



การวิเคราะห์เชิงตัวเลขของการเผาไหม้แบบ Multi-Species ด้วยวิธี Eulerian-Granular Model Numerical Simulation of Multi-Species Combustion with Eulerian-Granular Model

มงคล แก้วบำรุง¹ และ เฉลิมพล เป็ล่งสะอาด²

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยปทุมธานี อ.เมือง จ.ปทุมธานี 12000

²ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

*ติดต่อ: E-mail : mongkol.kaewbumrung@gmail.com, โทรศัพท์ 02-979-6999

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อนำเสนอรูปแบบการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแบบ Eulerian Combustion ด้วยวิธี Volumetric Finite-Rate Interaction แบบปั่นป่วนสองมิติ เพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดกลไกการเผาไหม้ก่อนเปลี่ยนสถานะจากเชื้อเพลิงแข็งเป็นแก๊สผสมที่ประกอบไปด้วย ไอน้ำ (H₂O), ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO), และ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) โดยชุดสมการควบคุมของการวิเคราะห์เชิงตัวเลขสำหรับการไหลของเชื้อเพลิงพิจารณาแบบ Eulerian-Granular Model ที่มีปฏิสัมพันธ์ความปั่นป่วนของเชื้อเพลิงแบบ Kinetic Theory of Granular Flow (KTGF) และขั้นตอนการหาคำตอบของระบบสมการดังกล่าวใช้วิธี Finite Volume Method ภายใต้กรอบของ Eulerian Reference Frame ที่มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ไปตามกฎของ Arrhenius Reaction ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป ANSYS FLUENT R17.1 สำหรับกลไกจลนศาสตร์เคมีของการเผาไหม้มีส่วนประกอบทางเคมี 7 ชนิด และสมการทางเคมี 9 สมการ โดยมีการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของการเผาไหม้แบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous Reaction) ซึ่งผลที่ได้จากการวิเคราะห์พบว่า อัตราส่วนผสมของเชื้อเพลิงก่อนเปลี่ยนสถานะ, ปริมาณความหนาแน่นของเชื้อเพลิง, อุณหภูมิของอากาศที่เข้ามาผสม มีผลกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ ความร้อนที่เกิดขึ้น และปริมาณเชิงมวลของแก๊สผสมที่ได้ ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองดังกล่าวจะเป็นข้อมูลสำหรับการออกแบบการทดลองจริงและสร้างต้นแบบต่อไปในอนาคต

คำหลัก: Multi-Species, Eulerian-Granular Model, Volumetric Finite-Rate/Eddy-Dissipation

Abstract

In this research is focus between a Eulerian Combustion based on Volumetric Finite-Rate Interaction. The fluid is considered as two-dimensional multiphase turbulence fluid at a steady state condition. The phase interaction between solid fuel assume to be a granular material govern by the set of partial differential equations based on Eulerian-Granular Model with Kinetic Theory of Granular Flow (KTGF) option. The commercial software ANSYS FLUENT R17.1 based on Finite Volume Method (FVM) applied in this study. The Heterogeneous Phase Combustion Kinematic reaction consist of 7 chemical species with 9 chemical compositions are investigated the gas composition after combust consist of H₂O, CO and CO₂. from variation of the Fuel Volume fraction at the inlet, Mass Fraction of Volatile in Solid Carbon and Air Inlet temperature. The result suggest that the fuel volume fraction and air temperature at the inlet are effect to the mass fraction of of H₂O, CO and CO₂ but for Mass Fraction of Volatile in Solid Carbon still not precisely to suggest due to limitation of Eulerian-Granular theory.

