

AEC-2029

การประยุกต์ใช้แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์สำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงถ่านหินผง เพื่อการออกแบบชุดหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวล

The Application of Mathematical Simulation for Pulverized Coal Combustion to Biomass Burners Design

ธนภัทร์ ภัคดีวรวิงศ์¹, ชินภัทร ชูระการ¹ และจาร์วุตตร เจริญสุข^{1*}

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

*ติดต่อ: โทรศัพท์: 023 264 197, โทรสาร: 023 264 198

E-mail: kcjaruw@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการออกแบบชุดหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวล จากผลการจำลองการเทียบเคียงของเตาเผาไหม้เชื้อเพลิงถ่านหินผง พบว่า 1) การลดอุณหภูมิผนังเท่ากับ 1300 K บริเวณใกล้หัวเผา 2) การเพิ่มค่าคงที่ของอัตราการแพร่ออกซิเจนภายในพื้นผิวอนุภาคชาร์ (C_1) และอัตราจลนศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยาของชาร์ (C_2) ในอัตราส่วน 2.5 เท่าของค่าเริ่มต้น และ 3) ใช้แบบจำลอง Random Walk สำหรับทำนายการกระจายตัวของอนุภาคอันเนื่องมาจากความปั่นป่วนสามารถทำให้ผลการกระจายตัวของอนุภาคและการกระจายตัวของความเข้มข้นออกซิเจนมีความใกล้เคียงกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองอย่างน่าพอใจ เมื่อนำแบบจำลองที่ถูกรับเทียบแล้วนำมาประยุกต์ใช้กับการจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลสำหรับหัวเผาแบบ Pre-Chamber ขนาด 1 MW เพื่อศึกษาความเป็นไปได้สำหรับการนำหัวเผานี้มาใช้ในงานจริง โดยที่เส้นผ่านศูนย์กลางภายในหัวเผา Pre-Chamber มีขนาดเท่ากับ 0.4 เมตร และมีความยาว 0.786 เมตร ขณะที่ผนังถูกออกแบบมาเป็น Refractory Wall ทางด้านเตาเผา มีลักษณะเป็นทรงกระบอกแฉกนอน มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของเตาเผาเท่ากับ 0.6 เมตร และมีความยาว 3.0 เมตร จากการศึกษาพบว่าหัวเผา Pre-Chamber ที่มีมุมผนังบริเวณทางออก 135 องศา ไม่สามารถคงความเสถียรภาพในการเผาไหม้ไว้ได้ จึงทำให้เกิดเป็นปรากฏการณ์ลักษณะที่เรียกว่าการเป่าดับ (Blow-Off) แต่เมื่อทำการเปลี่ยนมุมผนังบริเวณทางออกเท่ากับ 90 องศา ทำให้เส้นทางเดินของอนุภาคมีการฟุ้งกระจายที่มากขึ้นภายใน Pre-Chamber ส่งผลให้อนุภาคสามารถทำปฏิกิริยาได้อย่างต่อเนื่อง จากอิทธิพลนี้จึงนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของระยะเวลาในการเผาไหม้ (Residence Time) ภายใน Pre-Chamber ซึ่งช่วยให้สามารถคงความเสถียรภาพในการเผาไหม้ไว้ได้โดยไม่มีเกิดการเป่าดับ

คำหลัก: การจำลอง, การเผาไหม้, เชื้อเพลิงชีวมวล

Abstract

The mathematical simulations were investigated and used as designing methodology of the biomass burners. The validated results was obtained by, i) the reduction of wall temperature at burner zone to 1300 K, ii) the increase of mathematical model describing in oxygen diffusion constant into char particle (C_1) and kinetic rate of char reaction (C_2) at 2.5 times of the default value, and iii) using of the Random Walk model to predict the particles distribution owing to turbulent flow in combustion chamber.

AEC-2029

The temperature and oxygen distributions agreed well with the experimental data. In order to study its capability on real plant, the validated model was then used for simulation of pulverized biomass fuel with Pre-Chamber burner, sizing 1 MW, which inside diameter and length were 0.4 and 0.786 meters respectively, while the wall of Pre-Chamber was designed as refractory wall. The furnace was a horizontal cylinder with inside diameter and length of 0.6 and 3.0 meters, respectively. From simulation, it was found that Pre-Chamber burner with 135 degrees of outlet wall angle could not preserve the combustion stability causing of the Blow-Off phenomenon. In contrary, when it was changed into 90 degrees contraction, the distribution of particle trajectories not only improved, but their average residence time is also increased. This improvement causes particles reacting continuously in the pre-combustion chamber thus enabling combustion stability.

Keywords: Simulation, Combustion, Biomass

1. บทนำ

ปัจจุบันพลังงานทดแทนถือได้ว่าเป็นตัวเลือกอันดับแรกๆที่ทั่วโลกให้ความสนใจและได้รับความสำคัญเป็นอย่างมากในประเทศไทย ซึ่งสังเกตได้จากแผนการกำหนดนโยบายในการพัฒนาประเทศที่สนับสนุนให้มีการหาแหล่งพลังงานทดแทนต่างๆ รวมถึงหญ้าเนเปียร์ [1] เนื่องจากแหล่งพลังงานที่มีใช้อยู่ในปัจจุบันส่วนใหญ่มาจากเชื้อเพลิงฟอสซิลซึ่งมีปริมาณลดลงอย่างต่อเนื่อง พลังงานชีวมวล (Biomass) จึงเป็นตัวเลือกที่น่าสนใจ ซึ่งพลังงานชีวมวลนั้นมาจากองค์ประกอบของสิ่งมีชีวิตหรือสารอินทรีย์ต่างๆ รวมทั้งวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น ไม้พิน แกลบ และกากอ้อย เป็นต้น โดยชีวมวลนั้นมีข้อดีคือจะก่อให้เกิดแก๊สพิษ เช่น SO_2 และ NO_x ในปริมาณที่น้อย เนื่องจากชีวมวลมีสัดส่วนของกำมะถันค่อนข้างน้อยและมีแอมโมเนีย (NH_3) เป็นองค์ประกอบหลักในสารระเหยซึ่งสามารถช่วยลดการเกิด NO_x ได้ แต่อย่างไรก็ตามการพิสูจน์ผลจากการทดลองและวิเคราะห์เชิงคณิตศาสตร์ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลลักษณะอนุภาคยังมีไม่มากนักเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงถ่านหินผง ซึ่งเชื้อเพลิงถ่านหินผงได้ถูกพิสูจน์อย่างแพร่หลายโดยนักวิจัยหลายๆท่าน [2, 7] โดยมีงานวิจัยหลายฉบับที่ได้รับการตีพิมพ์ในอดีตจนถึงปัจจุบันซึ่งอยู่ในรูปแบบโปรแกรมการ

