



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ : เตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์เบดโดยใช้เชื้อเพลิงแกลบในระดับปฏิบัติการ

โดย อาจารย์นิติ พิริยะรุ่งโรจน์ และคณะ

31 ตุลาคม 2547

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ : เตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดเบดโดยใช้เชื้อเพลิงแกลบในระดับปฏิบัติการ

คณะผู้วิจัย สังกัด

หัวหน้าโครงการ : อาจารย์นิติ พิริยะรุ่งโรจน์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
ผู้ร่วมวิจัย : ดร.ฐานิตย์ เมธิยานนท์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
ที่ปรึกษา : ศ.ดร.สมชาติ โสภณธนฤทธิ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ชุดโครงการสนับสนุนปฏิบัติการวิจัยในภาคอุตสาหกรรม

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

(ความเห็นในรายนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

สารบัญ

รายงานฉบับสมบูรณ์ประกอบด้วย	หน้า
1. Executive Summary	1
2. บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	2
3. บทคัดย่อภาษาไทย	3
4. แบบสรุปโครงการวิจัยฝ่ายอุตสาหกรรม	4
5. แบบฟอร์มตารางเปรียบเทียบวัตถุดิบประสงค์ กิจกรรมที่วางแผนไว้ และกิจกรรมที่ดำเนินการมาและผลที่ได้รับ ตลอดโครงการ	8
6. การออกแบบสร้างและทดลอง เตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดไชน์เบดโดยใช้เชื้อเพลิงแกลบในระดับปฏิบัติการ และออกแบบเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดไชน์เบดระดับอุตสาหกรรมขนาด 9 MW _{th}	9
ภาคผนวก	
ภาคผนวก 1 ตัวอย่างการคำนวณหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดไชน์เบด โดยใช้เชื้อเพลิงแกลบในระดับปฏิบัติการ	50
ภาคผนวก 2 บทความสำหรับการเผยแพร่	51

Executive Summary

เนื่องจากในแต่ละปีอุตสาหกรรมโรงสีข้าว อุตสาหกรรมแปรรูปอาหารสัตว์มีความต้องการพลังงานความร้อนไปใช้ในกระบวนการผลิตเป็นจำนวนมาก เช่น ใช้ในการอบแห้ง ผลิโต๊นท์ เป็นต้น ซึ่งทำให้มีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการสูงและประเทศต้องนำเข้าน้ำมันจากต่างประเทศเข้ามาปีละจำนวนมาก จึงได้มีผู้ประกอบการหลายรายภายในประเทศผลิตเตาเผาไหม้ที่ใช้เชื้อเพลิงจากชีวมวล เช่น แกลบ ชังข้าวโพดเป็นต้น เพื่อใช้กับอุตสาหกรรมดังกล่าวโดยเตาที่ผลิตขึ้นภายในประเทศ ได้แก่เตาเผาไหม้แบบปล่องควัน แบบตะแกรงเอียง เตาเผาไหม้ไซโคลน และเตาเผาไหม้ฟลูอิดไชน์เบด ซึ่งเตาแต่ละแบบมีลักษณะเด่นต่างกันไป เช่น เตาเผาไหม้ไซโคลนมีสัดส่วนความสูงต่อเส้นศูนย์กลางต่ำทำให้สะดวกในการติดตั้งภายในอาคาร แต่ให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนและค่าพิคัดความร้อนต่ำ นั่นหมายความว่าความคุ้มค่าในการใช้เชื้อเพลิงและความคุ้มค่าในการใช้พื้นที่ภายในเตาต่ำ ซึ่งแตกต่างจากเตาเผาไหม้ฟลูอิดไชน์เบดที่ให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนและค่าพิคัดความร้อนที่สูงแต่สัดส่วนความสูงต่อเส้นศูนย์กลางมากทำให้เกิดปัญหาในการติดตั้ง ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงทำการออกแบบและสร้างเตาเผาไหม้แบบใหม่ นั่นคือเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดไชน์เบด (VFBC) ที่สามารถรวมลักษณะเด่นของเตาเผาไหม้ไซโคลน เตาเผาไหม้ฟลูอิดไชน์เบดไว้ด้วยกันและยังสามารถใช้กับเชื้อเพลิงจากชีวมวลที่หาได้ภายในประเทศ (ซึ่งการออกแบบและสร้าง VFBC นั้นคณะผู้วิจัยได้ข้อมูลพื้นฐาน จากการศึกษาพฤติกรรมการไหลของอากาศและแกลบภายใน VFBC จำลอง ซึ่งได้ทำการวิจัยก่อนหน้านี้) และเมื่อทำการทดลองพบว่า VFBC สามารถรวมพฤติกรรมการเผาไหม้แบบวอร์เทคและฟลูอิดไชน์เบดขณะที่เกิดการเผาไหม้จะทำให้เกิดการเผาไหม้ตลอดทั่วทั้งพื้นที่หน้าตัดของเตาทำให้ VFBC สามารถผลิตพิคัดความร้อนจำเพาะได้สูงถึง $0.91 \text{ MW}_{th}/\text{m}^3$ ซึ่งมากกว่าเตาเผาไหม้ไซโคลนที่ผลิตพิคัดความร้อนจำเพาะได้เท่ากับ $0.34 \text{ MW}_{th}/\text{m}^3$ ซึ่งจะทำให้ผู้ประกอบการสามารถซื้อเตาในราคาที่ถูกลงในกรณีที่ต้องการค่าพลังงานความร้อนที่ได้ต่อปริมาตรของเตาที่เท่ากันกับเตาไซโคลน เนื่องจากเตามีขนาดเล็กลงต้นทุนในการผลิตจึงต่ำลงตาม และการที่ได้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเท่ากับ 95% ซึ่งมากกว่าเตาเผาไหม้ไซโคลนที่ให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเท่ากับ 65-80% นั่นหมายความว่าผู้ประกอบการจะลดค่าใช้จ่ายในส่วนของการใช้เชื้อเพลิงได้มากกว่า เนื่องจากเตาเผา VFBC สามารถผลิตพลังงานความร้อนได้มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบปริมาณการใช้เชื้อเพลิงที่เท่ากัน และข้อดีอีกประการของ VFBC ก็คือมีสัดส่วนความสูงต่อเส้นศูนย์กลางต่ำเท่ากับ 2.75 ซึ่งน้อยกว่าเตาเผาไหม้ฟลูอิดไชน์เบดที่มีสัดส่วนความสูงต่อเส้นศูนย์กลางเท่ากับ 13 ทำให้ VFBC เกิดความสะดวกในการเคลื่อนย้ายและติดตั้ง จากข้อมูลดังกล่าวทำให้เตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดไชน์เบด เป็นทางเลือกใหม่สำหรับผู้ประกอบการที่ต้องการเตาเผาสำหรับผลิตพลังงานความร้อน

Abstract

A novel vortexing-fluidized bed combustor (VFBC) using rice-husk as fuel was developed and presented. The combined characteristics of vortex combustion and fluidized bed combustion are the main features of the VFBC, which was designed to achieve high thermal capacity ($\text{MW}_{\text{th}} \text{m}^{-3}$), high thermal efficiency and low diameter to height ratio. The VFBC comprises a vertical cylinder chamber and a conical base, which provides a bed for incompletely combusted fuel. The overall dimensions are 1.10 m in height and 0.40 m in diameter. To evaluate combustor performance, the specific feed rate of fuel and mass flow rates of the primary, secondary, and tertiary air were varied independently of one another. The combustion appeared into two zones characterized by different combustion behaviors, i.e. 1) vortex combustion above the vortex ring and 2) fluidized bed combustion below the vortex ring. The fluidized bed zone has uniform temperature distributions across the cross-section of the combustor. The swirling of air above the vortex ring and the vortex ring itself played important roles in preventing the escape of combustion particulates. Bottom ash appeared as fine black and grey particles of ash, which ranged in size from 200 to 600 μm . Fluidization could be initiated without the assistance of any inert material mixed into the bed. The experimental results indicated that thermal efficiency did not depend on the secondary or tertiary airflows, but was significantly influenced by the excess air resulting from the combined total of the three airflows. The introduction of the tertiary airflow helped maintaining the temperature inside the combustor within acceptable levels. According to experimental conditions, i.e. a specific feed rate of $240 \text{ kg h}^{-1} \text{m}^{-3}$ and excess air (157%), it was found that the VFBC could achieve an exit gas temperature of 1060°C , thermal efficiency of 95%, and thermal capacity of $0.91 \text{ MW}_{\text{th}} \text{m}^{-3}$. The amounts of CO_2 , CO, and O_2 gases emitted were directly related to thermal efficiency, and the amounts of CO and NO_x were 50 and 380 ppm, respectively.

บทคัดย่อ

ในโครงการวิจัยนี้ได้มีการพัฒนาเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์เบด (Vortexing-Fluidized bed Combustor, VFBC) ที่ใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิง โดยออกแบบให้มีการร่วมลักษณะเด่นของการเผาไหม้แบบวอร์เทคและฟลูอิดซ์เบดไว้ด้วยกัน โดยมีจุดประสงค์เพื่อต้องการเตาเผาไหม้แบบใหม่ที่ให้ค่าพิกัดความร้อน ($MW_{th} m^{-3}$) และประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูง แต่ในขณะเดียวกันมีค่าสัดส่วนความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางต่ำ เตาเผาที่ใช้ในการทดลองมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและความสูงเท่ากับ 0.4 และ 1.10 เมตร ตามลำดับ และมีฐานเป็นรูปกรวยสำหรับรองรับอนุภาคที่ยังเผาไหม้ไม่หมด ในการทดสอบสมรรถนะของเตาได้มีการแปรเปลี่ยนอัตราการป้อนเชื้อเพลิงจำเพาะและอัตราการไหลของอากาศส่วนที่หนึ่ง สอง และสาม ในแต่ละการทดลอง จากผลการทดลองพบว่าภายในเตาเผาไหม้จะถูกแบ่งออกเป็นห้องเผาไหม้สองส่วนตามลักษณะการเผาไหม้คือ 1) บริเวณที่อยู่เหนือวงแหวนวอร์เทคขึ้นไป ซึ่งมีลักษณะการเผาไหม้แบบวอร์เทคและ 2) บริเวณห้องเผาไหม้ที่อยู่ด้านล่างวงแหวนวอร์เทคลงมาเกิดการเผาไหม้แบบฟลูอิดซ์เบด ซึ่งสอดคล้องกับผลของการกระจายอนุภาคน้ำมันในเตาที่มีการกระจายอนุภาคน้ำมันสม่ำเสมอตลอดทั้งหน้าตัดเตาในส่วนนี้ นอกจากนี้การหมุนวนของอากาศเหนือวงแหวนและตัววงแหวนเองมีส่วนสำคัญในการดักจับอนุภาคน้ำมันที่ยังเผาไหม้ไม่หมดไม่ให้หนีออกไปจากเตา ทำให้เตาที่ออกมาจะมีลักษณะละเอียดสีดำปนเทาโดยมีขนาดอยู่ในช่วง 200 ถึง 600 μm . การเกิดฟลูอิดซ์เซชันภายในเตาไม่จำเป็นต้องผสมวัสดุเฉื่อยลงในเบด ประสิทธิภาพเชิงความร้อนไม่ขึ้นกับปริมาณอากาศส่วนที่สองหรือสาม แต่จะขึ้นกับปริมาณอากาศส่วนเกินทั้งหมดซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณอากาศทั้งสามส่วน ผลของการจ่ายอากาศส่วนที่สามจะช่วยควบคุมอนุภาคน้ำมันในเตาไม่ให้สูงเกินไป จากการทดลองพบว่าที่อัตราการป้อนแกลบ $240 kg h^{-1} m^{-3}$ ปริมาณอากาศส่วนเกิน 157% จะได้แก๊สร้อนตรงทางออกเตามีอุณหภูมิ 1,060 °C ประสิทธิภาพเชิงความร้อน 95% และพิกัดความร้อนเตาที่ได้เท่ากับ $0.91 MW_{th} m^{-3}$ โดยปริมาณ CO_2 , CO และ O_2 เป็นไปในแนวทางที่สอดคล้องกับค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนโดยปริมาณ CO และ NO_x ที่ปล่อยออกมาจากเตามีค่า 50 และ 380 ppm ตามลำดับ

แบบสรุปโครงงานวิจัยฝ่ายอุตสาหกรรม (ฝ่าย 5)

สัญญาเลขที่ RDG4750006 ชื่อโครงการ โครงการเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์เบดโดยใช้เชื้อเพลิงแกลบในระดับปฏิบัติการ

หัวหน้าโครงการ : อาจารย์นิติ พิริยะรุ่งโรจน์ สถาบัน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

โทรศัพท์ 0 2988 3666 ต่อ 241

โทรสาร 0 2988 3666 ต่อ 241

E-mail : jamesmutniwat@hotmail.com

ปรึกษา : ศ.ดร.สมชาติ โสภณธนฤทธิ์ สถาบัน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

โทรศัพท์ 0 2470 8693-9 ต่อ 111

E-mail : somchart.sop@kmutt.ac.th

ผู้ร่วมวิจัย : ดร.ฐานิตย์ เมธิยานนท์ สถาบัน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

โทรศัพท์ 0 2988 3666 ต่อ 241

โทรสาร 0 2988 3666 ต่อ 241

E-mail : thanid_m@yahoo.com

ความเป็นมาของโครงการ

การเผาไหม้โดยใช้หลักการของการไหลวนหรือการไหลแบบวอร์เทคได้เป็นที่รู้จักกันแพร่หลายมาหลายทศวรรษแล้ว เช่น เตาเผาไหม้ไซโคลน [1] ซึ่งมีการเผาไหม้จะใช้หลักการของการไหลวนหรือการไหลแบบวอร์เทค ซึ่งนอกจากทำหน้าที่ผลิตความร้อนแล้วยังทำหน้าที่ดักเก๊าไม่ให้หลุดลอยออกไปพร้อมกับแก๊สเผาไหม้ด้วย ต่อมาได้มีการนำมาประยุกต์ใช้กับเชื้อเพลิงชีวมวล เช่น แกลบ [2], [3] และ [4] สำหรับเตาเผาไหม้ฟลูอิดซ์เบดก็ได้มีการพัฒนามานานแล้วเช่นกัน ส่วนใหญ่จะใช้กับเชื้อเพลิงถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าแต่ก็มีการนำมาประยุกต์ใช้กับเชื้อเพลิงชีวมวลเช่นกัน [5], [6] และ [7] แต่เนื่องจากเชื้อเพลิงชีวมวลส่วนใหญ่จะมีรูปร่างที่ไม่เป็นทรงกลมและมีความหนาแน่นต่ำเช่น แกลบ ขี้เลื่อย เป็นต้น ทำให้ยากต่อการทำให้เกิดฟลูอิดซ์เซชัน จึงมีความจำเป็นต้องผสมวัสดุเฉื่อยที่ไม่ทำปฏิกิริยาออกซิเดชันจำพวกทรายซิลิกา อลูมินา ผสมลงในเบดในอัตราส่วนที่เหมาะสม [6] และ [8] อย่างไรก็ตามการผสมวัสดุเฉื่อยเหล่านี้ลงไปจะทำให้ความดันตกคร่อมห้องเผาไหม้มีค่าสูงมากจำเป็นต้องใช้พัดลมที่มีขนาดใหญ่ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าในส่วนนี้สูง และเมื่อประมาณ 10 กว่าปีมานี้ได้มีการพัฒนาเตาเผาไหม้ฟลูอิดซ์เบดซึ่งใช้กับถ่านหินบดและเป็นเตาชนิดที่ป้อนเชื้อเพลิงเข้าทางด้านล่างของเบด [9], [10] และ [11] และได้มีการพัฒนาขึ้นโดยมีการเพิ่มอากาศส่วนที่สอง ซึ่งถูกฉีดเข้าไปในแนวสัมผัสในบริเวณ free board โดยจะทำให้เกิดการหมุนวนของแก๊สเผาไหม้และอนุภาคขึ้นในบริเวณ free board การฉีดอากาศส่วนที่สองสามารถทำได้ทั้งระดับความสูงต่างๆ ของตัวเตา ผลของการเกิดวอร์เทคจากการฉีดอากาศเข้าไปในแนวสัมผัสนี้จะทำให้สามารถดักอนุภาคที่ยังเผาไหม้ไม่หมดไม่ให้หลุดลอยออกไปจากเตาและยังทำให้เกิดการหมุนเวียนของอนุภาคเชื้อเพลิง

ระหว่างบริเวณเบคด้านล่างกับบริเวณที่เกิดวอร์เทกใน free board ส่งผลให้สามารถลดความสูงของเตาฟลูอิดไคซ์เบคลงได้ งานวิจัยเหล่านี้ [9], [10] และ [11] คล้ายคลึงกับ U.S. [12] ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ซึ่งเตาเผาไหม้ฟลูอิดไคซ์เบคที่ใช้เชื้อเพลิงชีวมวลในประเทศไทยยังไม่มีการผลิตขายแต่ในต่างประเทศได้มีการทำวิจัยในห้องปฏิบัติการพบว่า มีจุดเด่นที่น่าสนใจอยู่หลายประการซึ่งสามารถนำข้อมูลมาเปรียบเทียบกับเตาเผาไหม้ไฮโคลนได้ดังแสดงในตารางที่ 1 และเมื่อไม่นานมานี้ได้มีการศึกษาพฤติกรรมการไหลของแก๊ส-อนุภาค ภายในเตาเผาไหม้วอร์เทกพบว่าบริเวณใกล้ผนังเตาอากาศที่จะมีการไหลในทิศทางลง (สู่ด้านล่างเตา) ซึ่งจะทำให้เกิดการหมุนเวียนของอนุภาคภายในเตา และมีส่วนสำคัญให้ residence time นานขึ้น [13]

ตารางที่ 1. เปรียบเทียบลักษณะและคุณสมบัติของเตาเผาไหม้ไฮโคลนและฟลูอิดไคซ์เบค [6], [3]

เตาเผาฟลูอิดไคซ์เบค	เตาเผาไฮโคลน
1. ค่าพิถิตความร้อนเตา 1 MW/m ³	1. ค่าพิถิตความร้อนเตาประมาณ 0.34 MW/m ³
2. อัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่าศูนย์กลางของเตา (H/D) ประมาณ 13	2. H/D มีค่าประมาณ 2.5
3. ประสิทธิภาพการเผาไหม้ อยู่ในช่วง 80 – 95%	3. ประสิทธิภาพการเผาไหม้ อยู่ในช่วง 65 – 80%
4. ต้องใช้วัสดุเชื้อเพลิงจำพวกซลิกา อลูมินา เป็นต้น ผสมลงในเบคเหนือแผ่นกระจายลมเพื่อให้เกิดฟลูอิดไคซ์-ชัน	4. ไม่ต้องใช้วัสดุเชื้อเพลิงผสมลงในเบค
5. แก๊สสามารถลอยออกไปพร้อมกับอากาศร้อนที่ท่อทางออก	5. ต้องมีระบบลำเลียงทางกลในการลำเลียงแก๊สออกจากเตา

วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อทำการวิจัยในระดับห้องปฏิบัติการเพิ่มเติม จากที่ได้มีการศึกษาและวิจัยในเบื้องต้นไปบางส่วนแล้ว เพื่อให้ได้ข้อมูลพื้นฐานที่จำเป็นต่อการออกแบบและสร้างเตาเผาไหม้วอร์เทก-ฟลูอิดไคซ์เบค (VFBC) ในระดับอุตสาหกรรมขนาด 9 MW_{th} โดยจะศึกษาทั้งในด้านพฤติกรรมการไหลของอนุภาคและคิเนติกส์ของการเผาไหม้ ภายในเตาเผาไหม้จริง

2. ทำการวิจัยในระดับห้องปฏิบัติการควบคู่ไปกับการทดสอบสมรรถนะ VFBC ต้นแบบในระดับอุตสาหกรรมขนาด 9 MW_{th} เพื่อให้ได้ข้อมูลในการแก้ไขและปรับปรุงเตาเผาไหม้ต้นแบบต่อไป

ผลที่ได้รับ	บรรลุลักษณะประสงค์ข้อที่	โดยทำให้
1. สร้างเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์เบด (VFBC) ที่มีการเผาไหม้จริงในระดับห้องปฏิบัติการเป็นผลสำเร็จและทำการทดลองเบื้องต้นเพื่อให้รู้ถึงเงื่อนไขการทำงานของเตาเผา VFBC โดยทำการปรับเปลี่ยน 1) อัตราการไหลของเชื้อเพลิง 2) ปริมาณอากาศส่วนเกินที่ใช้ในการเผาไหม้ (ผลการทดลองได้กล่าวไว้อย่างละเอียดในส่วนของเนื้อหางานวิจัย)	1	1. รู้ถึงเงื่อนไขขั้นต้นที่ใช้ในการทำงานของเตา VFBC ในระดับห้องปฏิบัติการ 2. ได้ข้อมูลพื้นฐานที่จำเป็นต่อการออกแบบและสร้างเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์เบด (VFBC) ในระดับอุตสาหกรรมขนาด 9 MW_{th}
2. ทำการทดลองเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์เบด (VFBC) ในระดับห้องปฏิบัติการเพิ่มเติมโดยศึกษาถึงพารามิเตอร์ที่จะทำให้ได้เงื่อนไขการทดลองที่ให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาและพิกัดความร้อน (MW/m^3) สูง เช่น อัตราการไหลของอากาศส่วนที่ สอง และ สาม (ผลการทดลองได้กล่าวไว้อย่างละเอียดในส่วนของเนื้อหางานวิจัย) ซึ่งการทดลองจะทำควบคู่ไปกับการสร้างและทดสอบสมรรถนะเตา VFBC ในระดับอุตสาหกรรม	2	1. การได้ข้อมูลเพิ่มเติมจากการทดลองทำให้ทราบถึงเงื่อนไขการทดลองที่ทำให้ VFBC ในระดับห้องปฏิบัติการ มีค่าพิกัดความร้อนเตา (MW/m^3) และประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูง 2. จากเงื่อนไขข้างต้นได้ถูกนำมาเป็นข้อมูลพื้นฐานกำหนดเงื่อนไขการทำงานของ VFBC ในระดับอุตสาหกรรม

การนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์

ข้อมูลที่ได้จากการออกแบบและสร้างเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์เบดโดยใช้เชื้อเพลิงแกลบในระดับปฏิบัติการและรวมถึงข้อมูลที่ได้จากการทดลองในแต่ละเงื่อนไขของการทดลองจะถูกนำไปเป็นข้อมูลพื้นฐานในการการออกแบบและสร้างเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์เบด (VFBC) ในระดับอุตสาหกรรมขนาด 9 MW_{th} ต่อไป

การประชาสัมพันธ์

1. ฐานิตย์ เมธิยานนท์, นิวัติ พิริยะรุ่งโรจน์, อติศักดิ์ นาถกรณกุล และ สมชาติ โสภณธนฤทธิ์, 2546, การศึกษาพฤติกรรมการไหลของอากาศ-เกลบนภายในเตาเผาไหม้จำลองที่มีลักษณะการไหลแบบไซโคลนร่วมกับการไหลแบบฟลูอิดไคซ์เบด, การประชุมวิชาการประจำปี 2546 สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยวิศวกรรมเกษตรและเทคโนโลยีที่เหมาะสมเพื่อสิ่งแวดล้อม, 13 – 14 มีนาคม 2546 ณ เศรษฐมณี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขตบางเขน, หน้า 332 - 343

2. ฐานิตย์ เมธิยานนท์, นิวัติ พิริยะรุ่งโรจน์, อติศักดิ์ นาถกรณกุล และ สมชาติ โสภณธนฤทธิ์, 2546, การพัฒนาเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดไคซ์เบดสำหรับเชื้อเพลิงเกลบ, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 17, 15 – 17 ตุลาคม 2546, หน้า 662 - 670

3. ฐานิตย์ เมธิยานนท์, นิวัติ พิริยะรุ่งโรจน์, อติศักดิ์ นาถกรณกุล และ สมชาติ โสภณธนฤทธิ์, 2546, เตาเผาไหม้จำลองวอร์เทค-ฟลูอิดไคซ์เบด : การศึกษาเชิงการทดลองพฤติกรรมการไหลของอากาศและเกลบ, วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนาปีที่ 14 ฉบับที่ 14, หน้า 59 – 67