Keywords: Multi-Species, Eulerian-Granular Model, Volumetric Finite-Rate/Eddy-Dissipation

1. บทนำ

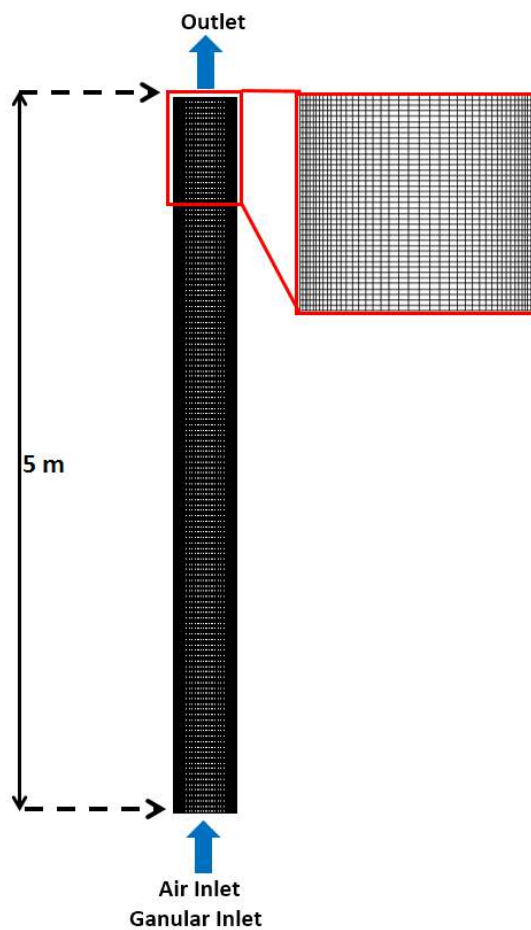
จากสถานการณ์ปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมเนื่องจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่ไม่สมบูรณ์หรือไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอส่งผลให้เกิดการปล่อยก๊าซที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และการดำเนินชีวิตของมนุษย์ นักวิทยาศาสตร์และวิศวกรจึงได้ค้นคว้าวิจัยหาเชื้อเพลิงชนิดใหม่ๆ ที่หาได้ง่ายและไม่ปล่อยก๊าซพิษออกสู่สิ่งแวดล้อมหรือปล่อยออกมาอยู่ในระดับที่ไม่เป็นอันตราย และตัวเลือกที่ได้รับความสนใจเป็นลำดับต้นๆ คือ ไม้ แกลบ และ เศษเหลือจากอุตสาหกรรมการเกษตร เป็นต้น เพราะนอกจากจะเป็นการกำจัดขยะไปในตัวแล้วยังเป็นการเพิ่มมูลค่าของขยะเหล่านั้นกลายมาเป็นพลังงานทดแทนได้

จากการศึกษาปัจจุบันพบว่า การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแบบ Multi-Species ที่มีการฉีดเชื้อเพลิงแบบหนาแน่นและต่อเนื่อง เพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดกลไกการเผาไหม้ก่อนเปลี่ยนสถานะจากเชื้อเพลิงแข็งเป็นแก๊สผสมที่ประกอบไปด้วย ออกซิเจน (O_2), ไนโตรเจน (N_2), ไอน้ำ (H_2O), ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO), และ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) มีผลมาจากการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผสมของเชื้อเพลิงก่อนเปลี่ยนสถานะ, ปริมาณความหนาแน่นของเชื้อเพลิง, คุณสมบัติของอากาศที่เข้ามาผสม แต่ในการทำวิจัยที่ผ่านมา [1,2,4,5] จะมุ่งเน้นไปที่การพ่นเชื้อเพลิงที่ทำกรบดจนเป็นผงขนาดเล็กแล้วพ่นเข้าไปในระบบเพื่อให้เกิดการเผาไหม้ ซึ่งจะเหมาะกับเชื้อเพลิงที่มีความแข็งเช่น ผงเซรามิก ผงถ่านหิน และ ผงถ่าน เป็นต้น ดังนั้นการจำลองด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณจะใช้วิธี Discrete Particle Model (DPM) ซึ่งมีข้อจำกัดคืออัตราส่วนของเม็ดเชื้อเพลิงที่พ่นเข้าไปในระบบจะต้องไม่เกิน 10% ของมวลรวมทั้งหมด [3] หากต้องการเพิ่มอัตราส่วนของเม็ดเชื้อเพลิงมากกว่า 10% ชุดสมการควบคุมของการวิเคราะห์เชิงตัวเลขสำหรับการไหลของเชื้อเพลิงต้องพิจารณาแบบ Eulerian-Granular Model ที่มีปฏิสัมพันธ์ความปั่นป่วนทางเคมีแบบ