จำลองเชิงคณิตศาสตร์ (CFD) เช่น FLUENT[®] และ CFX[®] ฯลฯ

ดังนั้นงานวิจัยนี้อยู่ภายใต้การวิเคราะห์การเผาไหม้เชื้อเพลิงผง หากแต่จะต้องทำการศึกษาคำถามเข้าใจเกี่ยวกับการจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงถ่านหินเพื่อที่จะให้มีผลของความผิดพลาดน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับผลการทดลองและนำข้อมูลที่ได้จากเชื้อเพลิงถ่านหินมาประยุกต์ใช้กับเชื้อเพลิงชีวมวล เพื่อเพิ่มทางเลือกในการใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าหรือความต้องการพลังงานที่เพิ่มขึ้นในอนาคต

2. สมการพื้นฐานของแบบจำลอง

2.1 แบบจำลองของแก๊ส [15]

การเคลื่อนที่ของแก๊สได้อธิบายในระนาบสองมิติ โดยที่ Reynolds-average Navier-Stokes (RANS) ถูกกำหนดให้อยู่ในสถานะคงตัว (Steady-State) และเสริมด้วยแบบจำลอง Standard $k-\epsilon$ Turbulence ซึ่ง 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 โดยที่ Governing Equation ที่ใช้สำหรับแก๊สปัญหาการเคลื่อนที่ของแก๊สประกอบด้วย มวล (m) ความเร็วตามแนวแกน

AEC-2029

(u, v) พลังงานจลนศาสตร์ของความปั่นป่วน (k) อัตราการสลายตัว (ε) เอนทัลปี (H) และเศษส่วนเชิงมวลของแต่ละสปีชีส์ (Y_i) ดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่ง μ_i คือ ความหนืดของการปั่นป่วน λ คือ การนำความร้อน และ Γ คือการแพร่ของโมเลกุลของแต่ละสปีชีส์

ตารางที่ 1 ตัวแปร Φ , Γ_{eff} และ S_ϕ ในสมการความต่อเนื่องสำหรับแก๊ส

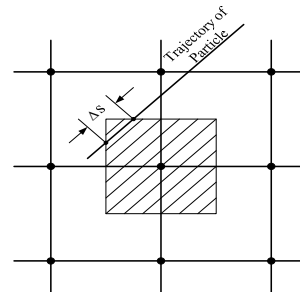
	Φ	Γ_{eff}	S_ϕ
Continuity	1	0	\dot{m} , total mass transfer rate from particle phase
Momentum	u, v	$\mu + \mu_t$	F_D , drag forces of particles
Energy	H	$\lambda + \frac{\mu_t}{\sigma_H}$	S_H , reaction heats and convective / radiative heat transfers from particle phase
Species mass fraction	Y_i	$\Gamma + \frac{\mu_t}{\sigma_{Y_i}}$	S_p , chemical reaction rate involving component i
Turbulent kinetic energy	k	$\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}$	$P_k - \rho\varepsilon$
Turbulent dissipation rate	ε	$\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}$	$C_1 \frac{\varepsilon}{k} P - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{K}$

โดย $\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}$, $P_k = (\mu + \mu_t) \nabla U \cdot (\nabla U + (\nabla U)^T)$
ค่าคงที่: $C_\mu = 0.09$, $C_1 = 1.44$, $C_2 = 1.92$

2.2 แบบจำลองของอนุภาค [5]

การกระจายตัวของอนุภาคถูกจำลองโดยใช้วิธี Lagrangian โดยสมมุติว่าอนุภาคมีลักษณะเป็นทรงกลมและความหนาแน่นเริ่มต้นมีค่าคงที่ การถ่ายเทมวล โมเมนตัม และพลังงานของอนุภาคที่มีผลต่อ gas

phase จะเกี่ยวข้องกับตำแหน่งที่อนุภาคเคลื่อนที่ผ่าน สามารถคำนวณได้โดยเทคนิค Particle Source In Cell Techniques (PSICT) [13] จากรูปที่ 1 แสดงการกระจายตัวของอนุภาคสำหรับแต่ละตำแหน่งทางเข้าและแต่ละกลุ่มของขนาด



รูปที่ 1 การกระจายตัวของอนุภาคโดยใช้วิธี Lagrangian ผ่านเซลล์

2.2.1 สมการอนุรักษ์มวล

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

R_m คืออัตราเชิงปริมาตรของมวลที่ออกจากอนุภาคสู่แก๊สโดยการปลดปล่อยสารระเหยหรือซาร์ในการเผาไหม้ ซึ่งอัตราของสารระเหยที่ปล่อยออกมาถูกอธิบายในรูปของ Arrhenius function ร่วมกับกลุ่มของตัวแปรที่ได้จากการสังเกตในการทดลอง เขียนสมการได้ดังนี้

$$R_m = \frac{dV}{dt} = K_A (V^* - V) \quad (3)$$

V คือปริมาณสะสมของสารระเหยที่ปล่อยออกมา V^* คือปริมาณทั้งหมดของสารระเหยภายในถ่านหิน และค่า K_A คือค่าที่แสดงในรูปของ Arrhenius ได้ดังนี้

$$K_A = k_0 \exp\left(-\frac{E_{dvol}}{R_u T}\right) \quad (4)$$

R_u คือ Universal gas constant, T คือค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์ k_0 คือค่าคงที่ของปฏิกิริยาที่ได้จากการทดลอง และ E_{dvol} คือ activation energy

