

การเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลวโดยหัวเผาวัสดุพรุนชนิดไม่มีการแตกตัวเป็นละอองสเปรย์

Combustion of Liquid Fuel through a Porous-Medium Burner without Spray Atomization

สำเร็จ จักรใจ* สุรัชชัย สนธิทใจ และ ชุตติเดช ผ่องใส
ห้องปฏิบัติการวิจัยเครื่องยนต์และการเผาไหม้
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
91 ถนนประชาอุทิศ (สุขสวัสดิ์ 48) แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

Sumrerng Jugjai*, Surachai Sanitjai and Chutidech Pongsai
Combustion and Engine Research Laboratory (CERL)

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi
91 Prachauthit Road (Suksawad 48) Bangmod, Thung Kharu District, Bangkok 10140
Tel. 0-970-9128, Fax. 0-970-9111, E-mail: sumrueng.jug@kmutt.ac.th

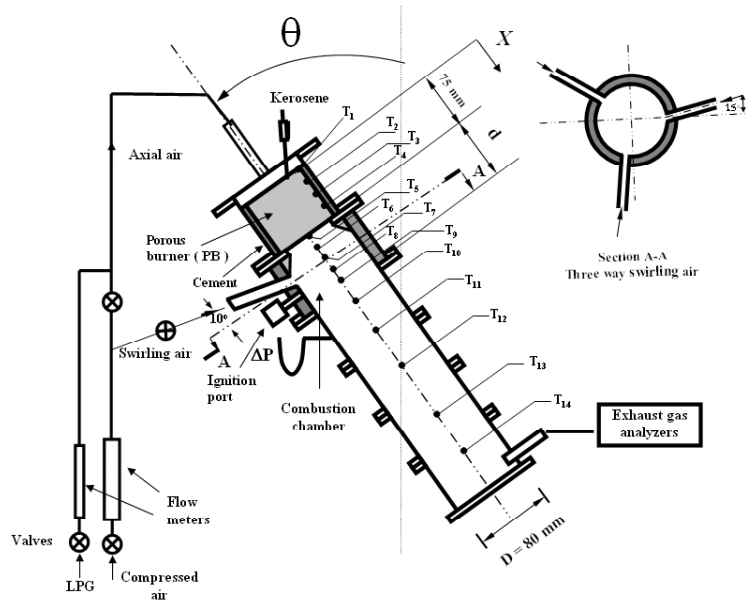
บทคัดย่อ

งานวิจัยและพัฒนาเกี่ยวกับการเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลวโดยหัวเผาวัสดุพรุน (porous burner, PB) ชนิดไม่มีการแตกตัวเป็นละอองสเปรย์มีความสำคัญอย่างมากจนอาจเข้ามาทดแทนการเผาไหม้แบบสเปรย์ที่ใช้ทั่วไปในอนาคตอันใกล้นี้ อย่างไรก็ตาม งานวิจัยหัวเผาวัสดุพรุนส่วนใหญ่ได้มุ่งเน้นเฉพาะการเผาไหม้แบบไหลขึ้นหรือไหลลงในแนวตั้งเท่านั้น ทำให้การประยุกต์ใช้งานแคบ ดังนั้นการขยายสมรรถนะหัวเผาวัสดุพรุนให้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงโดยไม่ขึ้นกับตำแหน่งของหัวเผา (กำหนดโดยมุมที่แนวแกนของหัวเผาทำกับแนวตั้งเรียกว่ามุมหัวเผา θ) นับเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งและเป็นวัตถุประสงค์หลักของการศึกษานี้ จากผลการทดลองพบว่า มุมหัวเผา θ มีอิทธิพลต่ออุณหภูมิการเผาไหม้ และปริมาณมลพิษ (CO และ NO_x) สูงมาก ผ่านรูปแบบการไหลซึมผ่านของน้ำมันก๊าดภายในวัสดุพรุน ซึ่งเป็นตัวกำหนดพื้นที่การระเหย (area of evaporation front) ของน้ำมันภายในวัสดุพรุน การดึงดูด (entrainment) และการผสมคลุกเคล้าเป็นเนื้อเดียวกันของไอน้ำมันกับอากาศเผาไหม้ การเลือกใช้ความหนาเชิงแสงของหัวเผาวัสดุพรุน τ_b ที่สูงและเหมาะสมสามารถลดอิทธิพลของมุมหัวเผา θ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังช่วยส่งเสริมการระเหย ส่งเสริมการเผาไหม้ และขยายบริเวณการเผาไหม้ที่เสถียรได้อีกด้วย พบว่าความหนาเชิงแสงของหัวเผาวัสดุพรุน $\tau_b = 131$ เป็นค่าที่สูงและเหมาะสมที่สุดเพราะให้สมรรถนะการเผาไหม้ที่ไม่ขึ้นกับมุมหัวเผา θ อีกต่อไป อีกทั้งให้บริเวณการเผาไหม้ที่เสถียรค่อนข้างกว้าง โดยให้อุณหภูมิการเผาไหม้สูงสุด ให้บริเวณการเผาไหม้ที่เสถียรกว้างที่สุด แต่มลพิษ CO และ NO_x ต่ำสุด คือ 125 และ 110 ppm ตามลำดับ

