

การศึกษาย่านการทำงานของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงที่มีมุมผนังทางออก 90 องศา The Investigation on Operation Range of Biomass Pulverized Burner with 90 Degrees of Outlet Wall Angle

ชินภัทร ชูระการ, ชนภัทร ภัคดีวรวงษ์ และ จารุวัตร เจริญสุข*

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

*ติดต่อ: โทรศัพท์ : 023 264 197, โทรสาร : 023 264 198, E-mail : kcjaruw@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อออกแบบและพัฒนาหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผง โดยจะเป็นการนำแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ในการเผาไหม้ ที่ผ่านการจำลองเทียบเคียงกับเตาเผาเชื้อเพลิงถ่านหินผง มาประยุกต์ใช้กับการจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผงสำหรับหัวเผาแบบ pre-chamber ขนาด 1 MW เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำหัวเผาชนิดนี้มาใช้ในงานจริง จากการศึกษาพบว่าหัวเผา pre-chamber ที่มีมุมผนังบริเวณทางออกเท่ากับ 90 องศา ทำให้เส้นทางเดินของอนุภาคมีการฟุ้งกระจายที่มากขึ้นภายใน pre-chamber ส่งผลให้อนุภาคสามารถทำปฏิกิริยาได้อย่างต่อเนื่อง จึงนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของระยะเวลาในการเผาไหม้ ซึ่งช่วยให้สามารถถ่วงความเสถียรภาพในการเผาไหม้ไว้ได้ ในส่วนของการศึกษาเพื่อตรวจสอบย่านการทำงานที่เหมาะสมสำหรับหัวเผาดังกล่าวพบว่าหัวเผานี้มีย่านการทำงานอยู่ระหว่าง 450 kW ถึง 1 MW ซึ่งจะเป็นช่วงที่หัวเผาสามารถรักษาเสถียรภาพในการเผาไหม้ และให้การเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ซึ่งหากเพิ่มกำลังความร้อนจากการเผาให้สูงกว่า 1 MW จะเกิดปรากฏการณ์การเป่าดับ (blow-off) แต่หากลดกำลังความร้อนจนต่ำกว่า 450 kW จะเกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้มีอนุภาคชาร์ และสารระเหยหลงเหลือไปกับไอเสีย ซึ่งถือเป็นการทิ้งพลังงานในส่วนดังกล่าวไปโดยไร้ประโยชน์

คำหลัก: กระบวนการเผาไหม้; การจำลอง; เชื้อเพลิงชีวมวล

Abstract

This work involves with the design and development of a pulverized biomass burner. In order to assess its capability on real plant, the validated mathematical model for coal combustion was applied for simulation of pulverized biomass fuel with pre-chamber burner with sizing of 1 MW. From simulation, it was found that pre-chamber burner with 90 degrees of outlet wall angle could improve the distribution of particle trajectories and their average residence time was also increased. This improvement had caused particles reacting continuously in the pre-combustion chamber thus enabling combustion stability. As part of a study to investigate the proper operation range for pre-chamber burner with 90 degrees of outlet wall angle, we found that burner can be operated at 450 kW up to 1 MW, which can maintain the stability and provide complete combustion. If increasing the thermal throughput greater than 1 MW, Blow-Off phenomenon would occur. However reducing the thermal throughput less than 450 kW would cause incomplete combustion. A result, char particles and volatile were left unburned at the exhaust indicating loss of energy.

AEC-101

Keywords: Combustion; Simulation; Biomass

1. บทนำ

ปัจจุบันพลังงานทดแทนถือได้ว่าเป็นตัวเลือกอันดับแรกๆที่ทั่วโลกให้ความสนใจ และได้รับความสำคัญเป็นอย่างมากในประเทศไทย ซึ่งสังเกตได้จากแผนการกำหนดนโยบายในการพัฒนาประเทศที่สนับสนุนให้มีการหาแหล่งพลังงานทดแทนต่างๆ พลังงานชีวมวล (biomass) จึงเป็นตัวเลือกที่น่าสนใจซึ่งพลังงานชีวมวลนั้นมาจากองค์ประกอบของสิ่งมีชีวิตหรือสารอินทรีย์ต่างๆรวมทั้งวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเช่น ไม้ฟืน แกลบ และกากอ้อย เป็นต้น โดยชีวมวลนั้นมีข้อดีคือจะก่อให้เกิดแก๊สมลพิษ เช่น SO₂ และ NO_x ในปริมาณที่น้อย

