



## การศึกษาพารามิเตอร์เพื่อสอบเทียบการกระจายตัวอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ สำหรับหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงชนิดห้องเผาไหม้ช่วย

### Parametric Study for Validating the Temperature Distribution for Pulverized Biomass Burner with a Pre-Chamber

พงศกร สิริภูมิ<sup>1</sup>, จารุวัตร เจริญสุข<sup>1</sup> และ ภรณ์เพ็ญ สภิตนากุล<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ถนนฉลองกรุง 1 เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

\*ผู้ประพันธ์บทความ [ponepen.la@kmitl.ac.th](mailto:ponepen.la@kmitl.ac.th)

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการปรับแต่งพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวลผง สำหรับหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงชนิดห้องเผาไหม้ช่วย ที่อัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิงเข้า 300kW ด้วยการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณแบบ 2 มิติเบื้องต้นได้ทำการตรวจสอบความเป็นอิสระของกริด โดยจากผลการทดสอบได้เลือกใช้กริดขนาดความละเอียดจำนวน 28584 เอลิเมนต์ พารามิเตอร์ที่ทำการปรับแต่งสามารถแบ่งได้เป็น 3 หมวดตามแบบจำลอง ได้แก่ Devolatilization, Char Combustion และ Enthalpy of formation ของสารระเหย ประกอบไปด้วย 5 พารามิเตอร์ย่อย โดยก่อนการปรับแต่งพบว่า อุณหภูมิตำแหน่ง  $T_1-T_4$  มีระดับต่ำกว่าผลการทดลองคิดเป็นความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 15.025% ในขณะที่อุณหภูมิตำแหน่ง  $T_5$  มีค่าสูงกว่า คิดเป็นความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 15.6% และ  $T_6-T_7$  คิดเป็นความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 2.05% ผู้วิจัยได้ทำการปรับแต่งโดยมุ่งเน้นให้สารตั้งต้นเกิดการปลดปล่อยพลังงานภายในห้องเผาไหม้ช่วยมากขึ้น เพื่อเพิ่มระดับอุณหภูมิ  $T_1-T_4$  ในขณะเดียวกันต้องลดหรือรักษาไม่ให้  $T_5$  สูงเกินกว่าผลการทดลองมากเกินไป จากผลการปรับแต่งพารามิเตอร์ทั้ง 3 หมวด ทำให้อุณหภูมิ  $T_1-T_4$  สูงจนถึงระดับเดียวกับผลการทดลอง มีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 1.225% แต่พบว่า  $T_5$  ยังคงมีค่าสูงกว่าคิดเป็นความคลาดเคลื่อน 16.1% และ  $T_6-T_7$  มีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 2.95% โดยจากการพิจารณา รูปแบบการไหลในห้องเผาไหม้ช่วยเห็นว่าบริเวณตำแหน่ง  $T_1-T_4$  ลักษณะการไหลที่มีความปั่นป่วนมากกว่าบริเวณอื่นๆ ดังนั้นผู้วิจัยจึงให้ความสำคัญกับความแม่นยำในบริเวณดังกล่าวเป็นหลัก ซึ่งหลังจากการปรับแต่งพารามิเตอร์มีความคลาดเคลื่อนลดลงอย่างเห็นได้ชัด จึงสามารถใช้ชุดพารามิเตอร์นี้ในการศึกษาอิทธิพลการขยายหัวเผาต่อไปได้

**คำหลัก:** พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ, การเผาไหม้, การเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล

#### ABSTRACT

This research presents the optimization of parameters affecting the combustion of pulverized biomass fuel for a pulverized biomass fuel burner with a pre-chamber at an input fuel combustion rate of 300kW, using 2D computational fluid dynamics (CFD) simulation. Initially, grid independence was verified, and based on the test results, a resolution of 28,584 elements was selected. The parameters adjusted can be categorized into three groups according to the model:

Devolatilization, Char Combustion, and Enthalpy of Formation of volatiles, consisting of five sub-parameters. Prior to optimization, it was found that the temperatures at positions  $T_1$ – $T_4$  were lower than the experimental results, with an average deviation of 15.025%. Meanwhile, the temperature at position  $T_5$  was higher, with an average deviation of 15.6%, and at positions  $T_6$ – $T_7$ , the average deviation was 2.05%. The researchers focused on optimizing the parameters to increase energy release within the pre-chamber to raise the temperatures at  $T_1$ – $T_4$ , while simultaneously reducing or maintaining  $T_5$  to avoid it being significantly higher than the experimental results. As a result of adjusting the parameters across the three categories, the temperatures at  $T_1$ – $T_4$  reached the same levels as the experimental results, with an average deviation of 1.225%. However,  $T_5$  remained higher, with a deviation of 16.1%, and  $T_6$ – $T_7$  had an average deviation of 2.95%. Upon examining the flow patterns within the auxiliary combustion chamber, it was observed that the flow was more turbulent around positions  $T_1$ – $T_4$  compared to other areas. Therefore, the researchers focused on achieving higher accuracy in these regions. The parameter adjustments significantly reduced deviations, indicating that these parameters can be used for further studies on the influence of burner expansion.

**Keywords:** CFD, Combustion, Biomass combustion

## 1. บทนำ

การปรับเปลี่ยนจากการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลของภาคอุตสาหกรรมที่นำความร้อนมาใช้ในกระบวนการผลิตถือเป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถลดการปลดปล่อยคาร์บอนสุทธิสู่ชั้นบรรยากาศ เนื่องจากการปลูกพืชสามารถดูดซับคาร์บอนในชั้นบรรยากาศได้ นำไปสู่การตอบสนองต่อนโยบายรัฐบาลและข้อตกลงประชาคมโลก อย่างไรก็ตามเทคโนโลยีการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งที่ใช้กันอยู่อย่างแพร่หลายในประเทศไทยยังคงเป็นเทคโนโลยีที่รองรับการเผาไหม้ถ่านหิน ซึ่งมีค่าความร้อนจำเพาะต่อหน่วยสูงกว่าชีวมวลให้เปลวไฟสั้นและได้ก๊าซไอเสียอุณหภูมิสูง ในการเปลี่ยนประเภทเชื้อเพลิงจึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงหรือเปลี่ยนการออกแบบหัวเผาเพื่อให้เหมาะสมต่อเชื้อเพลิงชีวมวลไปด้วย