4. ฐานิตย์ เมธิยานนท์, นิวัติ พิริยะรุ่งโรจน์ และ สมชาติ โสภณธนฤทธิ์, 2547, เตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดไคซ์เบดแบบสองห้องเผาไหม้สำหรับเชื้อเพลิงเกลบ, SONGKLANAKARIN JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY, Vol.26 NO.6, ประจำเดือน พฤศจิกายน – ธันวาคม 2547

5. ฐานิตย์ เมธิยานนท์, นิวัติ พิริยะรุ่งโรจน์, พีระวัตร ทองนอก และ สมชาติ โสภณธนฤทธิ์, 2547, เตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดไคซ์เบด : Part I ผลกระทบของอากาศส่วนที่หนึ่งต่อสมรรถนะเตา, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 18, 18 – 20 ตุลาคม 2547, หน้า 166

6. ฐานิตย์ เมธิยานนท์, นิวัติ พิริยะรุ่งโรจน์, พีระวัตร ทองนอก และ สมชาติ โสภณธนฤทธิ์, 2547, เตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดไคซ์เบด : Part II ผลกระทบของอากาศส่วนที่สองต่อสมรรถนะเตา, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 18, 18 – 20 ตุลาคม 2547, หน้า 167

แบบฟอร์มตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์ กิจกรรมที่วางแผนไว้ และกิจกรรมที่ดำเนินการมา และผลที่ได้รับ
ตลอดโครงการ

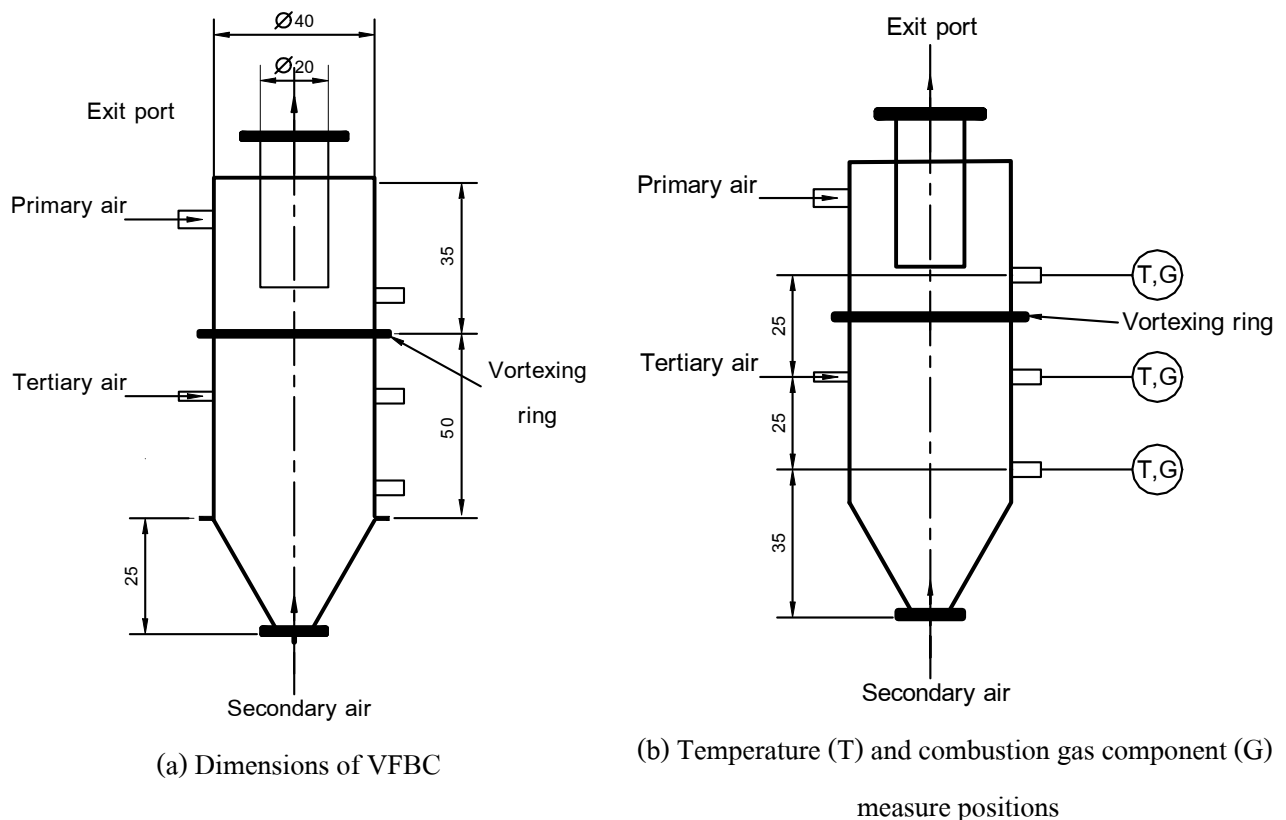
กิจกรรม (ตามแผน)	ผลที่คาดว่าจะได้รับ (ตามแผน)	ผลการดำเนินการ	หมายเหตุ
1. ออกแบบและสร้าง VFBC ที่ใช้เผาไหม้จริงในระดับห้องปฏิบัติการ	1. สามารถออกแบบและสร้าง VFBC ที่ใช้เผาไหม้จริงในระดับห้องปฏิบัติการ	1. สร้างเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิด์เบด (VFBC) ที่มีการเผาไหม้จริงในระดับห้องปฏิบัติการเป็นผลสำเร็จและทำการทดลองเบื้องต้นเพื่อให้รู้ถึงเงื่อนไขการทำงานของเตาเผา VFBC โดยทำการปรับเปลี่ยน 1) อัตราการไหลของเชื้อเพลิง 2) ปริมาณอากาศส่วนเกินที่ใช้ในการเผาไหม้	
2. วิจัยเบื้องต้นเพื่อนำข้อมูลพื้นฐานไปใช้ในการออกแบบ VFBC ในระดับอุตสาหกรรม	2. สามารถทำการวิจัยและได้นำข้อมูลพื้นฐานไปใช้ในการออกแบบ VFBC ในระดับอุตสาหกรรม	2. ทำการทดลองเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิด์เบด (VFBC) ในระดับห้องปฏิบัติการเพิ่มเติมโดยศึกษาถึงพารามิเตอร์ที่จะทำให้ได้เงื่อนไขการทดลองที่ให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตา และพิกัดความร้อน (MW/m^3) สูง เช่น อัตราการไหลของอากาศส่วนที่ สอง และ สาม ซึ่งผลการทดลองที่ได้ถูกนำมาเป็นข้อมูลพื้นฐานออกแบบและสร้าง VFBC ในระดับอุตสาหกรรม	

การออกแบบ สร้างและทดลองเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์เบดโดยใช้เชื้อเพลิงแกลบในระดับปฏิบัติการและออกแบบเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์เบดระดับอุตสาหกรรมขนาด 9 MW_{th}

1. การออกแบบสร้างและทดลอง เตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์เบดโดยใช้เชื้อเพลิงแกลบในระดับปฏิบัติการ

1.1. ขั้นตอนการออกแบบเตาเผาเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์เบด

จากผลการศึกษาพฤติกรรมของอากาศ-แกลบภายในเตาเผาไหม้จำลอง [14] และ [15] แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มที่สามารถจะนำหลักการดังกล่าวไปใช้กับเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์เบด (Vortexing-fluidized bed combustion, VFBC) จริงได้จึงได้นำข้อมูลจากการศึกษาในข้างต้นมาใช้เป็นแนวทางในการออกแบบเตาเผา VFBC ในระดับห้องปฏิบัติการ ซึ่งเตาเผา VFBC เป็นเตาเผาที่ถูกออกแบบมาเพื่อรวมเอาลักษณะเด่นของเตาเผาแบบไซโคลนและเตาเผาแบบฟลูอิดซ์เบดเข้าด้วยกันโดยเตาเผา VFBC มีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเตาเผาเท่ากับ 40 ซม. สูง 110 ซม. ดังแสดงในรูปที่ 1a และสามารถแบ่งเตาเผาออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่หนึ่งรูปร่างของเตาเผาแบบทรงกระบอกและส่วนที่สองรูปร่างของเตาเผาแบบทรงกรวยหงายโดยบริเวณปลายกรวยถูกตัดเพื่อติดตั้งแผ่นกระจายอากาศ (Air Distributor) สำหรับอากาศส่วนที่สอง ซึ่งอากาศที่ถูกใช้ในการเผาไหม้แกลบภายในเตาเผา VFBC สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน ดังแสดงในรูปที่ 1b โดยอากาศส่วนที่หนึ่ง (Primary air) คืออากาศที่นำแกลบเข้าสู่เตาเผาซึ่งจะถูกป้อนในแนวสัมผัสทางด้านบนของห้องเผาไหม้แบบทรงกระบอก เพื่อทำให้เกิดการ



รูปที่ 1. ขนาดและตำแหน่งวัดอุณหภูมิของเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์เบด (หน่วย : ซม.)

หมุนวนของอากาศและเกลบบแบบวอร์เทค อากาศส่วนที่สอง (Secondary air) จะถูกจ่ายผ่านแผ่นกระจายลมเข้าสู่เตาเผา VFBC ที่บริเวณด้านล่างของห้องเผาไหม้ที่มีลักษณะเป็นทรงกรวยหงายทำให้เกิดพฤติกรรมแบบฟลูอิดไลซ์เบดทั่วในบริเวณของห้องเผาไหม้ที่อยู่ถัดจากวงแหวนวอร์เทคลงมา โดยรูปร่างของเตาเผาแบบทรงกรวยหงายจะช่วยทำให้เกลบลอยตัวได้ง่ายและอนุภาคในเบดมีการหมุนเวียนทั่วถึงโดยไม่ต้องใช้วัสดุเฉื่อยมาผสมลงในเบด และ อากาศส่วนที่สาม (Tertiary air) จะเป็นอากาศที่ถูกจ่ายในแนวสัมผัสที่ตำแหน่งด้านข้างเตาเผาแบบทรงกระบอกในระดับความสูงเท่ากับ 60 ซม. เพื่อลดอุณหภูมิในห้องเตาเผา

1.2. วิธีการทดลอง แบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักๆ คือ

1.2.1. การทดลองเบื้องต้นเพื่อให้รู้ถึงเงื่อนไขการทำงานของเตาเผา VFBC

เตรียมอุปกรณ์การทดลองดังแสดงในรูปที่ 2 ทำการติดเตาเผาโดยใช้เกลบเป็นเชื้อเพลิงและอุ่นเตาจนอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ประมาณ 600°C จึงเริ่มทำการทดลอง

1.2.1.1. ปรับอัตราการไหลของอากาศและเกลบให้สอดคล้องกับเงื่อนไขการทดลองที่ 1-6 ในตารางที่ 2 ในการทดลองจะใช้พัดลมอัดอากาศ 2 ตัว ตัวละ 2.2 kW ในการวัดอัตราการไหลของอากาศใช้ออริฟิสมิเตอร์ซึ่งถูกปรับเทียบจาก Hot wire anemometer ที่มีค่าความคลาดเคลื่อน 3% ของค่าที่วัดได้ และสามารถควบคุมอัตราการป้อนของเกลบโดยใช้อินเวอร์เตอร์ในการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ป้อนเกลบ

1.2.1.2. เริ่มบันทึกอุณหภูมิที่ตำแหน่งท่อทางออกเตาเผา VFBC ทุก 5 นาทีจนครบ 120 นาที โดยใช้ Thermocouple type K และใช้ตัวชี้บอก ซึ่งมีความละเอียด $\pm 1^{\circ}\text{C}$

1.2.2. การศึกษาผลของอากาศส่วนที่สองและสามต่อสมรรถนะของ VFBC

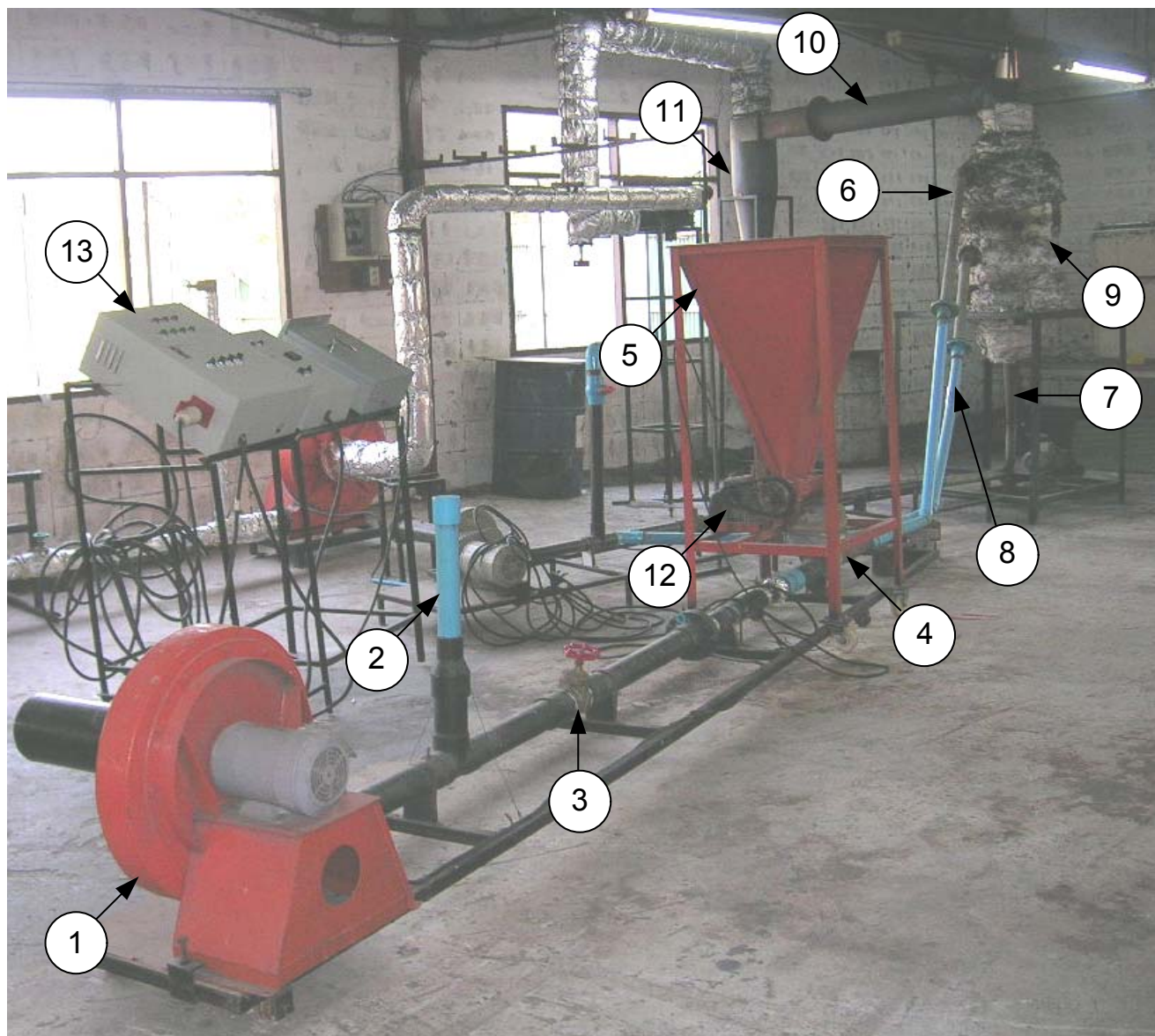
(อุปกรณ์การทดลองเป็นชุดเดียวกับชุดศึกษาการทดลองเบื้องต้นเพื่อให้รู้ถึงเงื่อนไขการทำงานของเตาเผา VFBC)

1.2.2.1. การปรับอัตราการไหลของเกลบและอากาศให้สอดคล้องกับเงื่อนไขการทดลองที่ 7-13 ในตารางที่ 2

1.2.2.2. เริ่มบันทึกอุณหภูมิที่ตำแหน่ง $Y = 0.35$ เมตร โดยอ้างอิงตำแหน่งความสูงจากแผ่นกระจายลม (Air distributor) ที่ตำแหน่ง $d/D = 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.35, 0.4, 0.45, 0.5, 0.55, 0.6, 0.65, 0.7, 0.75, 0.8, 0.85, 0.9, 0.95$ และ 1.0 หลังจากนั้นทำการเก็บข้อมูลที่ได้จากการเผาไหม้ (เมื่อ d คือ ตำแหน่งที่วัดอุณหภูมิในแนวเส้นผ่านของเตาเผาไหม้ VFBC และ D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเตาเผาไหม้ VFBC ซึ่งเท่ากับ 40 ซม.)

1.2.2.3. บันทึกอุณหภูมิที่ตำแหน่งทางออกและตรวจวัดองค์ประกอบของแก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้โดยใช้เครื่อง Gas analyzer รุ่น Testo 350 XL

1.2.2.4. ทำการทดลองซ้ำข้อ 1.1.2.2-1.1.2.3 โดยบันทึกอุณหภูมิที่ตำแหน่ง $Y = 0.60$ เมตร และ 0.85 เมตร ตามลำดับ



รูปที่ 2. เตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดไคซ์เบด

- | | | |
|-------------------------|-------------------|--------------------|
| 1. Blowers | 2. Air drain port | 3. Valves |
| 4. Injector | 5. Hopper | 6. Primary air |
| 7. Secondary air | 8. Tertiary air | 9. VFBC |
| 10. Exit port | 11. Cyclone | 12. Feeding system |
| 13. Temperature Control | | |

ตารางที่ 2. เงื่อนไขการทดลองของเตาเผาวัชพืชฟลูอิดไชเบด

	Run No.	Specific Rice husk feed rate (kg/h-m ³)	Primary air		Secondary air		Tertiary air		Excess air (%)
			Flow rate (m ³ /min)	Velocity (m/s)	Flow rate (m ³ /min)	Velocity (m/s)	Flow rate (m ³ /min)	Velocity (m/s)	
The preliminary study of VFBC operation condition	1	160	2.75	22.7	0.97	2	-	-	288
	2	187	2.75	22.7	0.97	2	-	-	233
	3	213	2.75	22.7	0.97	2	-	-	192
	4	240	2.2	18.2	0.97	2	-	-	117
	5	240	2.33	19.2	0.97	2	-	-	125
	6	240	2.75	22.7	0.97	2	-	-	157
The study of the effects of tertiary airflow on performance of VFBC	7	240	2.06	17	0.85	1.75	-	-	108
	8	240	2.06	17	0.85	1.75	0.37	12.3	133
	9	240	2.06	17	0.85	1.75	0.76	25.0	157
	10	240	2.06	17	0.85	1.75	1.12	37.0	182
The study of the effects of secondary airflow on performance of VFBC	11	240	2.06	17	0.66	1.35	0.75	25.0	145
	12	240	2.06	17	0.93	1.92	0.75	25.0	163
	13	240	2.06	17	1.22	2.5	0.75	25.0	182

ตารางที่ 3. The specification of Gas analyzer model Testo 350 XL

GAS	Range
O ₂	0 -25 %
CO	0 – 10,000 ppm
NO	0 – 3,000 ppm
SO ₂	0 – 5,000 ppm

เมื่อประสิทธิภาพเชิงความร้อน (η_{th}) ของเตาเผาได้ด้วยสมการดังนี้

$$\eta_{th} = \frac{\dot{m}_a (c_{p,g} T_e - c_{p,a} T_i)}{\dot{m}_f HHV} \quad (1)$$

เมื่อ

$\dot{m}_a$	=	อัตราการไหลของอากาศ, kg/s
$\dot{m}_f$	=	อัตราการป้อนเชื้อเพลิงแกลบ, kg/s
HHV	=	ค่าความร้อนสูงของแกลบ 14.5 MJ/kg
T_e	=	อุณหภูมิแก๊สร้อนที่ตำแหน่งทางออกของ VFBC
T_i	=	อุณหภูมิอากาศที่ตำแหน่งทางเข้าของ VFBC
$c_{p,g}, c_{p,a}$	=	ค่าความจุความร้อนของแก๊สร้อนและอากาศที่เข้าเผาไหม้

โดยกำหนดให้

$c_{p,g}$ ที่ตำแหน่งทางออกเท่ากับ $c_{p,a}$ ที่มีอุณหภูมิแก๊สร้อน

สมการที่ (1) อยู่บนสมมติฐานที่ว่า $\dot{m}_f \ll \dot{m}_a$ ดังนั้น มวลของแก๊สร้อนจึงประมาณเท่ากับมวลของอากาศที่เข้าเผาไหม้

1.3. ผลการทดลอง

เบื้องต้นเพื่อให้รู้ถึงเงื่อนไขการทำงานที่เหมาะสมของเตาเผา VFBC จึงได้กำหนดเงื่อนไขทดลองออกเป็น 6 เงื่อนไข โดยเปลี่ยนอัตราการไหลของแกลบและอากาศต่างๆ กัน ดังแสดงในตารางที่ 2 เงื่อนไขการทดลองที่ 1-6

1.3.1. การทดลองเบื้องต้นเพื่อให้รู้ถึงเงื่อนไขการทำงานของเตาเผา VFBC

จากผลการทดลองสามารถสรุปในประเด็นสำคัญได้ดังนี้

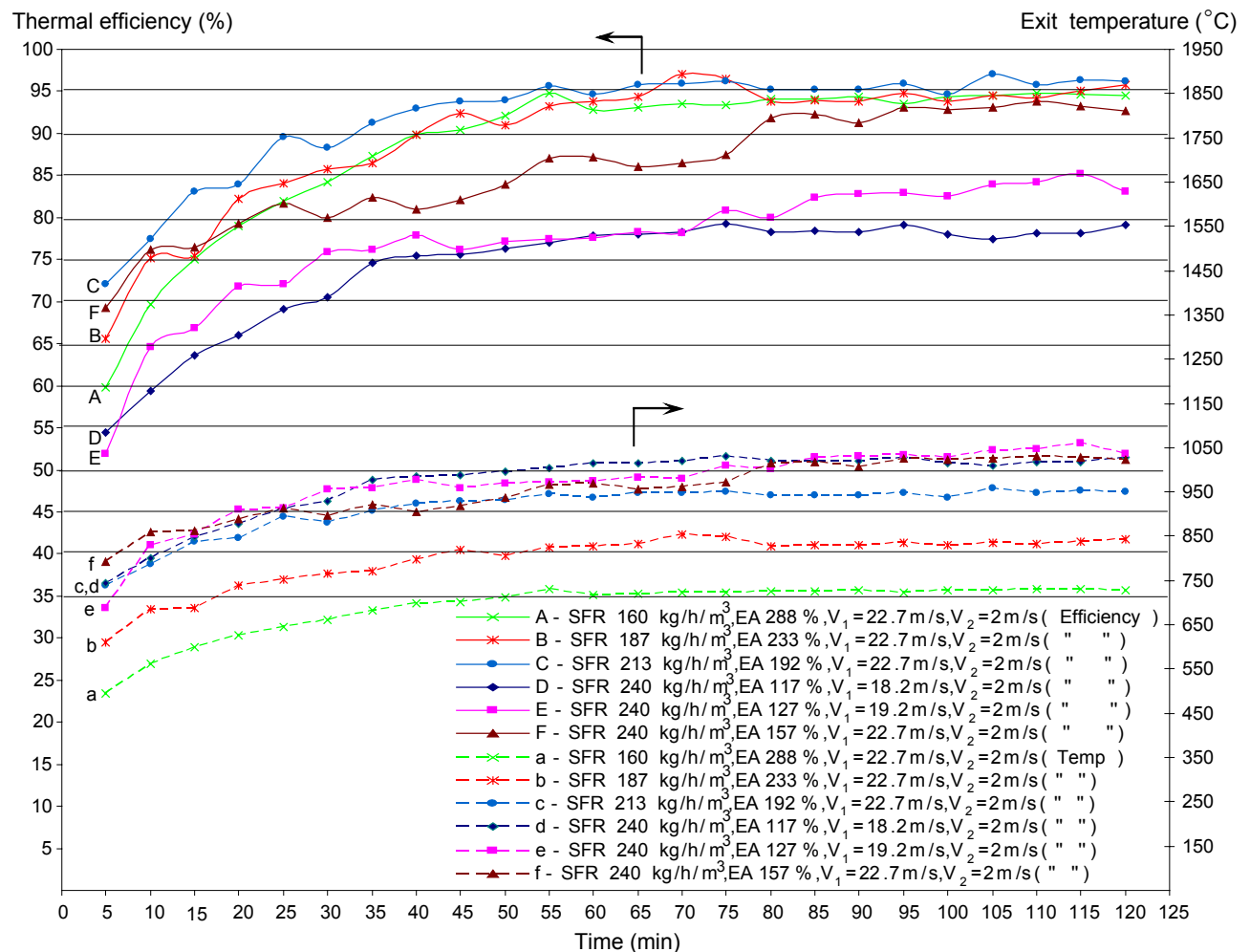
1.3.1.1. จากการสังเกตการเผาไหม้ผ่านช่องมองของเตาเผา VFBC พบว่าการเกิดฟลูอิดไคซ์เซชันจะครอบคลุมบริเวณตั้งแต่ด้านล่างของเตาเผา VFBC จนถึงบริเวณที่เป็นที่ตั้งของวงแหวนวอร์เทก (Vortexing ring) ทุกเงื่อนไขการทดลองดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งการเกิดฟลูอิดไคซ์เซชันของแก๊สเผาไหม้กับอนุภาคภายในของเตาเผาจะสอดคล้องกับการเกิดฟลูอิดไคซ์เซชันของอากาศ-แกลบในกรณีเตาเผาไหม้จำลอง [14] และ [15]