สำหรับการศึกษาในอดีตของทีมีวิจัย ชนภัทร์ ภักดีวรวงศ์ และคณะ [1] ได้นำแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ในการเผาไหม้ ที่ผ่านการจำลองเทียบเคียงกับเตาเผาไหม้เชื้อเพลิงถ่านหินผง มาประยุกต์ใช้กับการจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผงสำหรับหัวเผา pre-chamber ขนาด 1 MW พบว่า pre-chamber ที่มีมุมผนังบริเวณทางออก 90 องศาทำให้เส้นทางเดินของอนุภาคมีการฟุ้งกระจายที่มากขึ้นภายใน pre-chamber ส่งผลให้อนุภาคสามารถทำปฏิกิริยาได้อย่างต่อเนื่อง และคงความเสถียรภาพในการเผาไหม้ไว้ได้โดยไม่มีการเกิดปรากฏการณ์การเป่าดับ (blow - off) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาย่างการทำงานของหัวเผาดังกล่าว เพื่อทำนายถึงความเป็นไปได้ในการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่อไป

2. สมการพื้นฐานของแบบจำลอง

2.1 แบบจำลองของแก๊ส [2]

การเคลื่อนที่ของแก๊สได้อธิบายในระนาบสองมิติ โดยที่ Reynolds - average Navier–Stokes (RANS) ถูกกำหนดให้อยู่ในสภาวะคงตัว (Steady-State) และเสริมด้วยแบบจำลอง Standard $k-\epsilon$ Turbulence ซึ่งสมการควบคุม (Governing Equation) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\nabla \cdot (\rho U \Phi) - \Gamma_{eff} \nabla^2 \Phi = S_\Phi \quad (1)$$

เมื่อ U คือเวกเตอร์ความเร็วเฉลี่ย, ρ คือความหนาแน่น และ S_Φ คือ source term โดยที่สมการควบคุมที่ใช้สำหรับแก๊สปัญหาการเคลื่อนที่ของแก๊สประกอบด้วย มวล (m), ความเร็วตามแนวแกน (u, v) พลังงานจลนศาสตร์ของความปั่นป่วน (k) อัตราการสลายตัว (ϵ) เอนทัลปี (H) และเศษส่วนเชิงมวลของแต่ละสปีชีส์ (Y_i) ดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่ง μ_i คือความหนืดของการปั่นป่วน λ คือ การนำความร้อน และ Γ คือการแพร่ของโมเลกุลของแต่ละสปีชีส์

ตารางที่ 1 ตัวแปร Φ , Γ_{eff} และ S_Φ ในสมการควบคุมสำหรับแก๊ส

	Φ	Γ_{eff}	S_Φ
มวล	1	0	\dot{m} , มวลรวมที่ถ่ายเทออกจากอนุภาค
โมเมนตัม	u, v	$\mu + \mu_t$	F_D , แรงจุด (drag force) ของอนุภาค
พลังงาน	H	$\lambda + \frac{\mu_t}{\sigma_H}$	S_H , ปฏิกิริยาทางความร้อน และการพาหรือการแผ่รังสีความร้อนออกจากอนุภาค
สัดส่วนเชิงมวลของแก๊ส i	Y_i	$\Gamma + \frac{\mu_t}{\sigma_{Y_i}}$	S_p , อัตราการทำปฏิกิริยาเคมีของแก๊ส i
พลังงานจลน์ของความปั่นป่วน	k	$\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}$	$P_k - \rho \epsilon$
อัตราการกระจายตัวของความปั่นป่วน	ϵ	$\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}$	$C_1 \frac{\epsilon}{k} P - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{K}$

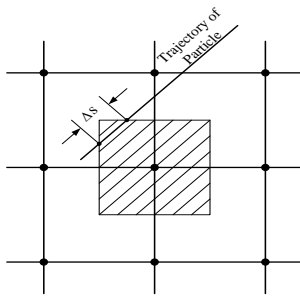
โดย $\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon}$, $P_k = (\mu + \mu_t) \nabla U \cdot (\nabla U + (\nabla U)^T)$

ค่าคงที่ : $C_\mu = 0.09$, $C_1 = 1.44$, $C_2 = 1.92$

AEC-101

2.2 แบบจำลองของอนุภาค [3]

การกระจายตัวของอนุภาคถูกจำลองโดยใช้วิธี Lagrangian การถ่ายเทมวล โมเมนตัม และพลังงานของอนุภาคที่มีผลต่อแก๊สเฟสจะเกี่ยวข้องกับตำแหน่งที่อนุภาคเคลื่อนที่ผ่าน สามารถคำนวณได้โดยเทคนิค Particle Source In Cell Techniques (PSICT) [4] ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 การกระจายตัวของอนุภาคโดยใช้วิธี Lagrangian ผ่านเซลล์

2.2.1 สมการอนุรักษ์มวล

$$\frac{dm_p}{dt} = R_m \quad (2)$$

R_m คืออัตราเชิงปริมาตรของมวลที่ออกจากอนุภาคสู่แก๊ส โดยการปลดปล่อยสารระเหยหรือซาร์ในการเผาไหม้ โดยที่

$$R_m = k_0 \exp\left(-\frac{E_{dvol}}{R_u T}\right) (V^* - V) \quad (3)$$

V คือปริมาณสะสมของสารระเหยที่ปล่อยออกมา, V^* คือปริมาณทั้งหมดของสารระเหยภายในถ่านหิน, R_u คือค่าคงที่สากลของแก๊ส, T คือค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์, k_0 คือค่าคงที่ของปฏิกิริยาที่ได้จากการทดลอง และ E_{dvol} คือพลังงานกระตุ้น