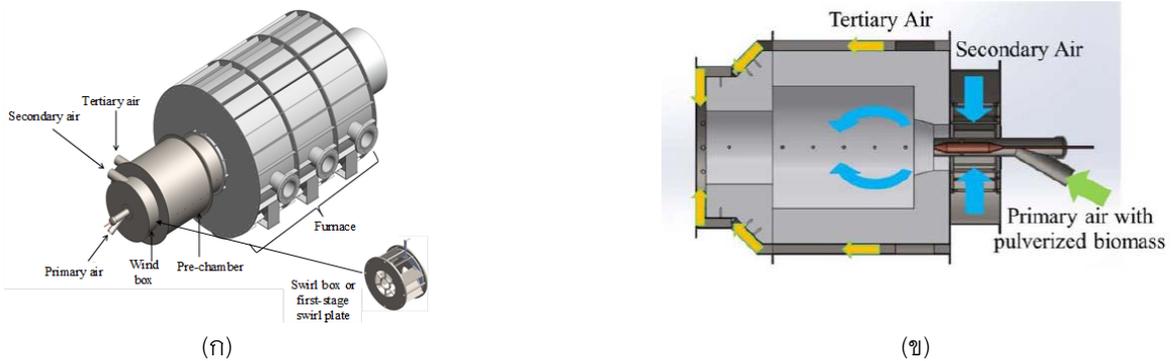
โดยเครื่องมือหนึ่งที่นิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลายและมีประสิทธิภาพ ในการศึกษาการเผาไหม้โดยไม่จำเป็นต้องใช้ต้นทุนสูงได้แก่ การใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics) ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจึงใช้ซอฟต์แวร์ Fluent เพื่อช่วยการออกแบบหัวเผาชีวมวลระดับห้องปฏิบัติการ อย่างไรก็ตามเพื่อให้ได้ความแม่นยำในการจำลองจะต้องมีการสอบเทียบกับผลการทดลองพื้นฐานเสียก่อน ซึ่งจากการศึกษาพบว่าค่าพื้นฐานสำหรับเชื้อเพลิงแข็งของซอฟต์แวร์ดังกล่าวถูกจัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการจำลองถ่านหินโดยเฉพาะ ทำให้แม้กระทั่งในงานวิจัยที่มีการใช้งานกับถ่านหิน ยังพบว่ามี การปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์บางส่วนเพื่อให้ผลการจำลองที่แม่นยำขึ้น [1–3] และในงานวิจัยที่ใช้เชื้อเพลิงผสมระหว่างถ่านหินและชีวมวลพบว่าพารามิเตอร์ในหมวด Devolatilization และ Char Combustion ได้มีการถูกปรับแต่งอย่างมีนัยสำคัญ โดยเน้นเพิ่มอัตราการปลดปล่อยสารระเหยเผาไหม้ได้ เนื่องจากชีวมวลมีสัดส่วนสารระเหยดังกล่าวสูงกว่าถ่านหินมากแต่มีความความร้อนต่ำ [4–6] จากการศึกษาผู้วิจัยได้นำค่าพารามิเตอร์ที่งานวิจัย ทั้งในส่วนการเผาไหม้สารระเหยและถ่านหินที่ใช้กับเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดต่างๆ มาใช้เป็นเกณฑ์เพื่อปรับแต่งในงานวิจัยนี้ซึ่งใช้ไม้ยางพาราเป็นเชื้อเพลิงต่อไป

เป็นที่มาของงานวิจัยนี้ ที่เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาอิทธิพลการขยายขนาดท่อปฐมภูมิสำหรับหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดผงโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อสอบเทียบผลการจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล (ไม้ยางพารา) กับผลการทดลองในห้องปฏิบัติการพารามิเตอร์ที่ปรับเปลี่ยนเพื่อสอบเทียบผลการทดลองสามารถแบ่งเป็นหมวดหมู่ตามแบบจำลอง ได้แก่ Devolatilization, Char Combustion และ Enthalpy of formation ของสารระเหย โดยผลการศึกษาจากงานวิจัยนี้จะถูกนำไปใช้ในการจำลองเพื่อศึกษาอิทธิพลการขยายขนาดท่อปฐมภูมิต่อไป อย่างไรก็ตามจากการสำรวจ ยังไม่พบบางงานวิจัยที่ระบุแนวทางการปรับแต่งพารามิเตอร์อย่างแน่ชัดเกณฑ์การปรับแต่งในงานวิจัยจึงเป็นการปรับค่าและสังเกตผลเปรียบเทียบกับผลการทดลองควบคู่กันไป

## 2. วิธีดำเนินการวิจัย

### 2.1 การทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง

ผู้วิจัยได้จัดทำการศึกษาทดลองการเผาไหม้หัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงแบบห้องเผาไหม้ช่วยเพื่อใช้ในการผลิตไอน้ำในภาคอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นงานวิจัยต่อเนื่องในห้องปฏิบัติการของทีมีวิจัย แสดงดังไดแกรมในรูปที่ 1 โดยวัตถุประสงค์การออกแบบห้องเผาไหม้ช่วยก่อนปล่อยก๊าซไอเสียสู่ห้องเผาไหม้ เพื่อให้สามารถเพิ่มความปั่นป่วน อากาศส่วนหนึ่งถูกปล่อยผ่านแผ่นบังคับทิศทางทำให้เกิดการหมุนควงของอากาศในห้องเผาไหม้ เกิดเป็นกระแสหมุนวนก๊าซไอเสียในห้องเผาไหม้ทั้งภายในและภายนอก (internal and external recirculation) [8] อีกทั้งห้องเผาไหม้ขนาดเล็กจะช่วยลดการสูญเสียความร้อนผ่านผนัง อันจะช่วยให้เชื้อเพลิงปลดปล่อยสารระเหยเผาไหม้และเข้าสู่กระบวนการเผาถ่านชาร์ได้อย่างรวดเร็ว



รูปที่ 1 ไดอะแกรมแสดง (ก) ส่วนประกอบหัวเผา (ห้องเผาไหม้ช่วย) และห้องเผาไหม้ (ข) การไหลในห้องเผาไหม้ช่วย [7]

การทดลองจัดทำขึ้นที่อัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิงขาเข้า 300 kW โดยเชื้อเพลิงที่ใช้ได้แก่ ไม้ยางพารา แสดงคุณสมบัติเชื้อเพลิงดัง ตารางที่ 1 เมื่อนำผ่านตะแกรงร่อน (sieve analysis) อนุภาคเชื้อเพลิงมีขนาดอยู่ในช่วง 38–1180 μm แสดงการกระจายตัวของแต่ละขนาดอนุภาคในรูปแบบสัดส่วนโดยมวล และแปลงอยู่ในรูปสมการ Rosin–Ramler

$$Y_d = e^{-(d/\bar{d})^n} \tag{1}$$

ตารางที่ 1 คุณสมบัติเชื้อเพลิงไม้ยางพาราที่ใช้ในการเผาไหม้

| การวิเคราะห์โดยประมาณแบบรับมา (Proximate Analysis, as received)      |              |         |          |              |
|--|--------------|---------|----------|--------------|
| สารระเหย   | คาร์บอนคงที่ | เถ้า    | ความชื้น | ค่าความร้อน  |
| (wt%)  | (wt%)        | (wt%)   | (wt%)    | (MJ/kg, DAF) |
| 65.25  | 16.16        | 2.43    | 16.16    | 17.5         |
| การวิเคราะห์แบบแยกธาตุแบบแยกเถ้าและความชื้น (Ultimate Analysis, DAF) |              |         |          |              |
| C (wt%)  | H (wt%)      | O (wt%) | N (wt%)  |              |
| 46.44  | 6.45         | 46.56   | 0.55     |              |