Volumetric Finite-Rate Interaction ภายใต้กรอบของ Eulerian Reference Frame [3] งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการศึกษาการเผาไหม้ที่มีอัตราส่วนของเชื้อเพลิงมากกว่า 10% โดยพิจารณาอัตราส่วนผสมของก๊าซที่เกิดขึ้นเพื่อนำผลที่ได้จากการจำลองดังกล่าวจะเป็นข้อมูลสำหรับการออกแบบการทดลองจริงและสร้างต้นแบบต่อไปในอนาคต

2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในการศึกษาครั้งนี้จะพิจารณาเป็นแบบสองมิติในระบบแกน x-y ภายใต้กรอบของ Eulerian Reference Frame ที่ความดันบรรยากาศปกติของไหลในระบบสองชนิดคือ เชื้อเพลิงผงและอากาศ โดยรูปที่ 1 แสดงตัวแปรที่สนใจในการศึกษาครั้งนี้



รูปที่ 1 ขนาดและรูปร่างของห้องเผาไหม้ที่ทำการศึกษา



3. ระเบียบวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

ในการศึกษานี้เป็นการศึกษาแบบสารหลายชนิด (Multiphase) ประกอบไปด้วยเม็ดเชื้อเพลิงแข็งพิจารณาแบบ Eulerian-Granular และอากาศที่สามารถเกิดปฏิกิริยาทางเคมีได้ ซึ่งสมการควบคุมต่างๆที่ใช้สำหรับเม็ดเชื้อเพลิงอยู่ภายใต้ที่มีปฏิสัมพันธ์ความปั่นป่วนทางเคมีแบบ Volumetric Finite-Rate Interaction ภายใต้กรอบของ Eulerian Reference Frame [3] ของโปรแกรมสำเร็จรูป ANSYS FLUENT R17.1 ซึ่งใช้วิธีปริมาตรจำกัด โดยกริดที่เลือกใช้เป็นแบบสี่เหลี่ยมไม่สม่ำเสมอ บริเวณผนังจะสร้างกริดที่มีขนาดเล็กเพื่อเพิ่มความถูกต้องของการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีดังรูปที่ 1 จำนวนกริดที่ใช้ศึกษามีจำนวน 92,600 กริด ที่ให้ค่าคำตอบที่ไม่เปลี่ยนแปลงไปตามขนาดและจำนวนของกริด สำหรับการแก้สมการพีชคณิตได้ใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่เหมาะสมดังนี้

- P – V Coupling : Coupled
- Special Discretization
- Gradient : Green-Gauss Cell Based
- Pressure : Second Order Upwind
- Momentum : Second Order Upwind
- Volume Fraction : Second Order Upwind
- Turbulent-k : Second Order Upwind
- Turbulent- ε : Second Order Upwind
- Phase Species : Second Order Upwind

3.1 สมการการเคลื่อนที่และการเผาไหม้ของเม็ดเชื้อเพลิงแบบ Eulerian-Granular

สำหรับการเคลื่อนที่ของเม็ดเชื้อเพลิงที่พิจารณาภายใต้กรอบของ Eulerian Reference Frame [3,4,5,6] สามารถเขียนได้เป็น

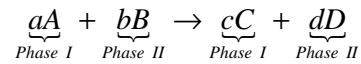
$$\frac{\partial}{\partial t}(\phi_s \rho_s) + \nabla \cdot (\phi_s \rho_s U_s) = S_{sg} \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\phi_s \rho_s) + \nabla \cdot (\phi_s \rho_s U_s) = S_{sg} \quad (2)$$