AEC-2029

2.2.2 สมการอนุรักษ์โมเมนตัมและการเคลื่อนที่เฉลี่ย

$$\frac{dm_p \tilde{u}_i}{dt} = \sum \bar{F}_i \quad (5)$$

พจน์ทางด้านขวาเกิดจากแรงภายนอก ซึ่งส่วนใหญ่เกิดจากแรงจุดที่กระทำต่ออนุภาค [5] ดังนั้นสมการสมดุลโมเมนตัมคือ

$$\frac{d\tilde{u}_p}{dt} = -\alpha(\tilde{u}_p \pm u_{disp.} - \tilde{u}_g) \quad (6)$$

$$\frac{d\tilde{v}_p}{dt} = -\alpha(\tilde{v}_p \pm v_{disp.} - \tilde{v}_g) + \frac{\tilde{w}^2}{r_p} \quad (7)$$

\tilde{u}_g, \tilde{u}_p คือความเร็วเฉลี่ยของแก๊สและอนุภาคตามลำดับ, r_p คือระยะจากแกนสมมาตรของอนุภาค

2.2.3 สมการอนุรักษ์พลังงาน

สมดุลพลังงานเกิดจากผลรวมการถ่ายเทความร้อนของอนุภาค ความร้อนจากการเผาไหม้ของซาร์ ความร้อนที่ปล่อยออกมากับการสูญเสียน้ำหนักของการเผาไหม้ซาร์ และความร้อนจากการระเหยในกระบวนการปล่อยสารระเหย ดังนั้นสมการอนุรักษ์พลังงานคือ

$$\frac{d(m_p c_p T_p)}{dt} = m_p \dot{Q}_t - c_p T_p \left(-\frac{dm_p}{dt} \right) - L_v \frac{dm_p}{dt} \quad (8)$$

$$\dot{Q}_t = \dot{Q}_{conv.} + \dot{Q}_{rad.} + \dot{Q}_{comb.} \quad (9)$$

เมื่อ L_v คือความร้อนแฝงของการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นก๊าซของถ่านหิน (kJ/kmol), c_p คือความจุความร้อนจำเพาะ (kJ/kmol-K), T_p คืออุณหภูมิ

2.2.4 แบบจำลองการเผาไหม้ของซาร์ [9, 10]

สมมติฐานของอัตราการเกิดปฏิกิริยาจากพื้นผิวซาร์ถูกทำนายไว้สองรูปแบบโดยเกิดจากอัตราทางจลนศาสตร์หรือการแพร่

$$D_0 = C_1 \frac{[(T_p + T_\infty)/2]^{0.75}}{d_p} \quad (10)$$

โดยที่อัตราทางจลนศาสตร์

$$R = C_2 e^{-(E/RT_p)} \quad (11)$$

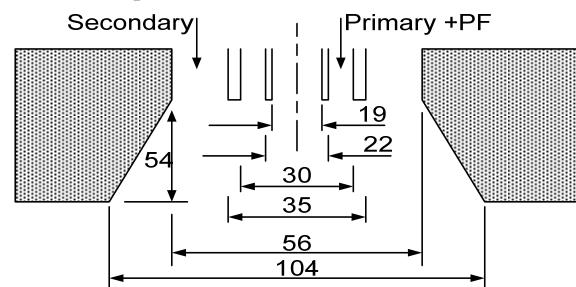
คืออัตราการเปลี่ยนแปลงเชิงมวลของอนุภาคน้ำหนักที่เกิดจากการเผาไหม้ซาร์

$$\frac{dm_p}{dt} = -A_p p_{ox} \frac{D_0 R}{D_0 + R} \quad (12)$$

เมื่อ A_p คือพื้นที่หน้าตัดของอนุภาค $(\frac{\pi d_p^2}{4}) p_{ox}$ คือความดันย่อยของออกซิเจนของแก๊สรอบข้างที่พื้นผิวของการเผาไหม้อนุภาค และ R คือ อัตราจลนศาสตร์ที่รวมกันระหว่างปฏิกิริยาทางเคมีที่อยู่ภายในอนุภาคซาร์และการแพร่จากซาร์ที่มีลักษณะเป็นรูพรุน

3. ลักษณะของเตาเผาไหม้เชื้อเพลิงถ่านหิน

เตาเผาที่ทำการทดลองเปรียบเทียบกับมีขนาดเท่ากับ 114 KW มีเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวเผา 0.056 เมตร โดยที่เตาเผาที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอกแนวตั้ง เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.6 เมตร และความยาว 3.0 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 2 และข้อมูลเพิ่มเติมของเตาเผาถูกแสดงไว้ใน [5]

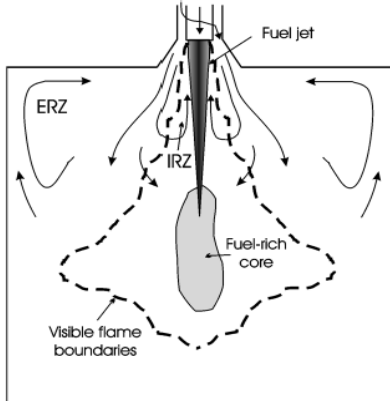


รูปที่ 2 โครงสร้างของหัวเผาในห้องเผาไหม้

ลักษณะของอากาศพลศาสตร์สำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงผงสามารถแบ่งได้เป็นสองลักษณะ คือ บริเวณที่มีการหมุนวนของกระแสภายในแกนกลางของเตาเผา (Internal Recirculation Zone, IRZ) และ

AEC-2029

บริเวณที่มีการหมุนวนของกระแสภายนอกแกนกลางของเตาเผา (External Recirculation Zone, ERZ) สังเกตได้ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 รูปแบบของกระแสการไหลในเตาเผาไหม้ [4]