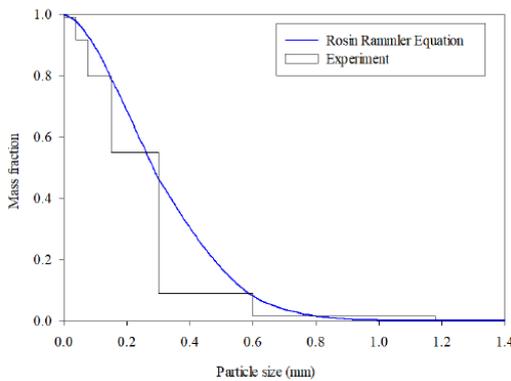
มีขนาดเฉลี่ย  $\bar{d}$  ที่ 350 μm และมีพารามิเตอร์การกระจาย n เท่ากับ 1.71 ความสัมพันธ์ของเศษส่วนมวลและอนุภาคแสดงดังรูปที่ 2 ปริมาณอากาศขาเข้าทั้งหมดถูกคำนวณสอดคล้องกับปริมาณอากาศส่วนเกิน 15% จากปริมาณอากาศทางทฤษฎี โดยอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ อากาศปฐมภูมิ (Primary) อากาศทุติยภูมิ (Secondary) และอากาศตติยภูมิ (Tertiary) ที่สัดส่วน 25:65:10 ซึ่งเป็นสัดส่วนที่เหมาะสมต่อการใช้เผาไหม้ซึ่งได้จากผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยในการป้อนอากาศทุติยภูมิ

ผู้วิจัยได้ทำการหาค่าตัวเลขหมุนควง (swirl number) จากผลการจำลองแบบ 3 มิติ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.48 เพื่อนำมาคำนวณเป็นความเร็วในแนวแกนและความเร็วเชิงมุมที่สอดคล้องกับค่าตัวเลขหมุนควงดังกล่าว แสดงดังตารางที่ 2

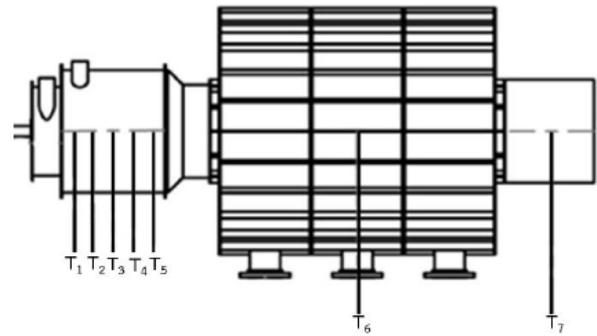
ในการทดลองมีการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล 7 ตำแหน่ง ตามความยาวของห้องเผาไหม้ แสดงดังรูปที่ 3 ค่าความคลาดเคลื่อน  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  โดยตำแหน่งที่ติดตั้ง  $T_1-T_7$  ได้แก่ 0.375 0.625 0.875 1.125 1.375 4.125 และ 6.25 เมตร จากแผ่นขวางการไหล ตามลำดับ

ตารางที่ 2 ปริมาณเชื้อเพลิงและอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้

|   | อัตราการไหล (kg/s) | เปอร์เซ็นต์ (%) | ความเร็วเชิงมุม (rad/s) |
|---|--------------------|-----------------|-------------------------|
| เชื้อเพลิงชีวมวลบด                            | 0.0172             |                 |                         |
| อากาศปฐมภูมิ                                  | 0.029              | 25              |                         |
| อากาศทุติยภูมิ (บ่อนผ่านแผ่น<br>บังคับทิศทาง) | 0.075              | 65              | 62.2                    |
| อากาศตติยภูมิ                                 | 0.012              | 10              |                         |



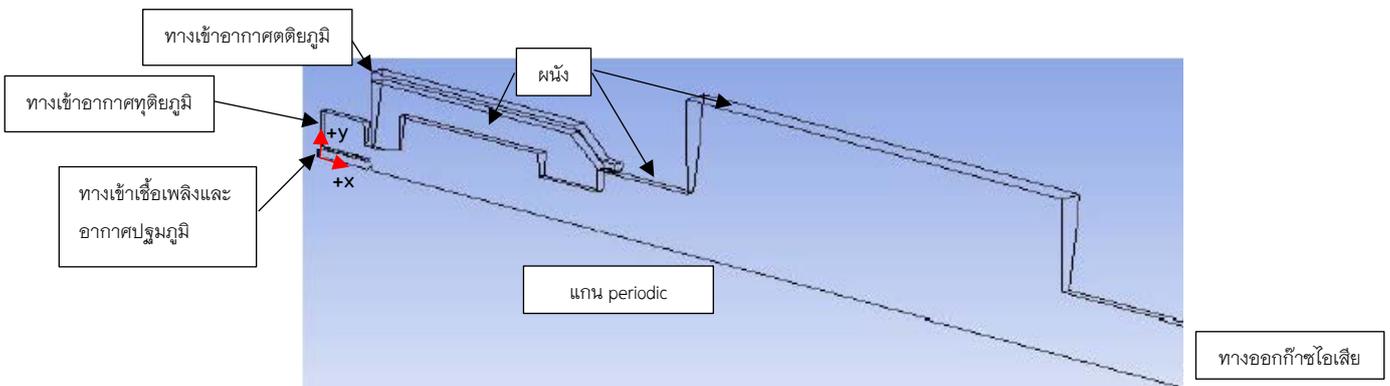
รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างเศษส่วนมวลและอนุภาค



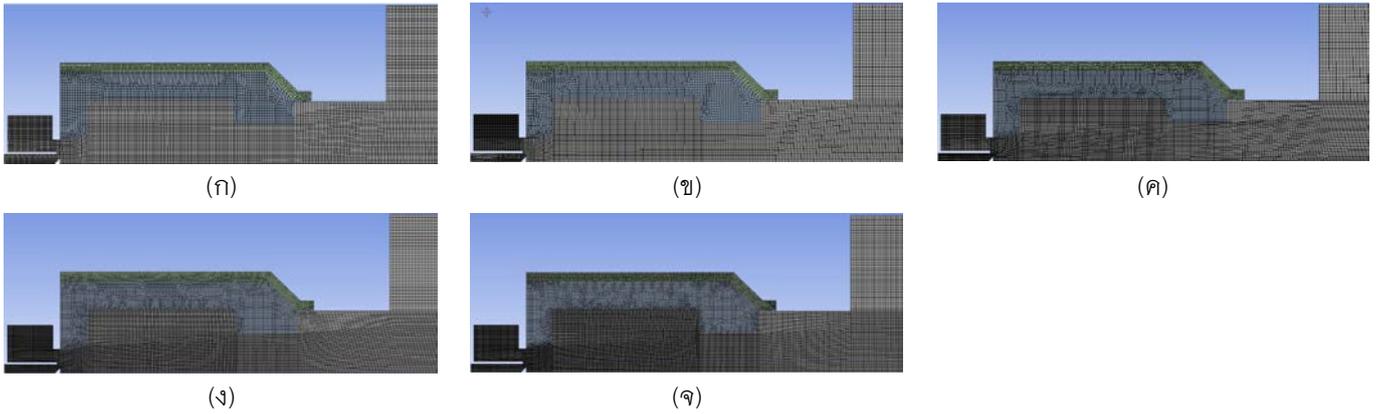
รูปที่ 3 ตำแหน่งติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล

2.2 โมเดลและการจำลอง

การจำลองถูกจัดทำขึ้นแบบ 2 มิติ โดยซอฟต์แวร์ Fluent 12.0 โมเดลที่ใช้ในการจำลองแสดงดังรูปที่ 4 โดยเป็นระนาบตั้งแต่ทางเข้าเชื้อเพลิงไปจนถึงทางออกของก๊าซไอเสีย และให้มีการจำลองแบบ periodic บนระนาบดังกล่าว สมการและพารามิเตอร์ควบคุมที่ใช้ในการจำลอง แสดงดังตารางที่ 3 ถูกอ้างอิงมาจากงานวิจัยก่อนหน้า [8] ก่อนทำการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ได้มีการตรวจสอบความเป็นอิสระของขนาดเซลล์ละเอียดกริด 5 จำนวน ได้แก่ 16800 20356 28584 37738 และ 51805 เฮลิเมนต์ โดยใช้ข้อมูลเชื้อเพลิงและอากาศดังหัวข้อ 2.1