2.2.2 สมการอนุรักษ์โมเมนตัม และการเคลื่อนที่เฉลี่ย

$$\frac{dm_p \tilde{u}_i}{dt} = \sum \bar{F}_i \quad (4)$$

พจน์ทางด้านขวาเกิดจากแรงภายนอก ซึ่งส่วนใหญ่เกิดจากแรงจุดที่กระทำต่ออนุภาค [1,3]

2.2.3 สมการอนุรักษ์พลังงาน

สมดุลพลังงานเกิดจากผลรวมการถ่ายเทความร้อนของอนุภาค ความร้อนจากการเผาไหม้ของซาร์และความร้อนจากการระเหยในกระบวนการปล่อยสารระเหย เป็นต้น ดังนั้นสมการอนุรักษ์พลังงานคือ

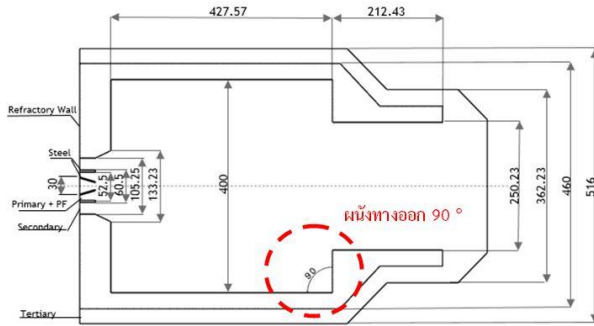
$$\frac{d(m_p c_p T_p)}{dt} = m_p \dot{Q}_i - c_p T_p \left(-\frac{dm_p}{dt}\right) - L_v \frac{dm_p}{dt} \quad (5)$$

เมื่อ L_v คือความร้อนที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาย่อยสลายเชื้อเพลิงในรูปของแข็งกลายเป็นเชื้อเพลิงแก๊ส (thermal decomposition) (kJ/kmol), c_p คือความจุความร้อนจำเพาะ (kJ/kmol-K), T_p คืออุณหภูมิ

3. ลักษณะของเตาเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล

รูปที่ 2 แสดงภาพลักษณะของหัวเผา pre-chamber สำหรับเตาเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผงที่มีขนาดเท่ากับ 1 MW โดยที่เส้นผ่านศูนย์กลางภายในหัวเผา pre-chamber มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 0.4 เมตร และมีความยาวประมาณ 0.8 เมตร ขณะที่ตำแหน่งผนังของ pre-chamber ถูกออกแบบมาเป็นผนังปูนทนไฟ ในขณะที่เตาเผา จะถูกจำลองให้มีลักษณะเป็นทรงกระบอกแนวนอน มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของเตาเผาเท่ากับ 0.6 เมตร และมีความยาว 3.0 เมตร

AEC-101

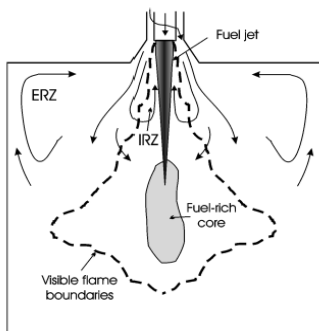


รูปที่ 2 ลักษณะของหัวเผา pre-chamber

ลักษณะของอากาศพลศาสตร์สำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงผงสามารถแบ่งได้เป็นสองลักษณะ คือ บริเวณที่มีการหมุนวนของกระแสภายในแกนกลางของเตาเผา (Internal Recirculation Zone, IRZ) และบริเวณที่มีการหมุนวนของกระแสภายนอกแกนกลางของเตาเผา (External Recirculation Zone, ERZ) สังเกตได้ดังรูปที่ 3

3.1 เงื่อนไขที่ใช้การเผาไหม้ชีวมวล

การไหลกำหนดให้เป็นแบบสมมาตรรอบแนวแกน 2 มิติ (2D-Axisymmetric) และสภาวะคงตัว (Steady State) โดยมีอัตราการก่อกำเนิดของมวลและความร้อนที่ถ่ายโอนมาจากอนุภาคที่จุดใดจุดหนึ่งในโดเมนของก๊าซเป็นแบบคงตัวเช่นกัน ในทำนองเดียวกันนั้นใช้แบบจำลองการเผาไหม้ Species Transport แบบจำลองการปั่นป่วน $k-\epsilon$ Standard โดยมีการเพิ่มค่าคงที่ของอัตราการแพร่ออกซิเจนภายในพื้นผิวอนุภาคคาร์บอน (C_1) และอัตราจลนศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยาของคาร์บอน (C_2) ในอัตราส่วน 2.5 เท่าของค่าเริ่มต้น และใช้แบบจำลองการติดตามแบบสุ่ม (Random Walk) โดยที่ค่า Kinetic Parameters ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 2