1.3.1.2. การเกิดฟลูอิดไคซ์เซชันภายในเตาเผา VFBC ไม่จำเป็นต้องผสมวัสดุเชื้อจำพวกทรายซิลิกาหรือลูมินาลงในเบดเหมือนเช่นในเตาเผาไหม้ฟลูอิดไคซ์เบดโดยทั่วไป

1.3.1.3. เตาเผา VFBC สามารถทำอัตราการป้อนเชื้อเพลิงจำเพาะ (Specific rice husk feed rate = SFR) ได้ 240 kg/h/m³ ที่ปริมาณอากาศส่วนเกิน 157% เมื่อคำนวณเป็นค่าพิคความร้อนของเตา (โดยกำหนดให้ HHV ของแกลบเท่ากับ 14.5 MJ/kg) ที่ η_{th} เท่ากับ 95% จะมีพิคความร้อนเท่ากับ 0.91 MW_{th}/m³ ซึ่งความจริงอาจ

สามารถป้อนเชื้อเพลิงด้วยอัตราที่มากกว่านี้ได้ ถ้าเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกินให้มากขึ้นโดยการจ่ายอากาศส่วนที่สามเข้าไปในเตา จากการทดลองจะเห็นว่า SFR ที่เตาเผา VFBC ทำได้มีค่าใกล้เคียงกับของเตาเผาไหม้ฟลูอิดซ์เบดสำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลซึ่ง SFR มีค่าประมาณ 265 kg/h/m^3 [6] และสูงกว่าที่เตาเผาไหม้ไฮโคลนที่ผลิตขายอยู่ภายในประเทศทำได้ ซึ่ง SFR มีค่าสูงสุดประมาณ 110 kg/h/m^3 สำหรับในงานวิจัยนี้เนื่องจากมีข้อจำกัดของพัดลมอัดอากาศที่ใช้ในการทดลองจึงได้กำหนดอัตราการป้อนเชื้อเพลิงไว้สูงสุดเท่ากับ 240 kg/h/m^3

1.3.1.4. ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตา (η_{th}) ในกรณีที่ค่า SFR เท่ากับ 240 kg/h/m^3 เมื่อใช้ปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 157% ดังแสดงในรูปที่ 3 (เส้นกราฟ F) พบว่าค่า η_{th} จะเพิ่มขึ้นไปตามเวลาที่เตาทำงานโดยจะเริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 90 นาที (และเป็นจริงสำหรับในกรณีอื่นๆ ด้วย) โดย η_{th} จะมีค่าประมาณ 95% ซึ่งเท่ากับในกรณีของเตาเผาไหม้ฟลูอิดซ์เบดซึ่ง η_{th} มีค่าในช่วง 90–95% และสูงกว่าของเตาไฮโคลนมากซึ่ง η_{th} มีค่าประมาณ 65–80%



รูปที่ 3. แสดงการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพเชิงความร้อนและอุณหภูมิแก๊สร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนแกลบจำเพาะและความเร็วของอากาศส่วนที่หนึ่ง (v_1) โดยคงที่ความเร็วอากาศส่วนที่สอง (v_2) (EA = ปริมาณอากาศส่วนเกินที่ใช้ในการเผาไหม้)

1.3.1.5. อุณหภูมิแก๊สร้อนที่ทางออกของเตาจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเวลา 30 นาทีแรกของการทดลอง และจากนั้นอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะเริ่มลดน้อยลงจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงตัว โดยอุณหภูมิแก๊สร้อนจะมีอุณหภูมิประมาณ $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ ในเวลาเพียง 20 นาทีและถึง $1,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ในเวลาประมาณ 80 นาที ดังแสดงในรูปที่ 3 (เส้นกราฟ f)

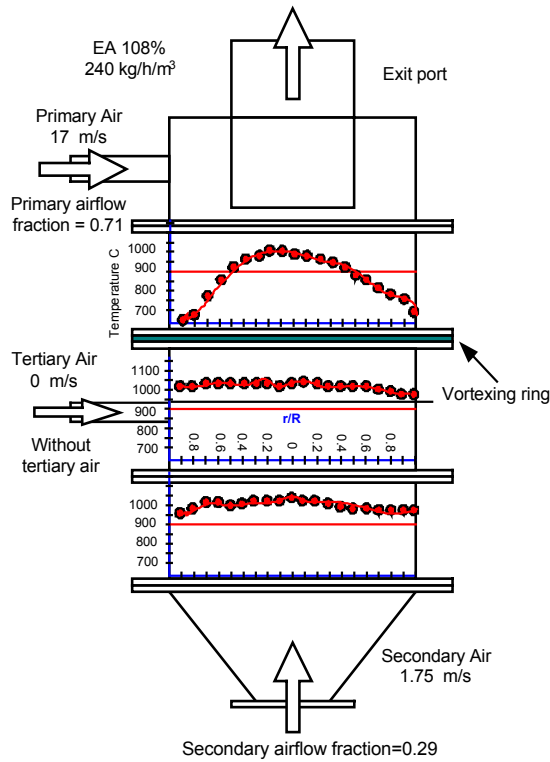
1.3.1.6. ในกรณีที่ค่า SFR 240 kg/h/m^3 ที่ปริมาณอากาศส่วนเกิน 157% จี๊ไธ่ที่ออกจากเตาเผามีลักษณะเป็นเถ้าปนขนาดประมาณ $200\text{-}600\text{ }\mu\text{m}$. มีสีดำปนเทาซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการเปลี่ยนคาร์บอนในเชื้อเพลิงไปเป็นแก๊สเผาไหม้ (Carbon conversion efficiency) ได้ดีซึ่งมีสาเหตุจากการหมุนวนแบบวอร์เทกที่รุนแรงในบริเวณห้องเผาไหม้ที่อยู่เหนือวงแหวนและตัววงแหวนเองทำหน้าที่ดักอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ทำให้ไม่หลุดออกจากเตาเผา VFBC ได้ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมการณ์เกิดมานอากาศที่ใช้ดักอนุภาคภายในเตาเผาไหม้วอร์เทก-ฟลูอิดไธซ์เบดแบบจำลอง [14] และ [15]

จากผลการทดลองข้างต้นจึงได้เลือกเงื่อนไขที่ทำให้เตาเผา VFBC ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาสูงสุดคือที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงจำเพาะสูงสุด (SFR) เท่ากับ 240 kg/h/m^3 ดังแสดงในรูปที่ 3 (เส้นกราฟ F) โดยใช้เป็นเงื่อนไขที่มีการใช้อากาศส่วนที่สาม

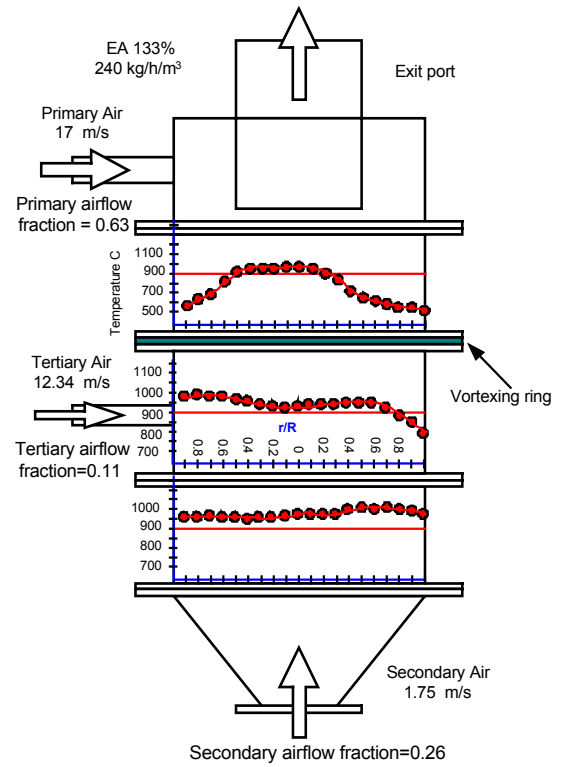
1.3.2. การศึกษาผลของปริมาณอากาศส่วนที่สามต่อสมรรถนะของ VFBC

1.3.2.1. การกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผา VFBC

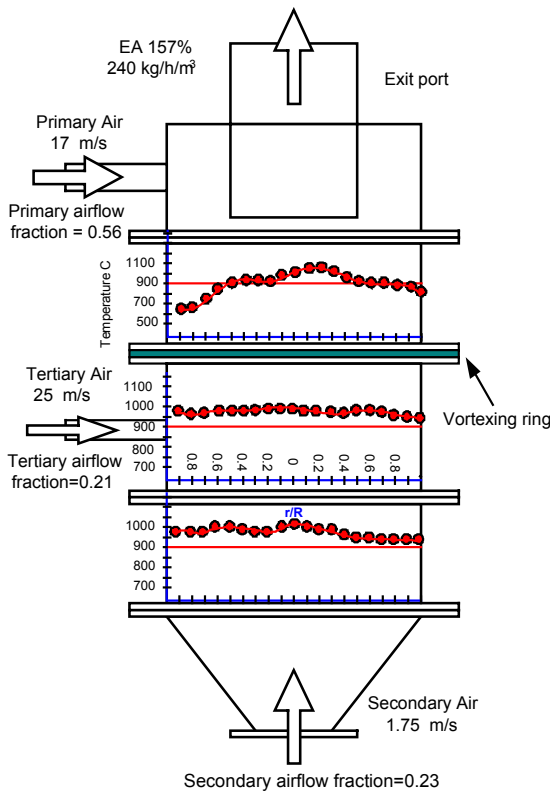
ในการทดลองนี้กำหนดอัตราการไหลของเชื้อเพลิงจำเพาะ 240 kg/h/m^3 และทำการเปลี่ยนอัตราการไหลของอากาศส่วนที่สามดังแสดงในเงื่อนไขการทดลองที่ 7-10 ในตารางที่ 2 การกระจายอุณหภูมิภายใน VFBC สามารถแบ่งออกเป็นสองบริเวณคือ 1) บริเวณห้องเผาไหม้ที่อยู่เหนือวงแหวนวอร์เทกพบว่าการกระจายอุณหภูมิของทั้งสี่การทดลองดังแสดงในรูปที่ 4(a-d) กระจายอุณหภูมิที่คล้ายคลึงกันเป็นรูปพาราโบลาว่า โดยบริเวณขอบผนังจะมีอุณหภูมิต่ำเนื่องจากใกล้ตำแหน่งที่จ่ายอากาศส่วนที่หนึ่งและส่วนบริเวณแกนกลางของเตาเผาจะมีอุณหภูมิสูงเนื่องจากเป็นบริเวณที่แก๊สร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ไหลผ่านเพื่อเข้าสู่ท่อทิ้งเถ้าที่อยู่ด้านบนของเตาเผา 2) คือบริเวณห้องเผาไหม้ที่อยู่ต่ำกว่าวงแหวนวอร์เทกพบว่ที่ปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 108, 133 และ 157% มีการกระจายอุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้เกิดขึ้นอย่างความสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัดเตาที่ความสูงเท่ากับ 0.35 เมตร และ 0.60 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 4(a-c) ซึ่งสะท้อนให้เห็นการเผาไหม้แบบฟลูอิดไธซ์เบดขึ้นภายในเตาที่ระดับความสูงดังกล่าวโดยทั้งอากาศและอนุภาคมีการเคลื่อนที่แบบไม่มีทิศทางแน่นอน (Random movement) ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมการณ์เคลื่อนที่ของอากาศภายในเตาเผาไหม้วอร์เทก-ฟลูอิดไธซ์เบดในแบบจำลอง [14] และ [15] ส่งผลให้สามารถเผาไหม้เชื้อเพลิงที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงจำเพาะ (SFR) 240 kg/h/m^3 สำหรับที่ปริมาณอากาศส่วนเกิน 182% ดังแสดงใน รูปที่ 4(d) อุณหภูมิบริเวณผนังจะต่ำกว่าที่บริเวณอื่นภายในเตาเผาค่อนข้างมากสาเหตุมาจากการจ่ายอากาศส่วนที่สามในบริเวณนี้มากเกินความจำเป็นทำให้มีการสูญเสียความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ไปกับการทำให้ไนโตรเจนในอากาศมีอุณหภูมิสูงขึ้น สำหรับอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาจากบริเวณที่ถัดจากวงแหวนวอร์เทกลงมา พบว่ที่ปริมาณอากาศส่วนเกิน 108% จะมีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดอยู่ในช่วง $990\text{-}1,025\text{ }^{\circ}\text{C}$ และเมื่อเพิ่มปริมาณ



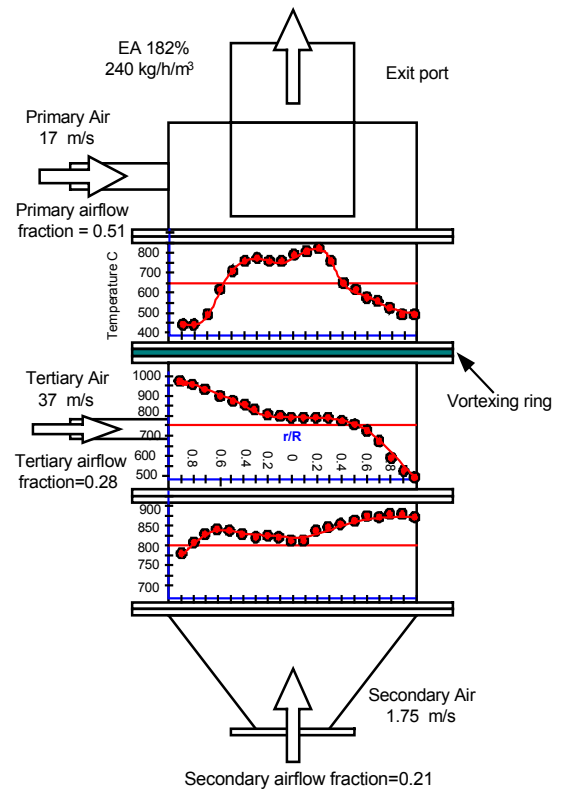
(a) Excess air = 108% (run no.7)



(b) Excess air = 133% (run no.8)



© Excess air = 157% (run no.9)



(d) Excess air = 182% (run no.10)

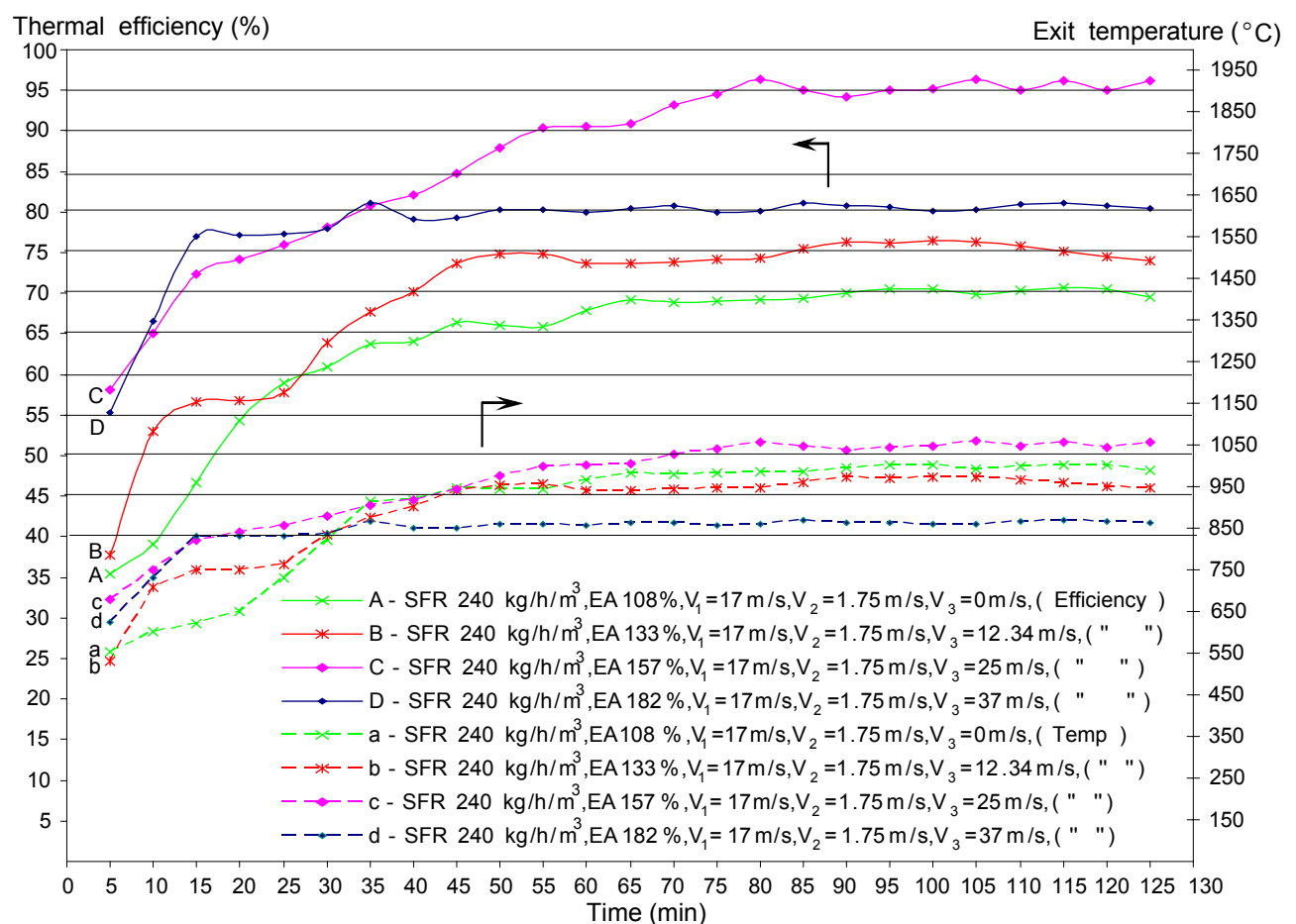
รูปที่ 4. แสดงการกระจายอุณหภูมิภายในเตา VFBC ที่ระดับความสูงเท่ากับ 0.35 , 0.6 และ 0.8 เมตร

(run nos. 7-10)

อากาศส่วนเกินเป็น 133 และ 157% จะมีอุณหภูมิเฉลี่ยต่ำกว่า 1,000 °C โดยมีค่าในช่วง 930-975 °C โดยที่ปริมาณอากาศส่วนเกิน 157% จะให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (η_{th}) สูงสุดเท่ากับ 95% (รูปที่ 5 เส้นการฟ C) และพบว่าอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ตรงทางออกของเตามีอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 1,060 °C

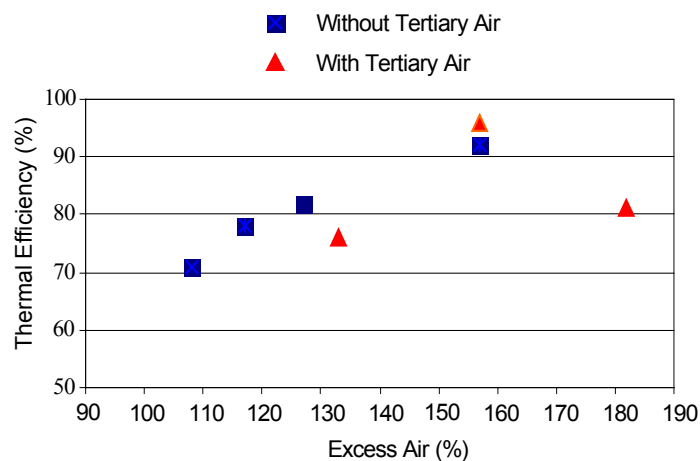
1.3.2.2. สมรรถนะของเตา VFBC

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนและพิกัดความร้อนของเตาเป็นค่าดัชนีที่ใช้บอกสมรรถนะของเตา โดยค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนเป็นดัชนีที่ใช้ บอกความคุ้มค่าของการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิง ส่วนพิกัดความร้อนของเตาซึ่งมีหน่วยเป็น MW_{th}/m^3 เป็นตัวบ่งบอกถึงความคุ้มค่าในการใช้พื้นที่ภายในเตาโดยในทางเศรษฐศาสตร์แล้วค่าพิกัดความร้อนของเตาจะแปรผกผันกับเงินทุนในการก่อสร้าง ดังนั้นในการประเมินสมรรถนะของเตาต้องพิจารณาจากดัชนีทั้งสองตัวไปพร้อมๆ กัน จาก รูปที่ 3 และ 5 พบว่าที่ปริมาณอากาศส่วนเกิน 157% η_{th} จะมีค่าสูงสุดประมาณ 95 % โดยมีค่าพิกัดความร้อนเตาเท่ากับ $0.91 MW_{th}/m^3$ (คำนวณโดยใช้ค่า HHV ของแกลบเท่ากับ 14.5 MJ/kg) ซึ่งทั้งค่า η_{th} และพิกัดความร้อนของเตาเผา VFBC ก็ใกล้เคียงกับของเตาเผาไหม้ฟลูอิดไธด์เบด [6] แต่สูงกว่า



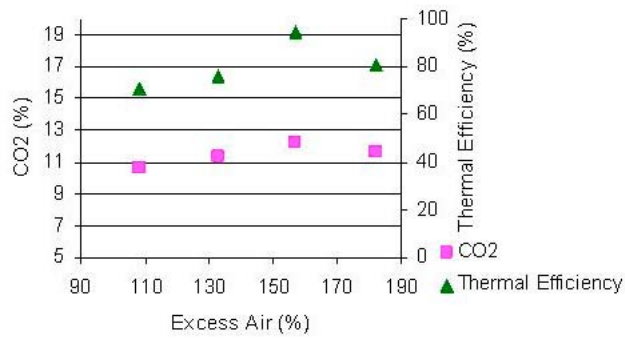
รูปที่ 5. แสดงการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพเชิงความร้อนและอุณหภูมิแก๊สร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เมื่อเปลี่ยนแปลงความเร็วอากาศส่วนที่สาม (v_3) โดยคงที่อัตราการป้อนแกลบจำเพาะ ความเร็วของอากาศส่วนที่หนึ่ง (v_1) และความเร็วของอากาศส่วนที่สอง (v_2) (EA = ปริมาณอากาศส่วนเกินที่ใช้ในการเผาไหม้)