รูปที่ 4 โมเดลที่ใช้ในการจำลอง

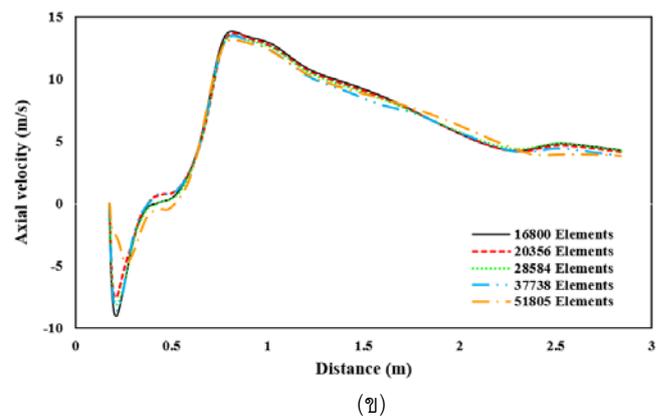
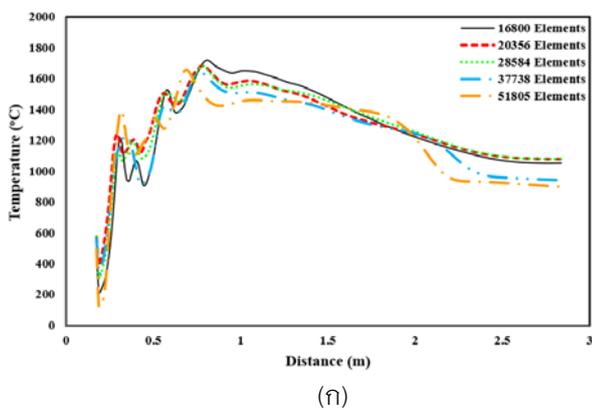


รูปที่ 5 จำนวนเอลิเมนต์ (ก) 16800 (ข) 20356 (ค) 28584 (ง) 37738 และ (จ) 51805

ตารางที่ 3 สมการและพารามิเตอร์ควบคุมที่ใช้ในการจำลอง [8]

|                                   |                           |
|-----------------------------------|---------------------------|
| Turbulent model                   | Standard k-epsilon        |
| Turbulent Prandtl number          | 0.7                       |
| Turbulent Schmidt number          | 0.3                       |
| Turbulent Chemistry Interaction   | Eddy-dissipation          |
| Thermal Conductivity              | Mass weighted mixing law  |
| Viscosity                         | Mass weighted mixing law  |
| Absorption Coefficient            | WSGGM domain based        |
| Volatile vaporization temperature | 100 °C                    |
| Devolatilization model            | Single rate               |
| Combustion model                  | Kinetic/diffusion limited |

ผลการตรวจสอบความเป็นอิสระของกริดทั้ง 5 ขนาด พบว่าการกระจายอุณหภูมิตามความยาวในห้องเผาไหม้มีระดับคงที่มากขึ้นเมื่อกริดมีขนาด 28584 จากนั้นเริ่มเกิดการแกว่งตัวมากขึ้น ผลการจำลองไม่ลู่เข้าสู่ค่าตอพบเมื่อเพิ่มความละเอียด ในขณะที่ความเร็วตามแนวแกนมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อปรับเปลี่ยนขนาดของกริด สามารถสรุปได้ว่าความละเอียดที่เหมาะสมต่อการนำมาเปรียบเทียบคือกริดที่มีความละเอียดมากเพียงพอ ทำให้ไม่เกิดการเบี่ยงเบนของระดับอุณหภูมิ ไม่จำเป็นต้องมีความละเอียดมากจนเกินไป ในการจำลองจึงใช้ความละเอียดที่ 28584



รูปที่ 6 ผลการตรวจสอบความเป็นอิสระของกริด (ก) การกระจายอุณหภูมิตามแนวแกน (ข) ความเร็วตามแนวแกน

### 2.3 เงื่อนไขการจำลอง

ดังที่กล่าวข้างต้น พารามิเตอร์ที่ปรับเปลี่ยนเพื่อสอบเทียบกับผลการทดลองสามารถแบ่งเป็นหมวดหมู่ ได้แก่ Devolatilization, Char Combustion และ Enthalpy of formation ของสารระเหย ขั้นตอนการปรับแต่งพารามิเตอร์จะกระทำที่ละหมวด เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับหมวดแรกทำการปรับแล้ว จะคงที่พารามิเตอร์นั้นๆ แล้วจึงปรับต่อในหมวดที่ 2 ไปจนครบทั้ง 3 หมวด โดยแต่ละหมวดมีการปรับพารามิเตอร์ดังนี้

#### 2.3.1 การปรับพารามิเตอร์ในหมวด Devolatilization

ในการปรับค่า Devolatilization จะมีอยู่ 2 พารามิเตอร์ที่สามารถปรับได้คือ Pre-Exponential Factor และ Activation Energy โดยทั้ง 2 ค่านี้จะมีผลต่ออัตราในการปลดปล่อยสารระเหย กล่าวคือหากค่า Pre -Exponential Factor มีค่าเพิ่มขึ้นความเร็วในการปลดปล่อยสารระเหยเพิ่มขึ้น ในทางตรงข้าม ต้องลดค่า Activation Energy เพื่อให้อัตราการปลดปล่อยสารระเหยเร็วขึ้น ซึ่งทั้ง 2 ค่านี้จำเป็นต้องปรับให้สอดคล้องกันเพื่อความเสถียรในการปลดปล่อยสารระเหย หากปรับเพียงค่าใดค่าหนึ่งจะทำให้ผลของการจำลองเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย โดยการปรับพารามิเตอร์ทั้งสองค่านี้จะสอดคล้องกับสมการที่ 2 ซึ่งเป็นสมการปลดปล่อยมวลของอนุภาคระหว่างปลดปล่อยสารระเหย และ สมการที่ 3 เป็นสมการหาอัตราจลนพลศาสตร์ (kinetic rate) เมื่อมีค่ามากขึ้นจะทำให้การปลดปล่อยสารระเหยได้เร็วขึ้น โดยในการปรับทั้ง 2 ค่านี้กำหนดให้เป็นไปตามตารางที่ 4

$$-\frac{dm_p}{dt} = k \left[ m_p - 1(1 - f_{v,0})(1 - f_{w,0}) m_{p,0} \right] \quad (2)$$

|       |           |     |                                  |
|-------|-----------|-----|----------------------------------|
| เมื่อ | $m_p$     | คือ | มวลอนุภาค (kg)                   |
|       | $f_{v,0}$ | คือ | สัดส่วนโดยมวลของสารระเหยในอนุภาค |
|       | $f_{w,0}$ | คือ | สัดส่วนโดยมวลของความชื้น         |
|       | $m_{p,0}$ | คือ | มวลเริ่มต้นของอนุภาค (kg)        |
|       | $k$       | คือ | อัตราจลนพลศาสตร์ ( $s^{-1}$ )    |