Abstract

Research and development on combustion of liquid fuel by a porous medium burner (PB) without spray atomization has been so important that it may be able to replace the conventional spray combustion in the near future. However, most of the considered porous medium burners have been focused on up- or down-flow in the vertical direction, thus limiting their practical applications. Extension in their performances without depending on the position of the burner (defined by an angle between vertical direction and axis of the burner and called burner angle, θ) is very important, and this becomes the main objective of the present study. Experimental results show that the burner angle θ has a strong effect on combustion temperature and emission of pollutants (CO and NO_x) via a flow pattern of the liquid fuel (kerosene) through the PB. The flow pattern controls area of the evaporation front within the PB, entrainment of fuel vapor by the swirling combustion air and mixing process. With relatively large and suitable optical thickness of the PB, $\tau_b = 131$, the burner performance is independent on the burner angle. Moreover, evaporation enhancement, combustion augmentation and extension of the stable combustion region with the lowest in CO and NO_x , respectively, at 125 and 110 ppm were achieved.

* Corresponding author



รูปที่ 1. อุปกรณ์การทดลอง

1. บทนำ

ในปัจจุบัน งานวิจัยและพัฒนาเกี่ยวกับการเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลวโดยหัวเผาวัสดุพรุน (porous burner, PB) ชนิดไม่มีการแตกตัวเป็นละอองเริ่มได้รับความสนใจจากนักวิจัยการเผาไหม้แพร่หลายมากยิ่งขึ้น เพราะหัวเผาวัสดุพรุนมีข้อเด่นหลายประการที่เหนือกว่าการเผาไหม้แบบสเปรย์ทั่วไป (conventional spray combustion) เช่น ให้การเผาไหม้แบบมีการหมุนเวียนความร้อน (regenerative combustion) ปลดปล่อยมลพิษ (CO และ NO_x) ต่ำ ให้ความเข้มของการเผาไหม้สูง ขนาดเล็กกะทัดรัด และความดันน้ำมันเชื้อเพลิงค่อนข้างต่ำ ฯลฯ เป็นต้น อย่างไรก็ตาม งานวิจัยหัวเผาวัสดุพรุนในอดีตมุ่งเน้นเฉพาะการเผาไหม้แบบไหลลง (down-flow) [1] เพื่ออาศัยแรงโน้มถ่วงช่วยดึงน้ำมันให้ไหลซึมผ่านเข้าไปในวัสดุพรุนแล้วเกิดการเผาไหม้ที่ผิวด้านล่างหรือภายในของวัสดุพรุน การเผาไหม้แบบนี้จึงมีข้อจำกัดที่สามารถใช้งานได้แต่เฉพาะแบบไหลลงในแนวตั้งเท่านั้น ในทางตรงกันข้ามถ้าต้องการให้การเผาไหม้เป็นแบบไหลขึ้น (up-flow) [2] อาจต้องอาศัยหัวฉีดความดันสูงช่วยแตกตัวน้ำมันให้เป็นละอองที่ละเอียดมากเสียก่อนแล้วจึงไหลขึ้นไปกับอากาศเผาไหม้เข้าสู่วัสดุพรุนในลักษณะของของไหลสองสถานะ (two - phase flow) แล้วเกิดการเผาไหม้ภายในวัสดุพรุน การเผาไหม้แบบนี้มีความยุ่งยากและไม่สะดวกต่อการใช้งานอย่างสูง

ดังนั้นการวิจัยและพัฒนาเพื่อให้หัวเผาวัสดุพรุนสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงโดยไม่ขึ้นกับตำแหน่งของหัวเผา (กำหนดโดยแนวแกนของหัวเผาทำมุมกับแนวตั้ง เรียกว่ามุมหัวเผา θ) นับเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่ง อิทธิพลของความหนาเชิงแสงของหัวเผาวัสดุพรุน τ_b ต่อสมรรถนะการทำงานของหัวเผาก็ได้รับการศึกษาเช่นกัน สมรรถนะดังกล่าวได้แก่ โพรไฟล์อุณหภูมิ ปริมาณมลพิษ CO และ NO_x และบริเวณการเผาไหม้ที่เสถียร ซึ่งใช้เป็นเครื่องชี้วัดถึงขอบเขตการประยุกต์ใช้งานของหัวเผาวัสดุพรุนว่าได้กว้างมากน้อยเพียงไร

2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

รูปที่ 1 แสดงอุปกรณ์การทดลองซึ่งมีรายละเอียดของส่วนประกอบที่สำคัญๆ พร้อมทั้งมิติ หลักการทำงาน วิธีการทดลอง ตลอดจนเครื่องมือที่ใช้วัดค่าต่างๆ ได้แก่อุณหภูมิ T ความเข้มข้นแก๊สไอเสีย CO และ NO_x ความแตกต่างของความดันในห้องเผาไหม้กับบรรยากาศ ΔP อัตราการไหลของอากาศและเชื้อเพลิงเหลว (kerosene) ยังคงเหมือนกับที่ใช้ในระบบก่อนหน้า [1] ทุกประการ ยกเว้นมีการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญสามประการคือ (1) ติดตั้งแกนหมุนหัวเผาในแนวตั้งฉากกับแกนหัวเผาพร้อมอุปกรณ์ล็อกตำแหน่งหัวเผา เพื่อสามารถหมุนหัวเผาให้อยู่ในตำแหน่งมุมหัวเผา θ ใดๆ ได้ (2) เปลี่ยนแผ่นด้านบนซึ่งเป็นที่ติดตั้งเข็มฉีดยาน้ำมันเชื้อเพลิงให้มากดโดยตรงแนบกับผิวบนของ PB และให้ปลายเข็มจ่อติดกับผิวด้านบนของ PB โดยตรงในลักษณะเฉียงลงเมื่อเทียบกับมุม θ ดังรูปที่ 1 (3) ยังไม่ติดตั้งวัสดุพรุนแผ่นรีซี (porous emitter, PE) ค่าคงตัวและค่าตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ได้เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม [1] บ้างเล็กน้อยเพื่อให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการทดลองปัจจุบันดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1. เงื่อนไขการทดลอง

