

ผลกระทบของอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่มีต่อพฤติกรรมการเผาไหม้และแก๊สไอเสีย
ของการเผาไหม้แกลบและกะลาปาล์มในเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์เบด

Effects of Air-Fuel Ratios on Combustion Behavior and Emissions of Rice Husk and
Palm Shell combustion within a Vortex-Fluidized Bed Combustor

ประสาน สถิตยเรือ่งศักดิ์*

^{1,2} คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร 140 ถนนเชื่อมสัมพันธ์ แขวงกระทุ่มราย
เขตหนองจอก กรุงเทพมหานคร 10530

*ติดต่อ: E-mail:thanid_m@yahoo.com, 029883655 ต่อ 3107

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอพฤติกรรมการเผาไหม้และแก๊สไอเสียที่ทางออกเตา ในการเผาไหม้แกลบและกะลาปาล์มในเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์เบด (VFBC) การทดลองได้ปรับเปลี่ยนอัตราการป้อนเชื้อเพลิงทั้งสองชนิด เพื่อทำการศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนอากาศส่วนเกิน (λ_{total}) โดยที่จะคงปริมาณอากาศแต่ละเงื่อนไขไว้ อัตราการป้อนแกลบปรับเปลี่ยนที่ 20, 22, และ 24 kg/h ซึ่งสอดคล้องกับ λ_{total} ในช่วง 1.76-2.12 ส่วนอัตราการป้อนกะลาปาล์มปรับเปลี่ยนที่ 10, 12, และ 14 kg/h ซึ่งส่งผลให้ค่า λ_{total} เปลี่ยนไประหว่าง 1.91-2.68 ผลการวัดอุณหภูมิและความเข้มข้นของออกซิเจนภายในเตา บ่งชี้ว่าการเผาไหม้หลักเกิดขึ้นในห้องเผาไหม้ตัวแหวนวอร์เทค ในขณะที่การเพิ่ม λ_{total} ส่งผลให้อุณหภูมิภายในเตาลดลง ในแง่ขององค์ประกอบแก๊สเสียที่ปริมาณออกซิเจนส่วนเกิน 6% ที่ทางออกพบว่า CO มีค่าต่ำและมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามการเพิ่ม λ_{total} ซึ่งมีค่าในช่วง 65-85 ppm สำหรับกรณีของแกลบและ 35-325 ppm ในกรณีของกะลาปาล์ม ในขณะที่ NO_x มีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่ม λ_{total} ซึ่งมีค่าในช่วง 295-325 ppm สำหรับแกลบ และ 140-280 ppm กรณีของกะลาปาล์ม

คำหลัก: กะลาปาล์ม; แกลบ; แก๊สเสีย; ฟลูอิดซ์เบด; วอร์เทค

Abstract

This paper presents the combustion characteristics and emissions from firing rice husk, and palm shell fired in a vortex-fluidized bed combustor (VFBC). In this study, the feed rates of both fuels were adjusted to investigate the effect of excess air ratio (λ_{total}) while the air flow for each test was fixed. The rice husk feed rate was varied at 20, 22, and 24 kg/h, corresponding to λ_{total} in the range of 1.76-2.12. The palm shell feed rate was varied at 10, 12, and 14 kg/h, resulting in λ_{total} changes between 1.91 and 2.68. The temperature and O_2 profiles along the combustor height implied that main combustion took place beneath the vortex ring, while increasing λ_{total} caused a drop in temperature along the combustor height. In view of gas emissions corrected to 6% O_2 , CO were low and seemed to slightly increase with increased λ_{total} , ranging 65-85 ppm for rice husk and 35-220 ppm for palm shell. However, NO_x emissions were decreased with increased λ_{total} , ranging 295-325 ppm for rice husk and 140-280 ppm for palm shell.

Keywords: Emissions; Fluidized bed; Palm shell; Rice husk; Vortex

1. บทนำ

ชีวมวลเป็นหนึ่งในพลังงานสะอาดรูปแบบหนึ่งที่มีความยั่งยืน นอกเหนือจากพลังงานหมุนเวียนจำพวก ลม และแสงอาทิตย์ โดยชีวมวลในประเทศไทยนั้นมีศักยภาพในเชิงพลังงานสูงถึง 504,339 TJ หรือเทียบเท่า 11,940 ktoe [1] ซึ่งทราบจนปัจจุบันได้มีการนำชีวมวลที่เหลือจากกระบวนการเกษตรกรรมและการแปรรูปผลผลิตทางการเกษตร อาทิเช่น แกลบ ชานอ้อย และใยผลปาล์มมาใช้เป็นเชื้อเพลิงป้อนให้แก่หม้อไอน้ำของโรงงานเพื่อผลิตไอน้ำหรือไฟฟ้าสำหรับใช้ในโรงงานประเภทต่างๆ สำหรับเทคโนโลยีการแปลงพลังงานที่ได้รับการยอมรับในปัจจุบันว่ามีประสิทธิภาพสูง ปลอดภัยมลพิษต่ำ และมีความยืดหยุ่นในการใช้เชื้อเพลิงที่มีความชื้นสูงได้หลากหลายชนิดคือ การเผาไหม้แบบฟลูอิดไธเบต [2-5] โดยตั้งแต่อดีตที่ผ่านมาได้มีงานวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลชนิดต่างๆ ด้วยเทคโนโลยีการเผาไหม้แบบนี้ เช่น แกลบ [4-9] พางข้าว [10] เปลือกมะกอก [11] และ กะลาปาล์ม [12] เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของคณะผู้วิจัยที่ได้ทำการศึกษาศึกษาการเผาไหม้ในเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดไธเบต (VFBC) ซึ่งเป็นเตาเผาไหม้ที่รวมลักษณะเด่นของของเผาไหม้สองชนิดเข้าด้วยกัน คือ เตาเผาไหม้ไฮโคลนและเตาเผาไหม้ฟลูอิดไธเบต ซึ่งได้ทำการศึกษาศึกษาทั้งการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลเดี่ยวและการเผาไหม้ชีวมวลร่วมกับถ่านหินในกรณีที่ไม้ใช้ทรายเป็นอนุภาคเบต หรือแม้กระทั่งกรณีที่ใช้ทรายเป็นอนุภาคเบตอีกด้วย ซึ่งในทุกการศึกษามีประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่ค่อนข้างสูง (>96%) และส่วนใหญ่มีการปลดปล่อยแก๊สพิษ (CO และ SO₂) อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน [10-14]