เตาเผาโซโครน [3] จากการทดลองเบื้องต้นที่ไม่มีการใช้อากาศส่วนที่สาม (เงื่อนไขการทดลองที่ 1-6 ในตารางที่ 2) และการทดลองที่มีการเพิ่มอากาศส่วนที่สามเข้าไป (เงื่อนไขการทดลองที่ 7-10) พบว่า η_{th} จะแปรผันตรงกับปริมาณอากาศส่วนเกิน ซึ่งจากการทดลองพบว่าการใช้หรือไม่ใช้อากาศส่วนที่สามจะไม่มีผลต่อค่า η_{th} ซึ่งดูได้จากกราฟรูปที่ 6 แต่การใช้อากาศส่วนที่สามจะมีผลต่อการควบคุมอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นภายในเตาไม่ให้เกิน 1,000 °C ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอากาศส่วนเกินและ η_{th} ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงจำเพาะเท่ากับ 240 kg/h·m³ แสดงใน รูปที่ 6 ซึ่งจะพบว่าในช่วงแรก η_{th} จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณอากาศส่วนเกินและหลังจากปริมาณอากาศส่วนเกินมากกว่า 157% ค่า η_{th} จะลดลง ซึ่งอธิบายได้ว่าในช่วงแรกที่มีการใช้ปริมาณอากาศส่วนเกินน้อยความปั่นป่วน (Turbulent) ที่เกิดจากความเร็วน้ำของอากาศภายในเตาไม่มากพอที่จะทำให้ลายชั้นฟิล์มของเถ้าที่ปกคลุมพื้นผิวอนุภาคของแข็งที่ยังเผาไหม้ไม่หมดทำให้ O₂ แพร่ไปทำปฏิกิริยากับคาร์บอนที่พื้นผิวอนุภาคได้น้อยการเผาไหม้จึงไม่ค่อยสมบูรณ์และเมื่อความเร็วของอากาศเพิ่มมากขึ้น การเผาไหม้ก็จะสมบูรณ์ขึ้นจนกระทั่งได้ประสิทธิภาพสูงสุดประมาณ 95% ที่ปริมาณอากาศส่วนเกิน 157% และจากนั้นถ้าเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกินเพิ่มขึ้นไปอีกจะทำให้ต้องสูญเสียความร้อนส่วนหนึ่งกับการทำให้อากาศส่วนเกินมีอุณหภูมิสูงขึ้นเท่ากับอุณหภูมิในเตาเผา ผลก็คืออุณหภูมิในเตาจะต่ำลงดังแสดงใน รูปที่ 5 (เส้นกราฟ d) ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันไม่ดีพอจึงทำให้ η_{th} ต่ำลง

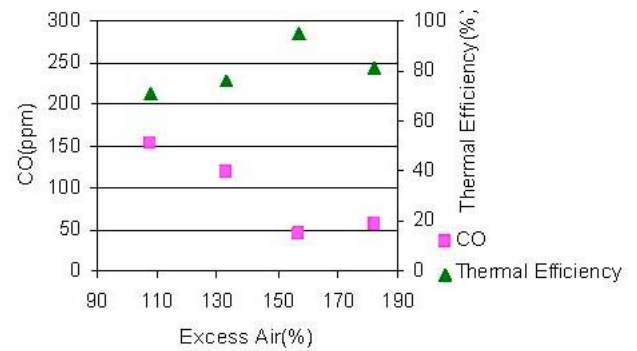


รูปที่ 6. ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพเชิงความร้อนกับปริมาณอากาศส่วนเกินที่ใช้ในการเผาไหม้

(run nos. 4–10 ; SFR = 240 kg/h·m³)

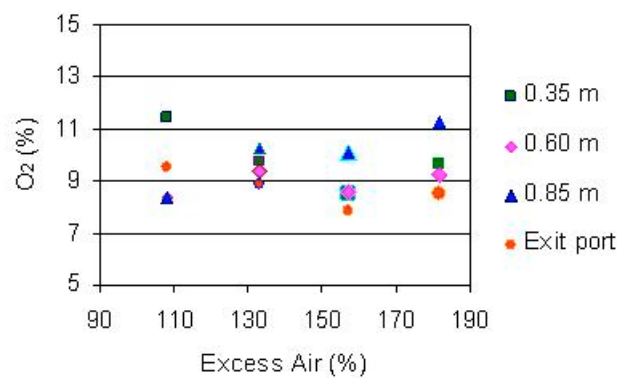


(a) CO₂

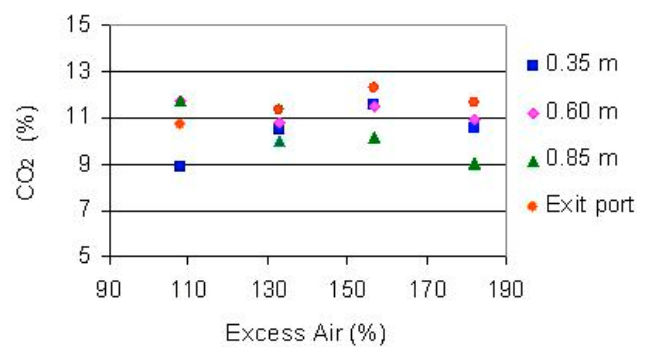


(b) CO

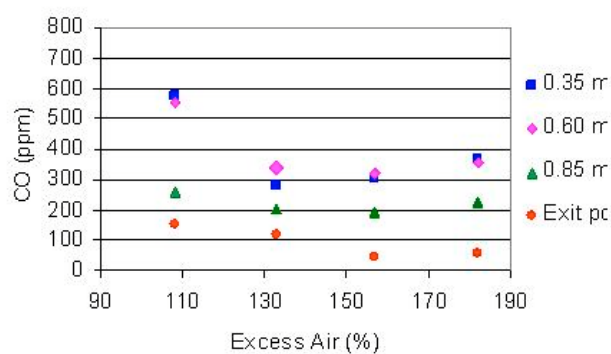
รูปที่ 7. ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอากาศส่วนเกินที่ใช้ในการเผาไหม้กับแก๊สร้อน และประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ (run nos. 7–10 ; SFR = 240 kg/h-m³)



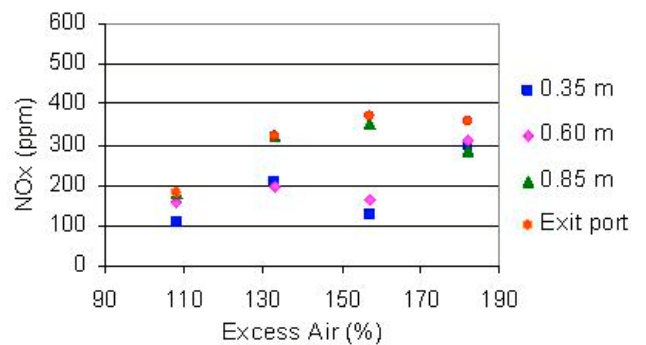
(a) O₂



(b) CO₂



(c) CO



(d) NO_x

รูปที่ 8. ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอากาศส่วนเกินที่ใช้ในการเผาไหม้กับแก๊สร้อน ที่ตำแหน่งความสูงต่างๆ ของเตา VFBC (run nos. 7–10)

1.3.2.3. องค์ประกอบของแก๊สร้อน

จากการทดลองพบว่า CO_2 และ CO ที่เกิดขึ้นจะสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณอากาศส่วนเกินและประสิทธิภาพของเตา ดังแสดงใน รูปที่ 7(a,b) โดยถ้าใช้ปริมาณอากาศส่วนเกินที่เหมาะสมเท่ากับ 157% จะทำให้การเผาไหม้เกิดขึ้นสมบูรณ์และส่งผลให้ประสิทธิภาพของเตาสูง ($\eta_{th} = 95\%$) และเกิดปริมาณ CO_2 ในสัดส่วนที่สูง ในขณะที่สัดส่วนปริมาณของ CO จะมีค่าน้อยที่ประสิทธิภาพเตาสูงสุด ปริมาณ CO จะมีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 50 ppm และปริมาณ O_2 ส่วนเกินในแก๊สร้อนที่ออกมาจากเตา ดังแสดงใน รูปที่ 8(a) จะแปรผันตรงกับ η_{th} โดยที่ปริมาณอากาศส่วนเกิน 87% จะมีค่า η_{th} ต่ำที่สุดจึงมีปริมาณ O_2 ส่วนเกินเหลืออยู่ในแก๊สร้อนมากที่สุดประมาณ 9.5% ในขณะที่ถ้าใช้ปริมาณอากาศส่วนเกิน 157% ค่า η_{th} จะมีค่าสูงสุดทำให้ O_2 ถูกใช้ไปในการเผาไหม้มาก ปริมาณ O_2 ที่ออกมาจากแก๊สร้อนตรงทางออกจึงเหลือน้อยที่สุดประมาณ 7.8% การเปลี่ยนแปลงปริมาณแก๊ส CO_2 , CO , O_2 และ NO_x ตามระดับความสูงของเตาแสดงใน รูปที่ 8(a-d) โดยพบว่าปริมาณ CO_2 , O_2 และ NO_x ยังไม่สามารถสรุปได้ว่ามีความสัมพันธ์อย่างไรกับความสูงของเตา มีเฉพาะ CO เท่านั้นที่พบว่า ที่ทุกปริมาณอากาศส่วนเกินค่า CO จะเกิดขึ้นมากที่สุดที่ระดับความสูง 0.35 เมตร เพราะปริมาณอนุภาคที่ยังเผาไหม้ไม่หมดซึ่งมากองรวมกันเป็นเบดที่บริเวณด้านล่างเตาซึ่งมีปริมาณมากเมื่อเทียบกับปริมาณอากาศส่วนที่สองที่จ่ายจากด้านล่างทำให้การเผาไหม้ยังไม่สมบูรณ์ หรืออาจเกิดจากปฏิกิริยา reduction

1.3.3. การศึกษาผลของปริมาณอากาศส่วนที่สองต่อสมรรถนะของ VFBC

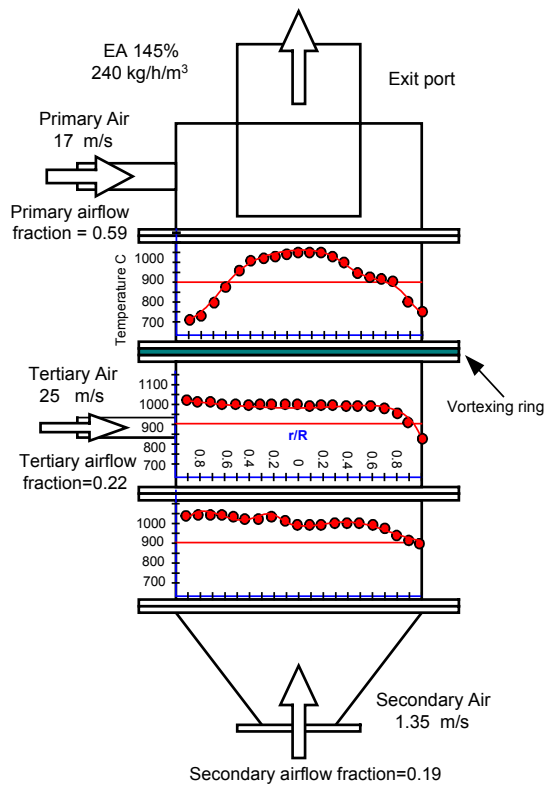
ในการทดลองนี้ได้กำหนดอัตราการไหลของเชื้อเพลิงจำเพาะ 240 kg/h/m^3 อัตราการไหลของอากาศส่วนที่หนึ่งและส่วนที่สอง เท่ากับ $2.06 \text{ m}^3/\text{min}$ และ $0.75 \text{ m}^3/\text{min}$ ตามลำดับ และปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของอากาศที่สอง ดังแสดงในตารางที่ 2 เงื่อนไขการทดลองที่ 11-13

1.3.3.1. การกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผา VFBC

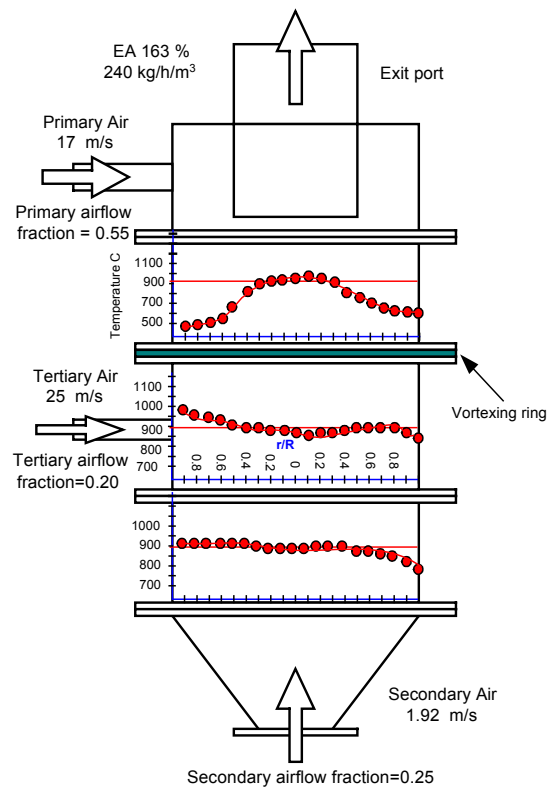
รูปที่ 9(a-c) แสดงให้เห็นว่าอัตราการไหลของอากาศส่วนที่สองเท่ากับ $0.66 \text{ m}^3/\text{min}$ และ $1.22 \text{ m}^3/\text{min}$ ($V_2 = 1.35 \text{ m/s}$ และ 2.5 m/s) ซึ่งเป็นอัตราการไหลที่ต่ำที่สุดและสูงที่สุดใน 13 การทดลองพบว่า ยังคงก่อให้เกิดพฤติกรรมการเผาไหม้แบบวอร์เทคและฟลูอิดไชเบด โดยการกระจายอุณหภูมิภายใน VFBC แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ 1) บริเวณห้องเผาไหม้ที่อยู่เหนือวงแหวนวอร์เทค ลักษณะการกระจายอุณหภูมิมียลักษณะคล้ายพาราโบลาว่า 2) บริเวณห้องเผาไหม้ที่อยู่ต่ำกว่าวงแหวนวอร์เทคพบว่าที่ระดับความสูงของเตาเท่ากับ 0.35 เมตร, 0.6 เมตร มีการกระจายอุณหภูมิสม่ำเสมอตลอดพื้นที่ ซึ่งลักษณะการกระจายอุณหภูมิทั้ง 2 ส่วน คล้ายกับลักษณะการกระจายอุณหภูมิในหัวข้อ 1.3.2.1

1.3.3.2. สมรรถนะของเตา VFBC

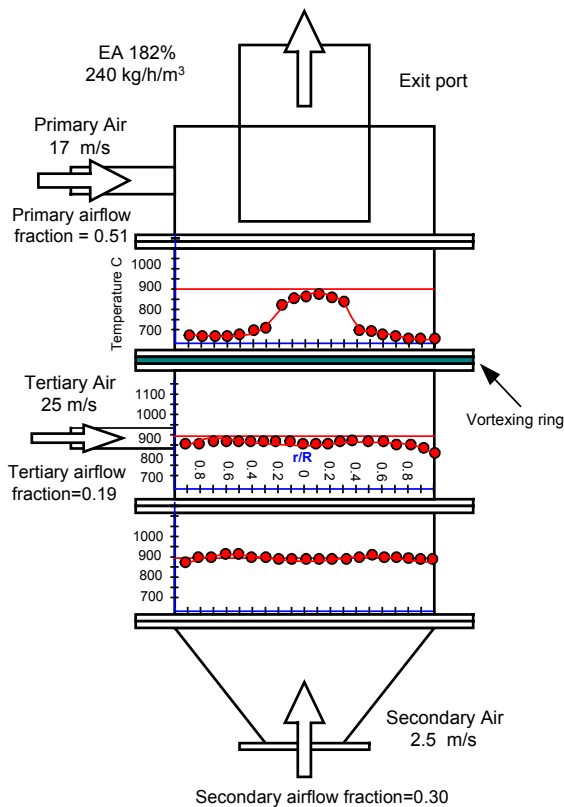
จากการทดลองเมื่อปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของอากาศส่วนที่สองซึ่งทำให้ได้ค่าปริมาณอากาศส่วนเกิน 145% ($V_2 = 1.35 \text{ m/s}$) และ 182 % ($V_2 = 2.5 \text{ m/s}$) ตามลำดับ พบว่าแนวโน้มประสิทธิภาพเชิงความร้อนดังแสดงใน รูปที่ 10 และ 11 เป็นไปในลักษณะคล้ายคลึงกับกรณีการศึกษาเบื้องต้นที่ไม่มีการจ่ายอากาศส่วนที่สอง



(a) Excess air = 145% (run no.11)



(b) Excess air = 163% (run no.12)



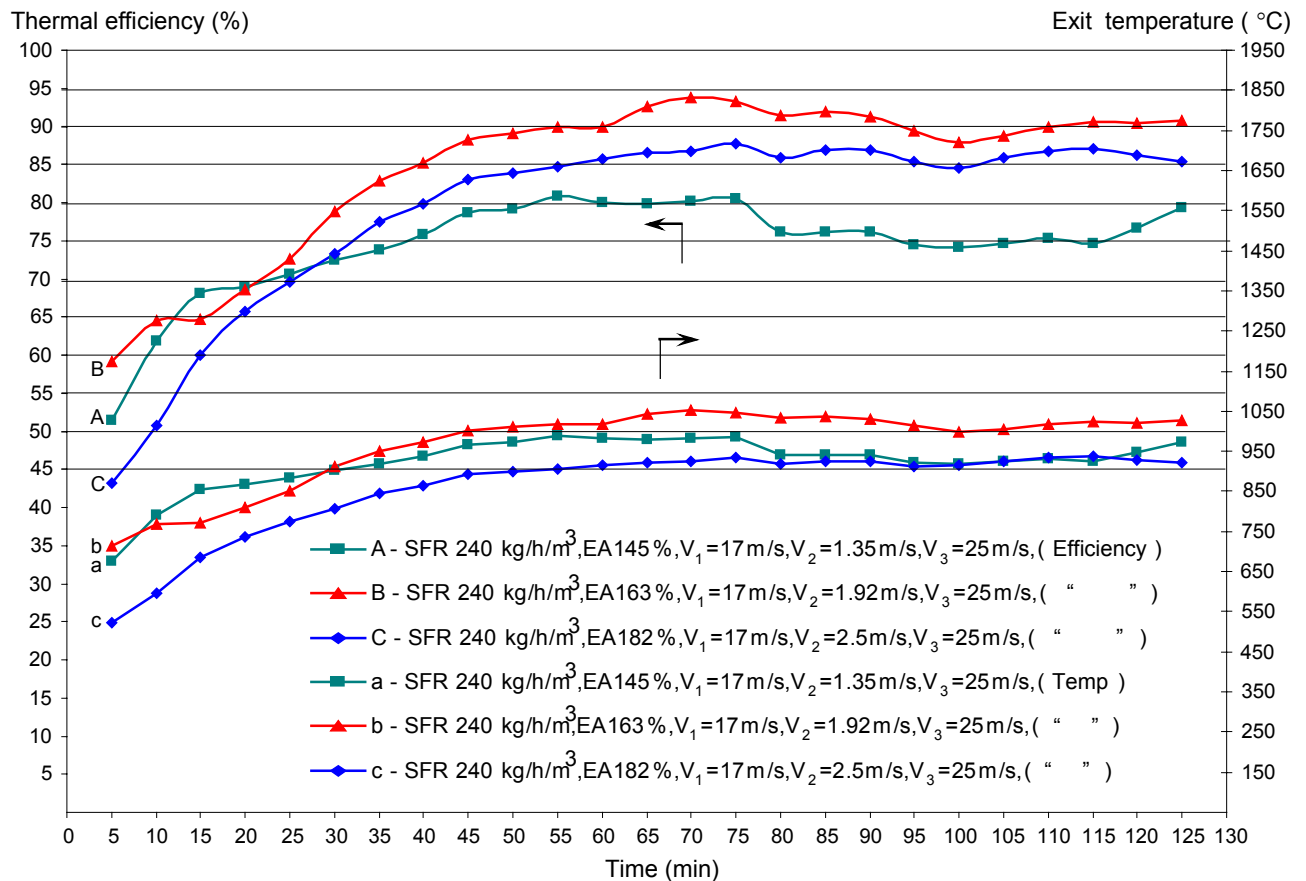
© Excess air = 182% (run no.13)

รูปที่ 9. แสดงการกระจายอุณหภูมิภายในเตา VFBC ที่ระดับความสูงเท่ากับ 0.35 , 0.6 และ 0.8 เมตร

(run nos. 11-13)

(หัวข้อ 1.3.1. รูปที่ 3) และการศึกษาผลของอากาศส่วนที่สาม (หัวข้อ 1.3.2.2 รูปที่ 5) กล่าวคือถ้าผลของการปั่นป่วนไม่มากพอ (กรณีนี้คือปริมาณอากาศส่วนที่สองน้อย) ทำให้ η_{th} ต่ำ ซึ่งเท่ากับ 78% และเมื่อเพิ่มฉนวนความร้อน (กรณีเพิ่มปริมาณอากาศส่วนที่สอง) จะทำให้ η_{th} สูงขึ้น ซึ่งเท่ากับ 92% (คือกรณีอากาศส่วนเกิน 163% ตามรูปที่ 10 เส้นกราฟ B) แต่เมื่อเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกินมากเกินไปจะทำให้อุณหภูมิในห้องเผาไหม้ตกลง ประกอบกับการที่ความเร็วในการทำให้เกิดฟลูอิดเซชันสูงทำให้อุณหภูมิที่ยังเผาไหม้ไม่หมดหลุดออกจากเตาเผาได้ จึงจะทำให้ η_{th} ลดลง เหลือเท่ากับ 87% (คือกรณีอากาศส่วนเกิน 182% ตาม รูปที่ 10 เส้นกราฟ C) นอกจากนี้ที่สำคัญจะเห็นได้จากผลการทดลองทั้งหมดตั้งแต่ต้น (หัวข้อ 1.3.1 เป็นต้นมา) จะพบว่าถึงแม้ว่าปริมาณอากาศในแต่ละส่วนจะแตกต่างกันไปแต่ถ้ารวมกันแล้วได้ปริมาณอากาศส่วนเกินใกล้เคียงกันจะให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ไม่แตกต่างกันดังจะเห็นได้จากผลการทดลองดังต่อไปนี้

ในการศึกษาผลของอากาศส่วนที่สองในหัวข้อนี้พบว่าเมื่อใช้อากาศส่วนเกิน 145% ($V_2 = 1.35 \text{ m/s}$) ในการเผาไหม้ ทำให้มีอุณหภูมิทางออกเฉลี่ยเท่ากับ 950°C และ η_{th} เท่ากับ 78% ดังแสดงใน รูปที่ 10 (เส้นกราฟ a และ A) เมื่อนำมาคำนวณจะมีพิกัดความร้อนเท่ากับ $0.76 \text{ MW}_{th}/\text{m}^3$ ซึ่งค่า η_{th} ดังกล่าวมีค่ามากกว่า η_{th} ที่ได้จากการใช้อากาศส่วนเกิน 108% และ 133% ของกรณีการศึกษาผลของอากาศส่วนที่สามในหัวข้อ 1.3.2.2 ซึ่งมีค่า η_{th} เท่ากับ 70% และ 75% ตามลำดับดังแสดงใน รูปที่ 5 (เส้นกราฟ A และ B) ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าค่า η_{th} ที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงเป็นผลมาจากความปั่นป่วนของปริมาณอากาศทั้งหมดที่ใช้มากกว่าที่จะขึ้นกับปริมาณอากาศที่ใช้ในแต่ละส่วน (อากาศส่วนที่สองหรือสาม) และเมื่อใช้อากาศส่วนเกินเพิ่มขึ้นเท่ากับ 163% ($V_2 = 1.92 \text{ m/s}$) ของกรณีศึกษาผลของอากาศส่วนที่สองทำให้มีอุณหภูมิทางออกเฉลี่ยเท่ากับ $1,025^\circ\text{C}$ และ η_{th} เท่ากับ 92% ดังแสดงใน รูปที่ 10 (เส้นกราฟ b และ B) ทำให้ได้พิกัดความร้อนของเตาเท่ากับ $0.9 \text{ MW}_{th}/\text{m}^3$ ซึ่งทั้งค่า η_{th} และพิกัดความร้อนเตาจะใกล้เคียงกับของกรณีอื่นๆ ที่มีปริมาณอากาศส่วนเกินใกล้เคียงกันคือ 1) กรณีใช้อากาศส่วนเกิน 157% (กรณีมีการจ่ายอากาศส่วนที่สามเข้าสู่เตาเผา VFBC, run no.9 หัวข้อ 1.3.2) ทำให้มีอุณหภูมิทางออกสูงสุดเท่ากับ $1,060^\circ\text{C}$ และ η_{th} สูงสุดเท่ากับ 95% ดังแสดงใน รูปที่ 5 (เส้นกราฟ c และ C) โดยให้พิกัดความร้อนของเตาเท่ากับ $0.92 \text{ MW}_{th}/\text{m}^3$ 2) กรณีใช้อากาศส่วนเกิน 157% (กรณีไม่มีการจ่ายอากาศส่วนที่ 3 เข้าสู่เตาเผา VFBC, run no.6 หัวข้อ 1.3.1) ทำให้มีอุณหภูมิทางออกเท่ากับ $1,020^\circ\text{C}$ และ η_{th} เท่ากับ 92% ดังแสดงใน รูปที่ 3 (เส้นกราฟ f และ F) นอกจากนี้พบว่าถ้าเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกินให้มากขึ้นเท่ากับ 182% ($V_2 = 2.5 \text{ m/s}$) ในการเผาไหม้จะทำให้มีอุณหภูมิทางออกลดลงเหลือเท่ากับ 924°C และ η_{th} ลดลงเหลือเท่ากับ 87% ดังแสดงใน รูปที่ 10 (เส้นกราฟ c และ C) ทำให้พิกัดความร้อนของเตาตกลงเหลือเท่ากับ $0.85 \text{ MW}_{th}/\text{m}^3$ ซึ่งเป็นผลมาจากการใช้ปริมาณอากาศส่วนเกินที่มากเกินไปจนเหมาะสมจะทำให้ความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ส่วนหนึ่งต้องสูญเสียให้กับไนโตรเจนในอากาศให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นจึงทำให้อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ลดลง ซึ่งคล้ายกับกรณีใช้อากาศส่วนเกินเท่ากับ 182% ที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 1.3.2.2