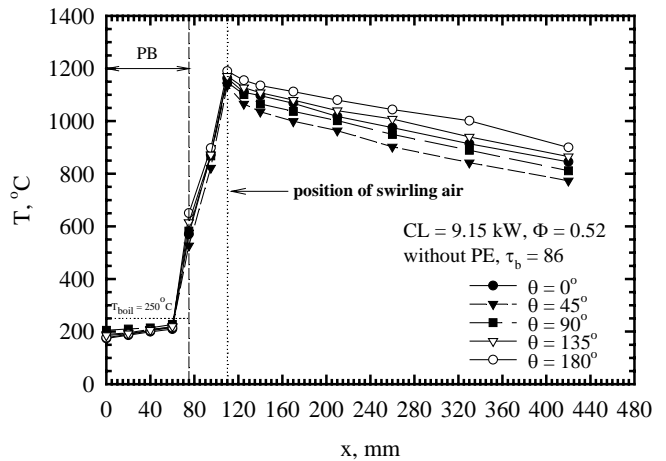
ปริมาณ	ค่า
Absorption coefficient of PB, K_b	1,150 - 1,750 1/m
Burner angle, θ	0 - 180 degree
Equivalence ratio, Φ	0.34 - 0.86
Lower heating value of kerosene	42 MJ/kg
Mesh size of the porous burner (PB),	60 - 100 mesh/inch
Optical thickness of the PB, $\tau_b = K_b \times 0.075$	86 - 131
Thermal input, CL	4 - 11 kW

3. ผลการทดลอง

กลไกการเผาไหม้ของหัวเผาวัสดุพอร์จะไม่ขอล่าช้าอีกในที่นี้ เพราะสามารถดูได้จากเอกสารอ้างอิง [1] สมรรถนะการเผาไหม้ได้รับการศึกษาทั้งอย่างเชิงคุณภาพ และอย่างเชิงปริมาณ การศึกษาอย่างเชิงคุณภาพนั้น กระทำได้โดยการสังเกตรูปร่างของเปลวไฟเป็นหลัก โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในการศึกษาอิทธิพลของมุมหัวเผา θ ซึ่งส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการเผาไหม้ผ่านรูปแบบการไหลซึมของน้ำมันภายในวัสดุพอร์ การสังเกตรูปแบบการไหลดังกล่าวไม่อาจสามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่าในขั้นตอนนี้เพราะหัวเผาวัสดุพอร์ (PB) จำเป็นต้องถูกอัดแน่นอยู่ในท่อเหล็กที่บดทรงกระบอกกลางเพื่อป้องกันการรั่วซึม และต้องทำงานภายใต้ความแตกต่างของอุณหภูมิที่สูงมากจนไม่อาจเปลี่ยนมาใช้เป็นแก้วใสแทนได้เพราะอาจเกิดการแตกร้าว นับเป็นข้อจำกัดของการทดลองนี้และต้องหาทางแก้ไขต่อไปในอนาคต สำหรับการศึกษอย่างเชิงปริมาณนั้น สามารถทำได้โดยการแปรเปลี่ยนค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องอย่างเป็นระบบ เช่น ความหนาเชิงแสงของหัวเผาวัสดุพอร์ (τ_b) ซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญมากของการศึกษานี้ สมรรถนะการเผาไหม้จะถูกรายงานในรูปของโพรไฟล์อุณหภูมิ ตามแนวแกนเตา ปริมาณการปลดปล่อย CO และ NO_x และบริเวณการเผาไหม้ที่เสถียร (stable combustion region) ทั้งนี้เพื่อทราบสภาวะการทำงานที่เหมาะสมของหัวเผา และเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการพัฒนาหัวเผาในขั้นต่อไปเพื่อให้สามารถใช้ประโยชน์ได้อย่างแท้จริงและอย่างเชิงพาณิชย์ในอนาคต