รูปที่ 3 รูปแบบของกระแสการไหลในเตาเผาไหม้ [5]

ตารางที่ 2 Kinetic Parameters สำหรับแบบจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล

Kinetic parameters :	
Devolatilization, E_{dvol} (J/kg-mol)	7.40×10^7
Pre-Exponential Factor	3.82×10^5
Char reaction, E (J/kg-mol)	7.90×10^7

สำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้ในการศึกษาคือ หญ้าเนเปียร์ ซึ่งมีสมบัติและองค์ประกอบดังแสดงในตารางที่ 3 โดยที่เป้าหมายของการจำลองในขั้นต้น หัวเผาจะต้องสามารถเผาไหม้ได้อย่างต่อเนื่องที่กำลังความร้อน 1 MW ตารางที่ 4 แสดงถึงเงื่อนไขการป้อนอากาศ ปริมาณอากาศ และเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้ที่กำลังความร้อน 1MW

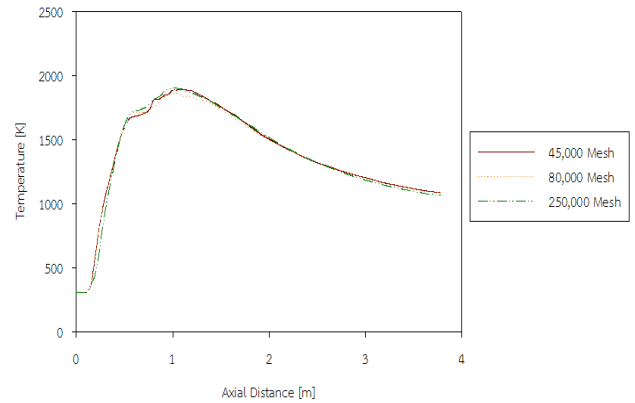
ตารางที่ 3 คุณสมบัติของหญ้าเนเปียร์อัดแท่ง (pellet) (Thailand Institute of Scientific and Technological Research)

การวิเคราะห์โดยประมาณ	(% โดยน้ำหนัก)
สารระเหย	66.91
คาร์บอนคงตัว	20.22
ความชื้น	4.57
ขี้เถ้า	8.30
การวิเคราะห์โดยละเอียด	(% โดยน้ำหนัก)
คาร์บอน	45.92
ไฮโดรเจน	6.58
ไนโตรเจน	8.30
กำมะถัน	0.11
ออกซิเจน	39.09
ปริมาณความร้อน (MJ/kg)	17.22

ตารางที่ 4 เงื่อนไขการจำลองสำหรับเตาเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล

AEC-101

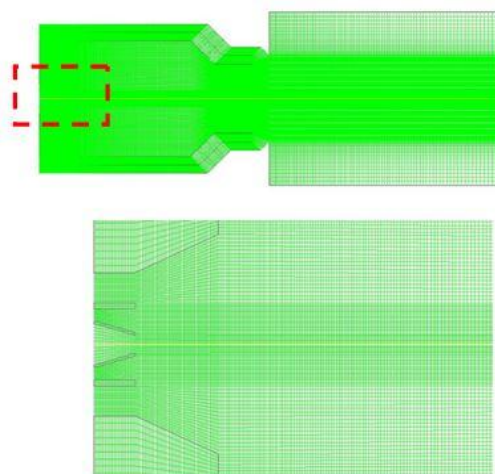
Primary pipe:	Air flow rate (kg/s)	6.613×10^{-2}
	Swirl number	0.0
	อุณหภูมิ (K)	308
อัตราการป้อนเชื้อเพลิงชีวมวล (kg/s)		5.807×10^{-2}
Secondary pipe:	Air flow rate (kg/s)	2.645×10^{-1}
	Swirl number	1.03
	อุณหภูมิ (K)	308
Tertiary pipe:	Air flow rate (kg/s)	1.102×10^{-1}
	Swirl number	0.0
	อุณหภูมิ (K)	308
อากาศส่วนเกินในการเผาไหม้ (%)		30