3.1 เงื่อนไขในการจำลองการเผาไหม้ถ่านหิน

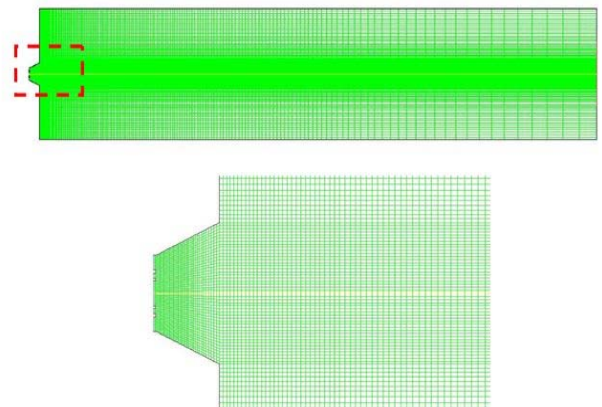
การไหลกำหนดให้เป็นแบบสมมาตรรอบแนวแกน 2 มิติ (2D-Axisymmetric) และสถานะคงตัว (Steady State) โดยมีอัตราการก่อกำเนิดของมวลและความร้อนที่ถ่ายโอนมาจากอนุภาคที่จุดใดจุดหนึ่งในโดเมนของก๊าซเป็นแบบคงตัวเช่นกัน ในทำนองเดียวกันนั้น ใช้แบบจำลองการเผาไหม้ Species Transport แบบจำลองการปั่นป่วน $k-\epsilon$ Standard และคงที่อุณหภูมิผนังที่ตำแหน่ง 0.056 ถึง 1.500 เมตร เท่ากับ 1300 K ในขณะที่ค่าของ Char Reaction (C_1 และ C_2) เพิ่มขึ้น 2.5 เท่าจากค่าเริ่มต้น และใช้แบบจำลองการติดตามแบบสุ่ม (Random Walk) สำหรับ Mesh ที่ใช้ในการจำลองเท่ากับ 11,400 และมีความละเอียดที่บริเวณใกล้หัวเผา ดังแสดงรูปที่ 4 ซึ่งเคยผ่านการพิสูจน์โดยทำการเปรียบเทียบกับ Mesh ที่มีความละเอียดเท่ากับ 100,000 ก่อนหน้านี้แล้ว โดยให้ผลของการจำลองที่ไม่แตกต่างกันมากนัก จึงได้เลือกใช้ Mesh ที่มีความละเอียดเท่ากับ 11,400 ในการจำลอง เพื่อที่จะลดระยะเวลาในการคำนวณ

ตารางที่ 2 เงื่อนไขในการจำลองสำหรับเตาเผาไหม้เชื้อเพลิงถ่านหิน

Central pipe:	Air flow rate (kg/s)	2.925×10^{-4}
	Swirl number	0.0
	อุณหภูมิ (K)	353
Primary pipe:	Air flow rate (kg/s)	9.344×10^{-3}
	Swirl number	0.0
	อุณหภูมิ (K)	353
	อัตราการป้อนถ่านหิน (kg/s)	0.39×10^{-2}
Secondary pipe:	Air flow rate (kg/s)	3.537×10^{-2}
	Swirl number	1.03
	อุณหภูมิ (K)	573
อากาศส่วนเกินในการเผาไหม้ (%)		15