อย่างไรก็ดี แกลบเป็นชีวมวลที่มีการใช้งานมาเป็นเวลานานแล้ว ส่วนกะลาปาล์มซึ่งเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มเป็นชีวมวลอีกชนิดหนึ่งที่ได้รับการนิยมนำไปใช้งานในเตาเผาไหม้แบบตะกรับของโรงงานน้ำมันปาล์มและหม้อไอน้ำแบบฟลูอิดไธเบต แต่ยังไม่เคยนำมาใช้กับเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดไธเบต ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาศึกษาการเผาไหม้กะลาปาล์มในเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดไธเบต (VFBC) ที่ใช้ทรายเป็นเบต โดยได้ทำการศึกษาศึกษาถึงผลกระทบของอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผา

ไหม้ที่มีต่อผลพฤติกรรมการเผาไหม้และมลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้แกลบและกะลาปาล์ม ซึ่งพิจารณาถึงลักษณะการเผาไหม้ และองค์ประกอบของแก๊สไอเสีย โดยทุกเงื่อนไขการทดลองจะปรับเปลี่ยนอัตราการป้อนเชื้อเพลิงและควบคุมปริมาณอากาศในส่วนอื่นๆ ไว้คงที่

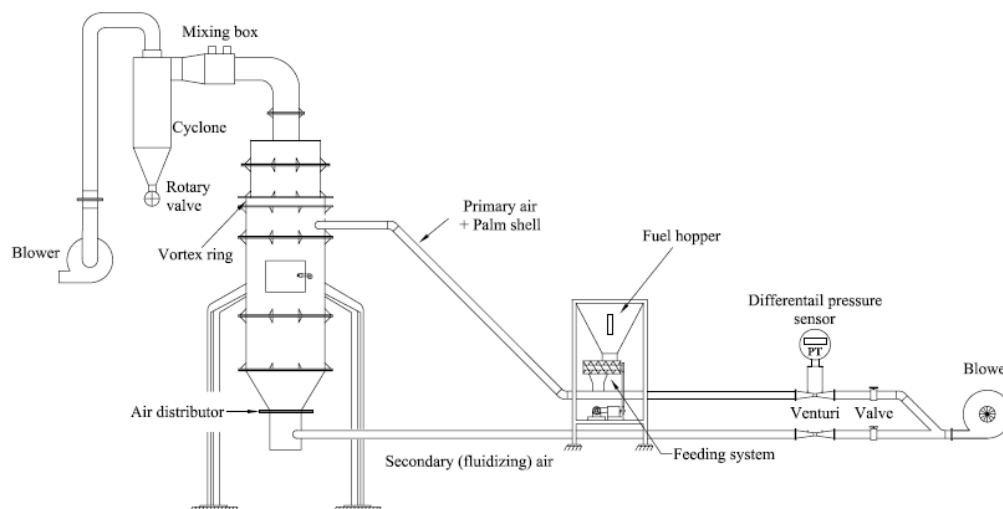
2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

2.1 เตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดไธเบต (VFBC)

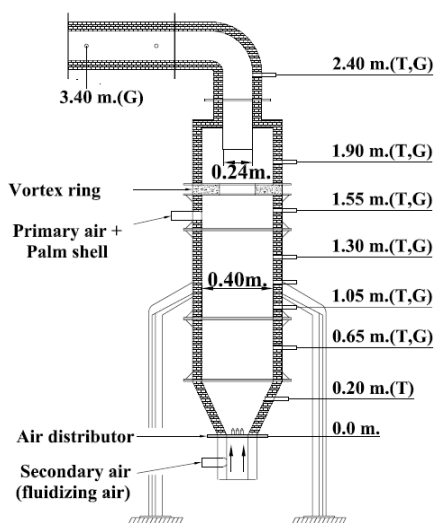
รูปที่ 1 แสดงตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์การทดลองของเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดไธเบต (VFBC) โดยเตาเผาไหม้ VFBC ที่ใช้ในการทดลองนั้นถูกออกแบบโดยรวมเอาลักษณะเด่นของเตาเผาแบบไฮโคลนคือการเผาไหม้แบบหมุนวนหรือวอร์เทคและการเผาไหม้อนุภาคแขวนลอยในอากาศของเตาเผาแบบฟลูอิดไธเบตเข้าด้วยกัน จึงทำให้เตาเผาชนิดนี้มีประสิทธิภาพสูง ขนาดของเตา VFBC คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในเตาเผาไหม้เท่ากับ 40 cm และสูง 165 cm โดยลักษณะของเตาเผาไหม้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังรูปที่ 2 คือส่วนที่หนึ่งเป็นรูปทรงกรวยหงายตัดยอดสูง 30 cm โดยที่ห้องเผาไหม้ทรงกระบอกจะมีการติดตั้งวงแหวนวอร์เทคซึ่งมีขนาดช่องเปิดของรูเท่ากับ 24 cm โดยวงแหวนวอร์เทคนี้จะช่วยในการดักอนุภาคเชื้อเพลิงที่ยังเผาไหม้ไม่หมด ให้ตกลงมายังเบตซึ่งจะสามารถเพิ่มระยะเวลาในการเผาไหม้ ส่วนด้านล่างของเตาเผาที่เป็นกรวยหงายนั้นจะเป็นส่วนรองรับอนุภาคเบตและเชื้อเพลิงในขณะเผาไหม้แบบฟลูอิด-ไธเบต ซึ่งมีการติดตั้งตัวกระจายอากาศแบบหัวฉีดไว้ด้านล่างสุด สำหรับการจ่ายอากาศเข้าเตาเผาไหม้จะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ 1) อากาศปฐมภูมิ (primary air) เป็นอากาศส่วนที่ถูกจ่ายในแนวสัมผัสกับผนังเตาพร้อมกับเชื้อเพลิงที่ตำแหน่งใต้วงแหวนวอร์เทค 2) อากาศทุติยภูมิ (secondary air) หรืออากาศที่ก่อให้เกิดฟลูอิดไธเซชันซึ่งถูกจ่ายเข้าบริเวณด้านล่างของเตาผ่านตัวกระจายอากาศแบบหัวฉีด และ 3) อากาศตติยภูมิ (tertiary air) ซึ่งจ่ายเหนือวงแหวนวอร์เทคเพื่อกวาดอนุภาคถ่านและเชื้อเพลิงที่อาจตกค้างด้านบนให้กลับลงมาสู่ด้านล่าง โดยอากาศส่วนนี้ได้ถูกใช้เฉพาะในกรณีของการเผาไหม้แกลบเท่านั้น ซึ่งสามารถดูรายละเอียดของชุดทดลองได้จากงานวิจัยที่ผ่านมา [7-8] นอกจากนี้ การทดลองได้ใช้ทรายขนาด 300 μm เป็นอนุภาคเบตในปริมาณ 12-15 kg