โดย

$$k = Ae^{-(E_1/RT)} \quad (3)$$

ตารางที่ 4 การปรับพารามิเตอร์ในหมวด Devolatilization

| เงื่อนไข    | Pre-Exponential Factor              | Activation Energy                |
|-------------|-------------------------------------|----------------------------------|
| ค่าเริ่มต้น | $3.82 \times 10^7$                  | $1.36 \times 10^7$               |
| A           | $3.82 \times 10^8$ (เพิ่ม 10 เท่า)  | $1.36 \times 10^5$ (ลด 100 เท่า) |
| B           | $3.82 \times 10^9$ (เพิ่ม 100 เท่า) | 1360 (ลด 10000 เท่า)             |

#### 2.3.2 การปรับพารามิเตอร์ในหมวดแบบจำลอง Char Combustion

ในการปรับค่า Combustion จะมีพารามิเตอร์ 3 ตัวที่สามารถปรับค่าได้คือ Mass Diffusion-Limited Rate, Kinetics-Limited Rate Pre-Exponential Factor และ Kinetics-Limited Rate Activation Energy ซึ่งทั้ง 3 ค่านี้มีผลต่ออัตราการปลดปล่อยพลังงานของถ่านชาร์ โดยในการจำลองนี้จะทำการปรับเพียง 2 พารามิเตอร์แรกเท่านั้น คือการปรับค่า Mass Diffusion-Limited Rate และ Kinetics-Limited Rate Pre-Exponential Factor ซึ่งการปรับทั้งสองพารามิเตอร์นี้จะมีผลไปในทางเดียวกันคือหากมีค่ามากจะมีอัตราการปลดปล่อยพลังงานสูง นั่นคือสามารถเพิ่มอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ได้ โดยค่าเริ่มต้นของทั้ง 2 พารามิเตอร์นี้ได้แก่  $1.5 \times 10^{-8}$  และ 0.002 ตามลำดับ สมการในการหาอัตราการปลดปล่อยพลังงานของถ่านชาร์เป็นไปตามสมการที่ 4 ซึ่งเป็นสมการหาอัตราการ

เปลี่ยนแปลงมวลของอนุภาคในช่วงการเผาไหม้ถ่านชาร์ สมการที่ 5 เป็นสมการหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของก๊าซออกซิเจน และ สมการที่ 6 เป็นสมการหาอัตราจลนพลศาสตร์ โดยการปรับค่าพารามิเตอร์ทั้งสองค่านี้สามารถดูได้ดังตารางที่ 5

$$\frac{dm_p}{dt} = -A_p p_{ox} \frac{D_0 \mathcal{R}}{D_0 + \mathcal{R}} \quad (4)$$

เมื่อ  $A_p$  คือ พื้นที่ผิว ( $m^2$ )  
 $p_{ox}$  คือ ความดันย่อย (Pa)  
 $D_0$  คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของ O2 ( $cm^2/s$ )  
 $\mathcal{R}$  คือ อัตราจลนพลศาสตร์

$$D_0 = C_1 \frac{[(T_p + T_\infty) / 2]^{0.75}}{d_p} \quad (5)$$

เมื่อ  $T_p$  คือ อุณหภูมิของอนุภาค (K)  
 $T_\infty$  คือ อุณหภูมิของบรรยากาศ (K)  
 $d_p$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (m)

$$\mathcal{R} = C_2 e^{-(E_2/RT_p)} \quad (6)$$

ตารางที่ 5 การปรับพารามิเตอร์ในหมวด Char Combustion

| เงื่อนไข | Mass Diffusion-Limited Rate                    | Kinetics-Limited Rate Pre-Exponential Factor |
|----------|--|--|
| A        | $1.5 \times 10^{-10}$ (ลด 100 เท่า)            | 0.02 (เพิ่ม 10 เท่า)                         |
| B        | $1.5 \times 10^{-12}$ (ลด 10000 เท่า)          | 0.02 (เพิ่ม 10 เท่า)                         |
| C        | $4.5 \times 10^{-12}$ (ลด $\approx$ 3300 เท่า) | 0.04 (เพิ่ม 20 เท่า)                         |

ตารางที่ 6 การปรับพารามิเตอร์ในหมวด Enthalpy of Formation ของสารระเหย

| เงื่อนไข | Enthalpy of Formation                |
|----------|--------------------------------------|
| A        | $-3.041 \times 10^8$ (ลด 30%)        |
| B        | $-3.509 \times 10^8$ (ลด 50%)        |
| C        | $-4.678 \times 10^8$ (ลด 2 เท่า)     |
| D        | $-1.637 \times 10^8$ (เพิ่ม 30%)     |
| E        | $-1.403 \times 10^8$ (เพิ่ม 40%)     |
| F        | $-1.169 \times 10^8$ (เพิ่ม 2 เท่า)  |
| G        | $-2.339 \times 10^7$ (เพิ่ม 10 เท่า) |

### 2.3.3 การปรับพารามิเตอร์ในหมวด Enthalpy of Formation ของสารระเหย

ในการปรับค่าเอนทาลปีของสารระเหยเป็นการเพิ่มหรือลดระยะห่างระหว่างชั้นพลังงานของสารตั้งต้นกับสารผลิตภัณฑ์ หากมีระยะห่างมากพลังงานที่ใช้จะมากตามไปด้วย โดยในการเผาไหม้จะเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน เชื้อเพลิงและผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้จะมีค่าเอนทาลปีเป็นลบ ซึ่งในการปรับค่าเอนทาลปีนี้จะเป็นการปรับค่าเอนทาลปีตั้งต้นของสารระเหย มีผลให้ระยะห่างของชั้น

พลังงานที่กล่าวไปข้างต้นต่างกัน เนื่องจากค่าพลังงานของตัวผลิตภัณฑ์ไม่ได้เปลี่ยนแปลงไปด้วย และในทางเดียวกันอุณหภูมิระหว่างปฏิกิริยาก็จะเพิ่มสูงขึ้นหรือลดลงก็จะขึ้นอยู่กับระยะห่างของชั้นพลังงาน โดยกรณีของการจำลองในการศึกษาครั้งนี้จะจำลองโดยใช้ค่าเอนทาลปีตามตารางที่ 6 ซึ่งค่าเริ่มต้นคือ  $-2.339 \times 10^8$  J/kg-mol