เมื่อ

- ϕ คือ Volume Fraction
- ρ คือ Density
- U คือ Instantaneous Velocity

พิจารณาสมการเคมีของการเผาไหม้เป็น



สามารถเขียนสมการการถ่ายเทมวล (Mass Transfer) , Momentum Transfer, Species Transfer และ Heat Transfer ของสมการเผาไหม้ดังกล่าวได้ดังนี้

$$\begin{aligned} S_1 &= \Re [cM_c - aM_a] \\ S_2 &= \Re [dM_d - bM_b] \end{aligned} \quad (3)$$

Mass Transfer

$$\begin{aligned} S_1^{\bar{u}} &= \Re \left[cM_c \left[\frac{aM_a \bar{u}_1 + bM_b \bar{u}_2}{aM_a + bM_b} \right] - aM_a \bar{u}_1 \right] \\ S_2^{\bar{u}} &= \Re \left[dM_d \left[\frac{aM_a \bar{u}_1 + bM_b \bar{u}_2}{aM_a + bM_b} \right] - bM_b \bar{u}_2 \right] \end{aligned} \quad (4)$$

Momentum Transfer

$$S_i^k = \Re \sum_{p_i^k} \gamma_j^{p_i^k} M_j^{p_i^k} - \Re \sum_{j_i^k} \gamma_j^{j_i^k} M_j^{j_i^k} \quad (5)$$

Species Transfer

$$S_i^H = S_{p_i} \left[\frac{\sum_r \gamma_j^r M_j^r h_j^{f,r}}{\sum_r \gamma_j^r M_j^r} \right] - \Re \sum_{p_i} \gamma_j^p M_j^p h_j^{f,p} \quad (6)$$

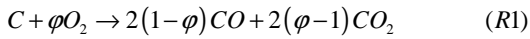
Heat Transfer

3.2 สมการเคมีของการเผาไหม้ [3,6,7]

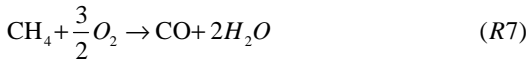
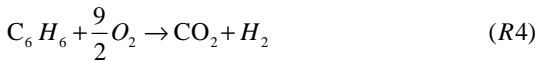
การเผาไหม้ของเม็ดเชื้อเพลิงที่พ่นเข้าไปในระบบมีอัตราส่วนไม่เกิน 20% - 30% โดยในการศึกษานี้



จะพิจารณาการชนกันของเม็ดเชื้อเพลิงซึ่งจะประกอบไปด้วยคุณสมบัติทางเคมีดังนี้



Solid Heterogeneous Reaction



Combustion Reaction and Kinetics of Gas Phase

เม็ดเชื้อเพลิงแต่ละเม็ดจะเกิดการเผาไหม้และเปลี่ยนเป็นก๊าซซึ่งการคำนวณการเปลี่ยนสถานะดังกล่าวใช้วิธีการคำนวณแบบ Multi Species โดยมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีเป็นไปตามกฎของ Arrhenius สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$k_{f,r} = A_r T^{\beta_r} e^{-E_r/RT} \quad (7)$$

เมื่อ

A_r	คือ	Pre-exponential Factor
β_r	คือ	Temperature Exponent
E_r	คือ	Activation energy for the Reaction