ตารางที่ 3 Kinetic Parameters สำหรับแบบจำลองการเผาไหม้ถ่านหิน

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

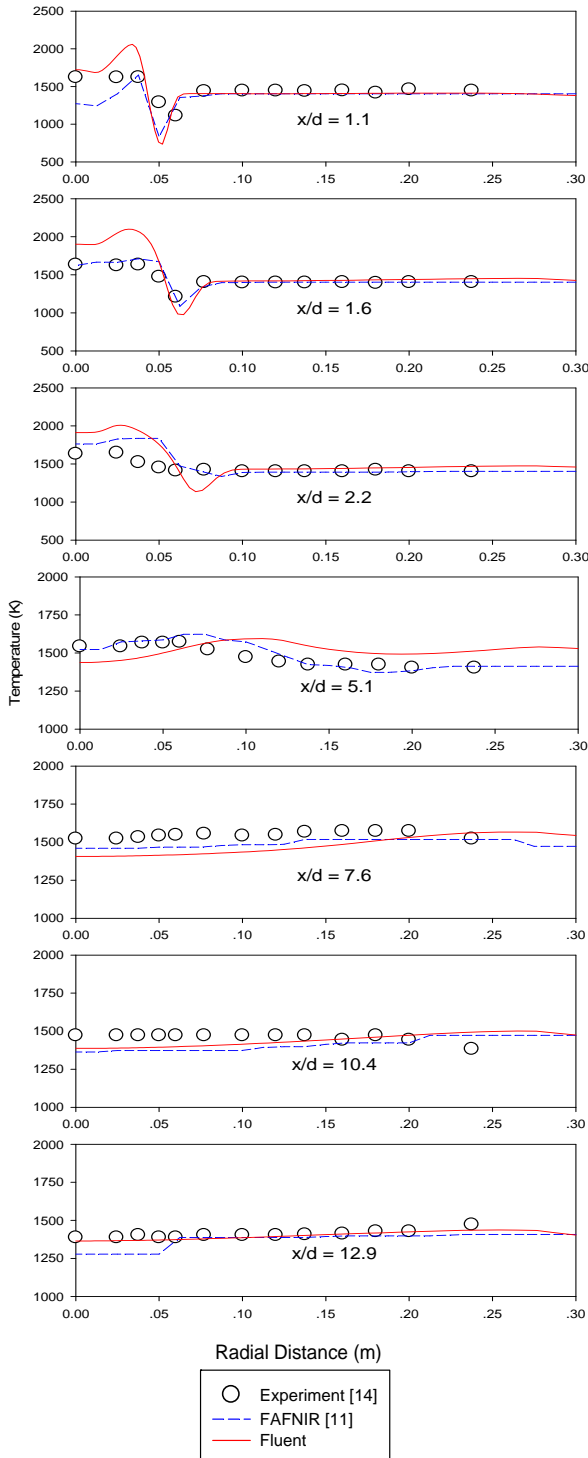


รูปที่ 4 ลักษณะของ mesh ที่ใช้ในการจำลองการเผาไหม้ถ่านหิน

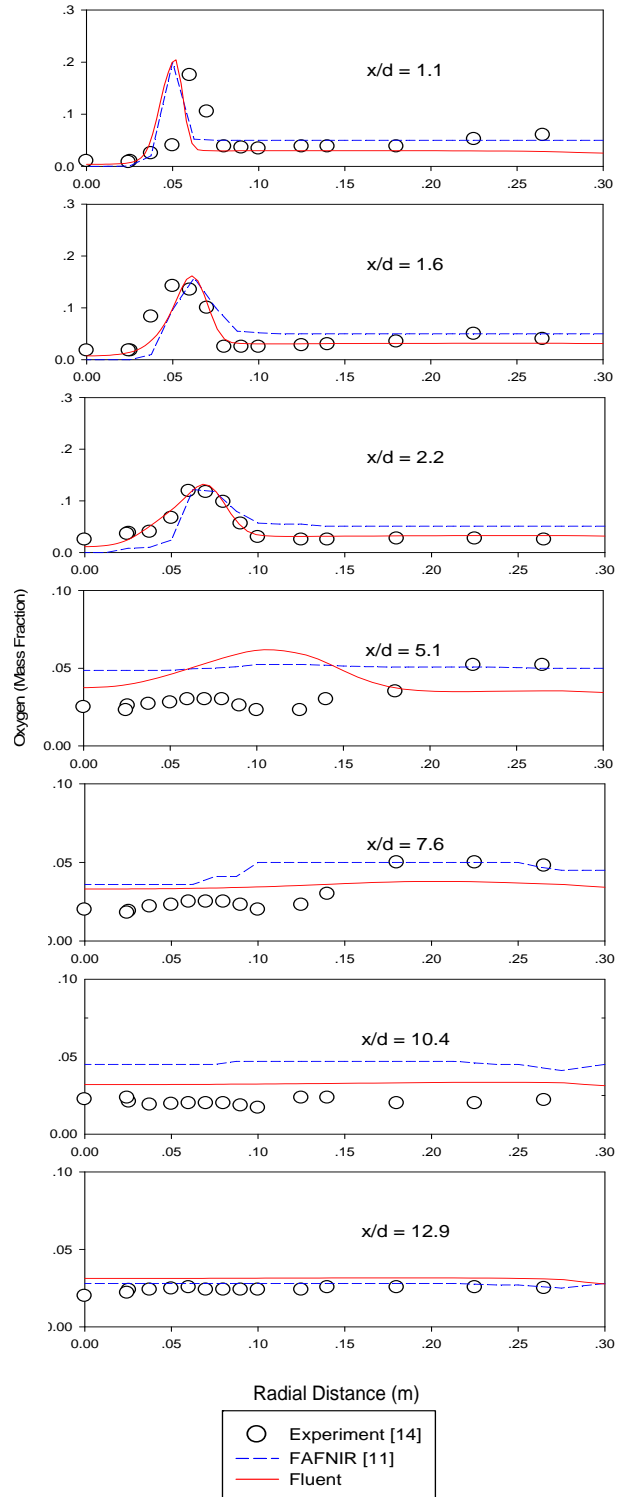
AEC-2029

3.2 ผลการเปรียบเทียบระหว่างการจำลองและการทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงถ่านหิน

ผลของการจำลองนี้ได้แสดงผลของการกระจายตัวของอุณหภูมิ และการกระจายตัวของความเข้มข้นออกซิเจน โดยผลจากการจำลองที่ได้ถูกนำไปเทียบเคียงกับผลการทดลอง [5] และผลการจำลองจากโปรแกรม FAFNIR [11]



รูปที่ 5 ผลการจำลองและทดลองของตัวอุณหภูมิ (K)



รูปที่ 6 ผลการจำลองและทดลองของความเข้มข้นออกซิเจน (Mass Fraction)

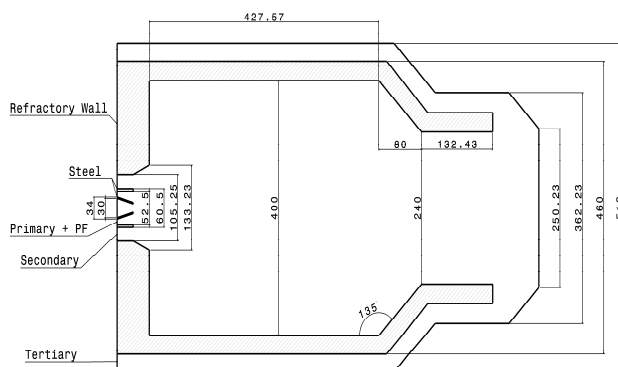
จากรูปที่ 5 และ 6 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิและออกซิเจนที่ได้จากการจำลองและทดลองตามลำดับ พบว่าที่ตำแหน่งบริเวณใกล้หัวเผาในช่วง IRZ ที่ระนาบ $x/d = 1.1-2.2$

AEC-2029

ของห้องเผาไหม้ให้ผลการทำนายของอุณหภูมิที่สูง เนื่องจากแบบจำลองการเผาไหม้ Species Transport นั้นมีการสมมติฐานให้เกิดอัตราทางจลนศาสตร์ที่รวดเร็ว (Fast Kinetic) จึงทำให้เชื้อเพลิงส่วนใหญ่มีอัตราการเผาไหม้อย่างรวดเร็วและอัตราการเกิดปฏิกิริยาทั้งหมดจะถูกควบคุมโดยการผสมผสานกันของการปั่นป่วน เป็นสาเหตุทำให้มีการสะสมของก๊าซที่ได้จากบริเวณที่มีการเผาไหม้รุนแรงที่เกิดขึ้นจากสารระเหยที่มีความเข้มข้นสูงในบริเวณนี้ และกระแสการไหลที่ได้จากอากาศหมุนวนของส่วนที่สอง ในขณะที่บริเวณใกล้เคียงหัวเผาที่ระนาบ $x/d = 5.1-12.9$ ให้ผลการทำนายของอุณหภูมิและออกซิเจนมีแนวโน้มใกล้เคียงกับผลจากการทดลอง

4. ลักษณะของเตาเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล

รูปที่ 7 แสดงภาพลักษณะของหัวเผา Pre-Chamber สำหรับเตาเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลที่มีขนาดเท่ากับ 1 MW โดยที่เส้นผ่านศูนย์กลางภายในหัวเผา Pre-Chamber มีขนาดเท่ากับ 0.4 เมตร และความยาว 0.786 เมตร ขณะที่ตำแหน่งผนังของ Pre-Chamber ถูกออกแบบมาเป็น Refractory Wall ทางด้านเตาเผาที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอกแฉกนอน มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของเตาเผาเท่ากับ 0.6 เมตร และความยาว 3.0 เมตร



รูปที่ 7 ลักษณะของหัวเผา Pre-Chamber ที่มีมุมของผนังบริเวณทางออก 135 องศา (unit in mm.)