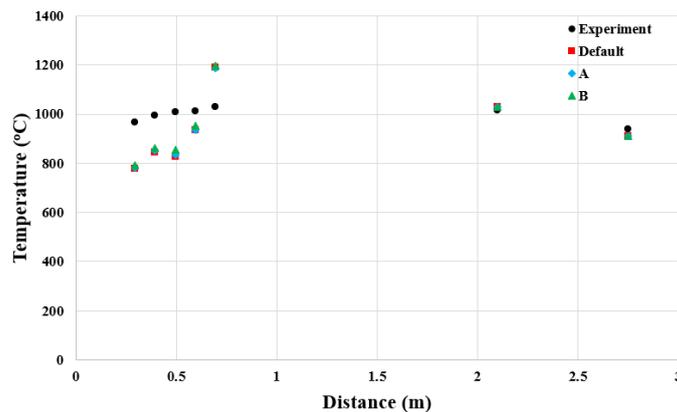
### 3. ผลการจำลองและการอภิปรายผล

#### 3.1 ผลการจำลองการปรับแต่งพารามิเตอร์ในหมวด Devolatilization

ผลการจำลองเป็นไปตามตารางที่ 7 และรูปที่ 7 พบว่า การปรับ Pre-Exponential และ Activation Energy จะส่งผลต่ออุณหภูมิในแนวแกนเล็กน้อย แต่แนวโน้มการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมียังไม่มากนัก เนื่องจากเป็นเพียงการเพิ่มความเร็วในการปลดปล่อยสารละลายของอนุภาคขนาดใหญ่ และเข้าสู่ช่วงการปลดปล่อยพลังงานของอนุภาคถ่านชาร์ได้เร็วขึ้น ซึ่งในช่วงปฏิกิริยาสลายอนุภาคถ่านชาร์นี้จะมีเส้นทางเดินของอนุภาคขนาดใหญ่ที่ยาวกว่าการปลดปล่อยสารระเหยทำให้อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้สูงขึ้น สังเกตได้จากตำแหน่ง  $T_5$  ที่อยู่ใกล้บริเวณทางออกของห้องเผาไหม้ช่วย ซึ่งมีอนุภาคขนาดใหญ่ที่อยู่ระหว่างอนุภาคถ่านชาร์ทำให้อุณหภูมิสูง ในขั้นถัดไปจะทำการปรับค่า Combustion model เพื่อลดอุณหภูมิของ  $T_5$  ลงมา และทำการปรับค่าเอนทาลปีเพื่อเพิ่มหรือลดอุณหภูมิของทั้งโดเมน ซึ่งสามารถเพิ่มอุณหภูมิ  $T_1$  ถึง  $T_4$  ได้ โดยในการปรับค่า Devolatilization ในการจำลองนี้จะใช้ค่าพารามิเตอร์ B ตามตารางที่ 4 ในการจำลองต่อไป

ตารางที่ 7 ผลการจำลองเมื่อปรับแต่งพารามิเตอร์ในหมวด Devolatilization

| ตำแหน่ง | ผลการทดลอง | ค่าเริ่มต้น   |               | A             |               | B             |               |
|---------|------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|         |            | อุณหภูมิ (°C) | %คลาตเคิลชั่น | อุณหภูมิ (°C) | %คลาตเคิลชั่น | อุณหภูมิ (°C) | %คลาตเคิลชั่น |
| $T_1$   | 966.55     | 777.75        | 19.5          | 783.4         | 18.9          | 793.02        | 17.9          |
| $T_2$   | 994.29     | 844.66        | 15.1          | 852.88        | 14.2          | 862.217       | 13.2          |
| $T_3$   | 1009.91    | 828.138       | 17.9          | 835.88        | 17.2          | 855.46        | 15.3          |
| $T_4$   | 100.88     | 933.86        | 7.6           | 935.01        | 7.5           | 954.58        | 5.6           |
| $T_5$   | 1031.04    | 1191.95       | 15.6          | 1188.3        | 15.2          | 1198.26       | 16.2          |
| $T_6$   | 1015.61    | 1028.35       | 1.2           | 1028.8        | 1.3           | 1028.8        | 1.3           |
| $T_7$   | 940.21     | 912.23        | 2.9           | 912.05        | 2.9           | 911.93        | 3             |



รูปที่ 7 ผลอุณหภูมิตามแนวแกนเมื่อปรับแต่งพารามิเตอร์ในหมวด Devolatilization

#### 3.2 ผลการจำลองการปรับแต่งพารามิเตอร์ในหมวดแบบจำลอง Char Combustion

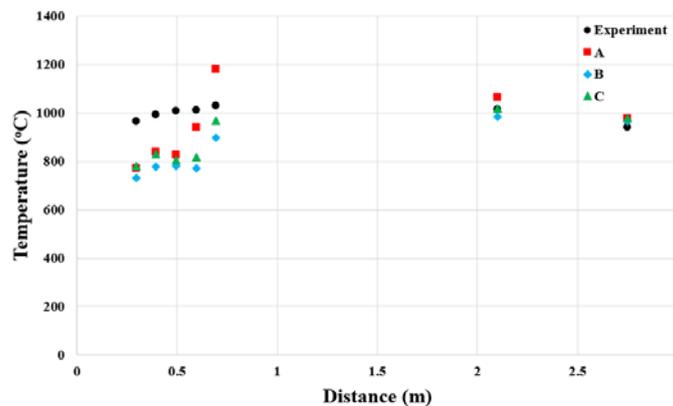
จากค่าเริ่มต้นดังปรากฏในผลการจำลอง รูปที่ 7 เจ็อนไซ B ผู้วิจัยได้ทำการปรับพารามิเตอร์ในหมวดแบบจำลอง Char Combustion ตามตารางที่ 5 ได้ผลการจำลองดังตารางที่ 8 และรูปที่ 8 พบว่าการลดค่า Mass Diffusion-Limited Rate ลงมา 100 เท่า

ตามเงื่อนไข A ยังทำให้อุณหภูมิที่ตำแหน่ง  $T_5$  ลดลงมาไม่มาก จึงทำการลดค่า Mass Diffusion-Limited Rate ลงมาอีกเป็น 10000 เท่า ตามเงื่อนไข B จะเห็นว่าอุณหภูมิที่ตำแหน่ง  $T_5$  ลดลงมากตามจุดกราฟสีฟ้า และในกรณีการปรับเป็นเงื่อนไข C โดยเพิ่ม Mass Diffusion-Limited Rate และ Kinetics-Limited Rate Pre-Exponential Factor จากเงื่อนไข B เป็น 3 เท่าและ 2 เท่าตามลำดับ ทำให้อุณหภูมิตามแนวแกนสูงกว่าเงื่อนไข B เล็กน้อย ทำให้ได้ข้อสังเกตว่าการปรับค่า Mass Diffusion-Limited Rate มีอิทธิพลต่อการเพิ่มอุณหภูมิมากกว่า การปรับค่า Kinetics-Limited Rate และมีอิทธิพลต่ออุณหภูมิที่ตำแหน่ง  $T_5$  มากกว่าตำแหน่ง  $T_1$  ถึง  $T_4$  ในขั้นถัดไปจะเป็นการปรับค่าเอนทาลปีของสารระเหยเพื่อเพิ่มอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วย โดยจะใช้เงื่อนไข C ตามตารางที่ 5 ในการจำลองขั้นต่อไป

อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิตำแหน่ง  $T_6$ - $T_7$  มีความคลาดเคลื่อนน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่งอื่นแม้จะยังไม่ปรับแต่งพารามิเตอร์ เนื่องจากการเผาไหม้ได้สิ้นสุดลงตั้งแต่ในห้องเผาไหม้ช่วย อีกทั้งไม่มีความปั่นป่วนของกระแสการไหล แบบจำลองจึงสามารถจำลองการไหลบริเวณดังกล่าวได้อย่างแม่นยำ

ตารางที่ 8 ผลการจำลองเมื่อปรับแต่งพารามิเตอร์ในหมวดแบบจำลอง Char Combustion

| ตำแหน่ง | ผลการทดลอง | A             |              | B             |              | C             |              |
|---------|------------|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------|--------------|
|         |            | อุณหภูมิ (°C) | %คลาดเคลื่อน | อุณหภูมิ (°C) | %คลาดเคลื่อน | อุณหภูมิ (°C) | %คลาดเคลื่อน |
| $T_1$   | 966.55     | 772.38        | 20.1         | 731.43        | 24.3         | 781.32        | 19.2         |
| $T_2$   | 994.29     | 838.2         | 15.6         | 776.46        | 21.9         | 830.65        | 16.5         |
| $T_3$   | 1009.91    | 827.55        | 18.1         | 781.79        | 22.6         | 806.11        | 20.2         |
| $T_4$   | 100.88     | 941.08        | 6.9          | 771.82        | 23.6         | 816.46        | 19.2         |
| $T_5$   | 1031.04    | 1182.24       | 14.6         | 898.36        | 12.9         | 967.34        | 6.2          |
| $T_6$   | 1015.61    | 1063.38       | 4.7          | 898.09        | 3.1          | 1019.06       | 0.3          |
| $T_7$   | 940.21     | 979.17        | 4.1          | 966.75        | 2.8          | 977.53        | 4.0          |