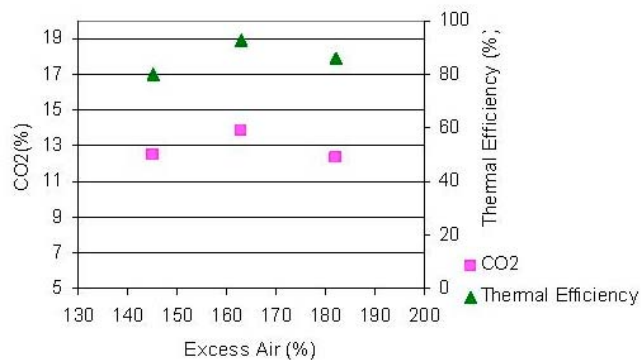


รูปที่ 10. แสดงการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพเชิงความร้อนและอุณหภูมิแก๊สร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เมื่อเปลี่ยนแปลงความเร็วอากาศส่วนที่สอง (v_2) โดยคงที่อัตราการป้อนแกลบจำเพาะ ความเร็วของอากาศส่วนที่หนึ่ง (v_1) และความเร็วของอากาศส่วนที่สาม (v_3) (EA = ปริมาณอากาศส่วนเกินที่ใช้ในการเผาไหม้)

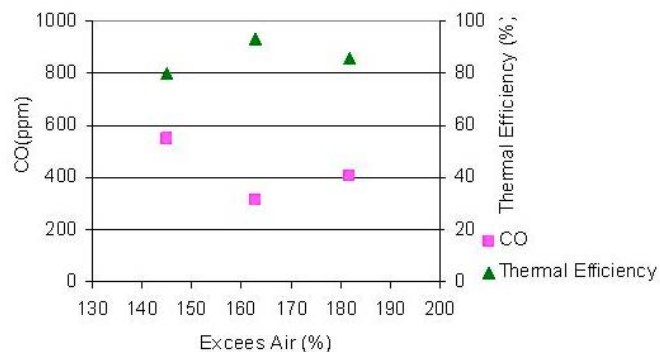
1.3.3.3. องค์ประกอบแก๊สร้อน

ในการวิเคราะห์ถึงปริมาณแก๊ส CO_2 , CO และ O_2 ที่ตำแหน่งทางออกของเตาเผา VFBC เมื่อทำการปรับเปลี่ยนปริมาณอากาศส่วนเกินที่ใช้ในการเผาไหม้ พบว่าทุกเงื่อนไขของการทดลองปริมาณแก๊ส CO_2 , CO และ O_2 ที่เกิดขึ้นให้ผลที่สอดคล้องกับค่า η_{th} ที่ได้จากการเผาไหม้ในทิศทางที่เมื่อค่า η_{th} สูงขึ้น ปริมาณ CO_2 จะเพิ่มขึ้น แต่ปริมาณ CO และ O_2 จะลดลง

จาก รูปที่ 11(a) แสดงให้เห็นว่า CO_2 ที่ตำแหน่งทางออกจะแปรผันโดยตรงกับปริมาณอากาศส่วนเกินที่ใช้ในการไหม้ โดยเมื่อใช้อากาศส่วนเกินเท่ากับ 145% ทำให้ η_{th} ต่ำ ซึ่งเท่ากับ 78% เนื่องจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ (ซึ่งได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 1.3.3.2) จึงทำให้มี CO_2 ที่เกิดจากการเผาไหม้มีปริมาณน้อย ซึ่งเท่ากับ 12.49% แต่เมื่อใช้ปริมาณอากาศส่วนเกินในการไหม้ให้มากขึ้น ซึ่งเท่ากับ 163% พบว่า η_{th} เพิ่มขึ้นเป็น 92% เนื่องจากการเกิดการป่นป่วนในการเผาไหม้เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์มากขึ้น ดังนั้นจึงทำให้ปริมาณ CO_2 เพิ่มขึ้น ซึ่งเท่ากับ 13.8% อย่างไรก็ตามเมื่อใช้ปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 182% ทำให้ปริมาณ CO_2 ลดลงเหลือเท่ากับ 12.3% เนื่องจากการใช้ปริมาณอากาศส่วนเกินที่เพิ่มขึ้นทำให้ 1) เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์



(a) CO₂

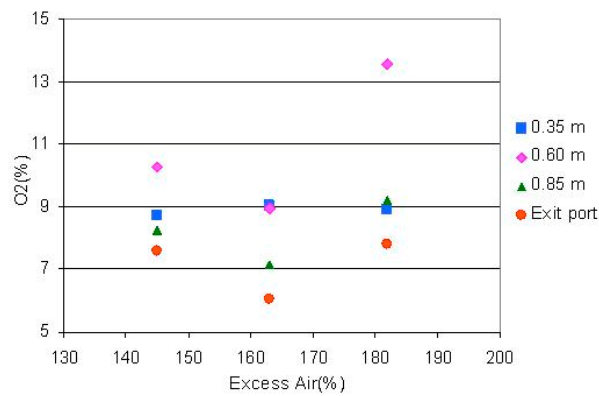


(b) CO

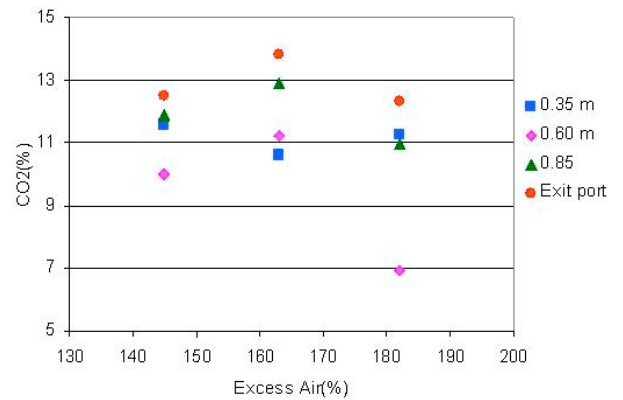
รูปที่ 11. ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอากาศส่วนเกินที่ใช้ในการเผาไหม้กับแก๊สร้อนและประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ (run nos. 11–13 ; SFR = 240 kg/h-m³)

ซึ่งสอดคล้อง กับ η_{th} ที่ลดลงต่ำลง ซึ่งเท่ากับ 87% (ดังได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 1.3.2.2) และ 2) สัดส่วนของปริมาณ CO₂ ลดลงเพราะสัดส่วนของอากาศทั้งหมดที่นำมาใช้ในการเผาไหม้เพิ่มมากขึ้น ส่วนการพิจารณาปริมาณ CO ที่เกิดจากการเผาไหม้พบว่า จาก รูปที่ 11(b) แสดงให้เห็นว่า CO ที่ตำแหน่งทางออกจะแปรผกผันกับปริมาณอากาศส่วนเกินที่ใช้ในการไหม้ เมื่อใช้อากาศส่วนเกินเท่ากับ 145% ในการเผาไหม้พบว่าเกิด CO ออกมาปริมาณมาก มีค่าเท่ากับ 547 ppm แสดงให้เห็นว่าเป็นเงื่อนไขที่ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ทำให้ได้ η_{th} ต่ำ เท่ากับ 78% แต่เมื่อใช้ปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 163% พบว่าปริมาณ CO ลดลงเหลือเท่ากับ 315 ppm เนื่องจาก 1) ปริมาณอากาศที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับ η_{th} ที่เพิ่มขึ้น เป็น 92% และ 2) การที่ใช้อากาศส่วนเกินมากขึ้นทำให้สัดส่วนของ CO ลดลง (เช่นเดียวกับกรณีของ CO₂ ที่ EA = 182%) แต่เมื่อเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกินขึ้นไปอีกเป็น 182% ทำให้ CO กลับมาเพิ่มขึ้นเป็นเท่ากับ 404 ppm เนื่องจากเกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ซึ่งสอดคล้องกับค่า η_{th} ที่ลดลงเหลือเท่ากับ 87% (ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอากาศส่วนเกินกับ η_{th} ที่ได้จากการเผาไหม้ ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 1.3.2.2) และในการพิจารณาปริมาณ O₂ ที่เกิดจากการเผาไหม้จากรูปที่ 12(a) แสดงให้เห็นว่า O₂ ที่ตำแหน่งทางออกจะแปรผันโดยตรงกับปริมาณอากาศส่วนเกินที่ใช้ในการไหม้ โดยเมื่อใช้อากาศส่วนเกินเท่ากับ 145% ทำให้ η_{th} ที่ต่ำ ซึ่งเท่ากับ 78% ทำให้เหลือ O₂ ที่ไม่ได้ใช้ในการเผาไหม้จำนวนมาก ซึ่งเท่ากับ 7.6% แต่เมื่อใช้ปริมาณอากาศส่วนเกินในการไหม้เท่ากับ 163% ทำให้ η_{th} เพิ่มขึ้น ซึ่งเท่ากับ 92% ซึ่งทำให้ O₂ ถูกนำไปใช้ในการเผาไหม้มากขึ้น จึงทำให้เหลือ O₂ ออกมาน้อย ซึ่งเท่ากับ 6.1% และเมื่อปริมาณอากาศส่วนเกินใช้ในการไหม้เท่ากับ 182% ทำให้ O₂ เพิ่มขึ้นเป็นเท่ากับ 7.8% เนื่องจาก 1) ปริมาณอากาศส่วนเกินที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ เหลือ O₂ ที่ไม่ได้ใช้ในการเผาไหม้จำนวนมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับ η_{th} ที่ลดลงเหลือเท่ากับ 87% และ 2) การเพิ่มอากาศส่วนเกินมากขึ้น เป็นการทำให้สัดส่วนของปริมาณ O₂ ในแก๊สร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เพิ่มมากขึ้นตาม และจากผลการทดลองนี้ทำให้พบว่าการเปลี่ยนปริมาณแก๊ส CO₂, CO และ O₂ ที่เกิดขึ้นสอดคล้องกับประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ดังที่ได้กล่าวมาแล้วตั้งแต่

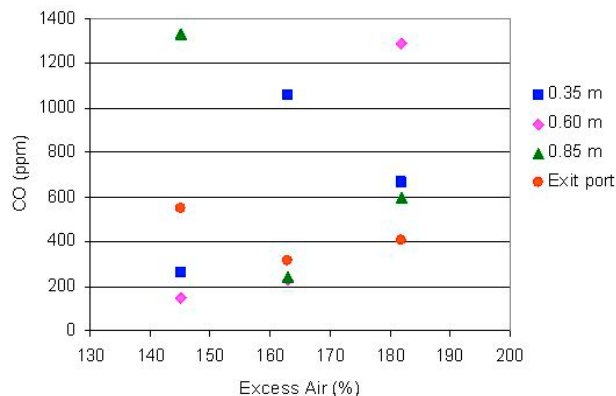
ต้น ส่วนในการวิเคราะห์ถึงการเปลี่ยนแปลงปริมาณแก๊ส CO_2 , CO และ O_2 ตามระดับความสูงของเตาแสดงใน รูปที่ 12(a-c) โดยพบว่าปริมาณ CO_2 , CO และ O_2 ยังไม่สามารถสรุปได้ว่ามีความสัมพันธ์อย่างไรกับความสูงของเตา ซึ่งคล้ายกับผลการทดลองที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 1.3.2.3



(a) O_2



(b) CO_2



(c) CO

รูปที่ 12. ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอากาศส่วนเกินที่ใช้ในการเผาไหม้กับแก๊สร้อน ที่ตำแหน่งความสูงต่างๆ ของเตา VFBC (run nos. 11–13)

1.4. สรุปผลการทดลอง

ในการวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นการพัฒนาเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์เบดสำหรับเชื้อเพลิงแกลบซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. เตาเผา VFBC ที่มีสัดส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความสูงมีค่าต่ำเพียง 2.75 สามารถรวมพฤติกรรมการไหลของอากาศและแกลบแบบวอร์เทคและฟลูอิดซ์เบดขณะที่เกิดการเผาไหม้ได้ซึ่งสังเกตได้จากการกระจายอุณหภูมิภายในเตาที่สามารถแบ่งออกเป็นสองบริเวณคือ 1) บริเวณห้องเผาไหม้ที่อยู่เหนือวงแหวนวอร์เทคโดยมี

ลักษณะการกระจายอุณหภูมิคล้ายรูปพาราโบลาคว่ำแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมการไหลแบบวอร์เทกและ 2) บริเวณห้องเผาไหม้ที่อยู่ต่ำกว่าวงแหวนวอร์เทกการกระจายอุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้เกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัดเตาแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมการเผาไหม้แบบฟลูอิดไชเบค

2. จากการรวมพฤติกรรมการเผาไหม้แบบวอร์เทกและฟลูอิดไชเบคขณะที่เกิดการเผาไหม้จะทำให้เกิดการเผาไหม้ตลอดทั่วทั้งพื้นที่หน้าตัดของเตาเผา VFBC ทำให้เตาสามารถผลิตพิกัดความร้อนจำเพาะได้สูงสุด $0.91 \text{ MW}_{th}/\text{m}^3$ ที่ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเท่ากับ 95% และปริมาณอากาศส่วนเกิน 157% โดยอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ที่ทางออกประมาณ $1,060^\circ\text{C}$

3. การเกิดฟลูอิดไชเซชันภายในเตาไม่จำเป็นต้องผสมวัสดุเชื้อเพลิงจำพวกทรายซิลิกา หรืออลูมินา ลงไปในเบค

4. การติดตั้งวงแหวนวอร์เทกจะช่วยเพิ่มการเคลื่อนที่หมุนวนอย่างรุนแรงบริเวณห้องเผาไหม้ที่อยู่เหนือวงแหวนวอร์เทก โดยอนุภาคที่มีน้ำหนักมากจะไม่สามารถเคลื่อนที่ออกจากเตาเผาได้ จี๊ไธ่ที่ออกจากเตาเผา VFBC จึงมีขนาดเล็กละเอียดประมาณ $200\text{-}600 \mu\text{m}$. และมีสีดำปนเทา

5. ประสิทธิภาพเชิงความร้อนจะแปรผันตรงกับปริมาณอากาศส่วนเกิน ในลักษณะที่เมื่อเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกินประสิทธิภาพเชิงความร้อนจะเพิ่มขึ้น แต่ถ้าปริมาณอากาศส่วนเกินมีค่ามากเกินไปประสิทธิภาพเชิงความร้อนก็จะลดต่ำลง โดยปริมาณอากาศส่วนที่สองและสามจะไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเตา แต่ถ้าความเร็วอากาศส่วนที่สองที่ทำให้เกิดฟลูอิดไชเซชันมากเกินไปจะทำให้อนุภาคเชื้อเพลิงที่ยังเผาไหม้ไม่หมดมีโอกาสดูดออกมาจากเตาได้ และอากาศส่วนที่สามจะมีผลต่อการควบคุมอุณหภูมิสูงสุดภายในเตาไม่ให้เกิน $1,000^\circ\text{C}$

6. ปริมาณ CO_2 , CO และ O_2 สอดคล้องกับปริมาณอากาศส่วนเกินและประสิทธิภาพของเตาโดยที่ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเท่ากับ 95% จะให้ปริมาณ CO และ NO_x ที่ปล่อยออกมาจากเตาค่าไม่เกิน 50 ppm และ 380 ppm ตามลำดับ

2. การออกแบบเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์เบด ระดับอุตสาหกรรมขนาด 9 MW_{th}

2.1. เงื่อนไขการออกแบบ VFBC ระดับอุตสาหกรรม

2.1.1. เตาเผาไหม้สามารถผลิตความร้อนได้ 9 MW_{th} และให้พิกัดความร้อนเท่ากับ 0.85 MW_{th} /m³

2.1.2. ความเร็วอากาศที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชันอยู่ในช่วงประมาณ 0.11 m/s

2.1.3. อัตราการป้อนแกลบจำเพาะเท่ากับ 240 kg/h-m³

2.2. คำนวณอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงของแกลบทางทฤษฎี

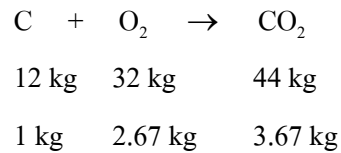
ตารางที่ 4. องค์ประกอบทางเคมีแบบละเอียดของแกลบ Ultimate analysis

องค์ประกอบ	น้ำหนักเปือก(%)
Carbon	38.0
Hydrogen	4.55
Oxygen	32.40
Sulphur	0.06
Nitrogen	0.69
Ash	14.0
Moisture	10.30
Total	100.0

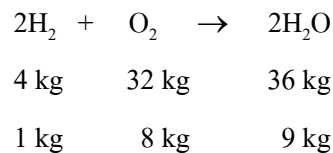
ตารางที่ 5. องค์ประกอบทางเคมีแบบประมาณของแกลบ Approximate analysis

องค์ประกอบ	น้ำหนักเปือก (%)
Fixed Carbon	20.1
Moisture	10.3
Volatile matter	55.6
Ash	14.0
Total	100.0
Density (kg/m ³)	105
Calorific Value	14.98 MJ/kg

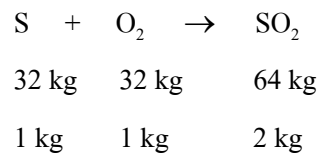
คำนวณหาปริมาณอากาศทางทฤษฎีที่ต้องการใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิง 1 kg_{แกลบ} เขียนสมการการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์เพื่อหาปริมาณ O₂ ทางทฤษฎี ดังนี้



ดังนั้น 0.34 kg_C จะใช้ O₂ = 0.38 × 2.67 = 1.015 kg



ดังนั้น 0.0511 kg_H จะใช้ O₂ = 8 × 0.0455 = 0.364 kg



ดังนั้น 0.0005 kg_S จะใช้ O₂ = 1 × 0.0006 = 0.0006 kg

ดังนั้นปริมาณ O₂ ที่ใช้ในการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ = 1.015 + 0.364 + 0.0006 = 1.380 kg_{O₂}/kg_f

เนื่องจากในเชื้อเพลิง(แกลบ) มีปริมาณ O₂ อยู่แล้ว 0.324 kg

ดังนั้นปริมาณ O₂ ที่ต้องการจากอากาศ = 1.380 - 0.324
= 1.056 kg O₂/kg_{แกลบ}

และในอากาศแห้งประกอบด้วย O₂ 23.2% โดยน้ำหนัก

ดังนั้นปริมาณอากาศทางทฤษฎี(A/F_{th}) ที่ต้องการคือ A/F ratio = $\frac{1.056}{0.232} = 4.55 \frac{\text{kg}_{\text{da}}}{\text{kg}_f}$

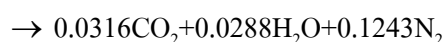
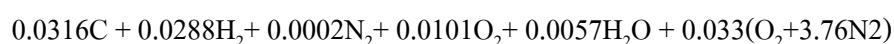
2.3 คำนวณอุณหภูมิการเผาไหม้

2.3.1. อุณหภูมิอะเดียแบติก (Adiabatic Flame Temperature)

ตารางที่ 6. แสดงสัดส่วนโดยโมลของธาตุต่อ 1 กิโลกรัมของเชื้อเพลิง

ธาตุ	สัดส่วนโดยน้ำหนัก kg/kg _{fuel}	น้ำหนักโมเลกุล	สัดส่วนโดยโมล kmol/kg _{fuel}
C	0.38	12	0.0316
H ₂	0.0455	2	0.0228
N ₂	0.0069	28	0.0002
O ₂	0.324	32	0.0101
H ₂ O	0.1030	18	0.0057

จากสัดส่วนโดยโมลของเชื้อเพลิงเขียนเป็นสมการสมดุลทางเคมีได้ดังนี้



จากสูตรระบบที่มีปฏิกิริยาเคมีที่มีการไหลคงตัวในกรณีที่สารตั้งต้นเข้าห้องเผาไหม้ที่ 25 °C

$$H_{\text{prod}} = H_{\text{react}}$$

$$\sum N_p(\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ)_p = \sum N_r(\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ)_r$$

ตารางที่ 7. แสดงค่าเอนทัลปีของธาตุที่สภาวะอ้างอิงมาตรฐานและที่ 298 K

สาร	$\bar{h}_f^\circ$ (KJ / kmol)	$\bar{h}_{298\text{K}}$
C	0	0
H ₂	0	8,468
O ₂	0	8,682
N ₂	0	8,669
CO ₂	-393,520	9,364
H ₂ O _(gas)	-241,820	9,904
H ₂ O _(liquid)	-285,830	9,904

แทนค่า

$$\begin{aligned}
& N_{\text{CO}_2} (\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}_{298\text{k}})_{\text{CO}_2} + N_{\text{H}_2\text{O}} (\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}_{298\text{k}})_{\text{H}_2\text{O}} + N_{\text{N}_2} (\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}_{298\text{k}})_{\text{N}_2} \\
& = N_{\text{C}} (\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}_{298\text{k}})_{\text{C}} + N_{\text{H}_2} (\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}_{298\text{k}})_{\text{H}_2} + N_{\text{H}_2\text{O}} (\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}_{298\text{k}})_{\text{H}_2\text{O}} \\
& \quad + N_{\text{O}_2} (\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}_{298\text{k}})_{\text{O}_2} + N_{\text{N}_2} (\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}_{298\text{k}})_{\text{N}_2}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& 0.0316\text{kmol}_{\text{CO}_2} (-393,520 + \bar{h}_{\text{CO}_2} - 9364) + 0.0285\text{kmol}_{\text{H}_2\text{O}} (-241,820 + \bar{h}_{\text{H}_2\text{O}} - 9,904) \\
& + 0.1243\text{kmol}_{\text{N}_2} (\bar{h}_{\text{N}_2} - 8669) = 0.0057\text{kmol}_{\text{H}_2\text{O}} (-285,830)_{\text{H}_2\text{O}}
\end{aligned}$$

$$0.0316\bar{h}_{\text{CO}_2} + 0.0285\bar{h}_{\text{H}_2\text{O}} + 0.1243\bar{h}_{\text{N}_2} = 19,353.594 \text{ kJ/kg}_f$$

สมมติอุณหภูมิของแก๊สเท่ากับ 2700 °K

$$0.0316(143,620)_{\text{CO}_2} + 0.0285(119,717)_{\text{H}_2\text{O}} + 0.1243(90,328)_{\text{N}_2} = 19,178.097 \text{ kJ/kg}_f$$

สมมติอุณหภูมิของแก๊สเท่ากับ 2850 °K

$$0.0316(152,908)_{\text{CO}_2} + 0.0285(127,952)_{\text{H}_2\text{O}} + 0.1243(95,859)_{\text{N}_2} = 20,393.799 \text{ kJ/kg}_f$$

เทียบส่วนหาค่าอุณหภูมิแก๊สได้เท่ากับ

$$\begin{aligned}
T_p &= 2,721.65 \text{ K} \\
T_p &= 2,448.65 \text{ }^\circ\text{C}
\end{aligned}$$

2.3.2. อุณหภูมิการเผาไหม้เมื่อพิจารณาความร้อนสูญเสีย (Non-Adiabatic Flame Temperature)