3.1 อิทธิพลของมุมหัวเผา θ

รูปที่ 2 แสดงอิทธิพลของ θ ต่อโพรไฟล์อุณหภูมิ T ตามแนวแกนเตาที่เงื่อนไขการทดลอง CL = 9.15 kW, $\Phi = 0.52$, $\tau_b = 86$ และไม่ติดตั้ง PE (without PE) การศึกษาเริ่มจาก $\theta = 0$ องศา (หรือ down-flow) แล้วรอให้ระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ก่อนบันทึกอุณหภูมิ T ความดันในห้องเผาไหม้ ΔP ปริมาณ CO และ NO_x จากนั้นเพิ่ม θ ขึ้นทีละ 15 องศา จนถึง $\theta = 180$ องศา (หรือ up-flow) เนื่องจากข้อมูลมีจำนวนมากและเพื่อป้องกันการสับสน จึงนำกราฟ T มาแสดงแค่ห้าเส้นเท่านั้นคือที่ $\theta = 0, 45, 90, 135$ และ 180 องศา และเป็นการเพียงพอที่จะสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนถึงแนวโน้มของปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น โพรไฟล์อุณหภูมิ T ตามแนวแกนเตา โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่เริ่มจากผิวหน้าของหัวเผาวัสดุพอร์ไปทางด้านปลายทางออกของเตา ไม่ได้แปรเปลี่ยนอย่างเชิงเส้นกับมุม θ กล่าวคือ กรณี $\theta = 0$ องศา จะให้ค่าอุณหภูมิระดับปานกลาง เมื่อ $\theta = 45$ องศา หรือการไหลเอียงลง (inclination down-flow) ให้ค่าอุณหภูมิต่ำสุด เมื่อ $\theta = 90$ องศา หรือการไหลในแนวระนาบ (horizontal-flow) ให้ค่าอุณหภูมิปานกลางและต่ำกว่าของ down-flow เล็กน้อย เมื่อ $\theta = 135$ องศา หรือการไหลเอียงขึ้น (inclination up-flow) ให้ค่าอุณหภูมิเพิ่มขึ้น และสุดท้าย เมื่อ $\theta = 180$ องศา จะให้ค่าอุณหภูมิสูงที่สุดตลอดแกนเตา ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากสาเหตุหลายประการ เช่น รูปแบบการไหล (flow pattern) ของน้ำมันภายในวัสดุพอร์ ขบวนการผสม (mixing process) ระหว่าง



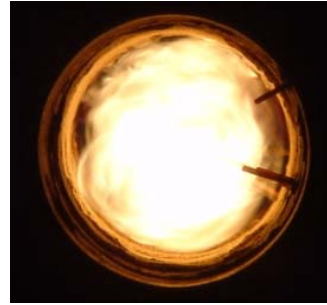
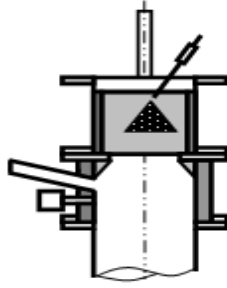
รูปที่ 2 อิทธิพลของ θ ต่อ T

ไอน้ำมันกับอากาศหมุนวนในห้องเผาไหม้ และอิทธิพลของแรงลอยตัวที่แตกต่างกัน เป็นต้น ซึ่งสามารถอาศัยรูปถ่ายของเปลวไฟ (รูปที่ 3) ความดันในห้องเผาไหม้ ΔP (รูปที่ 4) และปริมาณการเกิด CO และ NO_x (รูปที่ 5) ที่แปรเปลี่ยนตามมุม θ ประกอบการอธิบายได้ดังนี้

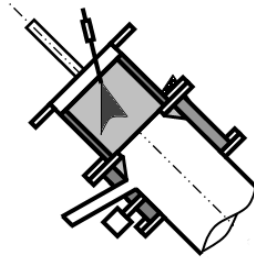
กรณี $\theta = 0$ องศา (down-flow) (รูปที่ 3 ก) ให้เปลวไฟกระจายอย่างสม่ำเสมอดีมาก อิทธิพลของแรงโน้มถ่วงอาจมีค่าเหนือแรงตึงผิวของน้ำมัน ทำให้คาดหมายได้ว่ารูปแบบการซึมไหลผ่านของน้ำมันในวัสดุพอร์น่าจะมีรูปร่างเป็นกรวยตันคว่ำในแนวตั้ง (vertically inverted solid cone) และสมมาตรตามแนวแกนของวัสดุพอร์ที่อยู่ในแนวตั้งเช่นกัน เกิดผิวหน้าของการระเหย (evaporation front) รูปวงกลมมีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับของวัสดุพอร์ (circular evaporation front) จึงให้การระเหยของน้ำมันที่พึงประสงค์เพราะกระจายอย่างสม่ำเสมอ (uniformly distributed) ตลอดหน้าตัดที่ทางออกของหัวเผาวัสดุพอร์ ให้การดึงดูด (entrainment) ของไอเชื้อเพลิงเข้ามาผสมกับอากาศหมุนวนอย่างสมดุลที่ทุกทางออกของเจ็ทอากาศหมุนวน ให้การผสมคลุกเคล้า (mixing) ที่ดีจนส่วนผสมมีความเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous mixture) และนำไปสู่การเผาไหม้ที่พึงประสงค์ เปลวไฟจึงกระจายอย่างสม่ำเสมอตลอดหน้าตัดของห้องเผาไหม้ดังที่ปรากฏ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากอิทธิพลของแรงลอยตัว (buoyancy force effect) ที่มากของไอเสีร้อน ส่งผลให้เกิดการอันของไอเสีย ความดัน ΔP ในห้องเผาไหม้จึงเพิ่มสูงขึ้นกว่ากรณีอื่นๆ ดังแสดงในรูปที่ 4 ได้ปริมาณ CO = 160 ppm และ NO_x = 110 ppm ตามที่ปรากฏในรูปที่ 5 ถ้าหากเพิ่มค่ามุม θ ให้มากขึ้นกว่านี้ อุณหภูมิ T ปริมาณ NO_x และความดัน ΔP มีแนวโน้มลดลงในขณะที่ปริมาณ CO กลับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