3.3 สมการเคมีสำหรับ Species Transport

Equations

จากงานวิจัยที่ผ่านมา [3, 8,9,10] มาพบว่าการเคลื่อนที่ของเม็ดเชื้อเพลิงขนาดเล็กที่มีความหนาแน่นสูงนั้นจำเป็นอย่างยิ่งในการนำทฤษฎีการคำนวณการเคลื่อนที่ของเม็ดเชื้อเพลิงในระบบแบบ Kinetic Theory

of Granular Flow (KTGF) เนื่องจากปฏิสัมพันธ์กันระหว่างเม็ดเชื้อเพลิงและการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้น ซึ่งพิจารณาจากสมการการถ่ายเทพลังงานและการชนกันของอนุภาคดังนี้

$$\frac{3}{2} \left[\frac{\partial}{\partial t} (r_s \rho_s \Theta_s) + \nabla \cdot (r_s \rho_s \Theta_s u_s) \right] = \quad (8)$$

$$- \underbrace{\left(p_s \bar{I} + r_s \bar{r}_s \right) \nabla \bar{u}_s + \nabla \cdot (k_s \nabla \Theta_s) - \gamma - 3 \Phi_{gs} \Theta_s}_{\text{Transport Equation of Particle Collide}}$$

สำหรับการถ่ายเทพลังงานของเม็ดเชื้อเพลิงแต่ละเม็ดนั้นสามารถคำนวณได้จาก Diffusion Coefficient (k) สามารถคำนวณได้จากสมการ [10]

$$k_s = \frac{0.39 \rho_s d_s \sqrt{\Theta_s \pi}}{(1+e) g_0} [1 + 1.2 r_s g_0 (1+e)]^2 \quad (9)$$

$$+ 2 \rho_s d_s g_0 r_s^2 (1+e) \sqrt{\frac{\Theta_s}{\pi}}$$

แต่เนื่องจากการไหลและการถ่ายเทพลังงานที่เกิดขึ้นของเม็ดเชื้อเพลิงทำให้เกิดการไหลและการเคลื่อนที่แบบปั่นป่วน (γ) ซึ่งพบว่ามึผลกับการเคลื่อนที่และการเผาไหม้ที่เกิดขึ้น จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าสามารถเขียนอยู่ในรูปสมการได้คือ

$$\gamma = 3(1-e^2) r_s^s \rho_s d_s g_0 \Theta_s \left[\frac{4}{d_s} \left(\sqrt{\frac{\Theta_s}{\pi}} \right) - \nabla u_s \right] \quad (10)$$

สำหรับการไหลของอากาศพิจารณาการไหลเป็นแบบปั่นป่วนโดยใช้สมการความปั่นป่วนมาตรฐานแบบ $k-\epsilon$ [3]

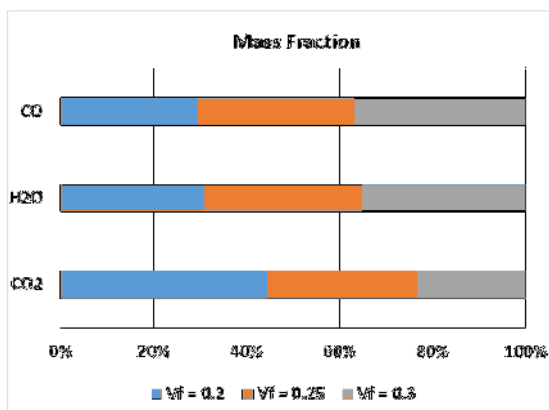
4. ผลการจำลอง

จากผลจากการศึกษา พบว่า อัตราส่วนผสมของเชื้อเพลิงก่อนเปลี่ยนสถานะ, ปริมาณความหนาแน่นของเชื้อเพลิง, คุณสมบัติของอากาศที่เข้ามาผสม มีผลกับ

อัตราการเพิ่มขึ้นของส่วนประกอบทางเคมีของก๊าซที่ได้หลังเผาไหม้ เช่น ไอน้ำ (H₂O), ก๊าซคาบอนมอนนอกไซด์ (CO), และ ก๊าซคาบอนไดออกไซด์ (CO₂) ดังนี้

4.1 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผสมของเชื้อเพลิงก่อนเปลี่ยนสถานะ