รูปที่ 5 การวิเคราะห์จำนวน Element ที่เหมาะสม

3.2 ลักษณะของกริดที่ใช้ในการจำลอง

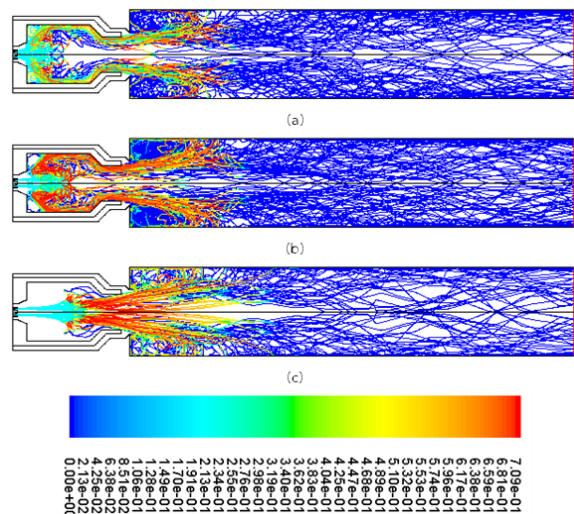
สำหรับกริดที่ใช้ในการจำลองนั้น จะมีความละเอียดประมาณ 45,000 และมีความละเอียดมากเป็นพิเศษที่บริเวณหัวเผา เนื่องจากบริเวณนี้คาดว่าจะเกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของไหลในอัตราที่สูงกว่าบริเวณอื่นๆ ดังแสดงรูปที่ 4 ซึ่งตัวเลขความละเอียดดังกล่าว เคยผ่านการพิสูจน์โดยทำการเปรียบเทียบกับกริดที่มีความละเอียดประมาณ 250,000 ก่อนหน้านี้แล้ว ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยให้ผลของการจำลองที่ไม่แตกต่างกันมากนัก จึงได้ใช้กริดที่มีความละเอียดเท่ากับ 45,000 ในการจำลอง เพื่อที่จะลดระยะเวลาในการคำนวณ



รูปที่ 4 ลักษณะของกริดที่ใช้ในการจำลอง

4. ผลการจำลองของหัวเผา pre-chamber ที่มีมุมผนังบริเวณทางออก 135 และ 90 องศา (1 MW) [6]

จากผลการจำลองของหัวเผา pre-chamber ที่มีมุมของผนังบริเวณทางออก 135 องศา พบว่าหัวเผาไม่สามารถคงความเสถียรภายในการเผาไหม้ไว้ได้ จึงทำให้เกิดเป็นปรากฏการณ์ที่เรียกว่าการเป่าดับเนื่องจากระยะเวลาการเผาไหม้ และการฟุ้งกระจายของอนุภาคภายในห้องเผาไหม้อาจจะน้อยเกินไป ดังแสดงในรูปที่ 6 จึงทำให้อนุภาคเชื้อเพลิงหลุดลอยออกจากช่วงที่มีการผสมผสานกันระหว่างการเผาไหม้อย่างรวดเร็ว เป็นสาเหตุทำให้ไม่สามารถรักษาอุณหภูมิจุดติด (Ignition) เอาไว้ได้

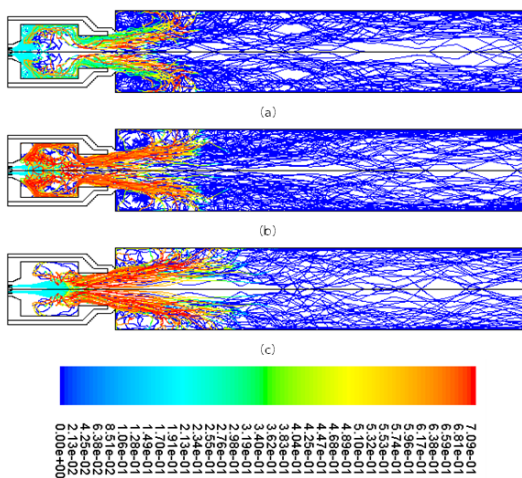


รูปที่ 6 เส้นทางเดินของอนุภาคที่แสดงถึง

AEC-101

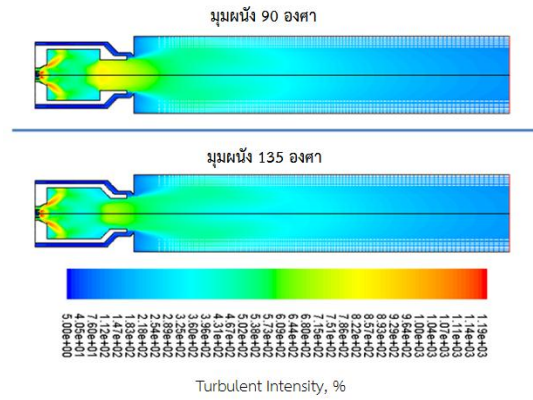
สัดส่วนเชิงมวลของอนุภาคคาร์ระหว่างการเผาไหม้ (Pre-Chamber 135°); (a) อนุภาคขนาดเล็ก 10 - 30, (b) กลาง 40 - 70 และ (c) ใหญ่ 80 - 100 ไมครอน