กรณี $\theta = 45$ องศา (รูปที่ 3 ข) ให้เปลวไฟไม่เต็มหน้าตัด ให้การเผาไหม้เร็วที่สุดในบรรดาคณิศทั้งหมด โดยสังเกตจากปริมาณ CO มีค่าสูงสุดประมาณ 200 ppm ในขณะที่อุณหภูมิ T และปริมาณ NO_x มีค่าต่ำสุด ดังแสดงในรูปที่ 5 และ 2 ตามลำดับ เหตุที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากเกิดรูปแบบการไหลที่ไม่พึงประสงค์ของน้ำมันภายในวัสดุพอร์ แรงโน้มถ่วงอาจยังมีอิทธิพลเหนือแรงตึงผิวของน้ำมัน รูปแบบการไหลของน้ำมันอาจมีรูปร่างเป็นกรวยตันคว่ำในแนวตั้งเช่นเดิมแต่ไม่

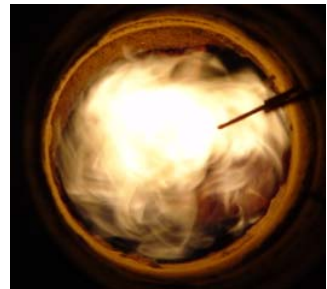
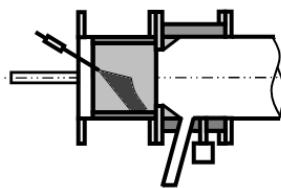
(ก) $\theta = 0$ องศา (down-flow)



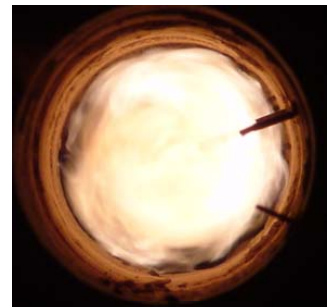
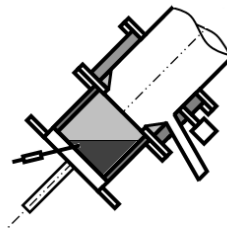
(ข) $\theta = 45$ องศา (inclination down-flow)



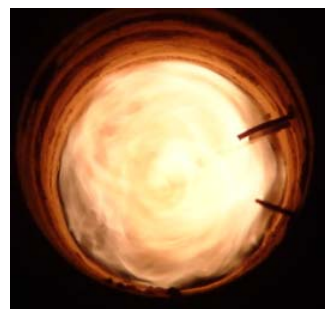
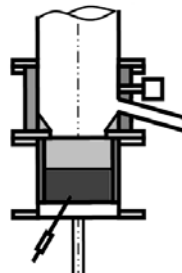
(ค) $\theta = 90$ องศา (horizontal-flow)



(ง) $\theta = 135$ องศา (inclination up-flow)



(จ) $\theta = 180$ องศา (up-flow)



รูปที่ 3 อิทธิพลของ θ ต่อรูปแบบการไหลของน้ำมันภายใน PB และรูปร่างเปลวไฟ (CL = 9.15 kW, $\Phi = 0.52$, $\tau_b = 86$, without PE)

สมมาตรตามแนวแกนของหัวเผาวัสดุพูน PB อีกต่อไป น้ำมันอาจไหล
 เทอย่างหนักไปที่จุดใดจุดหนึ่งที่มีผิวหน้าทางออกของหัวเผาวัสดุพูน PB
 ตามแนวที่มีความต้านทานการไหลต่ำสุด พื้นที่ผิวหน้าการระเหยลดลง
 และไม่ป็นรูปวงกลมอีกต่อไป ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะได้สภาวะที่พึง
 ประสงค์ต่อการระเหย การผสม และการเผาไหม้ดังที่ได้กล่าวมาแล้วที่
 $\theta = 0$ องศา กอปรกับที่ตำแหน่ง $\theta = 45$ องศา นี้ อิทธิพลของแรงลอย
 ตัวยังคงมีมากอยู่ จึงเป็นปัจจัยลบช่วยเสริมให้การเผาไหม้เลวลงไปอีก
 จนถึงจุดต่ำสุดตามที่กล่าวมาข้างต้น

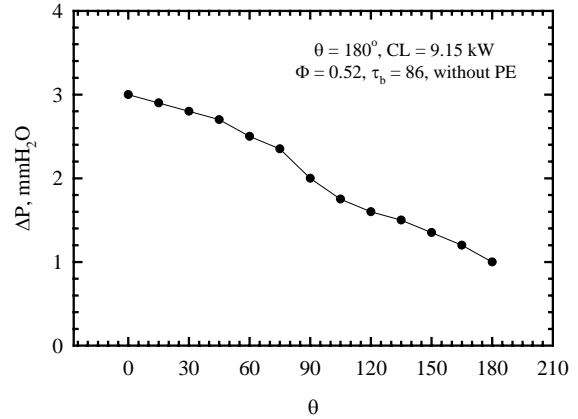
กรณี $\theta = 90$ องศา (รูปที่ 3 ค) ให้เปลวไฟไม่ค่อยดีนัก ความไม่
 สมมาตรของกรวยต้นน้ำมันเชื้อเพลิงเมื่อเทียบกับแนวแกนของหัวเผา
 วัสดุพูน PB ได้มาถึงจุดเลวที่สุด พื้นที่การระเหยอาจลดลงอย่างมาก
 แต่สมรรถนะการเผาไหม้กลับเริ่มดีขึ้นเพราะอุณหภูมิ T (รูปที่ 2) และ
 ปริมาณ NO_x (รูปที่ 5) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในขณะที่ปริมาณ CO (รูปที่
 5) มีค่าลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการลดลงของอิทธิพลของแรงลอยตัว
 ตามมุม θ ที่เพิ่มขึ้น ความดัน ΔP ในห้องเผาไหม้ลดลงอย่างเห็นได้ชัด
 ดังแสดงในรูปที่ 4 อากาศบริสุทธิ์ไหลเข้าสู่บริเวณการเผาไหม้ได้ดีขึ้น
 เพราะการระบายไอเสียออกจากห้องเผาไหม้เป็นไปโดยง่าย