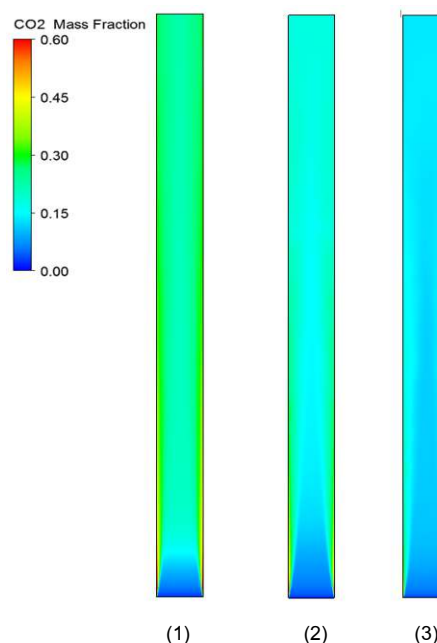
จากผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน (Vf : Volume Fraction) ผสมของเชื้อเพลิงก่อนเปลี่ยนสถานะมีค่าระหว่าง 0.2, 0.25 และ 0.3 มีความเร็วของอากาศที่ทางเข้า 3 m/s, อุณหภูมิของอากาศ 1,200 K ตามลำดับ พบว่า อัตราการเกิดก๊าซ CO ที่ ค่า Volume Fraction ที่เปลี่ยนแปลงไปไม่ได้มีผลต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของก๊าซที่เกิดขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เช่นเดียวกับ H₂O ที่มีอัตราการเกิดเท่าๆกันแม้ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงค่า Volume Fraction แต่สำหรับ ก๊าซ CO₂ พบว่าอัตราการเกิดเมื่อ Volume Fraction มีค่าน้อยและการเกิด ก๊าซ CO₂ จะค่อยๆลดลงเมื่อเพิ่ม Volume Fraction ซึ่งทั้งนี้ยังไม่ได้กล่าวได้แน่ชัดว่าเกิดจากปฏิกิริยาการเผาไหม้หรือที่อัตราส่วนผสมใดในเบื้องต้น แต่คาดว่าน่าจะเกิดจาก สมการเผาไหม้ R9 ที่ CO₂ สามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีเปลี่ยนไปเป็น H₂O และ CO



รูปที่ 2 Mass Fraction ของ ก๊าซ CO₂, H₂O และ CO เมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนผสมของเชื้อเพลิง

เมื่อพิจารณาการเกิด ก๊าซ CO₂ จากภาพที่ 3 พบว่า หาก Volume Fraction มีค่าน้อยการเผาไหม้จะอยู่ในวงแคบๆที่บริเวณทางเข้าเท่านั้น แต่เมื่อ Volume

Fraction ของเชื้อเพลิงมากขึ้นการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้มีแนวโน้มเกิดได้ทั่วถึงมากยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามหากความเร็วของอากาศที่ทางเข้าน้อยจนเกินไปอาจเป็นสาเหตุให้อากาศไม่มีแรงมากพอที่จะยกให้ผงเชื้อเพลิงลอยตัวขึ้นเพื่อเกิดการเผาไหม้ได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้ไม่ได้ศึกษาถึงผลกระทบดังกล่าวแต่จะมีการศึกษาในอนาคตด้วยสมการความปั่นป่วนที่มีความซับซ้อนและเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา



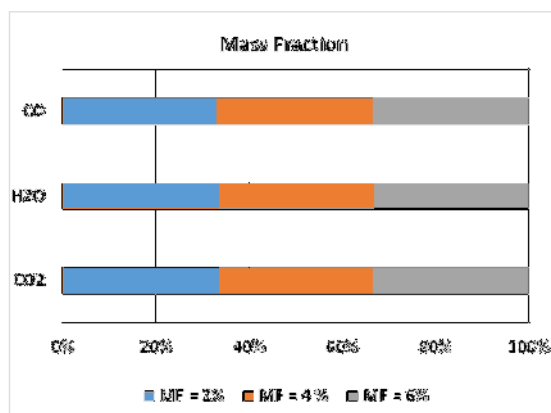
รูปที่ 3 ความเข้มข้นของ CO₂ เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผสมของเชื้อเพลิง