2.2 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลอง

เชื้อเพลิงที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้คือแกลบและกะลาปาล์มซึ่งมีองค์ประกอบของเชื้อเพลิงดังแสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 1 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์การทดลองของเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิด์เบดของการเผาไหม้กะลาปาล์ม



รูปที่ 2 ขนาดเตาเผาไหม้ VFBC ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิและแก๊สไอเสียในการทดลอง

ตารางที่ 1 องค์ประกอบของเชื้อเพลิง (as received)

Proximate analysis (Wt. %)	Fuel		Ultimate analysis (Wt. %)	Fuel	
	Rice husk	Palm shell		Rice husk	Palm shell
Fixed carbon	20.1	19.28	Carbon	38.0	44.48
Volatile matter	55.6	68.35	Hydrogen	4.55	5.31
Moisture	10.3	9.79	Oxygen	32.4	37.46
Ash	14.0	2.58	Nitrogen	0.69	0.36
HHV (MJ/kg)	14.98	19.03	Sulfur	10.3	0.02

2.3 ขั้นตอนการทดลอง

การวัดปริมาณอากาศที่ใช้ในการทดลองของงานวิจัยนี้ ได้ใช้วิธีที่ทำการสอบเทียบแล้วร่วมกับเซนเซอร์วัดความดันแตกต่างซึ่งมีความคลาดเคลื่อน $\pm 3\%$ ของย่านการวัด การควบคุมอัตราการป้อนเชื้อเพลิงแอลกอฮอล์ การควบคุมอัตราการป้อนเชื้อเพลิง ส่วนการวัดอุณหภูมิ (T) ในการทดลองจะใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K คู่กับอุปกรณ์แสดงผลซึ่งมีความละเอียด $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ซึ่งทำการวัดจำนวน 7 ตำแหน่งคือ 0.20, 0.65, 1.05, 1.30, 1.55, 1.90 m เหนือแผ่นกระจายอากาศ และที่เตาเผาไหม้ (ระดับ 2.40) ดังรูปที่ 2 สำหรับในการวัดความเข้มข้นของแก๊ส (G) ภายในเตาคือ O_2 , CO และ NO_x ที่ระดับความสูงต่างๆ คือ 0.65, 1.05, 1.30, 1.55, 1.90, 2.40 m และที่ท่อทางออกเตา (3.40 m) นั้นได้ใช้เครื่องวิเคราะห์แก๊สไอเสีย Testo 350XL ซึ่งสามารถวัดแก๊ส O_2 , CO และ NO_x

ด้วยเซนเซอร์ชนิดเซลล์เคมี ส่วน CO_2 ที่แสดงนั้น ได้มาจากการคำนวณย้อนกลับจากปริมาณ O_2 ที่ได้จากเครื่องวัด

ขั้นตอนการทดลองเริ่มจากการปรับความเร็วลมที่ใช้ของอากาศส่วนต่างๆ ให้ได้ตามเงื่อนไขการทดลองตามตารางที่ 2 จากนั้นทำการจุดเตาเผาไหม้ โดยเริ่มบรรจุทรายเข้าสู่เตาเผาไหม้แล้วให้ความร้อนกับทรายด้วยถ่านไม้ติดไฟแล้ว จนอุณหภูมิในเตาสูงขึ้นถึง $400\text{--}500^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลองสามารถเกิดการลุกไหม้ตัวเองได้ หลังจากนั้นจึงเริ่มป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่เตาเผาไหม้ เมื่อสภาวะการทำงานของเตาเผาไหม้เข้าสู่สภาวะคงตัว ซึ่งใช้เวลาประมาณ 60-90 นาทีแล้วจึงเริ่มบันทึกค่าต่างๆ ดังนี้คือ อุณหภูมิแนวกึ่งกลางเตาและความเข้มข้นของแก๊สต่างๆ (O_2 , CO, NO_x) ที่ระดับความสูงต่างๆ (ดังรูปที่ 2: T=อุณหภูมิ, G=แก๊ส)

ตารางที่ 2 เงื่อนไขการทดลอง

Conditions		Test no.					
		1	2	3	4	5	6
Fuel type		Rice husk			Palm shell		
Fuel feed rate (kg/h)		20	22	24	10	12	14
Total excess air ratio (λ_{total})		2.12	1.92	1.76	2.68	2.23	1.91
Primary air (with fuel)	Velocity (m/s)	13.0			22.35		
	Fraction (-)	0.40			0.46		
	Excess air ratio (λ_1)	0.84	0.76	0.70	1.23	1.02	0.88
Secondary air (fluidizing)	Velocity (m/s)	0.60			0.50		
	Fraction (-)	0.49			0.54		
	Excess air ratio (λ_2)	1.03	0.94	0.86	1.45	1.20	1.03
Tertiary air	Velocity (m/s)	10.0			-		
	Fraction (-)	0.11			-		
	Excess air ratio (λ_3)	0.25	0.22	0.21	-		
Sand as bed material (kg)		15			12		

3. ผลการทดลอง

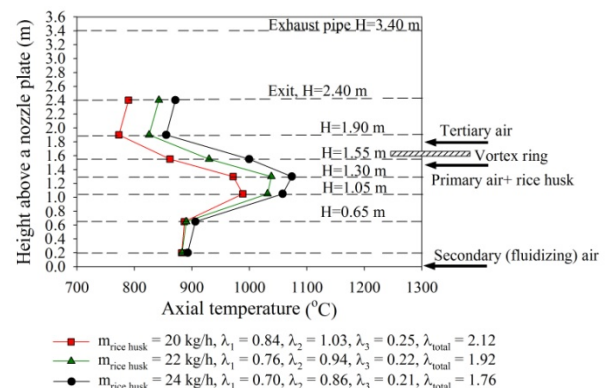
พฤติกรรมของการเผาไหม้เชื้อเพลิงแอลกอฮอล์และกะลาปาล์มภายในเตาเผาไหม้ VFBC สามารถแสดงได้โดยการกระจายอุณหภูมิแนวกึ่งกลางเตาเผาไหม้ตามระดับความสูงดังรูปที่ 3 (ก) และ (ข) รวมไปถึงการกระจายความเข้มข้นของแก๊สเผาไหม้ต่างๆ คือ O_2 , CO และ NO_x ดังรูป