เมื่อพิจารณาความร้อนสูญเสีย

$$H_{\text{prod}} = H_{\text{react}} - Q_{\text{loss}}$$

โดยแบ่งความร้อนสูญเสียเป็น 2 ส่วนหลักๆ คือความร้อนที่สูญเสียให้กับผนังเตา ซึ่งจะประมาณค่าเท่ากับ 10 % ของค่าความร้อนเชื้อเพลิง เท่ากับ 1,498 kJ/kg และความร้อนสูญเสียจากการระเหยน้ำในเชื้อเพลิงกลายเป็นไอน้ำที่อุณหภูมิการเผาไหม้ซึ่งหาได้ดังนี้

$$Q_{\text{loss}} = m [C_w(100-T_p) + (h_{\text{fg}} + C_v(T_g - 100))]$$

โดยที่

$$\begin{aligned}
m &= \text{มวลของน้ำในเชื้อเพลิง} \\
C_w &= \text{ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ} = 4.187 \text{ kJ/kg.K} \\
C_v &= \text{ค่าความร้อนจำเพาะเฉลี่ยโดยประมาณของไอน้ำ} = 1.88 \text{ kJ/kg.K} \\
T_f &= \text{อุณหภูมิเชื้อเพลิง, } ^\circ\text{C} \\
T_g &= \text{อุณหภูมิของก๊าซเสีย, } ^\circ\text{C} \\
h_{\text{fg}} &= \text{ค่าความร้อนแฝงของการระเหยน้ำที่ 1 บรรยากาศ} = 2256.8 \text{ kJ/kg}
\end{aligned}$$

$$Q_{\text{loss}} = 0.103 \frac{\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}}{\text{kg}_f} \left[4.187 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \text{K}} (100 - 35) \text{K} + 2,256.8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}} \right] + 1.88 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}} (1000 - 100)$$

$$= 434.758 \text{ kJ/kg}_f$$

$$Q_{\text{loss}} = 1498 + 434.758 = 1932.758 \text{ kJ/kg}_f$$

เมื่อคิดความร้อนสูญเสียและแทนลงในสมการ

$$0.0316 \text{ kmol}_{\text{CO}_2} (-393,520 + \bar{h}_{\text{CO}_2} - 9,364) + 0.0285 \text{ kmol}_{\text{H}_2\text{O}} (-241,820 + \bar{h}_{\text{H}_2\text{O}} - 9,904) \\ + 0.1243 \text{ kmol}_{\text{N}_2} (\bar{h}_{\text{N}_2} - 8,669) = 0.0057 \text{ kmol}_{\text{H}_2\text{O}} (-285,830)_{\text{H}_2\text{O}} - 1,932.758$$

$$0.0284 \bar{h}_{\text{CO}_2} + 0.0313 \bar{h}_{\text{H}_2\text{O}} + 0.1111 \bar{h}_{\text{N}_2} = 1,8654.7617 - 1,932.758 = 16,722.004 \text{ kJ/kg}_f$$

สมมติอุณหภูมิของแก๊สเท่ากับ $2,600^\circ\text{K}$

$$0.0316(137,449)_{\text{CO}_2} + 0.0285(114,273)_{\text{H}_2\text{O}} + 0.1243(86,650)_{\text{N}_2} = 18,370.764 \text{ kJ/kg}_f$$

สมมติอุณหภูมิของแก๊สเท่ากับ $2,500^\circ\text{K}$

$$0.0316(131,290)_{\text{CO}_2} + 0.0285(108,868)_{\text{H}_2\text{O}} + 0.1243(82,981)_{\text{N}_2} = 17,566.040 \text{ kJ/kg}_f$$

เทียบส่วนหาค่าอุณหภูมิแก๊สได้เท่ากับ

$$\begin{aligned} T_p &= 2,481.889 \text{ K} \\ T_p &= 2,208.889^\circ\text{C} \end{aligned}$$

2.4. แนวทางการลดอุณหภูมิการเผาไหม้

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิการเผาไหม้ที่ $2,275.233^\circ\text{C}$ เป็นอุณหภูมิที่สูงจึงต้องลดอุณหภูมิลงมาให้เหลือประมาณ $1,000^\circ\text{C}$ โดยมีแนวทางลดอุณหภูมิดังนี้

2.4.1. ใช้ไหลจากภายนอกมารับความร้อนภายในเตาเผาไหม้

2.4.2. เพิ่มอากาศส่วนเกินเพื่อที่จะให้อากาศไปถึงความร้อนจากเตาเผาไหม้

ในงานวิจัยนี้จะเลือกวิธีที่สองคือเพิ่มอากาศส่วนเกินเข้าไปซึ่งจะลองใช้อากาศส่วนเกินที่ 192%

สมมูลเคมีที่อากาศส่วนเกินเท่ากับ 192%

$$0.0316\text{C} + 0.0285\text{H}_2 + 0.0002\text{N}_2 + 0.0101\text{O}_2 + 0.0057\text{H}_2\text{O} + (2.92 \times 0.033) (\text{O}_2 + 3.76\text{N}_2)$$

$$\rightarrow 0.0316\text{CO}_2 + 0.0285\text{H}_2\text{O} + 0.06336\text{O}_2 + 0.1362\text{N}_2$$

จากสมการ

$$\begin{aligned} H_{\text{prod}} &= H_{\text{react}} - Q_{\text{loss}} \\ \sum N_p(\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ)_p &= (N\bar{h}_f^\circ)_{H_2O} - Q_{\text{loss}} \end{aligned}$$

แทนค่า

$$\begin{aligned} &0.0316(-393,520 + \bar{h}_{\text{CO}_2} - 9,364) + 0.0285(-241,820 + \bar{h}_{\text{H}_2\text{O}} - 9904) \\ &+ 0.06336(\bar{h}_{\text{O}_2} - 8682) + 0.1362(\bar{h}_{\text{N}_2} - 8669) = 0.0057(-285830) - 1932.758 \end{aligned}$$

$$0.0316\bar{h}_{\text{CO}_2} + 0.0285\bar{h}_{\text{H}_2\text{O}} + 0.06336\bar{h}_{\text{O}_2} + 0.1362\bar{h}_{\text{N}_2} = 20,034.150 \text{ kJ/kg}_f$$

สมมติอุณหภูมิของแก๊สเท่ากับ 1300 °K

$$\begin{aligned} &0.0316(59,522)_{\text{CO}_2} + 0.0285(48,807)_{\text{H}_2\text{O}} + 0.06336(42,033)_{\text{O}_2} + 0.1362(40,170)_{\text{N}_2} \\ &= 20,488.69 \text{ kJ/kg}_f \end{aligned}$$

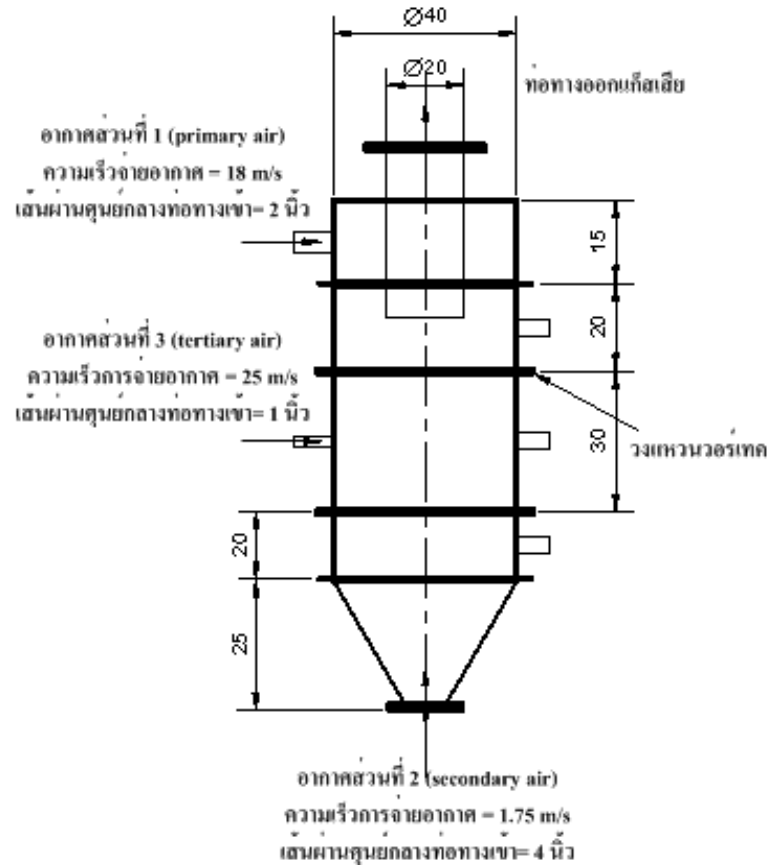
สมมติอุณหภูมิของแก๊สเท่ากับ 1260 °K

$$\begin{aligned} &0.0316(57,244)_{\text{CO}_2} + 0.0285(47,022)_{\text{H}_2\text{O}} + 0.06336(40,594)_{\text{O}_2} + 0.1362(38,807)_{\text{N}_2} \\ &= 19,780.849 \text{ kJ/kg}_f \end{aligned}$$

เทียบส่วนหาค่าอุณหภูมิแก๊สได้เท่ากับ

$$\begin{aligned} T_p &= 1274.31 \text{ } ^\circ\text{K} \\ T_p &= 1001.31 \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

ในทางทฤษฎีอากาศส่วนเกินที่ 192% สามารถลดอุณหภูมิการเผาไหม้ลงมาเหลือ 1,000 °C แต่เนื่องจากการทดลองจริงของ VFBC ระดับห้องปฏิบัติการ พบว่า อากาศส่วนเกินที่ 120 % สามารถควบคุมอุณหภูมิการเผาไหม้ภายในเตาเหลือ 1,000 °C ได้ เพราะในการเผาไหม้ทางทฤษฎีจุดที่เผาไหม้ดีที่สุดคือ จุดที่ไม่มีอากาศส่วนเกิน (A/F เท่ากับทางทฤษฎี) แต่ในทางปฏิบัติไม่สามารถเผาไหม้ที่ A/F เท่ากับทางทฤษฎีได้ เพราะการเผาไหม้จริงต้องการอากาศมากกว่าทางทฤษฎีเพื่อจะเข้าไปทำปฏิกิริยาการเผาไหม้กับเชื้อเพลิงให้ได้มากที่สุดและเหลือเชื้อเพลิงที่ไม่เผาไหม้น้อยที่สุด จุดนี้จะเป็นจุดที่เผาไหม้สมบูรณ์ทางปฏิบัติ ทำให้มีความแตกต่างกันระหว่าง อากาศส่วนเกินที่ลดอุณหภูมิเหลือ 1000 °C แต่ในการออกแบบจะเลือกใช้อากาศส่วนเกินที่ 120 % มาคำนวณขนาดท่อทางเข้าของอากาศในส่วนที่ 1, 2 และ 3 เพราะเป็นค่าที่ได้จากการทดลองจริง ซึ่งจากข้อมูลการทดลองของ VFBC ในระดับห้องปฏิบัติการ ที่อากาศส่วนเกิน 120 % มีอัตราการไหลเฉพาะของอากาศส่วนที่หนึ่ง (Primary air) อากาศส่วนที่สอง (secondary air) และอากาศส่วนที่สาม (Tertiary air) ดังนี้



รูปที่ 13. ความเร็วของอากาศและขนาดท่อจ่ายอากาศของVFBC ระดับห้องปฏิบัติการ (หน่วย: mm)

$$\begin{aligned} \text{อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศส่วนที่ 1} &= 1.2(\text{kg/m}^3) \times 18(\text{m/s}) \times (\pi/4)(0.0508)^2(\text{m}^2) \\ &= 4.378 \times 10^{-2} \text{ kg/s} = 157.6 \text{ kg}_{\text{air}}/\text{h} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศส่วนที่ 2} &= 1.2(\text{kg/m}^3) \times 1.75(\text{m/s}) \times (\pi/4)(0.10)^2(\text{m}^2) \\ &= 0.017 \text{ kg/s} = 59.38 \text{ kg}_{\text{air}}/\text{h} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศส่วนที่ 3} &= 1.2(\text{kg/m}^3) \times 25(\text{m/s}) \times (\pi/4)(0.0254)^2(\text{m}^2) \\ &= 0.01623 \text{ kg/s} = 58.4 \text{ kg}_{\text{air}}/\text{h} \end{aligned}$$

ที่อัตราการป้อนแกลบ 0.45 kg/min จะได้อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงในส่วนที่ 1,2 และ 3 ดังนี้

$$(A/F)_{\text{pri. air}} = 5.83 \text{ kg air /kg rice husk}$$

$$(A/F)_{\text{sec. air}} = 2.19 \text{ kg air /kg rice husk}$$

$$(A/F)_{\text{ter. air}} = 2.02 \text{ kg air /kg rice husk}$$

$$\text{รวม } (A/F)_{\text{act}} = (5.83+2.19+2.02) = 10.04 \text{ kg air /kg rice husk}$$

จากการคำนวณข้างต้นค่า(A/F) ของแกลบทางทฤษฎี เท่ากับ 4.55 kg air /kg rice husk

$$\text{ดังนั้น excess air} = 120 \%$$

2.5 การคำนวณค่า Swirl number ของ VFBC ระดับห้องปฏิบัติการของอากาศส่วนที่ 1 และ 3

เนื่องจากการ Scale-up จะใช้หลัก Geometrical Similarity แล้วจะต้องอาศัยหลัก Kinematic Similarity เพื่อที่ทำให้ความเร็วอากาศที่ให้ค่า Swirl number ที่เข้าเตาเผาไหม้ส่วนที่ 1 ที่จ่ายพร้อมกับแก๊สและส่วนที่ 3 มีค่าใกล้เคียงกันกับ VFBC ระดับห้องปฏิบัติการ จึงนำข้อมูลของอากาศส่วนต่างของ VFBC ระดับห้องปฏิบัติการ มาหาเป็น Swirl number ได้ดังนี้

จากสมการ

$$S = \sum_{i=1}^m f_i^2 \frac{\pi D_e D_o}{4 A_{t,i}}$$

เมื่อ

m	คือ	จำนวนท่อทางเข้าในแนวสัมผัส
$A_{t,i}$	คือ	พื้นที่หน้าตัดของท่อทางเข้าในแนวสัมผัส
f_i	คือ	สัดส่วนของปริมาณอากาศส่วนแรกต่อปริมาณอากาศทั้งหมด
D_e, D_o	คือ	เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อทางออกและของเตาเผาไหม้ตามลำดับ

จากข้อมูล VFBC ระดับห้องปฏิบัติการของอากาศส่วนที่ 1

m	=	1
A	=	$\frac{\pi}{4} \times d^2$ (d คือเส้นผ่านศูนย์กลางท่อจ่ายอากาศส่วนที่ 1 โดยมีขนาดเท่ากับ 0.0508 m.)
f_i	=	$\frac{5.83}{5.83 + 2.19 + 2.02} = 0.58$
D_e	=	0.2 m
D_o	=	0.4 m

ดังนั้น

$$S_1 = 0.58^2 \frac{\pi \times 0.2 \times 0.4}{4 \times (\pi/4) \times (0.0508)^2} = 10.452$$

จากข้อมูล VFBC ระดับห้องปฏิบัติการของอากาศส่วนที่ 3

m	=	1
A	=	$\frac{\pi}{4} \times d^2$ (d คือเส้นผ่านศูนย์กลางท่อจ่ายอากาศส่วนที่ 3 โดยมีขนาดเท่ากับ 0.0254 m.)
f_i	=	$\frac{2.02}{5.83 + 2.19 + 2.02} = 0.20$
D_e	=	0.2 m
D_o	=	0.4 m

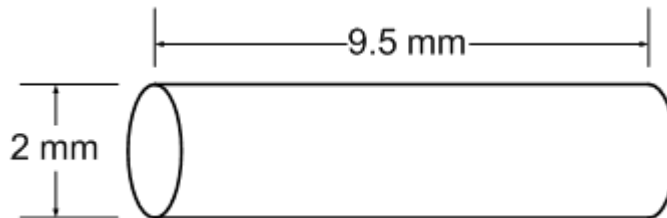
ดังนั้น

$$S_3 = 0.20^2 \frac{\pi \times 0.2 \times 0.4}{4 \times (\pi/4) \times (0.0254)^2} = 4.96$$

2.6. คำนวณความเร็วต่ำสุดที่เกิดฟลูอิดไลเซชัน (Minimum Fluidizing Velocity)

การออกแบบเตาเผาไหม้ต้องทราบความเร็วต่ำสุดที่เกิดฟลูอิดไลเซชันก่อนเพื่อใช้เป็นค่าอ้างอิงในการใช้งานจริง โดยมีสมมุติฐานในการคำนวณดังนี้

1. ข้าวเปลือกเมื่อถูกสีเป็นเกล็ดแล้วปริมาตรจะคงที่แต่มวลจะลดลงเหลือ 22.5%
2. ให้เกล็ดเป็นรูปทรงกระบอกมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 2 mm และยาว 9.5 mm



คำนวณเส้นผ่านศูนย์กลางวงกลมซึ่งมีปริมาตรเทียบเท่าเกล็ด (d_p)

จากการทดลองพบว่า

$$\text{ข้าวเปลือก 100 เมล็ด มีปริมาตร} = 2.63 \text{ ml} = 2.63 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$\text{มีน้ำหนัก} = 2.70 \text{ g}$$

$$\text{ปริมาตรต่อ 1 เมล็ด (V_p)} = 2.63 \times 10^{-8} \text{ m}^3$$

$$\text{ปริมาตรทรงกลม} = \frac{4}{3}\pi r^3 \quad \text{ดังนั้น} \quad r = \sqrt[3]{\frac{3V_p}{4\pi}}$$

แทนค่าปริมาตรข้าวเปลือกต่อ 1 เมล็ด (V_p) ลงในสมการเพื่อหาค่ารัศมีเทียบเท่าวงกลม

$$r = \sqrt[3]{\frac{2.63 \times 10^{-8}}{4\pi} \times 3} = 0.00184 \text{ m} = 0.184 \text{ cm}$$

ดังนั้นจากสมมุติฐานข้อที่ 1 เส้นผ่านศูนย์กลางวงกลมซึ่งมีปริมาตรเทียบเท่าเกล็ด

$$(d_p) = 2 \times 0.184 = 0.369 \text{ cm}$$

คำนวณความหนาแน่นจริงของเกล็ด

$$\text{ข้าวเปลือก 100 เมล็ด มีปริมาตร} = 2.63 \text{ ml} = 2.63 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$\text{มีน้ำหนัก} = 2.70 \text{ g}$$

จากสมมุติฐานในข้อที่ 1

$$\text{ดังนั้น เกล็ด 100 เมล็ด มีปริมาตร} = 2.63 \text{ ml} = 2.63 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$\text{มีน้ำหนัก} = 2.70 \times 0.225 = 0.607 \text{ g}$$

$$\text{ความหนาแน่นจริงของเกล็ด} = \frac{m}{V_p} = \frac{0.607 \times 10^{-3}}{2.63 \times 10^{-6}} = 230.798 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

คำนวณสัดส่วนช่องว่างขณะเบดนิ่งของเกล็ด

การคำนวณสัดส่วนช่องว่างมีวิธีการคำนวณดังนี้

1. นำข้าวเปลือกใส่ลงในหลอดแก้วทดลอง และบันทึกปริมาตรข้าวเปลือกในหลอดแก้ว
2. ใช้หลอดดูดน้ำดูดทุโลอิน แล้วฉีดทุโลอินลงในหลอดแก้วจนกระทั่งปริมาณของทุโลอินท่วม ข้าวเปลือก บันทึกปริมาตรทุโลอินที่ใช้ในหลอดแก้ว
3. บันทึกปริมาตรข้าวเปลือกหลังการผสมทุโลอิน หลังจากนั้นหาสัดส่วนช่องว่าง(ε_0)จาก

$$\varepsilon_0 = \frac{[(\text{ปริมาตรก่อนผสมทุโลอิน} + \text{ปริมาตรทุโลอินที่ใช้ผสม} - \text{ปริมาตรหลังเติมทุโลอิน}) / \text{ปริมาตรหลังเติมทุโลอิน}]$$

$$\text{ปริมาตรก่อนผสมปริมาตรทุโลอิน} = 12 \quad \text{ml}$$

$$\text{ปริมาตรทุโลอินที่ใช้ผสม} = 5 \quad \text{ml}$$

$$\text{ปริมาตรทั้งหมดหลังจากเติมทุโลอิน} = 12 \quad \text{ml}$$

ดังนั้น

$$\text{สัดส่วนช่องว่างขณะเบคคิงของเกลบ} (\varepsilon_0) = \frac{12 + 5 - 12}{12} = 0.417$$

คำนวณความกลมของอนุภาค

จากสมการที่ (2.18)

$$\phi_s = (\text{พื้นที่ผิววงกลม} / \text{พื้นที่ผิวของเกลบ}) \text{ที่ปริมาตรเท่ากัน}$$

สมมุติฐานข้อที่ 2 คำนวณพื้นที่ผิวของเกลบ ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} (A_p) &= \left[\left(\frac{\pi}{4} \times d^2 \right) \times 2 \right] + \pi dL \\ &= \left[\left(\frac{\pi}{4} \times 0.002^2 \right) \times 2 \right] + \pi \times 0.002 \times 0.0095 \\ &= 6.597 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$\text{พื้นที่ผิวทรงกลม} = \pi d^2$$

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลม(d) ซึ่งมีปริมาตรเท่ากับปริมาตรเกลบ (V_p)

คำนวณจากสมการ

$$d = \sqrt[3]{\frac{6V_p}{\pi}}$$

$$\text{พื้นที่ผิวทรงกลม} = \pi d^2 = \pi (1.41 V_p^{1/3})^2$$

$$\text{พื้นที่ผิวทรงกลม} = 4.87 V_p^{2/3}$$

ดังนั้น

$$\phi_s = \frac{4.87 V_p^{2/3}}{A_p}$$

ถ้าเม็ดของแข็งเป็นทรงกลม

$$\phi_s = 1$$

และถ้าเม็ดของแข็งมีรูปร่างต่าง ๆ ไป $\phi_s < 1$ เสมอ

$$\text{ดังนั้น} \quad \phi_s = \frac{4.87(2.63 \times 10^{-8})^{2/3}}{6.597 \times 10^{-5}} = 0.649$$

คำนวณสัดส่วนช่องว่างเมื่อเกิดฟลูอิดไคส์เบค

$$\text{จาก} \quad K_1 = \frac{1.75}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s} \quad \text{ใช้ค่า} \quad K_1 = 24.509$$

$$\varepsilon_{mf} = \sqrt[3]{\frac{1.75}{K_1 \phi_s}} = \sqrt[3]{\frac{1.75}{24.509 \times 0.649}} = 0.479$$

คำนวณความเร็วต่ำสุดที่เกิดฟลูอิดไคส์เบค

จากสมการ

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

โดยใช้สมบัติอากาศที่ 800°C ซึ่งมีค่าความหนืด (μ) และความหนาแน่น (ρ_g) ดังต่อไปนี้

$$\mu = 449 \times 10^{-7}, \text{ N.s/m}^2$$

$$\rho_g = 0.3166, \text{ kg/m}^3$$

แทนค่าในสมการ

$$\frac{1.75}{(0.479^3 \times 0.649)} \left(\frac{(3.69 \times 10^{-3}) U_{mf} (0.3166)}{449 \times 10^{-7}} \right)^2 + \frac{150(1 - 0.479)}{(0.479^3 \times 0.649^2)} = \frac{9.81(3.69 \times 10^{-3})^3 \times 0.3166(230.798 - 0.3166)}{(449 \times 10^{-7})^2}$$

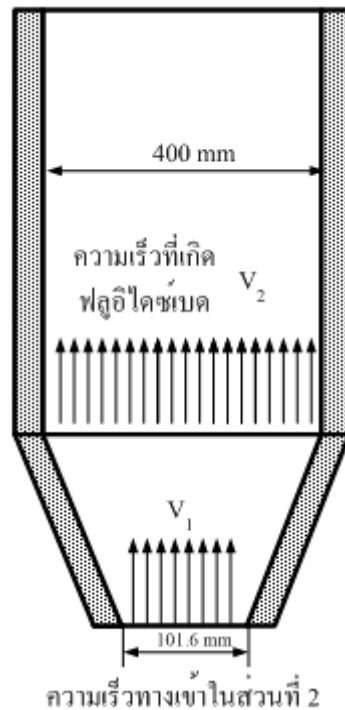
$$\left(\frac{(3.69 \times 10^{-3}) U_{mf} (0.3166)}{449 \times 10^{-7}} \right)^2 = \frac{9.81(3.69 \times 10^{-3})^3 \times 0.3166(230.798 - 0.3166)}{(449 \times 10^{-7})^2}$$

$$16594.289 U_{mf}^2 + 43881.459 U_{mf} - 17840.303 = 0$$

ได้ค่า ความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไคส์เบค $U_{mf} = 0.358 \text{ m/s}$