หลังจากที่ทราบถึงสาเหตุของปรากฏการณ์การเป่าดับ จึงได้ทำการปรับเปลี่ยนมุมของผนังบริเวณทางออกเป็น 90 องศา โดยหวังว่าจะเป็นการเพิ่มการฟุ้งกระจายของอนุภาค และระยะเวลาในการเผาไหม้ ซึ่งผลก็ปรากฏว่าหัวเผาที่มีมุมผนังดังกล่าวสามารถรักษาความเสถียรภาพในการเผาไหม้ไว้ได้ โดยไม่มีการเกิดปรากฏการณ์การเป่าดับ เมื่อทำการเปรียบเทียบรูปที่ 6 กับรูปที่ 7 ซึ่งแสดงเส้นทางเดินของอนุภาคที่แสดงถึงสัดส่วนเชิงมวลของอนุภาคคาร์ระหว่างการเผาไหม้สำหรับหัวเผา pre-chamber ที่มีมุมของผนังบริเวณทางออก 135 และ 90 องศาตามลำดับ โดยที่จะสังเกตเห็นว่าทั้งสองรูปมีการกระจายตัวของอนุภาคบริเวณ IRZ และ ERZ ภายในห้องเผาไหม้ แต่จะพบว่าผนัง 90 องศาจะเป็นตัวขวางกั้นให้อนุภาคขนาดใหญ่มีการฟุ้งกระจายภายในเตามากกว่ากรณีมุมผนัง 135 องศา ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 8 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบถึงการกระจายตัวของความเข้มข้นของความปั่นป่วน พบว่า pre-chamber ที่มีผนังทางออก 90 องศาจะมีความเข้มข้นของความปั่นป่วนสูงกว่าอย่างเห็นได้ชัดเจน



รูปที่ 7 เส้นทางเดินของอนุภาคที่แสดงถึงสัดส่วนเชิงมวลของอนุภาคคาร์ระหว่างการเผาไหม้

(pre-chamber 90°); (a) อนุภาคขนาดเล็ก 10 - 30, (b) กลาง 40 - 70 และ (c) ใหญ่ 80 - 100 ไมครอน



รูปที่ 8 การเปรียบเทียบถึงการกระจายตัวของความเข้มข้นของความปั่นป่วน

5. การจำลองย่านการทำงานของหัวเผา pre-chamber ที่มีมุมผนังบริเวณทางออก 90 องศา

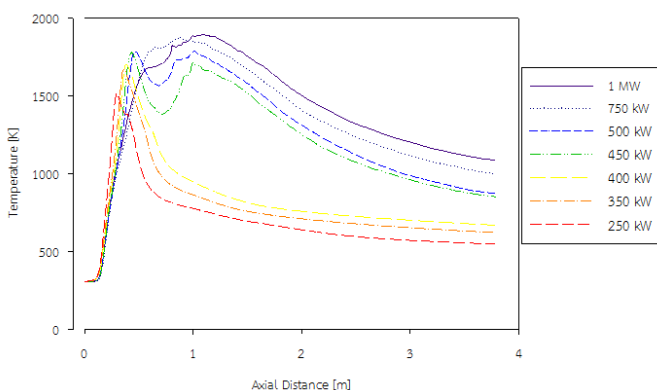
จากผลการจำลองในหัวข้อข้างต้นทำให้ทราบว่าหัวเผา pre-chamber ที่มีมุมผนังบริเวณทางออก 90 องศา สามารถรักษาเสถียรภาพของการเผาไหม้เอาไว้ได้ ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงเป็นการจำลองเพื่อหาย่านการทำงานที่มีความเหมาะสมกับหัวเผาดังกล่าว ซึ่งจะทำให้การจำลองที่ค่ากำลังความร้อนจากการเผาไหม้ในช่วง 250 kW จนถึง 1.25 MW ซึ่งเงื่อนไขในการจำลองจะทำการคงค่าอากาศส่วนเกิน (excess air) ไว้ที่ 30% แล้วทำการปรับเปลี่ยนอัตราการป้อนเชื้อเพลิง และอากาศตาม firing rate ในช่วงที่ต้องการศึกษา

จากรูปที่ 9 และ 10 แสดงลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิ และการกระจายตัวของสารระเหยตามแนวยาวของเตาเผา ตามลำดับ ซึ่งจากรูปทั้งสองจะสังเกตเห็นพฤติกรรมการเผาไหม้เป็นสองกลุ่ม กลุ่มแรกเป็นการเผาไหม้ในช่วง 450 kW ถึง 1 MW ซึ่งพบว่าอุณหภูมิของเปลวไฟที่ 1 MW จะมีค่าสูงสุดในขณะที่สภาวะ 450 kW จะให้อุณหภูมิที่ต่ำที่สุดในกลุ่ม ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณความเข้มข้นของสารระเหย เมื่ออุณหภูมิยิ่งสูงการเผาไหม้ยิ่งเกิดความร้อนแรงมากขึ้น ดังนั้นปริมาณความเข้มข้นของสารระเหยที่สภาวะ 1 MW จึงมีค่าต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับ

