119, pp.130-135, Mar., 2014.
- [5] Luo Siyi et al., "Experimental study on combustion of biomass micron fuel (BMF) in cyclone furnace," *Energy Conversion and Management*, Vol.51, pp.2098-2102, Nov., 2010.
- [6] Piotr Warzecha and Andrzej Boguslawski, "LES and RANS modeling of pulverized coal combustion in swirl burner for air and oxy-combustion technologies," *Energy*, Vol.66, pp.732-743, Mar., 2014.
- [7] Ansys fluent theory guide, version 15.0, Canonsburg, Reading, PA, 2014.
- [8] David Winfield et al., "Performance comparison of a single and triple tangential gas separation cyclone: A CFD study," *Power Technology*, Vol.235, pp.520-531, Feb., 2012.
- [9] Ferit Ficici, Vedat Ari and Murat Kapsiz, "The effects of vortex finder on the pressure drop in cyclone separators," *International Journal of the Physical Sciences*, Vol.5, pp.804-813, Jul. 2010.
- [10] Ferit Ficici and Vedat Ari, "Optimization of the preheater cyclone separators used in the cement industry," *International Journal of Green Energy*, Vol.10, pp.12-27, Mar., 2013.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้