- (1) Volume Fraction 0.20
- (2) Volume Fraction 0.25
- (3) Volume Fraction 0.30

4.2 ผลของการเปลี่ยนแปลง Mass Fraction ของคาร์บอน C(s) ในเม็ดเชื้อเพลิง

ผลการศึกษาสำหรับการเปลี่ยนแปลง Mass Fraction ของคาร์บอน C(s) ในเม็ดเชื้อเพลิงซึ่งอยู่ระหว่าง 20% - 60% แสดงดังรูปที่ 4 นั้น พบว่าการเกิดก๊าซทั้งสามชนิดมีปริมาณที่ใกล้เคียงกันและไม่มีความแตกต่างอย่างชัดเจนมากนัก ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่ม Mass Fraction ของคาร์บอน C(s) ในเม็ดเชื้อเพลิงน่าจะมีผลที่

ให้เกิดการเผาไหม้ที่ดีขึ้นและปริมาณก๊าซที่ได้ควรจะมีความเพิ่มขึ้นเช่นกัน แต่จุดและปริมาณที่ทำการศึกษานี้อาจจะไม่ถึงจุดวิกฤติที่ทำให้เกิดพฤติกรรมดังกล่าวได้นอกจากนี้แล้ว พบว่า หากเพิ่ม Mass Fraction ของคาร์บอน C(s) มากกว่า 60% การคำนวณจะไม่ลู่เข้าสู่คำตอบเนื่องจากแรงยกของอากาศมีไม่มากพอและการชนกันของเม็ดเชื้อเพลิงจะเข้ามามีผลกับการเคลื่อนที่และจากการค้นคว้าเพิ่มเติม [2] พบว่า หากเพิ่ม Mass Fraction ของคาร์บอน C(s) มากกว่า 60% Eulerian-Granular Model ไม่สามารถคำนวณได้ถูกต้อง จำเป็นต้องใช้ Dense Discrete Phase Model (DDPM) ซึ่งเป็นการผสมกันระหว่าง Eulerian-Granular Model และ Discrete Phase Model จะสามารถคำนวณได้ถูกต้องแม่นยำได้ดีกว่า Eulerian-Granular Model ที่ใช้ในปัจจุบัน

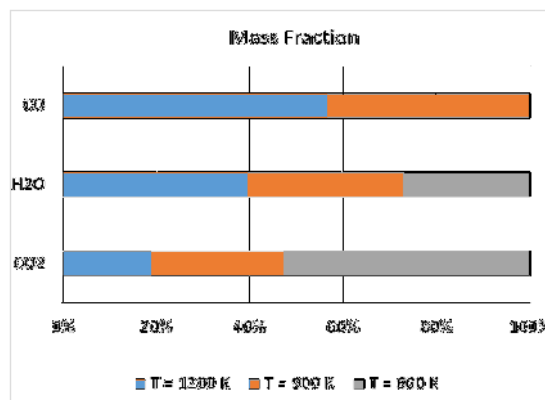


รูปที่ 4 Mass Fraction ของ ก๊าซ CO₂, H₂O และ CO เมื่อเปลี่ยนแปลง Mass Fraction ของคาร์บอน C(s) ในเม็ดเชื้อเพลิง

4.3 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศที่เข้ามาผสม

การศึกษาสำหรับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศที่เข้ามาผสมนั้นเป็นอีกหนึ่งตัวแปรที่มีความสำคัญกับก๊าซและพลังงานที่ใช้ในระบบการเผาไหม้เพราะหากอุณหภูมิที่เข้ามามีค่าน้อยเกินไปก็จะทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีของการเผาไหม้แต่หากสูงมากเกินไปนอกจากจะเป็นการสิ้นเปลืองพลังงานโดยเปล่าประโยชน์แล้ว ในการเพิ่ม