4.1 เงื่อนไขที่ใช้การเผาไหม้ชีวมวล

เตาเผาไหม้ชีวมวลนี้ได้ใช้เงื่อนไขในการจำลองเดียวกันกับกรณีถ่านหิน ซึ่งก็คือ การไหลกำหนดให้เป็นแบบสมมาตรรอบแนวแกน 2 มิติ (2D-Axisymmetric) สภาวะคงตัว (Steady State) แบบจำลองการเผาไหม้ Species Transport และแบบจำลองการปั่นป่วน $k-\epsilon$ Standard ในขณะที่ค่าของ Char Reaction (C_1 และ C_2) เพิ่มขึ้น 2.5 เท่าจากค่าเริ่มต้น และใช้แบบจำลองการติดตามแบบสุ่ม (Random Walk) โดยที่ค่า Kinetic Parameters ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 3 สำหรับ Mesh ที่ใช้ในการจำลองเท่ากับ 56,018 และมีความละเอียดที่บริเวณหัวเผาดังแสดงรูปที่ 8 ซึ่งเคยผ่านการพิสูจน์โดยทำการเปรียบเทียบกับ Mesh ที่มีความละเอียดเท่ากับ 220,000 ก่อนหน้านี้แล้ว โดยให้ผลของการจำลองที่ไม่แตกต่างกันมากนัก จึงได้ใช้ Mesh ที่มีความละเอียดเท่ากับ 56,018 ในการจำลอง เพื่อที่จะลดระยะเวลาในการคำนวณ

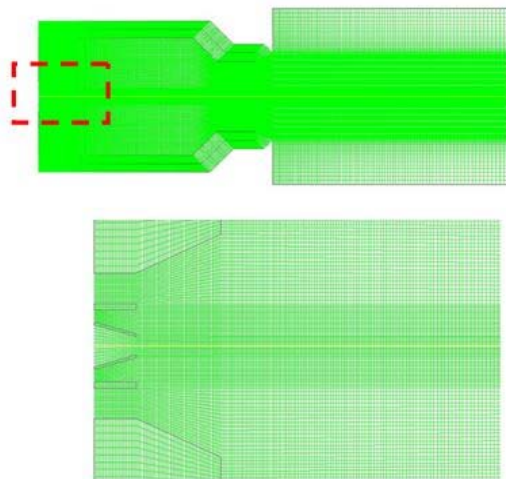
ตารางที่ 4 คุณสมบัติของหญ้าเนเปียร์อัดแท่ง (pellet) (Thailand Institute of Scientific and Technological Research)

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

AEC-2029

ตารางที่ 5 เงื่อนไขการจำลองสำหรับเตาเผาใหม่
เชื้อเพลิงชีวมวล

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

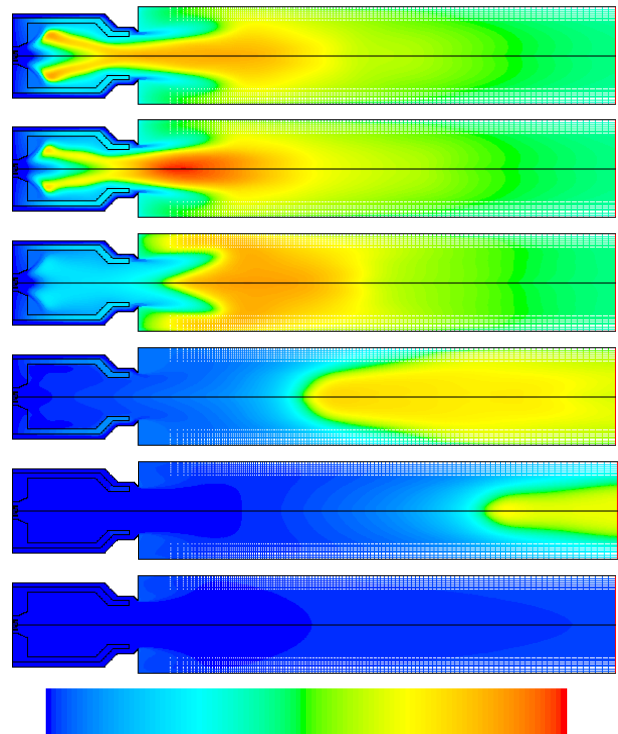


รูปที่ 8 ลักษณะของ mesh ที่ใช้ในการจำลอง
การเผาไหม้ชีวมวล

4.2 ผลการจำลองของหัวเผา Pre-Chamber ที่มี มุมผนังบริเวณทางออก 135 องศา

จากผลการจำลองของหัวเผา Pre-Chamber ที่มี
มุมของผนังบริเวณทางออก 135 องศา พบว่าหัวเผา
ไม่สามารถคงความเสถียรภายในการเผาไหม้ไว้ได้ จึง
ทำให้เกิดเป็นปรากฏการณ์ที่เรียกว่าการเป่าดับ
(Blow-Off) ดังรูปที่ 9 ที่ได้แสดงถึงวิวัฒนาการของ
คำตอบของการกระจายตัวของอุณหภูมิที่เกิดจากการ
เป่าดับ เนื่องจากความเร็วก๊าซสูงเกินไปภายในห้อง

เผาไหม้ของ Pre-Chamber จึงเกิดการพัดพาของมวล
อากาศเย็นที่มาจากทางเข้าสูงกว่าอัตราการก่อกำเนิด
ของอุณหภูมิและอัตราการแพร่ทางความร้อน ใน
ทำนองเดียวกันนั้นระยะเวลาการเผาไหม้ (Residence
Time) ภายในห้องเผาไหม้อาจจะน้อยเกินไป จึงทำให้อุณหภูมิเชื้อเพลิงหลุดลอยออกจากช่วงที่มีการ
ผสมผสานกันระหว่างการเผาไหม้อย่างรวดเร็ว เป็น
สาเหตุทำให้ไม่สามารถรักษาอุณหภูมิจุดติด (Ignition)
เอาไว้ได้ จึงทำให้เกิดเป็นปรากฏการณ์ลักษณะ
ดังกล่าวขึ้น