ที่ 4-6 โดยในกรณีของการเผาไหม้แอลกอฮอล์นั้นมีการนำเสนอเฉพาะการกระจายอุณหภูมิเพียงอย่างเดียวเนื่องจากลักษณะการกระจายความเข้มข้นของแก๊สเผาไหม้นั้นมีลักษณะคล้ายกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่เคยนำเสนอไปแล้ว [7-8]

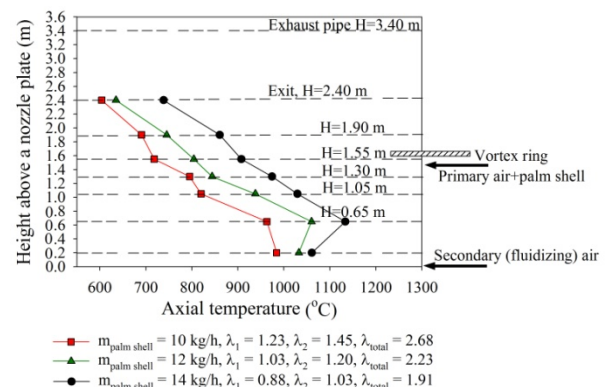
3.1 การกระจายอุณหภูมิในแนวกึ่งกลางเตาเผาไหม้

รูปที่ 3 (ก) และ (ข) แสดงการกระจายอุณหภูมิตามระดับความสูงในแนวกึ่งกลางเตาเผาไหม้ของกรณีการเผาไหม้แกลบและกะลาปาล์มตามลำดับ ภายใต้เงื่อนไขอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงค่าต่างๆ ซึ่งทำโดยการปรับเปลี่ยนอัตราการป้อนเชื้อเพลิงค่าต่างๆ และคงปริมาณอากาศแต่ละส่วนไว้คงที่ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงแต่ละชนิด ซึ่งจะนำเสนอในรูปของตัวแปรอัตราส่วนอากาศส่วนเกิน ($[A/F]_{act}/[A/F]_{th}$; λ_{total}) โดยผลการทดลองพบว่า การเผาไหม้เชื้อเพลิงแต่ละชนิดมีรูปแบบที่แตกต่างกันคือ การเผาไหม้แกลบเกิดขึ้นทันทีที่เชื้อเพลิงถูกป้อนเข้าสู่เตาเผาไหม้ โดยดูได้จากอุณหภูมิสูงสุดในช่วงระดับความสูง 1.05–1.30 m ดังรูปที่ 3 (ก) ซึ่งต่างจากกรณีของกะลาปาล์มซึ่งเผาไหม้ในเบตเป็นส่วนใหญ่จึงทำให้มีอุณหภูมิสูงสุดในเบตและเหนือเบตช่วงระดับความสูง 0.20–0.65 m ดังรูปที่ 3 (ข) เมื่อพิจารณาเฉพาะการเผาไหม้แกลบนั้นพบว่าอุณหภูมิในเบตและเหนือเบต (0.20–0.65 m) มีค่าในช่วง 880–900°C ในทุกเงื่อนไขการทดลองซึ่งเป็นผลมาจากการเผาไหม้ของอนุภาคถ่านคาร์บอนในเบตและเหนือเบตด้วยอากาศทุติยภูมิซึ่งมีค่าอัตราส่วนอากาศส่วนเกินทุติยภูมิ ($[A_2/F]_{act}/[A/F]_{th}$; λ_2) = 0.86–1.03 ในขณะที่ระดับที่สูงขึ้นมาถึงไต้วงแหวนวอร์เทคคือ 1.05–1.30 m มีอุณหภูมิสูงขึ้นในช่วง 980–1070°C ซึ่งเกิดจากการเผาไหม้สารระเหยอย่างรุนแรงกับอากาศปฐมภูมิ (สัดส่วนมวล 0.4) ซึ่งคิดเป็นค่า $\lambda_1 = 0.70$ –0.84 ส่วนที่ระดับความสูงตั้งแต่ 1.55 ไปจนถึง 2.4 m ซึ่งเป็นทางออกเตานั้นมีการลดลงของอุณหภูมิอย่างต่อเนื่องจนเหลือในช่วง 800–880°C ทั้งนี้ ผลการทดลองยังพบว่าการเพิ่มอัตราส่วนอากาศส่วนเกิน (λ_{total}) โดยการลดอัตราการป้อนเชื้อเพลิงจาก 24 kg/h เหลือ 20 kg/h ซึ่งทำให้ค่า λ_{total} เพิ่มขึ้นจาก 1.76 เป็น 2.12 นั้น ส่งผลให้อุณหภูมิภายในเตาเผาไหม้ที่ระดับต่างๆ มีค่าต่ำลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ระดับความสูงในช่วง 1.05 m ขึ้นไปจนถึงทางออกเตา (2.40 m) ซึ่งอุณหภูมิมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากอากาศปฐมภูมิบางส่วนที่ไม่ได้ถูกใช้เผาไหม้ร่วมกับการจ่ายอากาศทุติยภูมิ (สัดส่วนมวล 0.11) เข้าผสมกับแก๊สเผาไหม้ที่ไหลขึ้นมาจากเบต ในกรณีของการเผาไหม้กะลาปาล์มนั้นพบว่าอุณหภูมิสูงสุดเกิดขึ้นช่วงในเบตและเหนือเบต (0.20–0.65 m) ดังรูปที่ 3 (ข) โดยมี