กรณี $\theta = 135$ องศา (รูปที่ 3 ง) ให้เปลวไฟกระจายอย่าง
 สม่ำเสมอดีมาก อิทธิพลของแรงโน้มถ่วงอาจยังมีค่าเหนือกว่าแรงตึงผิว
 น้ำมันส่วนใหญ่จึงอาจไหลมาคั่งสะสมอยู่ที่ขอบด้านล่างของหัวเผาวัสดุ
 พูน PB แทนที่จะไหลโดยตรงไปที่ผิวหน้าของวัสดุพูน รูปทรงของ
 ปริมาตรน้ำมันภายในวัสดุพูนอาจเปลี่ยนแปลงจากกรวยต้นคั่วว่าเป็น
 ทรงกระบอกตันถูกตัดเฉียง และอาจเป็นข้อดีของรูปทรงดังกล่าวได้
 เพราะก่อให้เกิดพื้นที่การระเหยขนาดใหญ่รูปวงรี (ellipse evaporation
 front) ในแนวระนาบภายในวัสดุพูน อาจช่วยส่งเสริมการระเหยได้เป็น
 อย่างดี และนำไปสู่การเผาไหม้ที่พึงประสงค์ได้ ถึงแม้ว่าความไม่
 สมมาตรของปริมาตรน้ำมันตามแนวแกนของวัสดุพูนจะยังคงมีอยู่ แต่
 แทนจะไม่มีผลในทางลบแต่อย่างใด ยิ่งไปกว่านั้น อิทธิพลของแรงลอย
 ตัวที่ลดลงไปมากแล้วตาม ΔP ที่ลดลงดังรูปที่ 4 ยิ่งช่วยส่งเสริมการ
 เผาไหม้ให้ดียิ่งขึ้น ได้อุณหภูมิสูงขึ้นขณะที่ CO มีแนวโน้มลดลง

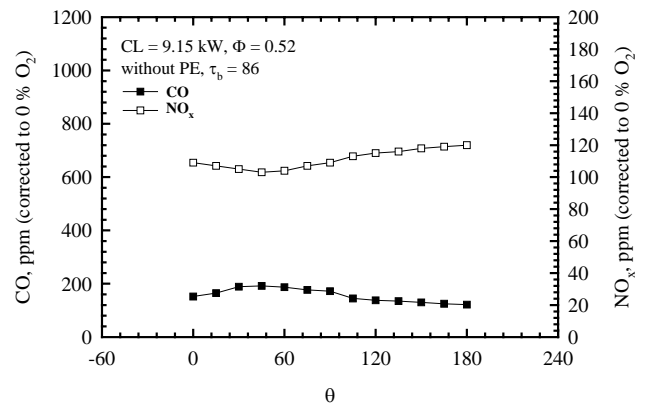
กรณีมุม $\theta = 180$ องศา (รูปที่ 3 จ) ให้เปลวไฟกระจายอย่าง
 สม่ำเสมอตลอดหน้าตัดหัวเผาวัสดุพูน PB ดีมาก และนับเป็นตำแหน่ง
 ที่ดีที่สุด พื้นที่การระเหยเปลี่ยนจากรูปวงรีเป็นรูปวงกลมโดยสมบูรณ์
 และอยู่ในแนวระนาบขนานกับผิวหน้าของหัวเผาวัสดุพูน PB ดังนั้นจึง
 ทำให้ได้การเผาไหม้ที่พึงประสงค์ดังที่กล่าวมาข้างต้นทุกประการ กอปร
 กับที่ตำแหน่งนี้ อิทธิพลของแรงลอยตัวมีค่าต่ำสุดสังเกตจาก ΔP มีค่า
 ต่ำสุดดังรูปที่ 4 ก็ยิ่งช่วยส่งเสริมการเผาไหม้ได้อย่างดีจน CO มีค่าต่ำ
 สุดประมาณ 100 ppm (รูปที่ 5) ขณะที่อุณหภูมิ T มีค่าสูงสุด (รูปที่ 2)
 และ NO_x มีค่าสูงสุดประมาณ 120 ppm ตามที่ปรากฏในรูปที่ 5

3.2 อิทธิพลของ τ_b

จากหัวข้อก่อนหน้าพบว่าสมรรถนะการเผาไหม้ขึ้นกับรูปแบบ
 การไหลซึมของน้ำมันภายในวัสดุพูนค่อนข้างมาก ซึ่งถูกกำหนดโดย
 มุมหัวเผา θ ทำให้การประยุกต์ใช้งานหัวเผาวัสดุพูนมีข้อจำกัดใ
 ใช้งานได้ดีที่สุดที่ตำแหน่ง $\theta = 180$ องศา หรือ up-flow เท่านั้น เพื่อให้