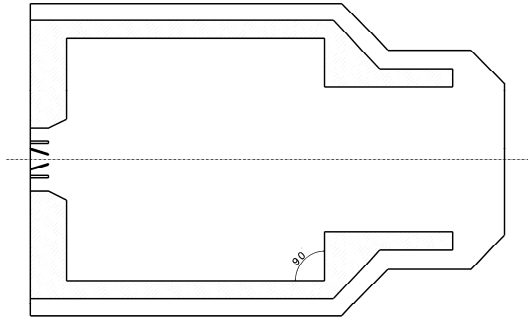


รูปที่ 9 ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิที่เกิดจาก
การเป่าดับ (K), (Pre-Chamber 135°)

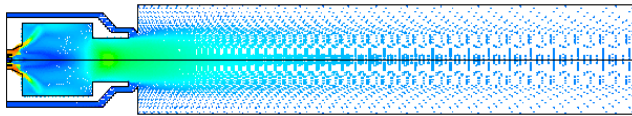
4.3 ผลการจำลองของหัวเผา Pre-Chamber ที่มี มุมผนังบริเวณทางออก 90 องศา

กรณีนี้ได้ทำการปรับเปลี่ยนมุมของผนังบริเวณ
ทางออกเป็น 90 องศา ดังแสดงรูปที่ 10 เพื่อที่จะเพิ่ม
ระยะเวลาในการเผาไหม้ โดยใช้เงื่อนไขในการจำลอง
เช่นเดียวกับกับหัวข้อที่ 4.1

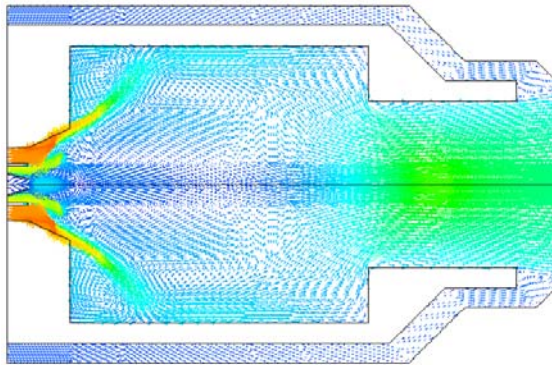
AEC-2029



รูปที่ 10 ลักษณะของหัวเผา Pre-Chamber ที่มีมุมของผนังบริเวณทางออก 90 องศา



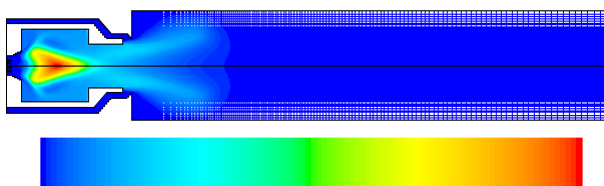
(a)



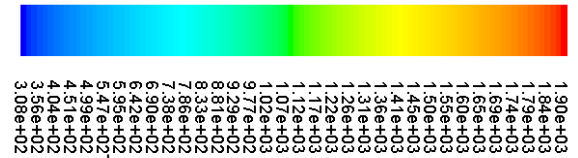
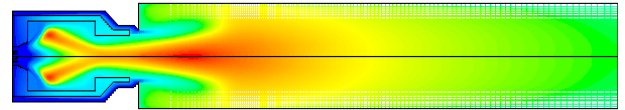
(b)

รูปที่ 11 เวกเตอร์ความเร็วของก๊าซ (m/s), (Pre-Chamber 90°)

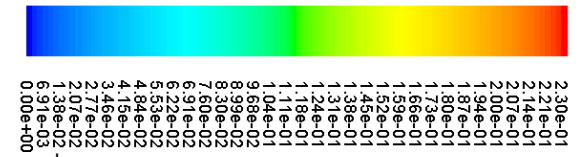
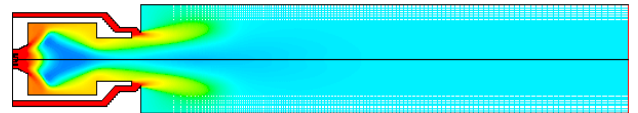
(a) ตลอดเตาเผา, (b) บริเวณหัวเผา



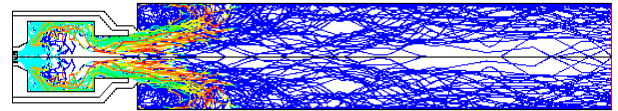
รูปที่ 12 การกระจายตัวของความเข้มข้นสารระเหย (Mass Fraction), (Pre-Chamber 90°)



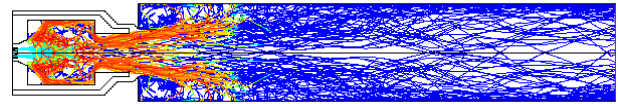
รูปที่ 13 การกระจายตัวของอุณหภูมิ (K), (Pre-Chamber 90°)



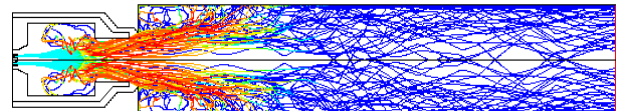
รูปที่ 14 การกระจายตัวของความเข้มข้นออกซิเจน (Mass Fraction), (Pre-Chamber 90°)



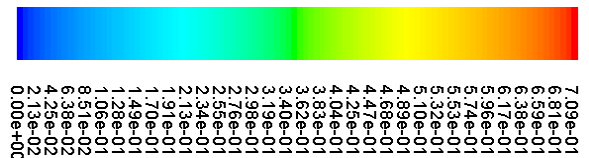
(a)



(b)



(c)



รูปที่ 15 เส้นทางเดินของอนุภาคที่แสดงถึงสัดส่วนเชิงมวลของอนุภาคคาร์บระหว่างเผาไหม้, (Pre-Chamber 90°)