ค่าในช่วง 970–1130°C แสดงให้เห็นถึงการเผาไหม้หลักของกะลาปาล์มกับกับอากาศทุติยภูมิซึ่งมีค่า λ_2 ที่เพียงพอต่อการเผาไหม้ในช่วง 1.03–1.45 ทั้งนี้ การที่กะลาปาล์มเกิดการเผาไหม้ส่วนใหญ่ในเบตซึ่งต่างจากการเผาไหม้แกลบที่เผาไหม้บริเวณทางเข้าของเชื้อเพลิง [7-8] มีสาเหตุมาจากความแตกต่างทางกายภาพของเชื้อเพลิงคือความหนาแน่นที่มากกว่าของกะลาปาล์มซึ่งทำให้อนุภาคเชื้อเพลิงเคลื่อนที่ลงสู่ในเบตอย่างรวดเร็ว ทำให้การปลดปล่อยและการเผาไหม้สารระเหยเกิดขึ้นในเบตและเหนือเบต อย่างไรก็ดี ที่ระดับความสูงตั้งแต่ 0.65 m ขึ้นไปพบว่าอุณหภูมิมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณอากาศส่วนเกินที่จ่ายเข้าไปในการเผาไหม้ โดยเฉพาะอากาศปฐมภูมิ (สัดส่วนมวล = 0.46) ซึ่งมีค่า λ_1 ในช่วง 0.88–1.23 นอกจากนี้ ยังพบว่าการลดลงของอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ตามการเพิ่มขึ้นของ λ_{total} ตั้งแต่ 1.91–2.86 ซึ่งทำให้อุณหภูมิทางออกเตาต่ำลงเหลือในช่วง 600–750°C



(ก) แกลบ



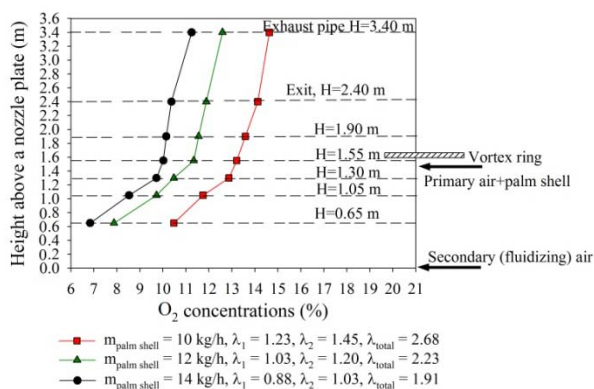
(ข) กะลาปาล์ม

รูปที่ 3 การกระจายอุณหภูมิแนวกึ่งกลางเตา VFBC ของการเผาไหม้แกลบและกะลาปาล์ม

3.2 การกระจายตัวของแก๊สภายในเตาตามความสูง

การกระจายความเข้มข้นของแก๊สเผาไหม้ชนิดต่างๆ คือ ออกซิเจน (O_2) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) ในแนวกึ่งกลางเตาตามระดับความสูงต่างๆ แสดงได้ดังรูปที่ 4-6 ตามลำดับ การทดลองได้ทำการปรับเปลี่ยนค่า λ_{total} โดยการปรับอัตราการป้อนกะลาปาล์มในช่วง 10-14 kg/h และคงปริมาณอากาศในส่วนต่างๆ คงที่

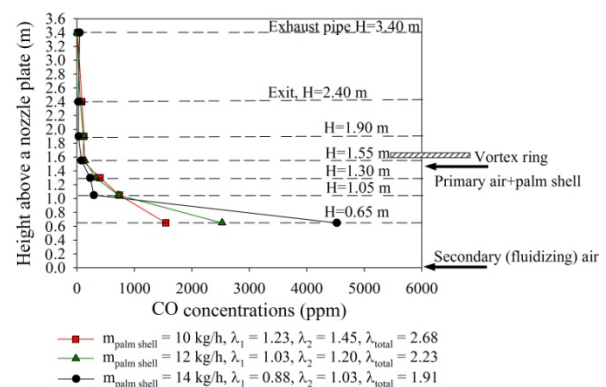
รูปที่ 4 แสดงการกระจายความเข้มข้นของ O_2 ภายในเตา โดยพบว่าความเข้มข้นของ O_2 มีค่าต่ำหลังจากไหลผ่านเบดโดยมีค่าในช่วง 6.8-10.5% ที่ระดับความสูง 0.65 m (ที่ระดับต่ำกว่า 0.65 m ไม่สามารถวัดค่าได้) และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องไปจนถึงทางออกเตาที่ระดับความสูง 2.40 m ซึ่งมีความเข้มข้นในช่วง 10.4-14.0% ทั้งนี้ ความเข้มข้นของ O_2 ที่เหลือน้อยหลังจากไหลผ่านเบดนั้นแสดงให้เห็นถึงการเผาไหม้กะลาปาล์มในเบดเป็นหลักด้วยอากาศหุ้มน้ำมันที่เพียงพอ ($\lambda_2 = 1.03-1.45$) อย่างไรก็ดี การลดอัตราการป้อนเชื้อเพลิงลงส่งผลให้ค่า λ_{total} เพิ่มขึ้นนั้นทำให้ความเข้มข้นของ O_2 ภายในเตาเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4 การกระจายตัวของ O_2 แนวกึ่งกลางเตาตามระดับความสูงของการเผาไหม้กะลาปาล์ม

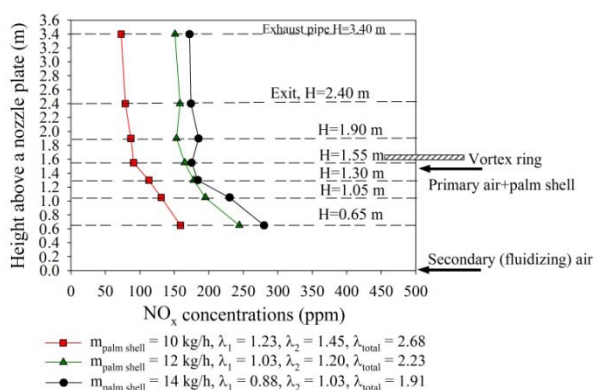
การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ CO ภายในเตาของการเผาไหม้กะลาปาล์มแสดงดังรูปที่ 5 โดยพบว่า CO มีความเข้มข้นสูงสุดที่ระดับเหนือเบด (ความสูง 0.65 m) โดยมีค่าประมาณในช่วง 1500-4540 ppm หลังจากนั้นจะมีค่าลดลงตามระดับความสูงเตาที่เพิ่มขึ้นไปจนถึงทางออกเตา (ที่ระดับ 2.4 m) ซึ่งเหลือค่าต่ำกว่า 100 ppm ความเข้มข้นของ CO มีค่าสูงในช่วงตำแหน่งเหนือเบดบ่ง