อุณหภูมิให้กับอากาศอาจจะเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับไปเกิดก๊าซที่ไม่ต้องการได้ ซึ่งจากผลการศึกษานี้ได้ใช้อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าเท่ากับ 1,200 K, 900 K และ 600 K ตามลำดับ จากรูปที่ 5 พบว่าที่อุณหภูมิอากาศ 600 K อัตราการเกิด CO นั้นน้อยมากเมื่อเทียบกับก๊าซชนิดอื่นๆ โดยที่ CO จะเกิดมากที่สุดที่อุณหภูมิอากาศ 1,200 K แสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิของอากาศทางเข้ามีผลกับการเผาไหม้ที่เกิดขึ้น และมีแนวโน้มที่อุณหภูมิสูงมากยิ่งขึ้นจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้ดีมากยิ่งขึ้นแต่จะมีความคุ้มค่าสำหรับการเพิ่มความร้อนให้อากาศหรือไม่นั้นต้องได้รับการศึกษาต่อไปในอนาคต



รูปที่ 5 Mass Fraction ของ ก๊าซ CO₂, H₂O และ CO เมื่อเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิของอากาศที่เข้ามาผสม

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] L. Zhang, D. Wu, L. Cai, C. Zou, J. Qiu, C. Zheng, The chemical and physical effects of {CO₂} on the homogeneous and heterogeneous ignition of the coal particle in O₂/CO₂ atmospheres, Proc. Combust. Inst. (2016) <http://dx.doi.org/10.1016/j.proci.2016.09.022>.
- [2] Anca-Couce, A., Zobel, N., Jakobsen, H.A., 2013. Multi-scale modeling of fixed-bed thermochemical processes of biomass with the



representative particle model: application to pyrolysis. *Fuel* 103 (0), 773–782.

[3] ANSYS FLUENT 14.5, Theory Guide; ANSYS, Inc., 2012

[4] Blondeau J, Jeanmart H. Biomass pyrolysis at high temperatures: prediction of gaseous species yields from an anisotropic particle. *Biomass Bioenergy* 2012;41:107–21

[5] C. Bu, A. Gómez-Barea, X. Chen, B. Leckner, D. Liu, D. Pallarès, P. Lu, Effect of CO₂ on oxy-fuel combustion of coal-char particles in a fluidized bed: modeling and comparison with the conventional mode of combustion, *Appl. Energy* 177 (2016) 247–259, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.05.108>.

[6] C. Bu, D. Pallarès, X. Chen, A. Gómez-Barea, D. Liu, B. Leckner, P. Lu, Oxy-fuel combustion of a single fuel particle in a fluidized bed: char combustion characteristics, an experimental study, *Chem. Eng. J.* 287 (2016) 649–656, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2015.11.078>.

[7] Corbetta, M., Frassoldati, A., Bennadji, H., Smith, K., Serapiglia, M.J., Gauthier, G., Melkior, T., Ranzi, E., Fisher, E.M., 2014. Pyrolysis of centimeter-scale woody biomass particles: kinetic modeling and experimental validation. *Energy Fuels* 28 (6), 3884–3898.

[8] D. Kim, S. Choi, C.R. Shaddix, M. Geier, Effect of CO₂ gasification reaction on char particle combustion in oxy-fuel conditions, *Fuel* 120 (2014) 130–140, <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2013.12.004>.

[9] Garcia, L., Salvador, M.L., Arauzo, J., Bilbao, R., 1998. Influence of catalyst weight/biomass

flow rate ratio on gas production in the catalytic pyrolysis of pine sawdust at low temperatures. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 37, 3812–3819.

[10] H. Enwald, E. Peirano, A. Almstedt, B. Leckner, Simulation of the fluid dynamics of a bubbling fluidized bed experimental validation of the two-fluid model and evaluation of a parallel multiblock solver., *Chem. Eng. Sci.* 54 (1999) 311–328.