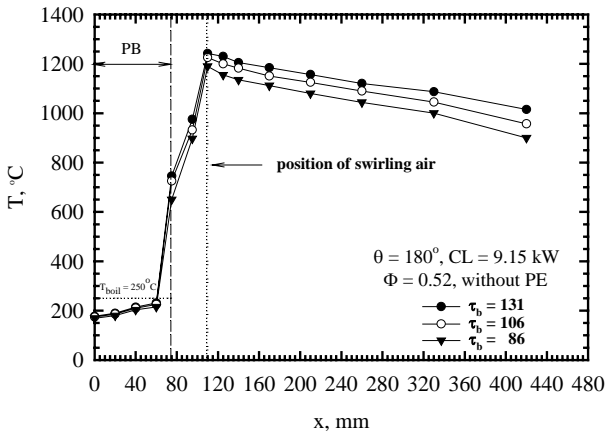
รูปที่ 4 อิทธิพลของ θ ต่อ ΔP



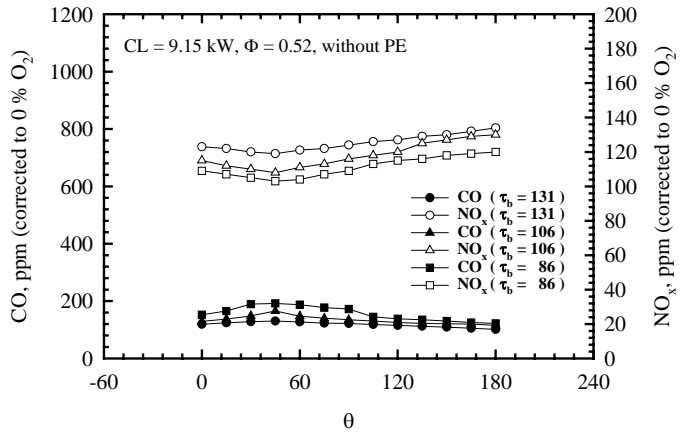
รูปที่ 5 อิทธิพลของ θ ต่อ CO และ NO_x

เกิดความยืดหยุ่นต่อการใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพที่ทุกมุมหัวเผา
 จำเป็นต้องปรับปรุงรูปแบบการไหลซึมของน้ำมันภายในวัสดุพูนเสีย
 ใหม่ โดยให้ขึ้นกับมุมหัวเผาน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ หรือไม่ขึ้นกับมุม
 หัวเผาอีกต่อไป วิธีการหนึ่งที่เป็นไปได้และนำเสนอในที่นี้คือเพิ่มความ
 ความถี่ของตาข่ายสแตนเลส (mesh size) ที่นำมาทำเป็นหัวเผาวัสดุ
 พูน (PB) ในการทดลองนี้ได้ใช้ตาข่ายซึ่งมีความถี่สามขนาดคือ 60,
 80 และ 100 mesh/inch ซึ่งเมื่อนำมาคิดเป็นความหนาเชิงแสง (optical
 thickness) ของหัวเผาวัสดุพูน (τ_b) แล้วมีค่าเป็น 86, 106 และ 131
 ตามลำดับ ความหนาเชิงแสงของวัสดุพูนคือปริมาณไร้หน่วยที่ใช้บอก
 ถึงความสามารถในการดูดกลืนการแผ่รังสีความร้อนได้มากน้อยเพียงไร
 มีค่าเท่ากับผลคูณระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนการแผ่รังสีความร้อน
 ของวัสดุพูน K_b (ซึ่งคำนวณได้จากความถี่ของตาข่าย) และความหนา
 เชิงเรขาคณิตของวัสดุพูน (ในที่นี้มีค่า 75 mm)

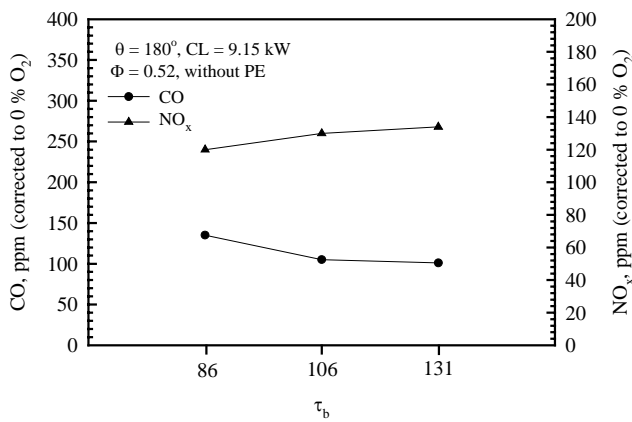
รูปที่ 6 แสดงตัวอย่างอิทธิพลของ τ_b ต่อ T ที่เงื่อนไขการทดลอง
 CL = 9.15 kW, $\Phi = 0.52$, $\theta = 180$ องศา และไม่ติดตั้ง PM พบว่า
 เมื่อ τ_b เพิ่มขึ้น อุณหภูมิ T เพิ่มขึ้นโดยตลอดแกน x ยกเว้นในช่วง
 ก่อนการระเหย ($T_1 - T_4$) ซึ่งมีค่าไม่ค่อยแตกต่างกันมากนัก การเผา
 ไหม้สมบูรณ์ดีขึ้นเพราะให้ปริมาณ CO ลดลงในขณะที่ปริมาณ NO_x มี
 แนวโน้มสูงขึ้นดังแสดงในรูปที่ 7 อิทธิพลของ τ_b ต่อ T ที่มุม θ ต่าง ๆ
 ก็ยังคงมีแนวโน้มเหมือนกับตัวอย่างดังในรูปที่ 6 ($\theta = 180$ องศา) จึง