2.7. คำนวณ Re ของอนุภาคภายในเตาอาร์เทคฟลูอิดซ์เบด

ในการคำนวณจะใช้ความเร็วที่เกิดฟลูอิดซ์เบดบริเวณห้องเผาไหม้รูปทรงกระบอกซึ่งต่อจากกรวย (V_2) ซึ่งคำนวณความเร็วได้ดังนี้



ความเร็วส่วนที่ 2 ที่เข้าเตาเผาไหม้มีค่าเท่ากับ 1.75 m/s มีอัตราการไหลเชิงปริมาตรเท่ากับ $0.0137 \text{ m}^3/\text{s}$ เมื่อห้องเผาไหม้ขยายตัวเป็นรูปทรงกระบอก ความเร็วที่เกิดฟลูอิดซ์เบดมีค่าเท่ากับ

จาก

$$Q = AV$$

$$V_2 = \frac{Q}{A} = \frac{0.0137 \times 4}{\pi \times (0.4)^2} = 0.11 \text{ m/s}$$

เนื่องจากความเร็วที่เกิดฟลูอิดซ์เบดที่เกิดขึ้นภายในเตามีค่าน้อยกว่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดซ์ที่ได้จากการคำนวณเพราะอาจจะเกิดความผิดพลาดของการคำนวณตัวแปรต่างๆ เช่น ค่าความกลมของอนุภาค สัดส่วนช่องว่างขณะเกิดฟลูอิดซ์เบด เป็นต้น ดังนั้นในการคำนวณ Re จึงเลือกใช้ความเร็วที่ได้จากการทดลองซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.11 m/s มาคำนวณ

จากสมการ
$$Re = \frac{\rho v d}{\mu}$$

d = เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค โดยจะใช้เส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าของเกลบ (d_p) ในการคำนวณมีค่าเท่ากับ 0.00369 m

v = ความเร็วที่เกิดฟลูอิดซ์เบด บริเวณห้องเผาไหม้รูปทรงกระบอกมีค่าเท่ากับ 0.11 m/s

ใช้สมบัติอากาศที่ 800°C ซึ่งมีค่าความหนืด (μ) และความหนาแน่น (ρ_g) ดังต่อไปนี้

$$\mu = 449 \times 10^{-7}, \text{ N.s/m}^2$$

$$\rho_g = 0.3166, \text{ kg/m}^3$$

ได้ Re ของอนุภาคภายในเตาเผาไหม้ดังนี้

$$Re = \frac{0.316 \times 0.11 \times 0.00369}{449 \times 10^{-7}} = 2.856$$

2.8. การหาขนาดมิติต่างๆของเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดไชน์เบดระดับอุตสาหกรรม

กำหนดพิกัดของเตาเผาไหม้เท่ากับ 9.0 MW_{th} และมีค่าพิกัดความร้อนเท่ากับ $0.85 \text{ MW}_{th}/\text{m}^3$

2.8.1. คำนวณปริมาตรเตาเผาไหม้

$$\begin{aligned} \text{ปริมาตรเตาเผาไหม้} &= \frac{\text{ความสามารถในการผลิตความร้อน } \text{MW}_{th}}{\text{พิกัดความร้อน } \text{MW}/\text{m}^3} \\ &= \frac{9.0 \text{ MW}_{th}}{0.85 \text{ MW}_{th}/\text{m}^3} = 10.59 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

2.8.2. คำนวณอัตราการป้อนเชื้อเพลิงแกลบ

จากอัตราป้อนเชื้อเพลิงจำเพาะเท่ากับ $240 \text{ kg}/\text{h}\cdot\text{m}^3$

$$\text{ดังนั้นอัตราการป้อนเชื้อเพลิงแกลบ} = 240 \left(\frac{\text{kg}}{\text{h}\cdot\text{m}^3} \right) \times 10.59 \text{ m}^3 = 2,541 \text{ kg/h}$$

2.8.3. คำนวณปริมาตรเบด, V_{bed}

งานวิจัยของ C.W.Bockhop พบว่า เมื่อเผาไหม้เชื้อเพลิงแกลบไปแล้ว 10 นาที เชื้อเพลิงแกลบจะมีมวลลดลงเหลือ 60% จากเดิม 100 % ดังนั้นสามารถคำนวณหาปริมาตรเบดได้ดังนี้

$$\text{Husk: char} = 1: 0.6$$

$$\text{Burning time} = 10 \text{ min}$$

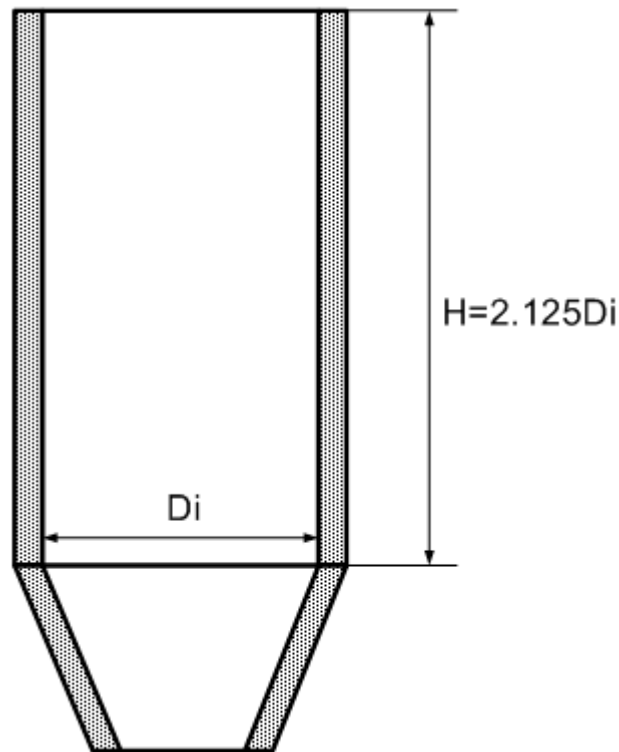
$$\text{Bulk density} = 105 \text{ kg}/\text{min}$$

$$V_{bed} = 2,541 \frac{\text{kg}_f}{\text{hr}} \times 1 \frac{\text{hr}}{60 \text{ min}} \times 0.6 \frac{\text{kg}_{char}}{\text{kg}_f} \times 10 \text{ min} \times \frac{1 \text{ m}^3}{105 \text{ kg}_f} = 2.42 \text{ m}^3$$

ในการออกแบบจะแบ่งเตาเผาไหม้เป็นสองส่วนคือ ส่วนบนของเตาเผาไหม้จะเป็นทรงกระบอกและส่วนล่างจะเป็นรูปกรวยตัดปลาย สาเหตุที่แบ่งส่วนล่างเตาเผาส่วนล่างเป็นรูปกรวยเพราะแกลบเป็นวัสดุที่เบาเกิดฟลูอิดไชน์เบดยากจึงต้องลดขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางด้านล่างลงเพื่อทำให้เกิดฟลูอิดไชน์เบดง่ายและการกระจายของเถ้าทั่วถึงมากกว่าที่เป็นทรงกระบอกทั้งหมด ดังนั้นจึงออกแบบให้ปริมาตรเบดทั้งหมดอยู่ในส่วนของกรวยตัด

2.8.4. คำนวณหาเส้นผ่านศูนย์กลางเตาเผาไหม้ทรงกระบอกด้านบน

จากการคำนวณข้างต้นปริมาตรเตาทั้งหมดเท่ากับ 10.59 m^3 และปริมาตรเบดมีค่าเท่ากับ 2.42 m^3
ดังนั้น ปริมาตรทรงกระบอกของเตา $= 10.59 \text{ m}^3 - 2.42 \text{ m}^3 = 8.17 \text{ m}^3$
กำหนดสัดส่วนความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 2.125 (ข้อมูลจาก VFBC ระดับห้องปฏิบัติการ)



ดังนั้นเส้นผ่านศูนย์กลางเตาเผาไหม้หาได้จาก

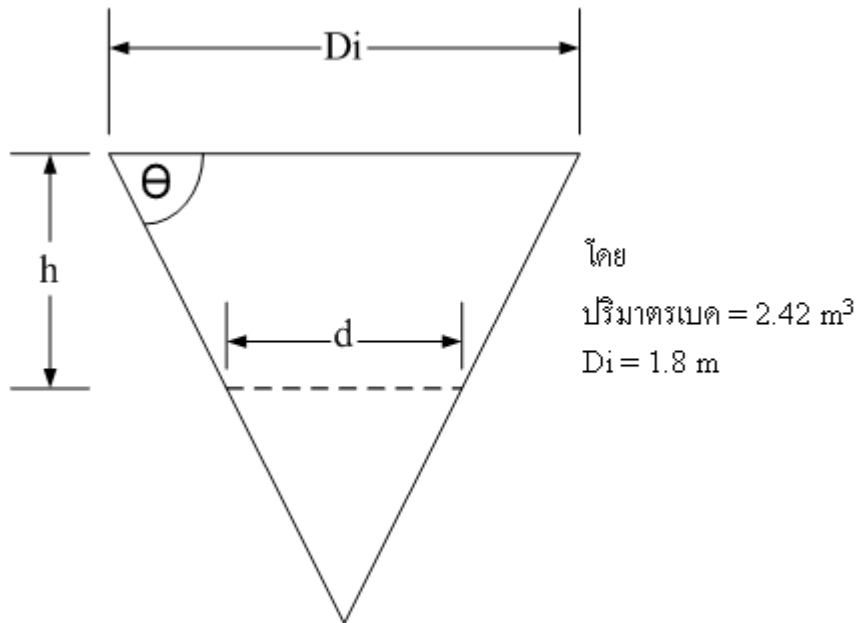
$$\text{ปริมาตรเตารูปทรงกระบอก}(V) = \frac{\pi d^2 H}{4} = \frac{\pi d^2 (2.125d)}{4}$$

$$\text{เส้นผ่านศูนย์กลางเตาเผาไหม้}(D_i) = \sqrt[3]{\frac{4V}{2.125\pi}} = \sqrt[3]{\frac{4 \times 8.17}{2.125 \times \pi}} = 1.7 \text{ m}$$

แต่เนื่องจากขนาดของอิฐทนไฟเมื่อวางเรียงเป็นวงกลมแล้วที่ไม่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1.7 m แต่จะมีขนาดใหญ่
เคียงคือ 1.8 m ดังนั้นเลือกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเตาเท่ากับ 1.8 m

2.8.5. คำนวณหาปริมาตรกรวยตัด

$$\text{ปริมาตรกรวยตัด} = \pi \left[\frac{h^3}{3(\tan \theta)^2} - \frac{D_i h^2}{2 \tan \theta} + \frac{D_i^2 h}{4} \right]$$



ในการคำนวณจะประมาณมุม θ โดยคิดจะเป็นปริมาตรกรวยเต็มที่มีมุม θ ต่างๆ

$$\text{ซึ่งปริมาตรกรวยเต็ม} = \frac{1}{3} \pi r^2 h = \frac{1}{3} \pi r^2 \tan \theta$$

โดยที่ รัศมีเท่ากับ 0.25 เมตรจะได้ปริมาตรกรวยเต็มที่มีมุม θ ต่างๆ ดังนี้

มุม θ	60°	65°	70°	75°
ปริมาตรกรวยเต็ม(m^3)	1.32	1.64	2.097	2.84

มุมกรวยที่ $60^\circ, 65^\circ$ และ 70° ไม่สามารถรับปริมาตรเบคได้ทั้งหมด จึงประมาณมุมที่มากกว่า 70° ดังนั้นประมาณมุมกรวยที่ 75°

$$2.42 \text{ m}^3 = \pi \left[\frac{h^3}{3(\tan 75^\circ)^2} - \frac{1.8h^2}{2 \tan 75^\circ} + \frac{1.8^2 h}{4} \right]$$

$$\text{จะได้ค่า ความสูงของกรวยตัด}(h) = 1.570 \text{ m}$$

$$\text{เส้นผ่านศูนย์กลางกรวยตัด}(d) = Di - \frac{2h}{\tan \theta} = 1.8 - \frac{2 \times 1.570}{\tan 75^\circ} = 0.96 \text{ m}$$

2.8.6. ตรวจสอบอากาศส่วนที่ 2

(A/F) ส่วนที่ 2 = $2.19 \text{ kg}_{\text{air}} / \text{kg}_{\text{rice husk}}$ (จากการคำนวณข้างต้นของ VFBC ระดับห้องปฏิบัติการ)

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศส่วนที่สอง} &= 2.19 \left(\frac{\text{kg air}}{\text{kg rice husk}} \right) \times 2,541 \left(\frac{\text{kg fuel}}{\text{h}} \right) \\ &= 5,564.79 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{และ อัตราการไหลเชิงปริมาตร} &= 5,564.79 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \times \frac{1}{1.2} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right) \times \frac{1\text{h}}{3600\text{s}} \\
&= 1.288 \text{ m}^3/\text{s} \\
\text{ดังนั้นความเร็วของอากาศทางเข้าส่วนที่สอง} &= \frac{1.288 \text{ m}^3/\text{s}}{(\pi/4)(0.97)^2 \text{ m}^2} = 1.74 \text{ m/s}
\end{aligned}$$

ในการตรวจสอบเส้นผ่านศูนย์กลางเตาเผาไหม้จะอาศัยหลัก Kinematic Similarity โดยพิจารณาว่า Re อนุภาคภายในเตาเผาไหม้ เนื่องจากพารามิเตอร์ที่เกี่ยวกับ Re คือ ความหนืด ความหนาแน่น เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคและความเร็ว แต่ ความหนืด ความหนาแน่น เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของ VFBC ระดับห้องปฏิบัติการและ VFBC ขนาด 9 MW_{th} มีค่าเท่ากันเนื่องจากเชื้อเพลิงและ (A/F)ratio เหมือนกันจึงน่าจะให้อุณหภูมิการเผาไหม้และประสิทธิภาพการเผาไหม้ใกล้เคียงกัน จึงเหลือพารามิเตอร์ที่พิจารณาคือความเร็ว โดยการทดลองระดับห้องปฏิบัติการ ใช้ความเร็วเมื่อเกิดฟลูอิด์เบคของอากาศส่วนที่ 2 เท่ากับ 0.113 m/s เพราะความเร็วในช่วงนี้จะทำให้การเกิดฟลูอิด์เบคของอนุภาคภายในเตาเผาไหม้กระจายเต็มพื้นที่หน้าตัดเตา และเมื่อเกิดการเผาไหม้อุณหภูมิจะกระจายเท่ากันทั่วทั้งหน้าตัดเตา จากการคำนวณความเร็วทางเข้าของอากาศส่วนที่สองของ VFBC ขนาด 9 MW_{th} มีค่าเท่ากับ 1.74 m/s อัตราการไหลเชิงปริมาตรเท่ากับ 1.228 m³/s เมื่อคำนวณความเร็วที่เกิดฟลูอิด์เบคบริเวณห้องเผาไหม้รูปทรงกระบอก(V₂)มีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned}
Q &= AV_2 \\
V_2 &= \frac{Q}{A} = \frac{1.288 \times 4}{\pi \times (1.8^2)} = 0.51 \text{ m/s}
\end{aligned}$$

ความเร็วที่เกิดฟลูอิด์เบคของเตาเผาไหม้วอร์เทคฟลูอิด์เบคขนาด 9 MW_{th} มีค่า 0.51 m/s ซึ่งสูงกว่าความเร็วการเกิดฟลูอิด์เบคของเตาเผาไหม้วอร์เทคฟลูอิด์เบคในห้องปฏิบัติการ (0.11 m/s) ดังนั้นในการทดสอบเตาเผาไหม้วอร์เทคฟลูอิด์เบคขนาด 9 MW_{th} จึงต้องลดความเร็วส่วนนี้ให้ได้ความเร็วเท่ากับ เตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิด์เบคในห้องปฏิบัติการ เมื่อลดความเร็วจะมีอัตราการไหลเชิงมวลเท่ากับ

อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศส่วนที่ 2 ของเตาเผาไหม้วอร์เทคฟลูอิด์เบคขนาด 9 MW_{th}

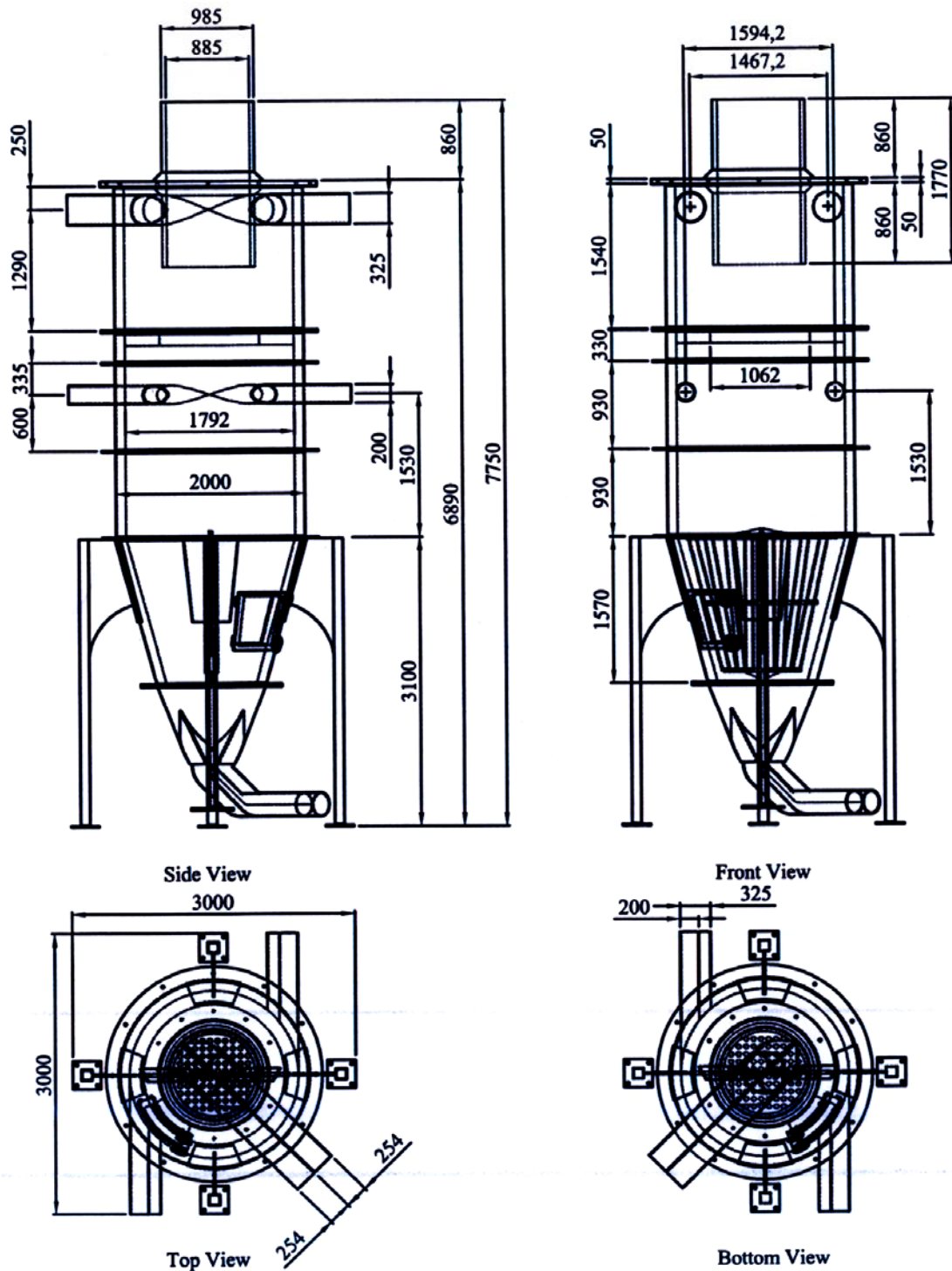
$$\begin{aligned}
&= 1.2(\text{kg}/\text{m}^3) \times 0.11(\text{m}/\text{s}) \times (\pi/4)(1.80)^2 (\text{m}^2) \\
&= 0.345 \text{ kg/s} = 1242 \text{ kg}_{\text{air}}/\text{h}
\end{aligned}$$

เมื่อคำนวณเป็นปริมาณอากาศต่อเชื้อเพลิงที่อัตราการป้อนเท่ากับ 2,541 kg/hr ได้กับเท่ากับ

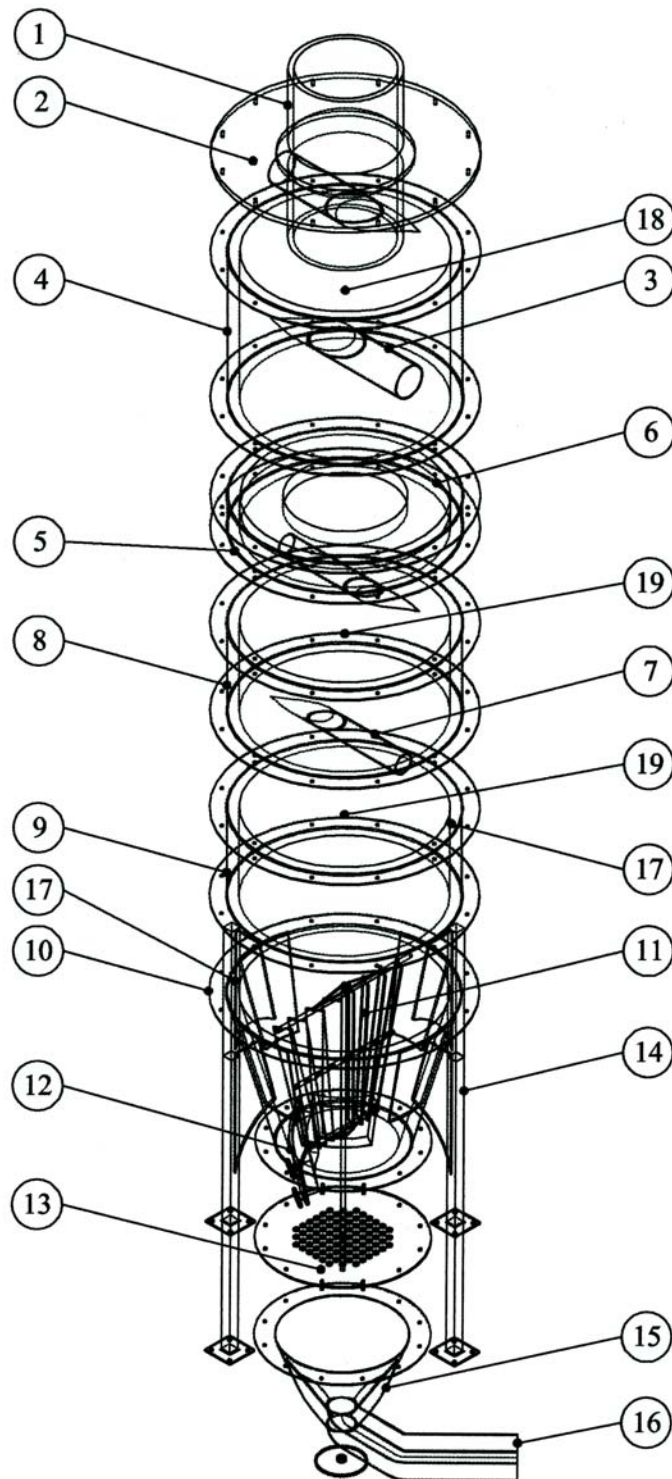
$$(A/F)_{\text{sec}} = \frac{1,242}{2,541} = 0.48 \text{ kg air /kg rice husk}$$