AEC-101

สภาวะอื่นๆในกลุ่ม เมื่อพิจารณาลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคน้ำมัน จะพบว่าการเผาไหม้ในเตาจะเกิดขึ้นสองช่วง การเผาไหม้ช่วงแรกจะเกิดขึ้นบริเวณกึ่งกลางของ pre-chamber ในขณะที่จะมีอนุภาคของเชื้อเพลิงบางส่วนถูกอิทธิพลของ swirl เหวี่ยงไปชนกับผนังของ pre-chamber และวิ่งชนกับผนังออกไป ส่งผลให้อนุภาคส่วนนี้จึงไม่ได้รับการเผาไหม้ในช่วงดังกล่าว ในส่วนของการเผาไหม้ช่วงที่สองจะเกิดขึ้นในบริเวณส่วนต้นของท่อไพใหญ่ ซึ่งอนุภาคเชื้อเพลิงที่เหลือจากการเผาไหม้ในช่วงแรกจะถูกเผาไหม้ในบริเวณนี้ทั้งหมด ซึ่งสอดคล้องกับความเข้มข้นของสารระเหยที่ลดลงจนหมดหลังจากผ่านบริเวณนี้ไป

ในส่วนของพฤติกรรมของการเผาไหม้กลุ่มที่สอง จะเป็นการเผาไหม้ที่สภาวะ 250 kW ถึง 400 kW ซึ่งอนุภาคน้ำมันของการเผาไหม้ค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับกลุ่มแรก เมื่อพิจารณาลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคน้ำมัน จะพบว่าการเผาไหม้จะเกิดขึ้นบริเวณกึ่งกลางของ pre-chamber เพียงช่วงเดียว ส่งผลให้อนุภาคของเชื้อเพลิงที่ถูกอิทธิพลของ swirl เหวี่ยงไปชนกับผนังของ pre-chamber ไม่ได้รับการเผาไหม้ จึงทำให้มีปริมาณสารระเหยหลงเหลืออยู่เป็นจำนวนมากเมื่อเทียบกับพฤติกรรมของการเผาไหม้กลุ่มแรก ดังนั้นอาจถือได้ว่าพฤติกรรมของการเผาไหม้ของกลุ่มนี้เป็นการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์



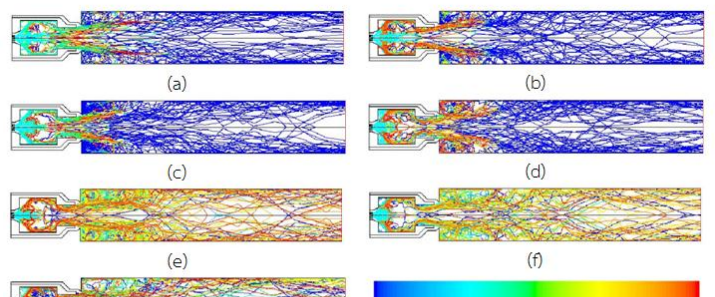
รูปที่ 9 ลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคน้ำมันตามแนว Axial ของเตาเผา



รูปที่ 10 ลักษณะการกระจายตัวของความเข้มข้นของสารระเหยตามแนว Axial ของเตาเผา

เมื่อพิจารณารูปที่ 11 แสดงเส้นทางเดินของอนุภาคที่แสดงถึงสัดส่วนเชิงมวลของชาร์ (Particle Char Fraction) พบว่าที่สภาวะ 1 MW, 750 kW, 500 kW และ 450 kW อนุภาคชาร์จะถูกเผาไหม้จนหมด ในขณะที่สภาวะ 400 kW, 350 kW และ 250 kW นั้นจะเหลืออนุภาคชาร์ที่ไม่ได้รับการเผาไหม้หลงเหลืออยู่พอสมควร ซึ่งเป็นผลมาจากอนุภาคของเชื้อเพลิงที่ถูกอิทธิพลของ swirl เหวี่ยงไปชนกับผนังของ pre-chamber ไม่ได้รับการเผาไหม้ ซึ่งเป็นเหตุผลที่สอดคล้องกับปริมาณสารระเหยที่ได้กล่าวไว้ในเบื้องต้น

นอกจากนี้เมื่อทำการจำลองการเผาไหม้ที่สภาวะ 1.25 kW พบว่าหัวเผาไม่สามารถคงความเสถียรภายในการเผาไหม้ไว้ได้ จึงทำให้เกิดเป็นปรากฏการณ์การเป่าดับ ในลักษณะเช่นเดียวกับกรณี pre-chamber ที่มีมุมของผนังบริเวณทางออก 135 องศา เนื่องจากความเร็วก๊าซสูงเกินไปภายในห้องเผาไหม้ของ pre-chamber จึงทำให้อนุภาคเชื้อเพลิงหลุดลอยออกจากบริเวณที่ต้องการให้มีการผสมผสานกันระหว่างการเผาไหม้อย่างรวดเร็ว เป็นสาเหตุทำให้อนุภาคน้ำมันไม่อาจรักษาการจุดติด (Ignition) ไว้ได้ จึงทำให้เกิดเป็นปรากฏการณ์ลักษณะดังกล่าว