รูปที่ 8 ผลอุณหภูมิตามแนวแกนเมื่อปรับแต่งพารามิเตอร์ในหมวดแบบจำลอง Char Combustion

### 3.3 ผลการจำลองการปรับแต่งพารามิเตอร์ในหมวด Enthalpy of Formation ของสารระเหย

จากค่าเริ่มต้นดังปรากฏในผลการจำลองรูปที่ 8 เงื่อนไข C ผู้วิจัยได้ทำการปรับพารามิเตอร์ในหมวด Enthalpy of Formation ของสารระเหย ตามตารางที่ 6 ได้ผลการจำลองดังตารางที่ 9 และ รูปที่ 9 พบว่าการปรับให้ค่าเอนทาลปีติดลบมากขึ้นจะทำให้อุณหภูมิของห้องเผาไหม้ลดลงอย่างเห็นได้ชัด (กรณี A ถึง C) เนื่องจากมีระยะห่างของระดับพลังงานระหว่างสารตั้งต้นและสารผลิตภัณฑ์น้อยลง ทำให้ปลดปล่อยพลังงานได้น้อย และมีอุณหภูมิต่ำ ซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพเป็นลำดับขั้นคือสารระเหยปลดปล่อยพลังงานออกมาได้ช้าลง อัตราการเผาไหม้ของถ่านชาร์จะเกิดขึ้นช้าลง และท้ายที่สุดจะทำให้อุณหภูมิของห้องเผาไหม้ช่วยลดลงอย่างมาก และในการปรับค่าเอนทาลปีให้ติดลบน้อยลงจะส่งผลให้อุณหภูมิของทั้งโดเมนยกตัวขึ้นมาเป็นเพราะระยะห่างของระดับพลังงานมีมากขึ้น ส่งผลให้การปลดปล่อย

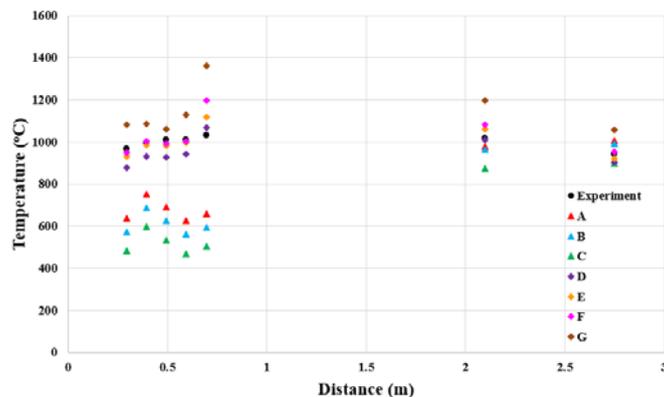
สารระเหยและอัตราการปล่อยพลังงานของถ่านชาร์เกิดขึ้นได้เร็ว อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วยจึงยกตัวสูงขึ้น โดยในกรณีศึกษา นี้สามารถใช้ค่าเอนทัลปีที่  $-1.169 \times 10^8 \text{ J/kg-mol}$  เป็นค่าที่เหมาะสมได้ เนื่องจากมีค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิที่ตำแหน่งตรวจวัด  $T_1$  ถึง  $T_7$  น้อยที่สุดดังตารางที่ 9 อย่างไรก็ตามอุณหภูมิ  $T_5$  ที่มีอุณหภูมิสูงกว่าการทดลอง สันนิษฐานว่าในการจำลองจะมีการรวมตัวของอนุภาคบริเวณใกล้ทางออกของห้องเผาไหม้ช่วยหรือก็คือบริเวณ  $T_5$  เป็นจำนวนมาก จึงทำให้อุณหภูมิที่บริเวณนี้สูง

ตารางที่ 9 ผลการจำลองเมื่อปรับแต่งพารามิเตอร์ในหมวด Enthalpy of Formation ของสารระเหย

| ตำแหน่ง | ผลการทดลอง | A             |              | B             |              | C             |              |
|---------|------------|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------|--------------|
|         |            | อุณหภูมิ (°C) | %คลาดเคลื่อน | อุณหภูมิ (°C) | %คลาดเคลื่อน | อุณหภูมิ (°C) | %คลาดเคลื่อน |
| $T_1$   | 966.55     | 637.45        | 34           | 573.22        | 40.7         | 780.82        | 50.3         |
| $T_2$   | 994.29     | 752.58        | 24.3         | 688.34        | 30.8         | 595.94        | 40.1         |
| $T_3$   | 1009.91    | 690.03        | 31.7         | 625.79        | 38           | 533.39        | 47.2         |
| $T_4$   | 100.88     | 625.04        | 38.2         | 560.81        | 44.5         | 468.41        | 53.7         |
| $T_5$   | 1031.04    | 659.10        | 36.1         | 594.87        | 42.3         | 502.47        | 51.3         |
| $T_6$   | 1015.61    | 977.64        | 3.7          | 964.69        | 5            | 872.29        | 14.1         |
| $T_7$   | 940.21     | 1005.8        | 7            | 992.85        | 5.6          | 900.45        | 4.2          |

ตารางที่ 9 ผลการจำลองเมื่อปรับแต่งพารามิเตอร์ในหมวด Enthalpy of Formation ของสารระเหย (ต่อ)

| ตำแหน่ง | D             |              | E             |              | F             |              | G             |              |
|---------|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------|--------------|
|         | อุณหภูมิ (°C) | %คลาดเคลื่อน |
| $T_1$   | 878.81        | 9.1          | 931.55        | 3.6          | 949.4         | 1.8          | 1080.79       | 11.8         |
| $T_2$   | 931.67        | 6.3          | 984.40        | 1.0          | 1001.48       | 0.7          | 1084.18       | 9.0          |
| $T_3$   | 927.71        | 8.1          | 980.45        | 2.9          | 992.48        | 1.7          | 1061.24       | 5.1          |
| $T_4$   | 942.03        | 6.8          | 994.77        | 1.6          | 1003.80       | 0.7          | 1126069       | 11.5         |
| $T_5$   | 1066.16       | 3.4          | 1118.89       | 8.5          | 1196.62       | 16.1         | 1361.93       | 32.1         |
| $T_6$   | 1008.78       | 0.7          | 1.61.52       | 4.5          | 1061.11       | 4.5          | 1186.22       | 15.1         |
| $T_7$   | 903.09        | 3.9          | 921.82        | 2.0          | 953.62        | 1.4          | 1056.01       | 12.3         |



รูปที่ 9 ผลอุณหภูมิตามแนวแกนเมื่อปรับแต่งพารามิเตอร์ในหมวด Enthalpy of Formation ของสารระเหย