(A/F)_{sec} ส่วนที่ 2 มีค่าน้อยกว่าที่คำนวณไว้ข้างต้นอยู่เท่ากับ 2.19-0.48 = 1.70 kg air /kg rice husk ซึ่งในการทดสอบจริงจะนำส่วนที่เหลือไปใช้ในส่วนที่ 1 และ ส่วนที่ 3 ต่อไปเพื่อคงค่าอากาศส่วนเกินให้ได้ 146% เท่าเดิม อากาศส่วนที่ 2 และ 3 ที่จ่ายเข้าเตาเผาไหม้สามารถปรับเปลี่ยนเพื่อแบ่งจ่ายไปยังส่วนอื่นๆได้ เพราะจากการทดลองใน

ห้องปฏิบัติการพบว่าปริมาณอากาศส่วนที่ 2 และ 3 จะไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้ตรงเท่ากับปริมาณอากาศส่วนเกินมีค่าเหมาะสม ส่วนเตาเผาไหม้รูปทรงกระบอกจะเทียบสัดส่วนตาม VFBC ในระดับห้องปฏิบัติการ โดยเมื่อเทียบสัดส่วนแล้วจะมีขนาดเตาเผาไหม้แสดงไว้ในรูปที่ 14 โดยรายละเอียดส่วนประกอบต่างๆของเตาแสดงในรูปที่ 15 และ 16

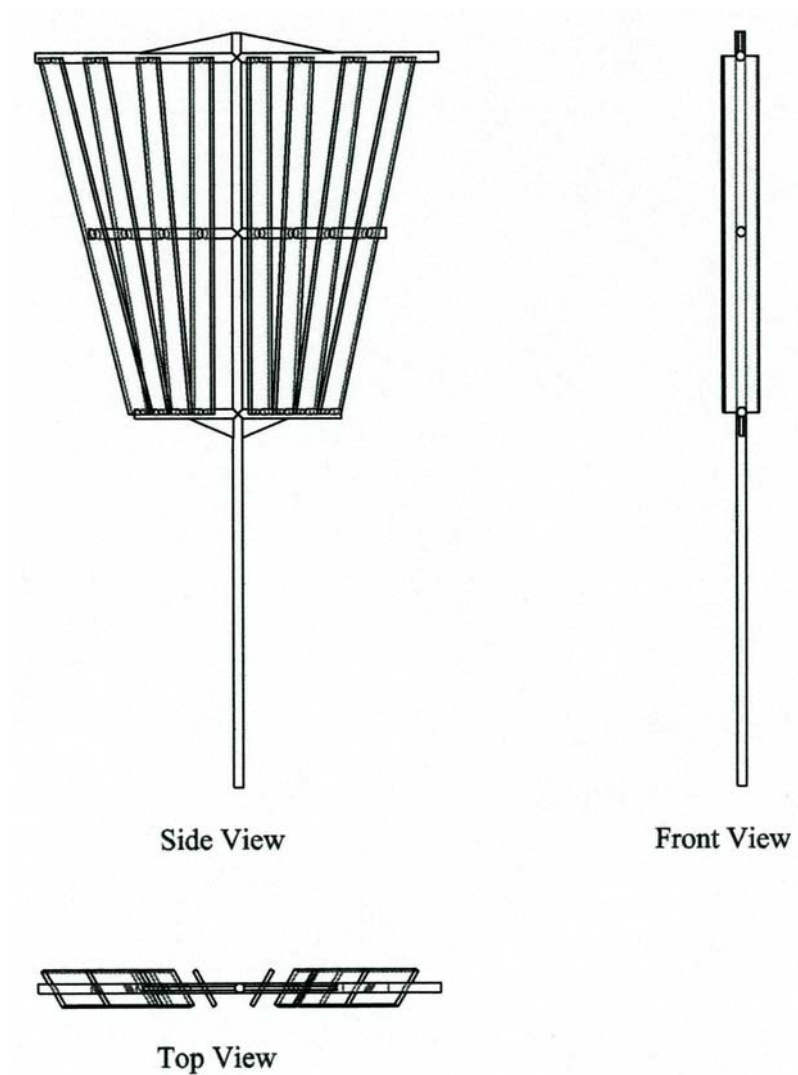


รูปที่ 14. แสดงขนาดเตาเผาไหม้ชีวมวลวอร์เทค-ฟลูอิดซ์เบด ขนาด 9 MW_{th} (หน่วย: mm)



1. ท่อทางออกก๊าซเผาไหม้
2. ฝาปิดหัวเตา
3. ท่อจ่ายอากาศส่วนที่ 1
4. หัวเตา
5. ตัวเตาส่วนวงแหวนวอร์เทค
6. วงแหวนวอร์เทค
7. ท่อจ่ายอากาศส่วนที่ 3
8. ตัวเตาส่วนห้องเผาไหม้ฟลูอิดไคซ์เบค
ท่อนที่ 1
9. ตัวเตาส่วนห้องเผาไหม้ฟลูอิดไคซ์เบค
ท่อนที่ 2
10. ส่วนล่างของเตา
11. ใบกวน
12. ประตูลูก
13. ตะแกรงกระจายลม
14. ขาดัง
15. ห้องจ่ายอากาศส่วนที่ 2
16. ท่อจ่ายอากาศส่วนที่ 2
17. อิฐทนไฟฉาบด้วยซีเมนต์ทนไฟ
18. ห้องเผาไหม้แบบวอร์เทค
(ห้องเผาไหม้ส่วนที่ 1)
19. ห้องเผาไหม้แบบฟลูอิดไคซ์เบค
(ห้องเผาไหม้ส่วนที่ 2)

รูปที่ 15. ส่วนประกอบของเตาวอร์เทค-ฟลูอิดไคซ์เบคแบบแยกชิ้น



รูปที่ 16. ไบกวน

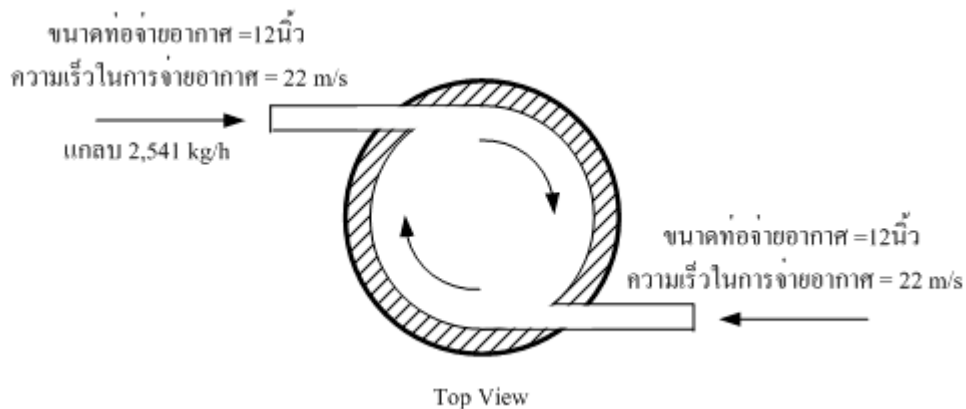
2.8.7. การหาปริมาณอากาศส่วนที่ 1 และการออกแบบท่ออากาศส่วนที่ 1

ในการคำนวณหาปริมาณอากาศส่วนที่ 1 จะใช้สัดส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงของอากาศส่วนที่ 1 ใน VFBC ในระดับห้องปฏิบัติการมาคำนวณเพื่อที่จะทำให้ค่า Swirl number ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันโดย

$$\begin{aligned}
 (A/F)_{\text{pri. air}} &= 5.83 \quad \text{kg air /kg rice husk} \\
 \text{ดังนั้น อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศส่วนที่หนึ่ง} &= 5.83 \left(\frac{\text{kg air}}{\text{kg rice husk}} \right) \times 2,541 \left(\frac{\text{kg fuel}}{\text{h}} \right) \\
 &= 14,814 \quad \frac{\text{kg}}{\text{h}} \\
 \text{และ อัตราการไหลเชิงปริมาตร} &= 14,814 \quad \frac{\text{kg}}{\text{h}} \times \frac{1}{1.2} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right) \times \frac{1\text{h}}{3600\text{s}} \\
 &= 3.44 \text{ m}^3/\text{s}
 \end{aligned}$$

ในการออกแบบท่ออากาศส่วนที่ 1 จะแบ่งการจ่ายอากาศออกเป็นสองท่อเท่าๆกัน ซึ่งแสดงไว้ดังรูปที่ 17 โดยแต่ละท่อจะมีอัตราการไหลเชิงปริมาตรเท่ากับ $1.72 \text{ m}^3/\text{s}$ โดยความเร็วที่ใช้ในการจ่ายอากาศจะเท่ากับ 22 m/s การป้อนแกลบเข้าเตาเผาไหม้จะใช้ท่อเพียงท่อเดียวในการลำเลียงแกลบส่วนอีกท่อหนึ่งจะมีไว้เพื่อรักษามันอากาศที่เกิดขึ้นให้มีค่าใกล้เคียงกับ VFBC ในระดับห้องปฏิบัติการ โดยขนาดของท่อที่ใช้สามารถคำนวณได้จาก

$$D_{\text{pri}} = \sqrt{\frac{4}{\pi} \times \frac{1.72 \text{ (m}^3/\text{s)}}{22 \text{ (m/s)}}} = 0.316 \text{ m} \approx 12''$$



รูปที่ 17. แสดงการจ่ายอากาศส่วนที่ 1 เข้าเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์เบด

เมื่อนำข้อมูลที่ออกแบบของอากาศส่วนที่ 1 มาคิดเป็น Swirl number ได้ดังนี้

จากสมการ
$$S = \sum_{i=1}^m f_i^2 \frac{\pi D_e D_o}{4 A_{t,i}}$$

$m = 2$

$A = \frac{\pi}{4} \times d^2$ (d คือเส้นผ่านศูนย์กลางท่อจ่ายอากาศส่วนที่ 1 โดยเท่ากับ 0.305 m .)

$f_i = \frac{5.83}{5.83 + 2.19 + 2.02} = 0.58$

$D_e = 0.9 \text{ m}$

$D_o = 1.8 \text{ m}$

แทนค่าในสมการ

$$S_1 = \left(0.58^2 \frac{\pi \times 0.9 \times 1.8}{4 \times (\pi/4) \times (0.305)^2} \right) + \left(0.58^2 \frac{\pi \times 0.9 \times 1.8}{4 \times (\pi/4) \times (0.305)^2} \right) = 11.75$$

เมื่อนำค่า Swirl number ของ VFBC ระดับห้องปฏิบัติการมาเปรียบเทียบกับค่าใกล้เคียงคือ Swirl number ของ VFBC ระดับห้องปฏิบัติการมีค่าเท่ากับ 10.45 และ Swirl number ของ VFBC ขนาด 9 MW มีค่าเท่ากับ 11.75 ดังนั้นเลือกขนาดท่อจ่ายอากาศส่วนที่ 1 เท่ากับ 12 นิ้ว และความเร็วในการจ่ายอากาศส่วนที่ 1 เท่ากับ 22 m/s

2.8.8. การหาปริมาณอากาศส่วนที่ 3 และการออกแบบท่ออากาศส่วนที่ 3

ในการคำนวณหาปริมาณอากาศส่วนที่ 3 จะใช้สัดส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงของอากาศส่วนที่ 3 ใน VFBC ในระดับห้องปฏิบัติการมาคำนวณ

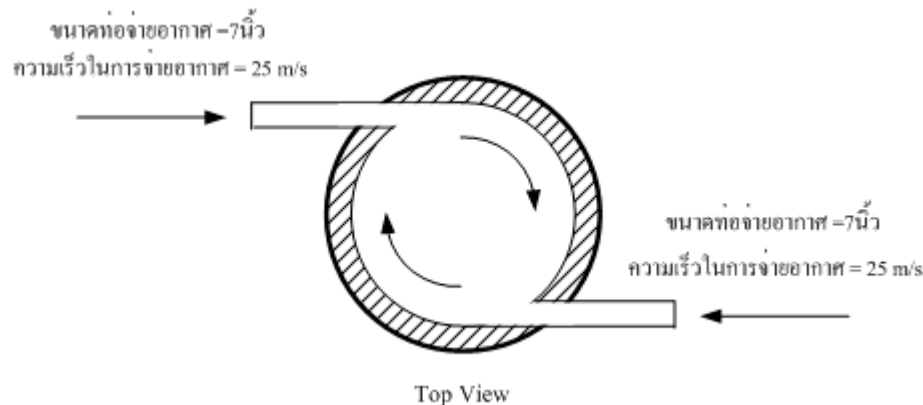
โดย $(A/F)_{\text{ter, air}} = 2.02 \text{ kg air / kg rice husk}$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศส่วนที่สาม} &= 2.02 \left(\frac{\text{kg air}}{\text{kg rice husk}} \right) \times 2,541 \left(\frac{\text{kg fuel}}{\text{h}} \right) \\ &= 5,132 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{และ อัตราการไหลเชิงปริมาตร} &= 5,132 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \times \frac{1}{1.2} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right) \times \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \\ &= 1.19 \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

ในการออกแบบท่ออากาศส่วนที่ 3 จะแบ่งการจ่ายอากาศออกเป็นสองท่อเท่าๆกัน ซึ่งแสดงไว้ดังรูปที่ 18 โดยแต่ละท่อจะมีอัตราการไหลเชิงปริมาตรเท่ากับ $0.595 \text{ m}^3/\text{s}$ ความเร็วที่ใช้ในการจ่ายอากาศจะเท่ากับ 25 m/s โดยขนาดของท่อที่ใช้สามารถคำนวณได้จาก

$$D_{\text{ter}} = \sqrt{\frac{4}{\pi} \times \frac{0.595 \text{ (m}^3/\text{s)}}{25 \text{ (m/s)}}} = 0.174 \text{ m} \approx 7''$$



รูปที่ 18. แสดงการจ่ายอากาศส่วนที่ 3 เข้าเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดไคซ์เบด

เมื่อนำข้อมูลที่ออกแบบของอากาศส่วนที่ 1 มาคิดเป็น Swirl number ได้ดังนี้
จากสมการ

$$S = \sum_{i=1}^m f_i^2 \frac{\pi D_c D_o}{4 A_{t,i}}$$

$$m = 2$$

$$A = \frac{\pi}{4} \times d^2 \text{ (d คือเส้นผ่านศูนย์กลางท่อจ่ายอากาศส่วนที่ 3 โดยมีขนาดเท่ากับ 0.1778 m.)}$$

$$f_i = \frac{2.02}{5.83 + 2.19 + 2.02} = 0.201$$

$$De = 0.9 \quad m$$

$$Do = 1.8 \quad m$$

แทนค่าในสมการ

$$S_3 = \left(0.201^2 \frac{\pi \times 0.9 \times 1.8}{4 \times (\pi/4) \times (0.178)^2} \right) + \left(0.201^2 \frac{\pi \times 0.9 \times 1.8}{4 \times (\pi/4) \times (0.178)^2} \right) = 4.131$$

เมื่อนำค่า Swirl number ของ VFBC ระดับห้องปฏิบัติการมาเปรียบเทียบกับมีค่าใกล้เคียงกันคือ Swirl number ของ VFBC ระดับห้องปฏิบัติการมีค่าเท่ากับ 4.96 และ Swirl number ของ VFBC ขนาด 9 MW มีค่าเท่ากับ 4.131 ดังนั้นเลือกขนาดท่อจ่ายอากาศส่วนที่ 3 เท่ากับ 7 นิ้ว และความเร็วในการจ่ายอากาศส่วนที่ 3 เท่ากับ 25 m/s

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย คุณวิบูรณ์ เทเพนท์ สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรมกลุ่มงานวิจัยวิศวกรรมหลังการเก็บเกี่ยวที่กรุณาให้คำแนะนำต่องานวิจัยนี้ และนักศึกษาภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานครที่ช่วยเหลือในส่วนการทดลองของ VFBC ระดับห้องปฏิบัติการโดยมีรายชื่อดังต่อไปนี้ นายอำนาจ มากกลาง นายสิงห์ชัย ทรัพย์อุดมมาก นายวสันต์ ศรีคำมูล นายธีระวัชร อ่อนดี นายไกรสร ล้อสุวรรณ นายสุรสิทธิ์ ภูเมือง นายอนุชา ใจกล้า นายสุรัตน์ จตุรสุขสกุล นายอดิเรก ใสส่อง นายวีระ ศรีอริยะกุล นายเสรี อรพัฒนานนท์ นายวรรณ โฉนแป้น นายคำนวน เพ็ญรักษา และ นายสิทธิโชค นพคุณขจร

เอกสารอ้างอิง

- [1] Gupta, A.k., Lilley, D.G and Syred, N. 1984. Swirl Flows. Abacus Press, Tunbridge Wells, England.
- [2] Singh, R., Maheshwari, R.C and Ojha, T.P. 1980. Development of a Husk Fired Furnace. J. agric Engng Res., 25 : 119-120.
- [3] Soponronnarit, S., Swasdisevi, T., Wetchacama S, Shujinda A and Srisawat B. 2000. Cyclone Rice Husk Furnace and Its Application on Paddy Drying, Int. Energy J., 1(2) : 67-75.
- [4] Tumambig, J.A., 1984, Testing and Evaluation of Rice Hull-Fed Furnace for Grain Drying, National Post Harvest Institute for Research and Extension., : 197-214.
- [5] Armesto, L., Bahillo, A., Veijonen, k., Cabanillas, A. and Otero, J. 2002. Combustion Behavior of Rice Husk in a Bubbling Fluidized Bed, B Bioenergy., 23(3) : 171-179.

- [6] Natarajan, E., Nordin A and Rao A.N. 1998. Overview of Combustion and Gasification of Rice Husk in Fluidized Bed Reactor, *B Bioenergy*, 14(5/6) : 533-546.
- [7] Werther, J., Saenger, M., Hartge E.U., Ogada, T. and Siagi, Z. 2000. Combustion of Agricultural residues, *Prog. Energy Combust. Sci*, 26(1) : 1-27.
- [8] Rao, T.R., and Bheemarasetti, J.V. Ram. 2000. Minimum Fluidization Velocities of Mixtures of Biomass and Sands, *Energy*, 26(6) : 633-644.
- [9] Nigh, S., Yang, G., Zhu A.Q. and Zhao, C.S. 1992. Measurements of Gas-Particle Flows and Elutriation of an 18 i.d. Cold Vortexing Fluidized-Bed Combustor Model, *Powder Technol.*, 69 : 139-146.
- [10] Yang, G., and Nieh S. 1987. Particle Flow Pattern in the Freeboard of a Vortexing Fluidized Bed, *Powder Technol.*, 50 : 121-131.
- [11] Yang, G. and Nieh, S. 1989. On the Suspension Layers in the Freeboard of Vortexing Fluidized Beds, *Powder Technol.*, 57 : 171-179.
- [12] Shang et al, Patent Number: 4,867,079. Combustor with Multistage Internal Vortices.
- [13] Nieh, S., and Zhang, J. 2000. Swirling, Reacting, Turbulent Gas-Particle Flow in a Vortex Combustor, *Powder Technol.*, 122 : 70-78.
- [14] Madhiyanon, T., Piriyanunroj, N., Nathakarannakule, A. and Soponronnarit, S. 2003(a). A Study on Air-Rice Husk Flow Behavior Cold Model, In Proc 4th the Technical Conference of the Thai Society of Agricultural Engineering., Kasetsart University, Bangkok, Thailand, Much. 13-14, 2003 : 332-343.
- [15] Madhiyanon, T., Piriyanunroj, N., Nathakarannakule, A. and Soponronnarit, 2003(b). The Vortexing-Fluidized bed Combustor Cold Model : Experiment Study of Air-Rice Husk Flow Behavior, *K & D Journal of EIT.*, 14(4) : 59-67.
- [16] Patent Number: 4,867,079. Combustor with Multistage Internal Vortices.
- [17] Patent Number: 4,881,476. Cyclone Reactor with Internal Separation and Axial Recirculation.
- [18] Becker et al, Patent Number: 4,881,476. Cyclone Reactor with Internal Separation and Axial Recirculation.

ภาคผนวก 1 ตัวอย่างการคำนวณหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์เบดโดยใช้เชื้อเพลิงแกลบในระดับปฏิบัติการ กรณีใช้อากาศส่วนเกินในการเผาไหม้ 182%

$$\eta_{th} = \left[\frac{(\dot{m}_a)(C_{p_g} T_g - C_{p_{amb}} T_{amb})}{\dot{m}_f HHV} \right] \times 100$$

จากการวิเคราะห์เชื้อเพลิงแกลบจากกรมวิทยาศาสตร์บริการพบว่าในเชื้อเพลิงแกลบเมื่อนำมาเผาไหม้แล้วจะได้เถ้าเท่ากับ 14 %

เมื่อ

$\dot{m}_a$ = อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 0.0863 kg/s

$\dot{m}_f$ = อัตราการป้อนเชื้อเพลิงเท่ากับ 0.0075 kg/s

C_{p_g} = ค่าความจุความร้อนของแก๊สเผาไหม้ 1.19 kJ/Kg °K
(ที่อุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ (T_g) เท่ากับ 850 °C)

$C_{p_{abm}}$ = ค่าความจุความร้อนของอากาศที่ป้อน 1.005 kJ/Kg °K
(ที่อุณหภูมิอากาศภายนอก (T_{amb}) เท่ากับ 29 °C)

HHV = ค่าความร้อนของแกลบเท่ากับ 14500 kJ/Kg

$$\eta_{th} = \left[\frac{(0.0863(1.19 \times (850 + 273)) - (1.005)(29 + 273))}{0.0075 \times 14500} \right]$$

$$\eta_{th} = 82 \%$$

ภาคผนวก 2 บทความสำหรับการเผยแพร่

1. ฐานิตย์ เมธิยานนท์, นิวัติ พิริยะรุ่งโรจน์, อติศักดิ์ นาถกรณกุล และ สมชาติ โสภณธนฤทธิ์, 2546, การศึกษาพฤติกรรมการไหลของอากาศ-เกลบนภายในเตาเผาไหม้จำลองที่มีลักษณะการไหลแบบไซโคลนร่วมกับการไหลแบบฟลูอิดไคซ์เบด, การประชุมวิชาการประจำปี 2546 สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยวิศวกรรมเกษตรและเทคโนโลยีที่เหมาะสมเพื่อสิ่งแวดล้อม, 13 – 14 มีนาคม 2546 ณ ศูนย์โสม มหวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน, หน้า 332 - 343

2. ฐานิตย์ เมธิยานนท์, นิวัติ พิริยะรุ่งโรจน์, อติศักดิ์ นาถกรณกุล และ สมชาติ โสภณธนฤทธิ์, 2546, การพัฒนาเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดไคซ์เบดสำหรับเชื้อเพลิงเกลบ, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 17, 15 – 17 ตุลาคม 2546, หน้า 662 - 670

3. ฐานิตย์ เมธิยานนท์, นิวัติ พิริยะรุ่งโรจน์, อติศักดิ์ นาถกรณกุล และ สมชาติ โสภณธนฤทธิ์, 2546,เตาเผาไหม้จำลองวอร์เทค-ฟลูอิดไคซ์เบด : การศึกษาเชิงการทดลองพฤติกรรมการไหลของอากาศและเกลบ, วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนาปีที่ 14 ฉบับที่ 14 , หน้า 59 – 67

4. ฐานิตย์ เมธิยานนท์, นิวัติ พิริยะรุ่งโรจน์ และ สมชาติ โสภณธนฤทธิ์, 2547, เตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดไคซ์เบดแบบสองห้องเผาไหม้สำหรับเชื้อเพลิงเกลบ, SONGKLANAKARIN JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY, Vol.26 NO.6, ประจำเดือน พฤศจิกายน – ธันวาคม 2547

5. ฐานิตย์ เมธิยานนท์, นิวัติ พิริยะรุ่งโรจน์, พีระวัตร ทองนอก และ สมชาติ โสภณธนฤทธิ์, 2547, เตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดไคซ์เบด : Part I ผลกระทบของอากาศส่วนที่หนึ่งต่อสมรรถนะเตา, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 18, 18 – 20 ตุลาคม 2547, หน้า 166

6. ฐานิตย์ เมธิยานนท์, นิวัติ พิริยะรุ่งโรจน์, พีระวัตร ทองนอก และ สมชาติ โสภณธนฤทธิ์, 2547, เตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดไคซ์เบด : Part II ผลกระทบของอากาศส่วนที่สองต่อสมรรถนะเตา, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 18, 18 – 20 ตุลาคม 2547, หน้า 167