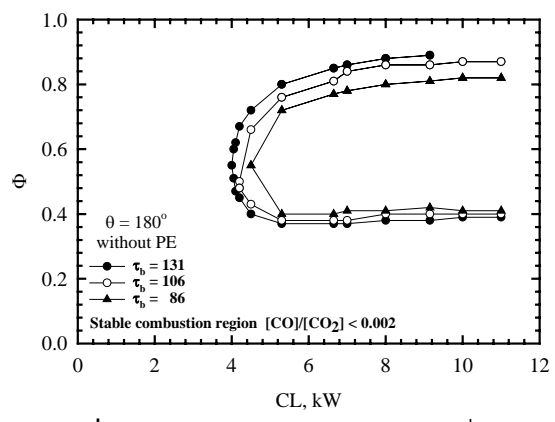
รูปที่ 6 ตัวอย่างอิทธิพลของ τ_b ต่อ T



รูปที่ 8 อิทธิพลของ τ_b ต่อ CO และ NO_x ที่ θ ต่าง ๆ



รูปที่ 7 ตัวอย่างอิทธิพลของ τ_b ต่อ CO และ NO_x



รูปที่ 9 อิทธิพลของ τ_b ต่อบริเวณการเผาไหม้ที่เสถียร

ไม่จำเป็นต้องแสดงทั้งหมดทุกมุมหัวเผา อย่างไรก็ตาม อิทธิพลของ τ_b ต่อปริมาณ CO และ NO_x ที่ทุกมุมของหัวเผา θ จำเป็นต้องถูกแสดงไว้ดังรูปที่ 8 พบว่า ที่ $\tau_b = 131$ ให้ CO มีค่าเกือบคงที่ประมาณ 110 ppm และแทบจะไม่ขึ้นกับมุมหัวเผา θ อีกต่อไป ดังนั้น $\tau_b = 131$ จึงเป็นค่าที่เหมาะสมและไม่จำเป็นต้องมีค่ามากไปกว่านี้เพราะจะเพิ่มความดันตกคร่อมวัสดุพอร์นให้มากขึ้น เพิ่มแรงเสียดทานต่อการไหลและอาจเกิดการอุดตันได้ง่ายอีกด้วย

เนื่องจากว่าที่ $\tau_b = 131$ ให้สมรรถนะการเผาไหม้ดีที่สุด และไม่ขึ้นกับมุม θ อีกต่อไปแล้ว ดังนั้นการทดลองที่เหลือทั้งหมดจากนี้ไปจะกระทำที่ $\tau_b = 131$ คงที่ตลอด และกำหนดให้ $\theta = 180$ องศาที่เป็นตัวแทนการทดลองเพื่อความสะดวก

3.3 บริเวณการเผาไหม้ที่เสถียร

นิยามของบริเวณการเผาไหม้ที่เสถียรในที่นี้หมายถึงสภาวะการเผาไหม้ (Φ และ CL) ที่ให้อัตราส่วน $[\text{CO}]/[\text{CO}_2] < 0.002$ เมื่อ $[\text{CO}]$ และ $[\text{CO}_2]$ คือความเข้มข้นของ CO และ CO_2 ตามลำดับโดยคิดที่ 0 % ของออกซิเจนส่วนเกิน บริเวณการเผาไหม้ที่เสถียรยิ่งกว้างมากเท่าไร ยิ่งดีเท่านั้น เพราะแสดงถึงสมรรถนะที่สูงของหัวเผา หัวเผาสามารถทำงานได้ในช่วงของ Φ และ CL ที่กว้างโดยยังคงให้

ประสิทธิภาพการเผาไหม้ (combustion efficiency) ที่สูง บริเวณการเผาไหม้ที่เสถียรสามารถถูกขยายให้กว้างออกไปได้โดยเลือกใช้ τ_b ที่สูงอย่างเหมาะสมดังแสดงในรูปที่ 9 พบว่า $\tau_b = 131$ เป็นค่าที่สูงพอเหมาะ หากสูงเกินกว่านี้ก็ไม่มีประโยชน์แต่กลับจะส่งผลในทางลบอย่างอื่นตามมาดังที่ได้กล่าวมาแล้วในตอนต้น

4. สรุป

ประสบความสำเร็จในการศึกษาและเข้าใจอิทธิพลของมุมหัวเผา θ ได้หัวเผาวัสดุพอร์นที่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงที่ทุกมุมของหัวเผา บริเวณการเผาไหม้ที่เสถียรกว้าง ปลอดภัยมลพิษต่ำ มีศักยภาพสูงที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานจริงแทนหัวเผาไหม้แบบสเปรย์ทั่วไปได้ในอนาคตอันใกล้

เอกสารอ้างอิง

[1] S. Jugjai, et al. "Enhancement of Evaporation and Combustion of Liquid Fuels through Porous Media", Experimental Thermal and Fluid Science, 2003, Vol. 27, No. 8, pp. 901 - 909.
 [2] M. Kaplan and M.J. Hall, "The Combustion of Liquid Fuels within a Porous Media Radiant Burner", Experimental Thermal and Fluid Science, 1995, Vol. 11, No. 1, pp.13 - 20.