ชี้ให้เห็นถึงโซนการเผาไหม้ในเบดด้านล่างด้วยอากาศหุ้มน้ำมัน $\lambda_2 = 1.03-1.45$ โดยสังเกตเห็นว่าภายใต้การป้อนเชื้อเพลิงที่ 14 kg/h ซึ่งมีค่า $\lambda_2 = 1.03$ มีค่า CO สูงสุดประมาณ 4500 ppm แต่เมื่อลดอัตราการป้อนเชื้อเพลิงเหลือ 10 kg/h ซึ่งมีค่า $\lambda_2 = 1.45$ ก็ทำให้ CO มีค่าต่ำลงเพราะมีอากาศเข้าไปเผาไหม้เทียบกับเชื้อเพลิงมากขึ้น สำหรับการลดลงของ CO อย่างรวดเร็วในระดับ 0.65-1.55 m นั้นมีสาเหตุมาจาก 1) การจ่ายอากาศปฐมภูมิในลักษณะหุ้มน้ำมันซึ่งจะช่วยให้เกิดการคลุกเคล้าของ CO กับ O_2 ได้ดีขึ้น และ 2) การติดตั้งวงแหวนวอร์เทกซ์ซึ่งจะช่วยให้เกิดการไหลวนของแก๊สเผาไหม้เสมือนเป็นการเพิ่มระยะเวลาการทำปฏิกิริยาของ CO กับ O_2 อย่างไรก็ดี เป็นที่น่าสังเกตว่าถึงแม้ CO ในกรณีป้อนเชื้อเพลิง 14 kg/h มี λ_2 ต่ำเพียง 1.03 และ $\lambda_{total} = 1.91$ ซึ่งมีค่า CO ที่ระดับ 0.65 m สูงสุดที่ 4500 ppm แต่การลดลงตามระดับความสูงเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยคาดว่าเป็นผลมาจากอุณหภูมิภายในเตาที่มีค่าสูงกว่าซึ่งทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น นอกจากนี้ การลดลงของ CO นั้นอาจจะเป็นผลมาจากการเจือจาง (Dilution) จากการปรับเพิ่ม λ_{total} ด้วยเช่นกัน หากเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของ CO ในงานวิจัยนี้กับงานวิจัยที่ผ่านมาซึ่งทดลองเผาไหม้แกลบ [7-8] พบว่าตำแหน่งการเกิด CO สูงสุดจะแตกต่างกัน โดยกรณีของแกลบนั้น CO สูงสุดเกิดที่ระดับ 1.05-1.30 m ซึ่งเกิดจากการปลดปล่อยสารระเหยของแกลบอย่างรวดเร็ว



รูปที่ 5 การกระจายตัวของ CO แนวกึ่งกลางเตาตามระดับความสูงของการเผาไหม้กะลาปาล์ม

การกระจายความเข้มข้นของ NO_x ในการเผาไหม้กะลาปาล์มแสดงดังรูป 6 ซึ่งพบว่า NO_x มีค่าสูงสุดที่ระดับความสูง 0.65 m โดยมีค่าในช่วง 155–270 ppm และมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องไปจนถึงระดับความสูง 1.90 m หลังจากระดับความสูงนี้ ความเข้มข้นของ NO_x จะมีค่าในช่วง 70–180 ppm ความเข้มข้นสูงสุดที่ระดับความสูง 0.65 m นั้นมีสาเหตุมาจากการทำปฏิกิริยาเนื้อเดียว (homogeneous reaction) ของสารระเหยซึ่งส่วนใหญ่อยู่ในรูปของ NH_3 กับ O_2 ภายใต้อุณหภูมิสูงตามสมการ $\text{NH}_3 + \text{O}_2 \rightarrow \text{NO} + \text{H}_2\text{O}$ และปฏิกิริยาเนื้อผสม (heterogeneous reaction) ของไนโตรเจนในเชื้อเพลิงกับ O_2 ภายในเบดซึ่งมาจากอากาศทุติยภูมิที่มีปริมาณเพียงพอ ($\lambda_2 = 1.03$ – 1.45) [15–16] ส่วนการลดลงของความเข้มข้นตามระดับความสูงนั้นน่าจะเป็นผลจากการเจือจางโดย O_2 ที่มาจากอากาศส่วนเกินที่เข้าเผาไหม้ ($\lambda_{\text{total}} = 1.91$ – 2.68) นอกจากนี้ประเด็นที่น่าสนใจคือ การเพิ่มอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่สูงขึ้นเป็น 14 kg/h ซึ่งทำให้ค่า λ_{total} ลดลงเหลือ 1.91 ส่งผลให้ความเข้มข้นของ NO_x มีค่าสูงนั้น น่าจะเป็นผลมาจากค่า λ_2 ที่มีค่ามากกว่า 1 ซึ่งหมายถึงมีปริมาณอากาศที่เพียงพอต่อการเผาไหม้แล้ว ทำให้อุณหภูมิในเบดสูง ($>1000^\circ\text{C}$) ดังรูปที่ 3 (ข) จนนำไปสู่การทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วของไนโตรเจนที่อยู่ในเชื้อเพลิงและสารระเหยที่ปลดปล่อยออกมาจากเชื้อเพลิง ซึ่งมีสัดส่วนที่มากถึง 68% (ตารางที่ 1)



รูปที่ 6 การกระจายตัวของ NO_x แนวกึ่งกลางเตาตามระดับความสูงของการเผาไหม้กะลาปาล์ม

อย่างไรก็ดี ในกรณีของการเผาไหม้กะลาปาล์มในเตาเผาไหม้ VFBC นี้ไม่พบการเกิดการรื้อถอนของ NO_x