(a) อนุภาคขนาดเล็ก 10 - 30, (b) กลาง 40 - 70 และ (c) ใหญ่ 80 - 100 ไมครอน

AEC-2029

จากรูปที่ 11 - 15 แสดงเวกเตอร์ความเร็วของแก๊ส การกระจายตัวของความเข้มข้นสารระเหย การกระจายตัวของอุณหภูมิ การกระจายตัวของความเข้มข้นออกซิเจน และเส้นทางเดินของอนุภาครวมถึงสัดส่วนเชิงมวลของอนุภาคสารระเหยระหว่างการเผาไหม้สำหรับหัวเผา Pre-Chamber ที่มีมุมของผนังบริเวณทางออก 90 องศาตามลำดับ โดยที่การกระจายตัวของความเร็วแก๊สสามารถสังเกตเห็น IRZ และ ERZ บริเวณห้องเผาไหม้ของ Pre-Chamber ทางด้านเส้นทางเดินของอนุภาคสังเกตเห็นเส้นทางของอนุภาคสอดคล้องกับกระแสการไหลภายในห้องเผาไหม้ แต่อย่างไรก็ตามอิทธิพลของอากาศส่วนที่สองที่เป็นกระแสการไหลหมุนวนไม่สามารถเห็นยวนำพาอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ให้เกิดการหมุนวนภายใน Pre-Chamber ได้ ขณะที่การกระจายตัวของความเข้มข้นสารระเหยที่ปล่อยออกมาจากอนุภาค สังเกตได้ว่าปริมาณความเข้มข้นของสารระเหยที่มีค่าสูงถูกปล่อยออกมาในช่วง IRZ ของห้องเผาไหม้ Pre-Chamber และทำให้อนุภาคสารที่เพิ่มขึ้นหลังจากการปลดปล่อยสารระเหยของอนุภาคในช่วงระหว่างการเผาไหม้มีแนวโน้มลดลงและหมดลงไปในที่สุด จึงทำให้การกระจายตัวของอนุภาคที่เกิดขึ้นภายในช่วง IRZ มีความร้อนที่สูงเท่ากับ 1894 K ซึ่งเกิดจากพลังงานความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ของสารระเหย ในทำนองเดียวกันนั้นจึงทำให้ความเข้มข้นของออกซิเจนมีค่าที่ต่ำในบริเวณนี้

5. สรุป

จากผลการจำลองสำหรับหัวเผา Pre-Chamber ที่มีมุมผนังบริเวณทางออก 90 องศา สามารถทำให้การกระจายตัวของอนุภาคมากขึ้นภายในห้องเผาไหม้ในส่วน Pre-Chamber เนื่องจากผนัง บริเวณทางออกของห้องเผาไหม้ Pre-Chamber ได้กั้นขวางเส้นทางเดินของอนุภาคได้บางส่วน จึงเป็นสาเหตุทำให้อนุภาคบางส่วนมีเส้นทางเดินแบบย้อนกลับและมีระยะเวลาในการเดินทางของอนุภาคมากขึ้น จึงทำให้ระยะเวลาในการเผาไหม้ (Residence Time) ภายในห้องเผาไหม้ของ Pre-Chamber เพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้มี

การปลดปล่อยสารระเหยอย่างรวดเร็วภายในห้องเผาไหม้ของ Pre-Chamber และทำให้การกระจายตัวของอุณหภูมิสูงขึ้นในบริเวณนี้เท่ากับ 1894 K ในทำนองเดียวกันนั้นสามารถคงความเสถียรภาพในการเผาไหม้ไว้ได้โดยไม่มีการเกิดปรากฏการณ์การเป่าดับ

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] อัมพล อาภาธนากร นิमित นิพัทธ์ธรรมกุล และ เฉลิมพงษ์ กล้าขยัน (2555). *โครงการนำร่องเพื่อผลิตพลังงานทดแทนจากชีวมวลในระดับชุมชน*, พิมพ์ครั้งที่ 1, สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ (องค์การมหาชน) และสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน
- [2] F. Breussin, F. Pigari and R. Weber. (1996). Predicting the near-burner-zone flow field and chemistry of swirl-stabilized low-NO_x flames of pulverized coal using the RNG- $k-\epsilon$, RSM and $k-\epsilon$ turbulence models. *Twenty-Sixth Symposium (International) on Combustion/The Combustion Institute*, pp. 211–217
- [3] F.C. Lockwood, A.P. Salooja and S.A. Syed. (2010). A Prediction Method for Coal Fired Furnaces”, *Combustion and Flame*. Vol.38. pp. 1, 1980. International Energy Agency (IEA), “Power Generation from Coal, *The IEA Coal Industry Advisory Board (CIAB)*, pp. 58.
- [4] 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.
- [5] J. Charoensuk, (1996). *The Application of Mathematical Model for Scaling Pulverized coal combustors*, Ph.D Thesis, University of London.
- [6] Jones W.P., Launder B.E. “The Prediction of Laminarization with a Two-Equation Model of Turbulence”, *International Journal of Heat and Mass Transfer.*, Vol.15, 1972. pp. 301.

AEC-2029

- [7] Lingling Zhao, Qiangtai Zhou and Changsui Zhao. (2008). Flame characteristics in a novel petal swirl burner. *Combustion and Flame* 155, pp. 277–288.
- [8] Lockwood F.C., Salooja A.P. and Syed S.A. (1980). A Prediction Method for Coal Fired Furnaces. *Combustion and Flame*, vol. 38, pp. 1.
- [9] 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.
- [10] M. M. Baum and P. J. Street. (1971). Predicting the Combustion Behavior of Coal Particles. *Combust. Sci. Tech*, 3(5):231-243.
- [11] N.Punbusayakul (2004). *Numerical Simulation of Sulfur Dioxide Adsorption in a Vortex Flow Reactor*, Thesis of King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.
- [12] Patankar S.V. (1996). Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, *Hemisphere*. Washington D.C. 1980.
- [13] 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.
- [14] T. Abbas. (1993). *In-flame Measurement of N-Pollutant and Burnout in a Pulverised-Coal-Fired Furnace*, Ph.D. Thesis of University of London and the Dipoma of Membership of the Imperial College.
- [15] 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.