จากการปรับค่าพารามิเตอร์ทั้ง 3 หมวด สามารถสรุปค่าที่ใช้ในการจำลองได้ดัง ตารางที่ 10 โดยผลสรุปค่าพารามิเตอร์ให้ผลการกระจายตัวอุณหภูมิคลาดเคลื่อนที่ตำแหน่ง  $T_5$  คิดเป็น 16.1% หากแต่ให้ผลระดับอุณหภูมิที่ตำแหน่ง  $T_1$ - $T_4$  และ  $T_6$ - $T_7$  อยู่ในช่วง

ยอมรับได้ ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 1.225% และ 2.95% ตามลำดับ จึงเพียงพอต่อการสังเกตพฤติกรรมเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ช่วย

ตารางที่ 10 สรุปพารามิเตอร์การจำลองที่สอดคล้องกับผลการทดลอง

|  | ค่าเริ่มต้น          | ค่าปรับแต่ง           |
|--|----------------------|-----------------------|
| Pre-Exponential Factor                       | $3.82 \times 10^7$   | $3.82 \times 10^9$    |
| Activation Energy                            | $1.36 \times 10^5$   | 1360                  |
| Mass Diffusion-Limited Rate                  | $1.5 \times 10^{-8}$ | $4.5 \times 10^{-12}$ |
| Kinetics-Limited Rate Pre-Exponential Factor | 0.002                | 0.04                  |
| Enthalpy of Formation                        | $-2.33 \times 10^8$  | $-1.169 \times 10^8$  |

#### 4. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้นำเสนอการปรับแต่งพารามิเตอร์สำหรับการจำลองที่ส่งผลต่อการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง สำหรับหัวเผาชนิดห้องเผาไหม้ช่วย ที่อัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิงขาเข้า 300 kW โดยผู้วิจัยทำการจำลองในรูปแบบ 2 มิติ เบื้องต้นได้ตรวจสอบความเป็นอิสระของกริด ทั้งหมด 5 ขนาด ได้แก่ 16800 20356 28584 37738 และ 51805 พบว่าเมื่อกริดมีความละเอียดตั้งแต่ 37738 ขึ้นไป ทำให้ระดับอุณหภูมิและความเร็วตามแนวแกนภายในห้องเผาไหม้เกิดการแกว่งเนื่องจากมีความละเอียดมากเกินไป การคำนวณจึงไม่ลู่ออก ค่าตอบ ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ความละเอียด 28584 ในการจำลองเพื่อปรับพารามิเตอร์ในขั้นขั้นตอนถัดไป

พารามิเตอร์ที่ปรับเปลี่ยนสามารถแบ่งออกเป็น 3 หมวดตามแบบจำลอง ได้แก่ Devolatilization, Char Combustion และ Enthalpy of Formation ประกอบไปด้วยพารามิเตอร์ย่อยทั้งหมด 5 ค่า โดยก่อนการปรับแต่งพบว่าอุณหภูมิตำแหน่ง  $T_1-T_4$  มีระดับต่ำกว่าผลการทดลองคิดเป็นความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 15.025% ในขณะที่อุณหภูมิตำแหน่ง  $T_5$  มีค่าสูงกว่า คิดเป็นความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 15.6% ส่วน  $T_6-T_7$  คิดเป็นความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 2.05% จึงเริ่มทำการเพิ่มอัตราการปลดปล่อยสารระเหยในหมวด Devolatilization แต่พบว่าไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงระดับอุณหภูมิมากนัก จึงเพิ่มการปลดปล่อยพลังงานของถ่านชาร์ในหมวด Char Combustion พบว่าสามารถปรับระดับอุณหภูมิ  $T_1-T_4$  สูงขึ้น และการปรับลด Mass Diffusion-Limited Rate ในหมวด Char Combustion ลง 3300 เท่า ทำให้อุณหภูมิตำแหน่ง  $T_5$  ปรับลดลง จากนั้นจึงปรับค่า Enthalpy of Formation เพื่อการเพิ่มปริมาณการปลดปล่อยพลังงานจากสารระเหยจากการเปลี่ยนสารตั้งต้นสู่ผลิตภัณฑ์ ทำให้อุณหภูมิ  $T_1-T_4$  สูงจนถึงระดับเดียวกับผลการทดลอง มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 1.225% แต่พบว่า  $T_5$  ยังคงมีค่าสูงกว่าคิดเป็นความคลาดเคลื่อน 16.1% และ  $T_6-T_7$  มีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 2.95% แม้ความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิที่ตำแหน่ง  $T_5-T_7$  มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ถือเป็นสัดส่วนเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับความคลาดเคลื่อนที่ลดลงของตำแหน่ง  $T_1-T_4$  ซึ่งถือเป็นบริเวณที่ก๊าซไอเสียมีความปั่นป่วนสูง เป็นผลเนื่องมาจากแผ่นกั้นการไหลที่ท่อปฐมภูมิและแผ่นบังคับการไหลของอากาศทุติยภูมิ อีกทั้งการศึกษาอิทธิพลจากการปรับเปลี่ยนขนาดของหัวเผาปฐมภูมิในงานวิจัยขั้นถัดไป จะส่งผลกระทบต่อเส้นทางการไหลบริเวณ  $T_1-T_4$  นี้โดยตรง จึงต้องการความแม่นยำสูง ดังนั้นผู้วิจัยจึงสามารถใช้พารามิเตอร์ที่ได้รับการปรับแต่งชุดนี้ในการจำลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ช่วยต่อไปได้

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] Muto M, Watanabe H, Kurose R. Large eddy simulation of pulverized coal combustion in multi-burner system-effect of in-furnace blending method on NO emission. Advanced Powder Technology 2019;30:3153-3162.

- [2] Rahimipetroudi I, Rashid K, Yang JB, Dong SK. Comprehensive study of the effect of a developed co-firing burner and its front-wall, opposed-wall, and tangential firing arrangements on the performance improvement and emissions reduction of coal-natural gas combustion in a boiler. *Int. J. of Therm. Sci.* 2022;173:107379.
- [3] Laubscher R, Rousseau P. Numerical investigation into the effect of burner swirl direction on furnace and superheater heat absorption for a 630 Mwe opposing wall-fired pulverized coal boiler. *Int. J. of Heat and Mass Transfer.* 2019;137:506–522.
- [4] Pérez-Jeldres R, Cornejo P, Flores M, Gordon A, García X. A modeling approach to co-firing biomass/coal blends in pulverized coal utility boilers: Synergistic effects and emissions profiles. *Energy* 2017;120:663–674.
- [5] Chowdhury MSR, Azad AZ, Karim MR, Naser J, Bhuiyan AA. Reduction of GHG emissions by utilizing biomass co-firing in a swirl-stabilizer furnace. *Renewable Energy* 2019;143:1201–1209.
- [6] Aziz M, Budianto D, Oda T. Computational fluid dynamic analysis of co-firing of palm kernel shell and coal. *Energies* 2016;9:137.
- [7] Laphirattanakul P, Kanprom P, Kwankaomeng S, Charoensuk J. Effect of bluff body and swirl plate on performance of pulverized biomass combustion in a laboratory-scale furnace. The 8<sup>th</sup> TSME International Conference on Mechanical Engineering, December 2017, Bangkok, Thailand.
- [8] Laphirattanakul P, Charoensuk J, Turakarn C, Keawchompoo C, Suksam N., Development of pulverized biomass combustor with a pre-combustion chamber. *Energy* 2020;208:118333.