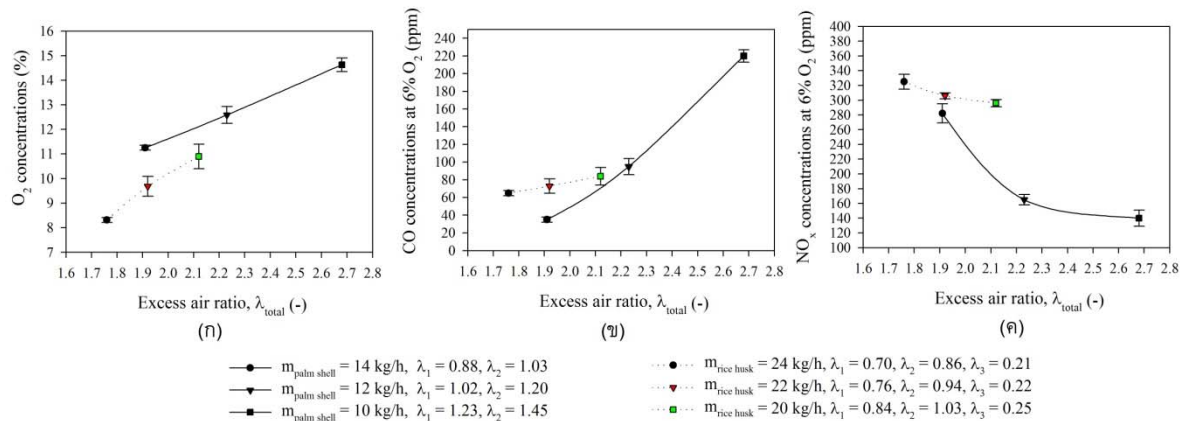
ด้วยผลของถ่านชาร์อย่างที่เคยพบในกรณีการเผาไหม้แกลบ [7] เพราะอนุภาคถ่านชาร์ของกะลาปาล์มถูกจำกัดให้เผาไหม้อยู่ในเบดเท่านั้น

3.3 องค์ประกอบของแก๊สไอเสียที่ทางออก

องค์ประกอบแก๊สไอเสียจากการเผาไหม้แกลบและกะลาปาล์มภายใต้การปรับเปลี่ยนอัตราส่วนอากาศส่วนเกิน (λ_{total}) คือ O_2 , CO และ NO_x ทั้งนี้ CO และ NO_x ที่นำเสนอได้นั้นได้แปลงมาที่ระดับความเข้มข้นของ O_2 ที่ 6% แล้วดังแสดงในรูปที่ 7 โดยพบว่าการลดอัตราการป้อนเชื้อเพลิงซึ่งมีผลเสมือนการเพิ่ม λ_{total} มีผลให้ความเข้มข้นของ O_2 เพิ่มขึ้นทั้ง 2 ชนิดเชื้อเพลิงดังรูปที่ 7 (ก) โดยมีค่า 8.3–11% สำหรับกรณีของแกลบ ซึ่งใช้ $\lambda_{\text{total}} = 1.76$ – 2.12 และมีค่า 11.2–14.7% สำหรับกรณีของกะลาปาล์ม ซึ่งใช้ $\lambda_{\text{total}} = 1.91$ – 2.68 เมื่อเปรียบเทียบค่า O_2 ระหว่างกรณีเผาไหม้แกลบและกะลาปาล์มที่ค่า λ_{total} ใกล้เคียงกันพบว่ากรณีเผาไหม้แกลบมีค่าต่ำกว่าซึ่งอาจบอกเป็นนัยว่าการเผาไหม้แกลบเกิดขึ้นได้ดีกว่ากะลาปาล์มจึงทำให้ O_2 ถูกนำไปใช้มากกว่า ส่วนความเข้มข้นของ CO พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตาม λ_{total} ทั้งสองชนิดเชื้อเพลิงโดยมีค่าในช่วง 65–85 ppm สำหรับแกลบ และ 35–220 ppm สำหรับกะลาปาล์ม ดังรูปที่ 7 (ข) การเพิ่มขึ้นของ CO ทั้ง 2 กรณีนี้คาดว่าสาเหตุหลักมาจากอุณหภูมิภายในเตาที่ลดต่ำลงตามการเพิ่ม λ_{total} (รูปที่ 3 (ก) และ (ข)) เมื่อเปรียบเทียบการเผาไหม้เชื้อเพลิงทั้งสองชนิดที่ค่า λ_{total} ใกล้เคียงกันนั้น พบว่า กรณีของแกลบมีค่า CO สูงกว่าเล็กน้อย ซึ่งคาดว่าเกิดจากการเผาไหม้ที่ล่าช้าของสารระเหยของแกลบบางส่วนที่หลุดลอยขึ้นไปเหนือวงแหวนวอร์เทคออกไปยังทางออกเตา อย่างไรก็ตามความเข้มข้นของ CO ที่วัดได้ทั้งสองกรณียังมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานของประเทศไทย (760 ppm) [7–8] เมื่อพิจารณาในแง่ของ NO_x ดังรูปที่ 7 (ค) พบว่าความเข้มข้นของ NO_x ลดลงตาม λ_{total} ทั้งสองชนิดเชื้อเพลิง โดยมีค่าในช่วง 295–325 ppm สำหรับกรณีของแกลบ และมีค่า 140–280 ppm ในกรณีของกะลาปาล์ม โดยการลดลงของ NO_x นี้มีผลมาจากอุณหภูมิภายในเตาเผาไหม้ที่ลดต่ำลง

ตาม λ_{total} ซึ่งทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาน้อยลง เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเชื้อเพลิงทั้งสองชนิดที่ค่า λ_{total} ใกล้เคียงที่ 1.9 นั้น พบว่าค่า NO_x ของแกลบมีค่าสูงกว่ากรณีของกะลาปาล์มซึ่งคาดว่าเกิดจากการทำปฏิกิริยาของสารระเหยบริเวณทางเข้าในกรณีเชื้อเพลิงแกลบที่มากกว่า ในขณะที่ค่า $\lambda_{total} = 2.12$ และ 2.23 นั้นพบว่าในกรณีของ

กะลาปาล์มมีค่าต่ำกว่าอย่างเห็นได้ชัดซึ่งน่าจะเป็นผลของอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอย่างชัดเจน ทั้งนี้ค่า NO_x ที่วัดได้นั้นมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานบางเงื่อนไขในกรณีของกะลาปาล์ม แต่ในกรณีของแกลบนั้นยังคงมีค่าสูงกว่ามาตรฐานที่กำหนดที่ (220 ppm)



รูปที่ 7 องค์ประกอบแก๊สไอเสียที่ทางออกเตาภายใต้การเปลี่ยนแปลง λ_{total} ต่างๆ ในการเผาไหม้แกลบและกะลาปาล์ม

4. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ตลอดจนแก๊สมลพิษจากการเผาไหม้แกลบและกะลาปาล์มในเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดเบด (VFBC) ภายใต้เงื่อนไขการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงในเทอมของ λ_{total} ต่างๆ สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. การเผาไหม้หลักของแกลบเริ่มเกิดขึ้นที่ตำแหน่งทางเข้าของเชื้อเพลิงในช่วงความสูง 1.05 – 1.30 m ในขณะที่การเผาไหม้หลักของกะลาปาล์มเกิดขึ้นในเบดระดับ <0.65 m การเพิ่ม λ_{total} ส่งผลให้อุณหภูมิภายในเตาลดต่ำลงแต่ส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนเพิ่มสูงขึ้น
2. วงแหวนวอร์เทคช่วยจำกัดให้ CO ที่เกิดขึ้นในเบดถูกเผาไหม้ในบริเวณใต้วงแหวนอย่างรวดเร็ว
3. การทำปฏิกิริยาของสารระเหยจากกะลาปาล์ม โดยเฉพาะอย่างยิ่ง NH_3 กับ O_2 ที่ตำแหน่ง 0.65 m ภายใต้อุณหภูมิสูงกว่า 900°C เป็นสาเหตุให้ความเข้มข้นของ NO_x มีค่าสูงสุด ส่วนการเพิ่ม λ_{total} ทำให้เกิดการเจือจางของแก๊สเผาไหม้
4. ความเข้มข้น O_2 วัดที่ท่อทางออกมีค่าเพิ่มขึ้นตาม λ_{total} ในขณะที่ความเข้มข้น CO ที่ระดับ O_2 ส่วนเกิน 6% มีค่าเพิ่มขึ้นในช่วง 65–85 ppm สำหรับ

แกลบ และ 35–220 ppm สำหรับกะลาปาล์ม ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานในทุกเงื่อนไขการทดลอง

5. ปริมาณ NO_x ที่ท่อทางออก มีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มขึ้นของ λ_{total} ซึ่งเป็นผลมาจากอุณหภูมิในเตาที่ต่ำลง โดยมีค่าในช่วง 295–325 ppm สำหรับกรณีของแกลบ และมีค่า 140–280 ppm ในกรณีของกะลาปาล์ม ซึ่งสูงกว่าค่ามาตรฐานที่ 220 ppm ในบางเงื่อนไข

6. เงื่อนไข λ_{total} ที่เหมาะสมจากการทดลองในกรณีพิจารณาในแง่ของการปลดปล่อยมลพิษ (NO_x) ที่ต่ำสุดคือ 2.12 สำหรับกรณีของแกลบ และ 2.68 ในกรณีของกะลาปาล์ม

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร (มทม.) ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Department of Alternative Energy Development and Efficiency, Ministry of Energy, Thailand (2014). *Statistic Data*, URL: <http://www.dede.go.th>, access on 10/06/2014.

- [2] Natarajan, E., Nordin, A., Rao, N., (1998). Overview of Combustion and Gasification of Rice husk in Fluidized bed reactors. *Biomass and Bioenergy*, Vol. 14, pp. 533-546
- [3] Werther, J., Saenger, M., Hartge, U., Ogada, T. and Siagi, Z. (2000). Combustion of agricultural residues, *Energy and Combustion Science.*, Vol. 26, pp. 1-27.
- [4] Madhiyanon, T., Sathitruangsak, P., Soponronnarits. (2010). Combustion behavior of rice-husk in a short-combustion-chamber fluidized-bed combustor (SFBC), *Applied Thermal Engineering*, 30, pp. 347-353.
- [5] Armesto, L., Bahillo, A., Veijonen, K., Cabanillas, A., Otero, J. (2002). Combustion behaviour of rice huskin a bubbling fluidised bed, *Biomass Bioenergy*, 23, pp.171-179.
- [6] Fang, M., Yang, L., Chen, G., Shi, Z., Lou, Z., Cen, K., (2004). Experimental study on rice husk combustion in a circulating fluidized bed, *Biomass Bioenergy*, 85, pp. 1273-82.
- [7] ประสาน สติตย์เรืองศักดิ์, ฐานิตย์ เมธิยานนท์ และ สมชาติ โสภณธนฤทธิ์ (2011). คุณลักษณะการเผาไหม้ แกลบในเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดไธซ์เบด ที่ใช้หัวฉีด กระจายอากาศ: การประชุมวิชาการเครือข่าย วิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จังหวัดกระบี่
- [8] ประสาน สติตย์เรืองศักดิ์, ฐานิตย์ เมธิยานนท์ และ สมชาติ โสภณธนฤทธิ์ (2012). อิทธิพลของความเร็ว อากาศที่ก่อให้เกิดฟลูอิดเซชันที่มีต่อคุณลักษณะการเผา ไหม้แกลบในเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดไธซ์เบดที่ใช้ทราย เป็นเบด: การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกล แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระ จอมเกล้าธนบุรี จังหวัดเขียงราย
- [9] Madhiyanon, T., Lapidattanakun, A., Sathitruangsak, P., Soponronnarit, S., (2006). A novel cyclonic fluidized-bed combustor (Ψ -FBC): Combustion and thermal efficiency, temperature distribution, combustion intensity, and emission of pollutants, *Combustion and Flame*, Vol. 146, pp. 232-245.
- [10] Okasha, F. (2007). Staged combustion of rice straw in a fluidized bed, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 32, pp. 52-59
- [11] Topal, H, Atimtay AT., Durmaz, A., (2003). Olive cake combustion in a circulating fluidized bed, *Fuel*, 82, pp. 132-138
- [12] ฐานิตย์ เมธิยานนท์ และ ประสาน สติตย์เรืองศักดิ์, (2014). คุณลักษณะการเผาไหม้กะลาปาล์มในเตาเผา ไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดไธซ์เบดที่ใช้ทรายเป็นเบด: การประชุม วิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 28, มหาวิทยาลัยขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น
- [13] Madhiyanon, M., Sathitruangsak, S., Soponronnarit, S. (2009). Co-combustion of rice husk with coal in a cyclonic fluidized-bed combustor (Ψ -FBC), *Fuel*, 88, pp. 132-138
- [14] Madhiyanon, M., Sathitruangsak, S., Soponronnarit, S. (2009). Co-firing characteristics of rice husk and coal in a cyclonic fluidized-bed combustor (Ψ -FBC) under controlled bed temperatures, *Fuel*, 90, pp. 2103-112
- [15] Zevenhoven, R., Kilpinen, P. (2002). Control of pollutants in flue gases and fuel gases. 2nd ed. Finland: Espoo/Turku
- [16] Lyngfelt, A. and Leckner, B. (1999) Combustion of wood-chip in circulating fluidized bed boilers-NO and CO emissions as function of temperature and air staging, *Fuel*, Vol. 78, PP. 1065-1072.