AEC-101

หลงเหลือ ซึ่งถือเป็นการทิ้งพลังงานในส่วนดังกล่าวไป
โดยไร้ประโยชน์

รูปที่ 11 เส้นทางเดินของอนุภาคที่แสดงถึง
สัดส่วนเชิงมวลของชาร์ (Particle Char Fraction)
(a) 1 MW, (b) 750 kW, (c) 500 kW, (d) 450 kW,
(e) 400 kW, (f) 350 kW และ (g) 250 kW

6. สรุป

จากผลการจำลองการเผาไหม้ที่ 1 MW สำหรับหัวเผา pre-chamber ที่มีมุมผนังบริเวณทางออก 90 องศา สามารถทำให้การกระจายตัวของอนุภาคมากขึ้นภายในห้องเผาไหม้ในส่วนของ pre-chamber เนื่องจากผนัง ณ บริเวณทางออกของห้องเผาไหม้ pre-chamber ได้กั้นขวางเส้นทางเดินของอนุภาคได้บางส่วน จึงเป็นสาเหตุทำให้อนุภาคบางส่วนมีเส้นทางเดินแบบย้อนกลับและมีระยะเวลาในการเดินทางของอนุภาคมากขึ้น จึงทำให้ระยะเวลาในการเผาไหม้ (residence Time) ภายในห้องเผาไหม้ของ pre-chamber เพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้มีการปลดปล่อยสารระเหยอย่างรวดเร็วภายในห้องเผาไหม้ของ pre-chamber และทำให้การกระจายตัวของอุณหภูมิสูงขึ้นในบริเวณนี้เท่ากับ 1894 K ในทำนองเดียวกันนั้นสามารถคงความเสถียรภาพในการเผาไหม้ไว้ได้โดยไม่มีการเกิดปรากฏการณ์การเป่าดับเมื่อทำการศึกษาเพื่อหาช่วงการทำงานที่เหมาะสมสำหรับหัวเผาที่ทำการศึกษา จากผลการจำลองพบว่าหัวเผานี้มีช่วงการทำงานอยู่ระหว่าง 450 kW ถึง 1 MW ซึ่งจะเป็นช่วงที่หัวเผาสามารถรักษาเสถียรภาพในการเผาไหม้ และให้การเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ซึ่งหากเพิ่มกำลังความร้อนจากการเผาให้สูงกว่า 1 MW จะเกิดปรากฏการณ์การเป่าดับ (blow - off) แต่หากลดกำลังความร้อนจนต่ำกว่า 450 kW จะเกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้มีอนุภาคชาร์และสารระเหย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] ธนภัทร์ ภักดีวรวงศ์. "การจำลองเชิงคณิตศาสตร์สำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงผง." วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2556.
- [2] Y.S. Shen, B.Y. Guo, A.B. Yu, P. Zulli. (2009). A Three-Dimensional Numerical Study of The Combustion of Coal Blends in Blast Furnace, *Fuel* 88, pp. 255-263.
- [3] J.Charoensuk, (1996). *The Application of Mathematical Model for Scaling Pulverized coal combustors*, Ph.D Thesis, University of London.
- [4] S.M.A. Rizvi. (1985). *Prediction of Flow, Combustion and Heat Transfer in Pulverized Coal Flames*, Ph.D. Thesis of University of London and the Dipoma of Membership of the Imperial College.
- [5] J. Ballester, J. Barroso, L.M. Cerecedo, R.Ichaso. (2005). Comparative Study of Semi-Industrial-Scale Flames of Pulverized Coals and Biomass, *Combustion and Flame* 141, pp. 204-215.
- [6] M. A. Field. (1969). Rate of Combustion Of Size-Graded Fractions of Char from a Low Rank Coal between 1200 K-2000 K. *Combustion and Flame* 13, pp. 237-252.
- [7] M. M. Baum and P. J. Street. (1971). Predicting the Combustion Behavior of Coal Particles. *Combust. Sci. Tech*, 3(5):231-243.
- [8] N.Punbusayakul (2004). *Numerical Simulation of Sulfur Dioxide Adsorption in a Vortex Flow*

AEC-101

Reactor, Thesis of King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.

[9] อ่ำพล อภาชนากร นิมิต นีพัทธ์ธรรมกุล และ เฉลิมพงษ์ กล้าขยัน (2555). *โครงการนำร่องเพื่อผลิตพลังงานทดแทนจากชีวมวลในระดับชุมชน*, พิมพ์ครั้งที่ 1, สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ (องค์การมหาชน) และสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน