Chulalongkorn University

Chula Digital Collections

Chulalongkorn University Theses and Dissertations (Chula ETD)

2022

# ฝาแฝดดิจิทัลของหม้อไอน้ำแขยเผาร่วมชีวมวลและถ่านหินโดยการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

ธนากรณ์ วาระเพียง

*คณะวิทยาศาสตร์*

Follow this and additional works at: https://digital.car.chula.ac.th/chulaetd

Part of the Petroleum Engineering Commons

## Recommended Citation

วาระเพียง, ธนากรณ์, "ฝาแฝดดิจิทัลของหม้อไอน้ำแขยเผาร่วมชีวมวลและถ่านหินโดยการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ" (2022). *Chulalongkorn University Theses and Dissertations (Chula ETD)*. 6098.
https://digital.car.chula.ac.th/chulaetd/6098

This Thesis is brought to you for free and open access by Chula Digital Collections. It has been accepted for inclusion in Chulalongkorn University Theses and Dissertations (Chula ETD) by an authorized administrator of Chula Digital Collections. For more information, please contact ChulaDC@car.chula.ac.th.

ฝาแฝดดิจิทัลของหม้อไอน้ำแบบเผาร่วมชีวมวลและถ่านหินโดยการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

นายธนากรณ์ วาระเพียง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีเชื้อเพลิง ภาควิชาเคมีเทคนิค
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2565
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DIGITAL TWIN OF BIOMASS AND COAL CO-FIRING BOILER BY COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS SIMULATION

Mr. Tanakorn Varapiang

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Fuel Technology
Department of Chemical Technology
FACULTY OF SCIENCE
Chulalongkorn University
Academic Year 2022
Copyright of Chulalongkorn University

| | |
|---|---|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | ฝาแฝดดิจิทัลของหม้อไอน้ำแบบเผาร่วมชีวมวลและถ่านหินโดยการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ |
| โดย | นายธนากรณ์ วาระเพียง |
| สาขาวิชา | เทคโนโลยีเชื้อเพลิง |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก | รองศาสตราจารย์ ดร.เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม | ดร.รัชชานนท์ เปี่ยมใจสว่าง |

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

------------------------------------------------------------------ คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

------------------------------------------------------------------ ประธานกรรมการ

(ดร.มนัสวี สุทธิพงษ์)

------------------------------------------------------------------ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ)

------------------------------------------------------------------ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ดร.รัชชานนท์ เปี่ยมใจสว่าง)

------------------------------------------------------------------ กรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์)

------------------------------------------------------------------ กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.คณิต มานะธุระ)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ธนากรณ์ วาระเพียง : ฝาแฝดดิจิทัลของหม้อไอน้ำแบบเผาร่วมชีวมวลและถ่านหินโดยการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ. ( DIGITAL TWIN OF BIOMASS AND COAL CO-FIRING BOILER BY COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS SIMULATION) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ดร.รัชชานนท์ เปี่ยมใจสว่าง

งานวิจัยนี้ศึกษาการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลผสมกับถ่านหินในหม้อไอน้ำฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียนซึ่งเป็นเรื่องที่น่าสนใจท่ามกลางการเพิ่มขึ้นของความต้องการพลังงาน ลักษณะการเผาไหม้ร่วมของชีวมวลและถ่านหินในหม้อไอน้ำจะได้รับการตรวจสอบโดยใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) เชื้อเพลิงที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ ได้แก่ ถ่านหิน ไม้สับ และเปลือกไม้ กำหนดสัดส่วนของเชื้อเพลิงเพื่อศึกษาผลกระทบต่อการเผาไหม้ด้วยการออกแบบการทดลองแบบผสมซิมเพล็กซ์เซนทรอยด์ การจำลอง CFD ประกอบด้วยแบบจำลองการไหลของความหนืด k-epsilon แบบจำลองการไหลของของไหลหลายเฟสของออยเลอร์ และแบบจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองแสดงให้เห็นว่าข้อมูลแบบจำลองมีความสอดคล้องกับข้อมูลจริงของโรงไฟฟ้าซึ่งอาจเป็นฝาแฝดดิจิทัลของหม้อไอน้ำที่ศึกษา โดยแบบจำลองจะทำนายผลที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้ ได้แก่ อุณหภูมิ ฟลักซ์ความร้อน เถ้า และแก๊สมลพิษ ได้แก่ คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) คาร์บอนไดออกไซด์ ($CO_2$) ไนตริกออกไซด์ (NO) ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ($SO_2$) และก๊าซคลอรีน ($Cl_2$) ผลการจำลองพบว่าการใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงจะให้อุณหภูมิและฟลักซ์ความร้อนสูงสุด รองลงมาคือ ไม้สับและเปลือกไม้ ในทางตรงข้ามการใช้ชีวมวลจะปล่อยแก๊สมลพิษออกมาน้อยกว่าถ่านหิน ในการทดลองนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของอัตราการป้อนเชื้อเพลิง พบว่าอัตราการป้อนเชื้อเพลิงสูงจะทำให้ตัวแปรตามสูงกว่าอัตราการป้อนเชื้อเพลิงต่ำ จากการวิเคราะห์ข้อมูลแบบจำลองพบว่าชีวมวลเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและประหยัดต้นทุนการผลิตมากกว่าถ่านหิน แบบจำลอง CFD สามารถสร้างแบบทำนายเพื่อกำหนดชนิดและสัดส่วนของเชื้อเพลิงได้อย่างง่ายดายโดยใช้สองวิธี คือ สมการและกราฟคอนทัวร์ ซึ่งสามารถเปรียบเสมือนฝาแฝดดิจิทัลของหม้อไอน้ำ

| | | |
|---|---|---|
| สาขาวิชา | เทคโนโลยีเชื้อเพลิง | ลายมือชื่อนิสิต ............................................ |
| ปีการศึกษา | 2565 | ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก ........................... |
| | | ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม ............................ |

# # 6470099823 : MAJOR FUEL TECHNOLOGY
KEYWORD: circulating fluidized bed boiler, computational fluid dynamics, coal, co-firing, biomass

Tanakorn Varapiang : DIGITAL TWIN OF BIOMASS AND COAL CO-FIRING BOILER BY COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS SIMULATION. Advisor: Assoc. Prof. BENJAPON CHALERMSINSUWAN, Ph.D. Co-advisor: Ratchanon Piemjaiswang, Ph.D.

This research investigates the combining of biomass fuel with coal in circulating fluidized bed (CFB) boilers which is of interest amid increasing energy demand. Biomass and coal co-firing characteristics in the boiler are then investigated using computational fluid dynamics (CFD). In this study, fuels of interest are coal, woodchips, and bark. The fuel proportions were set to investigate their effects on the combustion using a simplex centroid mixture design. CFD simulations consist of a standard k-epsilon viscosity flow model, Euler multiphase fluid flow model, and solid fuel combustion model. The model validation findings demonstrated that the model data reasonably fit with the actual plant data, which can be the digital twin of the studied boiler. The predictive responses of the model are temperature, heat flux, ash, and gas emissions which are carbon monoxide (CO), carbon dioxide ($CO_2$), nitric oxide (NO), sulfur dioxide ($SO_2$), and chlorine gas ($Cl_2$). The simulation results showed that the operation with coal gave the highest temperature and heat flux, followed by woodchips and bark. On the other hand, operations with biomass releases fewer gas emissions than those operations with coal. A study on the influence of fuel feed rates showed that high fuel feed rates would have higher dependent variables than low fuel feed rates. Based on data analysis, biomass is environmentally friendly and more economical than coal. The type and proportion of boiler fuel can be easily determined using two methods: predictive equation and ternary contour plot graph, which can be likened to the digital twin of biomass and coal co-firing boiler.

| | | |
|---|---|---|
| Field of Study: | Fuel Technology | Student's Signature ............................... |
| Academic Year: | 2022 | Advisor's Signature ............................. |
| | | Co-advisor's Signature ......................... |

CHULALONGKORN UNIVERSITY

# กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่อง “ฝาแฝดดิจิทัลของหม้อไอน้ำแบบเผาร่วมชีวมวลและถ่านหินโดยการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ” นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยการสนับสนุนและการได้รับความช่วยเหลือจากบุคคลหลายฝ่ายเป็นอย่างดีมาตลอดระยะเวลาที่การวิจัย

ผู้วิจัยขอขอบคุณ รศ.ดร.เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัยนี้เป็นอย่างยิ่ง ที่สละเวลาให้ความรู้ ข้อมูล แนวทางและวิธีการต่างๆ ในการทำงานวิจัย เพื่อให้งานวิจัยออกมาอย่างสมบูรณ์ และขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร.รัชชานนท์ เปี่ยมใจสว่าง ที่ช่วยให้คำแนะนำและสนับสนุนข้อมูลแก่การวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้แก่ ดร.มนัสวี สุทธิพงษ์ ประธานกรรมการ ศ.ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์ กรรมการ และรศ.ดร.คณิต มานะธุระ กรรมการภายนอก ที่สละเวลาให้คำแนะนำเพื่อนำมาปรับแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ คุณณัฐฐิมา รังธน เจ้าหน้าที่ของบริษัท อินทิเกรทเต็ด รีเสิร์ช เซ็นเตอร์ จำกัด ที่กรุณาประสานงานและให้ข้อมูลต่างๆ แก่การทำวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณ หน่วยบริหารและจัดการทุนด้านการเพิ่มความสามารถในการแข่งขันของประเทศ (บพข.) ที่สนับสนุนทุนวิจัยในครั้งนี้

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยเล่มนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับท่านที่สนใจ คุณประโยชน์ที่ได้จากงานวิจัยนี้ขอยกให้กับผู้มีพระคุณทุกท่าน รวมไปถึงบุคคลที่เกี่ยวข้องที่มิได้กล่าวถึง ผู้วิจัยขอขอบอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ธนากรณ์ วาระเพียง

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ........ ค

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ........ ง

กิตติกรรมประกาศ ........ จ

สารบัญ ........ ฉ

สารบัญตาราง ........ ฌ

สารบัญรูป ........ ฎ

บทที่ 1 บทนำ ........ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ........ 1

1.2 วัตถุประสงค์ ........ 2

1.3 ขอบเขตงานวิจัย ........ 2

1.4 ลำดับขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย ........ 2

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ ........ 2

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ........ 3

2.1 หม้อไอน้ำ ........ 3

2.1.1 อุทกพลศาสตร์ในห้องเผาไหม้ของหม้อไอน้ำ ........ 4

2.2 เชื้อเพลิง ........ 5

2.2.1 ถ่านหิน ........ 6

2.2.2 ชีวมวล ........ 7

2.2.3 การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง ........ 7

2.2.4 การเผาร่วม ........ 10

2.3 การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ........ 12

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.3.1 ขั้นตอนการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ..... 12
2.3.2 การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณด้วยวิธีปริมาตรจำกัด ..... 14
2.4 ฝาแฝดดิจิทัล ..... 19
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ..... 20
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีดำเนินงานวิจัย ..... 23
3.1 อุปกรณ์ ..... 23
3.1.1 หม้อไอน้ำ ..... 23
3.1.2 เชื้อเพลิง ..... 24
3.1.3 โปรแกรมสำเร็จรูป ..... 25
3.2 วิธีดำเนินงานวิจัย ..... 25
3.2.1 การพัฒนาแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ..... 26
3.2.2 การศึกษาผลของชนิดและสัดส่วนของเชื้อเพลิง ..... 31
3.2.3 การศึกษาผลของอัตราการป้อนเชื้อเพลิง ..... 32
3.2.4 การสร้างแบบการทำนายผล ..... 32
3.2.5 การวิเคราะห์ข้อมูลด้านสิ่งแวดล้อมและด้านเศรษฐศาสตร์ ..... 33
บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปรายผล ..... 35
4.1 ผลการพัฒนาแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ..... 35
4.1.1 ผลการสร้างขอบเขตทางกายภาพของของไหลในเตาเผาของหม้อไอน้ำ ..... 35
4.1.2 ผลการพัฒนาแบบจำลอง CFD ..... 36
4.1.3 ผลการทวนสอบความถูกต้องของแบบจำลอง ..... 38
4.2 ผลการศึกษาชนิดและสัดส่วนของเชื้อเพลิง ..... 39
4.3 ผลการศึกษาอัตราการป้อนเชื้อเพลิง ..... 50
4.4 ผลการสร้างแบบการทำนายผล ..... 52
4.4.1 ผลแบบการทำนายผลการทดลอง ..... 52

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.4.2 ผลกราฟทำนายผลเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ของหม้อไอน้ำ.......... 58
4.5 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.......... 60
4.5.1 ผลทางด้านสิ่งแวดล้อม.......... 60
4.5.2 ผลทางด้านเศรษฐศาสตร์.......... 62
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย.......... 63
บรรณานุกรม.......... 65
ภาคผนวก ก.......... 68
ภาคผนวก ข.......... 71
ประวัติผู้เขียน.......... 81

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

# สารบัญตาราง

หน้า


ตารางที่ 2-1 สรุปรายละเอียดเกี่ยวกับการเผาร่วม ........ 11

ตารางที่ 2-2 ข้อดีและข้อควรคำนึงของการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ........ 13

ตารางที่ 2-3 ค่าตัวเลขเรย์โนลด์และลักษณะการไหล ........ 16

ตารางที่ 2-4 สมการของการไหลแบบปั่นป่วนในรูปของตัวแปร $\phi$ ........ 19

ตารางที่ 2-5 สรุปผลการทำนายของแบบจำลอง CFD ของหม้อไอน้ำแบบ Co-firing ........ 22

ตารางที่ 3-1 ข้อมูลพื้นฐานของหม้อไอน้ำ ........ 23

ตารางที่ 3-2 ผลของการวิเคราะห์เชื้อเพลิง ........ 24

ตารางที่ 3-3 โปรแกรมสำเร็จรูปในงานวิจัย ........ 25

ตารางที่ 3-4 ค่า Orthogonal Quality และ Aspect Ratio ........ 26

ตารางที่ 3-5 ปฏิกิริยาเคมีของการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง ........ 28

ตารางที่ 3-6 การตั้งค่าแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ........ 29

ตารางที่ 3-7 การป้อนเชื้อเพลิงต่อ 1 ช่องป้อน ........ 30

ตารางที่ 3-8 การป้อนอากาศต่อ 1 ช่องป้อน ........ 30

ตารางที่ 3-9 ค่าผลการทดสอบจริงจากโรงไฟฟ้าและการทบทวนงานวิจัย ........ 30

ตารางที่ 3-10 ตัวแปรในการศึกษา ........ 31

ตารางที่ 3-11 การป้อนเชื้อเพลิงของ 10 การทดลอง ........ 31

ตารางที่ 3-12 การป้อนเชื้อเพลิงของการทดลองที่ 11 และ 12 ........ 32

ตารางที่ 3-13 ค่าเป้าหมายของตัวแปรตามเพื่อการเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ของหม้อไอน้ำ ........ 33

ตารางที่ 3-14 ค่ามาตรฐานควบคุมการปล่อยทิ้งอากาศเสียจากโรงไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง . 33

ตารางที่ 3-15 ราคาเชื้อเพลิงแข็ง ........ 34

ตารางที่ 4-1 ผลการตรวจสอบคุณภาพของ Mesh ........ 35


จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4-2 ผลการทวนสอบความถูกต้องของแบบจำลอง ..... 38
ตารางที่ 4-3 ผลอุณหภูมิและฟลักซ์ความร้อนของแบบจำลอง ..... 39
ตารางที่ 4-4 ผลสารมลพิษของแบบจำลอง ..... 39
ตารางที่ 4-5 ผล ANOVA ของอุณหภูมิภายในเตา ..... 41
ตารางที่ 4-6 ผล ANOVA ของฟลักซ์ความร้อน ..... 43
ตารางที่ 4-7 ผล ANOVA ของปริมาณ $CO_2$ ..... 44
ตารางที่ 4-8 ผล ANOVA ของปริมาณ CO ..... 45
ตารางที่ 4-9 ผล ANOVA ของปริมาณ $SO_2$ ..... 46
ตารางที่ 4-10 ผล ANOVA ของปริมาณ NO ..... 47
ตารางที่ 4-11 ผล ANOVA ของปริมาณ $Cl_2$ ..... 49
ตารางที่ 4-12 ผล ANOVA ของปริมาณเถ้า ..... 50
ตารางที่ 4-13 ผลอุณหภูมิและฟลักซ์ความร้อนของการศึกษาอัตราการป้อนเชื้อเพลิง ..... 51
ตารางที่ 4-14 ผลสารมลพิษของของการศึกษาอัตราการป้อนเชื้อเพลิง ..... 51
ตารางที่ 4-15 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของอุณหภูมิและฟลักซ์ความร้อนเมื่อเทียบกับ Base case 51
ตารางที่ 4-16 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของสารมลพิษเมื่อเทียบกับ Base case ..... 52
ตารางที่ 4-17 สมการทำนายผลตัวแปรตาม ..... 52
ตารางที่ 4-18 ผลตัวแปรตามเนื่องมาจากค่า Desirability และแบบจำลอง CFD ..... 60
ตารางที่ 4-19 ต้นทุนเชื้อเพลิงของการทดลอง ..... 62

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

# สารบัญรูป

หน้า


รูปที่ 2-1 ส่วนประกอบของหม้อไอน้ำฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียน [1] ............................................. 3

รูปที่ 2-2 ฟลูอิไดซ์เบดแบบเร็วสูงในห้องเผาไหม้ของหม้อไอน้ำฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียน [1] ........ 4

รูปที่ 2-3 ขอบเขตการเกิดฟลูอิไดเซชันแบบเร็วสูง [1]...................................................................... 5

รูปที่ 2-4 ประเภทของถ่านหินตามมาตรฐาน ASTM [3] .................................................................. 6

รูปที่ 2-5 ผลวิเคราะห์โดยประมาณของไม้สามชนิดที่เตรียมโดยการแปรรูปที่แตกต่างกันและถ่านหิน [2] ....................................................................................................................................... 8

รูปที่ 2-6 ลำดับการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแข็ง [2]............................................................................. 8

รูปที่ 2-7 ส่วนประกอบโดยทั่วไปของไม้และถ่านหิน [2] .................................................................... 9

รูปที่ 2-8 แผนภาพแวนเครเวเลน (Van Krevelen diagram) สำหรับเชื้อเพลิงแข็งต่างๆ [2] ......... 10

รูปที่ 2-9 ขั้นตอนการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ [6] ....................................................... 12

รูปที่ 2-10 ปริมาตรควบคุมในระบบ 3 มิติ [6] ................................................................................ 14

รูปที่ 2-11 ลักษณะการไหลของของไหล [7]..................................................................................... 16

รูปที่ 2-12 ความเร็วผันผวนตามเวลา ณ จุดหนึ่งของการไหลแบบปั่นป่วน [6]............................... 16

รูปที่ 3-1 เตาเผาของหม้อไอน้ำ ..................................................................................................... 23

รูปที่ 3-2 ค่า Orthogonal quality [22] ......................................................................................... 26

รูปที่ 3-3 กลไกการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งในแบบจำลอง .................................................................. 27

รูปที่ 4-1 Mesh ของของไหลในห้องเผาไหม้ของหม้อไอน้ำ ............................................................ 35

รูปที่ 4-2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแก๊สบริเวณเบดกับเวลาของ Base case............................ 36

รูปที่ 4-3 อุณหภูมิภายในเตาเผาของ Base case ; (1) ภาพคอนทัวร์ของอุณหภูมิ (2) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความสูงของเตา ......................................................................... 36

รูปที่ 4-4 ภาพคอนทัวร์ขององค์ประกอบต่างๆในเตาเผา ; (1) เบด และ (2) เชื้อเพลิง .................... 37

รูปที่ 4-5 ภาพคอนทัวร์ขององค์ประกอบต่างๆในเตาเผา ; (1) $O_2$ และ (2) $CO_2$............................ 38

รูปที่ 4-6 อุณหภูมิของแบบจำลอง ..... 40

รูปที่ 4-7 ฟลักซ์ความร้อนของแบบจำลอง ..... 42

รูปที่ 4-8 ปริมาณ $CO_2$ และ CO ของแบบจำลอง ..... 43

รูปที่ 4-9 ปริมาณ $SO_2$ ของแบบจำลอง ..... 45

รูปที่ 4-10 ปริมาณ NO ของแบบจำลอง ..... 46

รูปที่ 4-11 ปริมาณ $Cl_2$ ของแบบจำลอง ..... 48

รูปที่ 4-12 ปริมาณเถ้าของแบบจำลอง ..... 49

รูปที่ 4-13 กราฟคอนทัวร์สามแกน ; (1) Overall temperature และ (2) Bed temperature ..... 53

รูปที่ 4-14 กราฟคอนทัวร์สามแกน ; (1) Freeboard temperature และ (2) Outlet temperature ..... 54

รูปที่ 4-15 กราฟคอนทัวร์สามแกน ; (1) Heat flux และ (2) $CO_2$ ..... 55

รูปที่ 4-16 กราฟคอนทัวร์สามแกน ; (1) CO และ (2) $SO_2$ ..... 56

รูปที่ 4-17 กราฟคอนทัวร์สามแกน ; (1) NO และ (2) $Cl_2$ ..... 57

รูปที่ 4-18 กราฟคอนทัวร์สามแกนของ Ash ..... 58

รูปที่ 4-19 ค่า Desirability ของตัวแปร ..... 59

รูปที่ 4-20 กราฟ Desirability เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ของหม้อไอน้ำ ..... 59

รูปที่ 4-21 ปริมาณ $SO_2$ ของการทดลองเทียบกับข้อกำหนดจากประกาศกระทรวงฯและ EIA โรงไฟฟ้า ..... 61

รูปที่ 4-22 ปริมาณ NO ของการทดลองเทียบกับข้อกำหนดจากประกาศกระทรวงฯและ EIA โรงไฟฟ้า ..... 61

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

# บทที่ 1
# บทนำ

## 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบัน การพัฒนาทางด้านอุตสาหกรรมและเศรษฐกิจขยายตัวอย่างรวดเร็ว ทำให้ความต้องการใช้ไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น โดยไฟฟ้าส่วนใหญ่จะผลิตจากเชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น น้ำมัน ก๊าซธรรรมชาติ และถ่านหิน เป็นต้น ถ่านหินถูกนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในหม้อไอน้ำของโรงไฟฟ้าในปริมาณที่สูงขึ้น แต่ทรัพยากรถ่านหินมีอย่างจำกัดและไม่สามารถผลิตขึ้นมาทดแทนได้ทันตามความต้องการใช้งาน ส่งผลให้ราคาเชื้อเพลิงปรับตัวสูงขึ้น นอกจากนี้ถ่านหินยังก่อให้เกิดผลกระทบทางลบต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นโรงไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงจึงจำเป็นต้องมองหาแนวทางการใช้พลังงานทางเลือกที่ยั่งยืนมากยิ่งขึ้น

ชีวมวลมีศักยภาพเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า เนื่องจากเป็นพลังงานที่มีราคาถูกและมีจำนวนมากสามารถปลูกทดแทนได้ตลอดเวลา ส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตไฟฟ้ามีราคาถูกลง นอกจากนี้พลังงานจากชีวมวลยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม แต่ชีวมวลมีคุณสมบัติทางพลังงานไม่คงที่ซึ่งแตกต่างกันตามชนิดและพื้นที่การเพาะปลูกทำให้มีผลต่อพฤติกรรมการเผาไหม้ การศึกษาผลที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้ของหม้อไอน้ำเชื้อเพลิงชีวมวลเผาร่วมกับถ่านหินจึงถูกให้ความสนใจ ทั้งนี้เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้งานและเพื่อให้กระบวนการมีประสิทธิภาพสูงสุดก่อนการใช้งานจริงจึงจะต้องศึกษาอุทกพลศาสตร์ การถ่ายเทความร้อน และปฏิกิริยาเคมี การศึกษาโดยตรงจะต้องใช้ต้นทุนและทรัพยากรค่อนข้างสูง อีกทั้งยังเสี่ยงต่อการเกิดอันตรายแก่เครื่องมือและผู้ทดสอบ ปัจจุบันได้มีงานวิจัยมากมายที่นำเทคโนโลยีสร้างแบบจำลองเสมือนหรือฝาแฝดดิจิทัลมาใช้ในการศึกษาด้วยการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ทำให้มองเห็นภาพพฤติกรรมของของไหลในระบบที่มีกลไกที่ซับซ้อนให้มีความชัดเจนยิ่งขึ้นผ่านหน้าจอคอมพิวเตอร์ ช่วยให้ประหยัดเวลา ลดค่าใช้จ่ายและมีความปลอดภัยจากอุบัติเหตุที่อาจจะเกิดขึ้นจากการศึกษาหม้อไอน้ำโดยตรง

งานวิจัยในปัจจุบันได้ศึกษาการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณในหม้อไอน้ำที่มีเชื้อเพลิงเป็นถ่านหิน ชีวมวล หรือถ่านหินร่วมกับชีวมวลเพียงหนึ่งชนิด แต่การศึกษาอิทธิพลของชีวมวลหลายชนิดร่วมกับถ่านหินมีค่อนข้างน้อย ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการพัฒนาแบบจำลองเสมือนหรือฝาแฝดดิจิทัลของหม้อไอน้ำที่ใช้ถ่านหินเผาร่วมกับชีวมวลจำนวน 2 ชนิด ด้วยการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ โดยสนใจศึกษาหม้อไอน้ำฟลูอิไดซ์เบดหมุนเวียนซึ่งมีการกระจายตัวของความร้อนในห้องเผาไหม้สูงและมีการใช้เชื้อเพลิงแบบเผาร่วม ซึ่งมีความยืดหยุ่นต่อชนิดเชื้อเพลิง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ทั้งนี้มีจุดมุ่งหมายของงานวิจัยเพื่อเพิ่มศักยภาพการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลในหม้อไอน้ำแทนถ่านหินที่มีปัญหาเชิงลบ และได้ข้อมูลในการสนับสนุนการใช้พลังงานสะอาดที่เป็นพลังงานทางเลือกอย่างยั่งยืน

## 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 พัฒนาแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเพื่อทำนายพฤติกรรมในห้องเผาไหม้ของหม้อไอน้ำแบบเผาร่วมเชื้อเพลิงชีวมวลและถ่านหิน

1.2.2 ศึกษาผลของชนิดและสัดส่วนของเชื้อเพลิงต่อพฤติกรรมในห้องเผาไหม้ของหม้อไอน้ำแบบเผาร่วมเชื้อเพลิงชีวมวลและถ่านหิน

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาพฤติกรรมในห้องเผาไหม้ของหม้อไอน้ำฟลูอิไดซ์เบดหมุนเวียนแบบเผาร่วมเชื้อเพลิงที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัด 15.34 × 7.78 m และสูง 48.10 m ของบริษัท อินทิเกรทเต็ด รีเสิร์ช เซ็นเตอร์ จำกัด จ.ปราจีนบุรี

1.3.2 ชนิดของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ ถ่านหินเป็นประเภทซับบิทูมินัส และชีวมวล 2 ชนิด ได้แก่ ชิ้นไม้สับ และเปลือกไม้ ซึ่งเป็นชีวมวลที่มีค่าความร้อนสูงและหาได้ง่ายในประเทศไทย

1.3.3 แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณพัฒนาโดยใช้โปรแกรม Ansys Fluent และจะเป็นการศึกษาในแบบ 3 มิติ

## 1.4 ลำดับขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย

1.4.1 วิเคราะห์ปัญหาและที่มาของงานวิจัย

1.4.2 ค้นคว้าทฤษฎีและทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.4.3 พัฒนาแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณในห้องเผาไหม้ของหม้อไอน้ำแบบเผาร่วมชีวมวลและถ่านหิน

1.4.4 ศึกษาผลของชนิดและสัดส่วนของเชื้อเพลิงด้วยแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

1.4.5 วิเคราะห์ผล

1.4.6 สรุปผล เขียนวิทยานิพนธ์และบทความวิชาการ

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ต้นแบบฝาแฝดดิจิทัลห้องเผาไหม้หม้อกำเนิดไอแบบเผาร่วมชีวมวลและถ่านหินที่สามารถทำนายพฤติกรรมในห้องเผาไหม้เมื่อมีการเปลี่ยนชนิดและสัดส่วนของเชื้อเพลิง

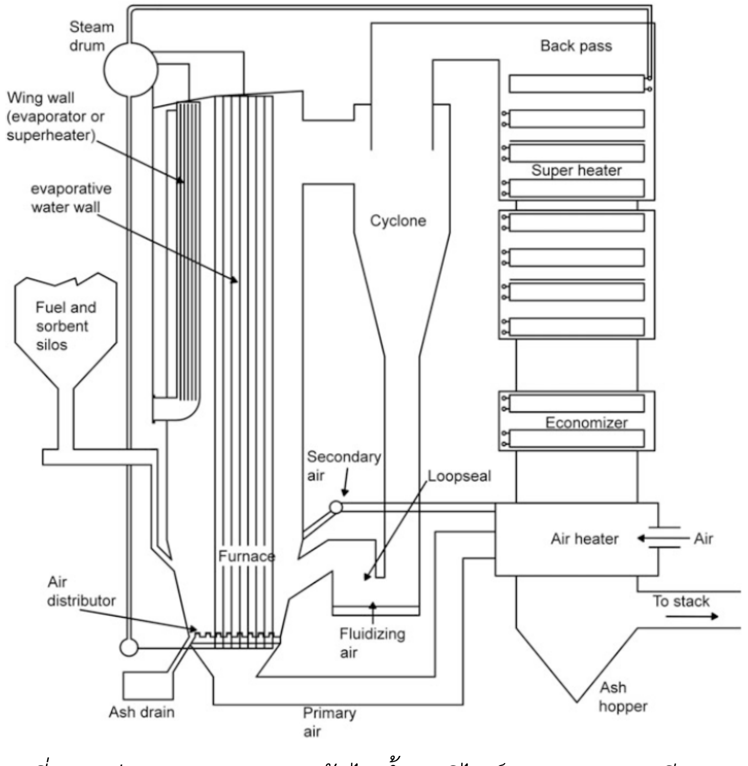
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

# บทที่ 2
# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

## 2.1 หม้อไอน้ำ

หม้อไอน้ำ (Boiler) เป็นอุปกรณ์ที่ทำงานด้วยการเผาไหม้เชื้อเพลิง แล้วถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นให้กับน้ำในภาชนะอัดความดันเพื่อกำเนิดไอน้ำที่มีความดันและอุณหภูมิที่กำหนด จากคุณสมบัติดังกล่าวได้ถูกนำมาใช้ในการหมุนกังหันไอน้ำในกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าของโรงไฟฟ้า หม้อไอน้ำที่นิยมใช้สำหรับเชื้อเพลิงแข็ง คือ หม้อไอน้ำฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียน (Circulating fluidized bed boiler ; CFB boiler) [1]

หม้อไอน้ำฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียน เป็นอุปกรณ์สำหรับผลิตไอน้ำด้วยการเผาไหม้เชื้อเพลิงในเตาเผาที่มีการกระจายตัวและไหลกลับของเชื้อเพลิงเพื่อทำปฏิกิริยาเผาไหม้กับอากาศได้ดี ส่งผลให้อุณหภูมิในเตาเผามีความสม่ำเสมอ โดยมีส่วนประกอบหลัก ได้แก่ ห้องเผาไหม้ (Furnace) ระบบป้อนเชื้อเพลิงและวัสดุเบด (Feeding system) ไซโคลน (Cyclones) ระบบการป้อนอากาศ เช่น อากาศปฐมภูมิ (Primary air) และอากาศทุติยภูมิ (Secondary air) ระบบแลกเปลี่ยนความร้อนที่ Back pass เช่น Super heater, Economizer และ Air Pre-heater และระบบการป้อนน้ำเข้า (Feed water system) ดังแสดงในรูปที่ 2-1

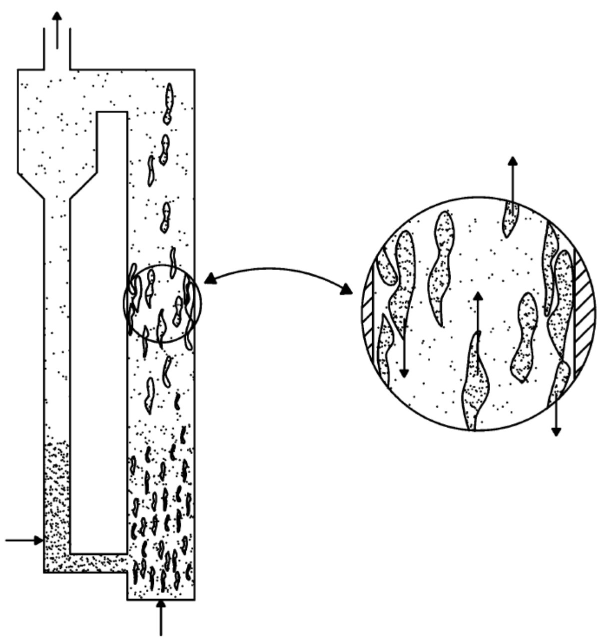



*รูปที่ 2-1 ส่วนประกอบของหม้อไอน้ำฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียน [1]*

2.1.1 อุทกพลศาสตร์ในห้องเผาไหม้ของหม้อไอน้ำ

อุทกพลศาสตร์ (Hydrodynamic) เป็นเรื่องที่สำคัญในการศึกษาเกี่ยวกับการทำงานของหม้อไอน้ำ ซึ่งอุทกพลศาสตร์ในห้องเผาไหม้ของหม้อไอน้ำฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียนจะมีลักษณะเป็นฟลูอิไดเซชันแบบเร็วสูง (Fast fluidization)

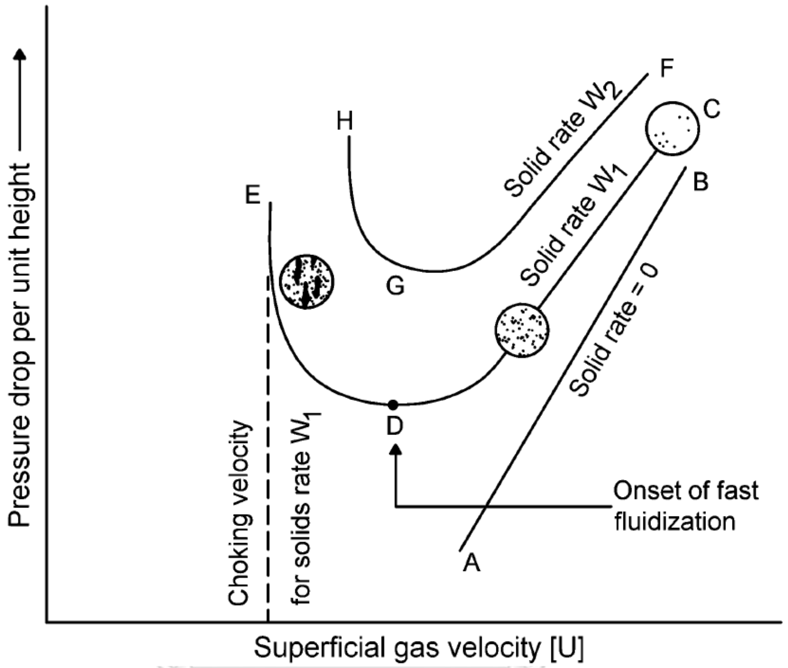
ฟลูอิไดเซชันแบบเร็วสูง เป็นเทคนิคในการนำอากาศที่มีความเร็วสูงเข้าไปสัมผัสกับเชื้อเพลิงที่มีทำให้มีลักษณะเป็นสารแขวนลอย ซึ่งอากาศจะมีความเร็วสูงกว่าความเร็วสุดท้ายของอนุภาคเชื้อเพลิง ทำให้อนุภาครวมตัวกันเป็นกลุ่มๆ เรียกว่า คลัสเตอร์ (Cluster) เคลื่อนที่ขึ้นลง และมีการสลายตัวและรวมตัวใหม่ตลอดเวลา และอนุภาคเชื้อเพลิงบางส่วนจะกระจายตัวแยกห่างจากกันที่ค่อนข้างเจือจาง ดังรูปที่ 2-2 ถ้านำเอาอนุภาคเชื้อเพลิงที่หลุดออกจากเบดกลับเข้ามาในระบบใหม่ จะเรียกระบบนี้ว่า ฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียน นั่นเอง



*รูปที่ 2-2 ฟลูอิไดซ์เบดแบบเร็วสูงในห้องเผาไหม้ของหม้อไอน้ำฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียน [1]*

Reddy-Karri และ Knowlton ได้อธิบายขอบเขตการเกิดฟลูอิไดเซชันแบบเร็วไว้ดังรูปที่ 2-3 ซึ่งเป็นการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของอากาศป้อนกับความดันลดต่อหน่วยความยาว พบว่า เมื่อป้อนของแข็งในอัตราคงที่ ($W_1$) และป้อนอากาศที่มีความเร็วสูงจุดถึงจุด C จะเกิดการกระจายตัวของอนุภาคของแข็งมากที่สุด ทำให้ความดันลดมีค่าสูงเนื่องจากเกิดแรงเสียดทานของอนุภาคของแข็งกับผนังมาก และเมื่อลดความเร็วของอากาศลงจนถึงจุด D อนุภาคของแข็งจะเริ่มจับตัวหนาแน่นมากขึ้น ส่งผลให้ความดันลดมีค่าลดลง หลังจากลดความเร็วของอากาศ

ลงเรื่อยๆ จนถึงจุด E อนุภาคของแข็งจะเริ่มรวมตัวกันเป็นกลุ่มคลัสเตอร์ ซึ่งจะเป็นเพิ่มแรงเสียดทานที่ผนังมากขึ้น ทำให้ความดันลดมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่จุด E จะมีการสะสมอนุภาคของแข็งจนเต็มระบบ จะเรียกจุดนี้ว่า Choking point จากการพิจารณาทั้งหมดสามารถระบุได้ว่าจุด D เป็นจุดเริ่มการเกิดฟลูอิไดเซชันแบบเร็วสูง




*รูปที่ 2-3 ขอบเขตการเกิดฟลูอิไดเซชันแบบเร็วสูง [1]*

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

โดยสรุป ปัจจัยที่สำคัญของการเกิดฟลูอิไดเซชันแบบเร็วสูงจะขึ้นกับความเร็วของอากาศป้อนและปริมาณของแข็งภายในระบบ อย่างไรก็ตามระบบฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียนจะต้องคำนึงถึงอัตราการป้อนกลับของของแข็ง ซึ่งจะส่งผลต่อปริมาณของแข็งในระบบด้วย

**2.2 เชื้อเพลิง**

เชื้อเพลิง (Fuel) คือ สารที่เกิดการเผาไหม้แล้วให้พลังงานความร้อน ธาตุองค์ประกอบที่สำคัญของเชื้อเพลิงคือ คาร์บอน (C) และไฮโดรเจน (H) เมื่อเชื้อเพลิงถูกเผาไหม้แล้วธาตุคาร์บอนและไฮโดรเจนจะทำปฏิกิริยากับก๊าซออกซิเจนแล้วเกิดพลังงานความร้อนออกมา [2]

สำหรับงานวิจัยนี้ได้ศึกษาเชื้อเพลิงแข็งที่ใช้ในห้องเผาไหม้หม้อไอน้ำฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียน ซึ่งเชื้อเพลิงแข็งเป็นลักษณะเชื้อเพลิงที่ใช้งานในสภาพของแข็งที่อุณหภูมิห้อง เช่น ถ่านหิน ฟืนถ่านไม้ แกลบ ขี้เลื่อย เป็นต้น ในงานวิจัยนี้ได้สนใจเชื้อเพลิงแข็ง คือ ถ่านหินและชีวมวล ซึ่งจะสามารถอธิบายได้ ดังนี้

2.2.1 ถ่านหิน

ถ่านหิน (Coal) คือ หินตะกอนหรือแร่เชื้อเพลิงที่สามารถติดไฟได้ มีสีน้ำตาลอ่อนจนถึงสีดำ มีทั้งชนิดผิวมันและผิวด้าน น้ำหนักเบา ถ่านหินประกอบด้วยธาตุที่สำคัญ 4 ธาตุ ได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และออกซิเจน นอกจากนั้น มีธาตุหรือสารอื่น เช่น กำมะถันเจือปนเล็กน้อย ถ่านหินที่มีจำนวนคาร์บอนสูง เมื่อนำมาเผาจะให้ความร้อนมาก ถือว่าเป็นถ่านหินคุณภาพดี [3]

American Society for Testing and Materials (ASTM) ได้แบ่งประเภทของถ่านหิน ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D388 โดยพิจารณาค่าความร้อน (Calorific value) ค่าสารระเหย (Volatile matter) และค่าคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) เป็นเกณฑ์ ซึ่งถ่านหินถูกแบ่งเป็น 4 ประเภท ได้แก่ ลิกไนต์ (Lignite) ซับบิทูมินัส (Sub-bituminous) บิทูมินัส (Bituminous) และแอนทราไซต์ (Anthracite) ดังรูปที่ 2-4

| U.S. Rank (ASTM) | | | Calorific Value (dmmf) (Btu/lb.) | Volatile Matter (dmmf) (%) | Fixed Carbon (dmmf) (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| High rank | Anthracitic | Meta-anthracite | | 2 | 98 |
| | | Anthracite | | 8 | 92 |
| | | Semi-anthracite | | 14 | 86 |
| Medium rank | Bituminous | low volatile | | 22 | 78 |
| | | medium volatile | | 31 | 69 |
| | | high volatile A | 14,000 | | |
| | | high volatile B | 13,000 | | |
| | | high volatile C | 11,500 | | |
| Low rank | Sub-bituminous | A | 10,500 | | |
| | | B | 9,500 | | |
| | | C | 8,300 | | |
| | Lignite | A | 6,300 | | |
| | | B | 5,000 | > 60 | 25 |
| Peat | | | | | |

*รูปที่ 2-4 ประเภทของถ่านหินตามมาตรฐาน ASTM [3]*

ถ่านหินทั้ง 4 ประเภทมีลักษณะและการนำไปใช้ประโยชน์ต่างกันดังนี้

1. ลิกไนต์มีซากพืชหลงเหลืออยู่เล็กน้อย มีความชื้นมาก เป็นถ่านหินที่ใช้เป็นเชื้อเพลิง
2. ซับบิทูมินัสมีสีดำ เป็นเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพเหมาะสมในการผลิตกระแสไฟฟ้า

3. บิทูมินัสเป็นถ่านหินเนื้อแน่น แข็ง ประกอบด้วยชั้นถ่านหินสีดำมันวาว ใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อการถลุงโลหะ

4. แอนทราไซต์เป็นถ่านหินที่มีลักษณะดำเป็นเงา มันวาวมาก มีรอยแตกเว้าแบบก้นหอย ติดไฟยาก มักใช้เป็นเชื้อเพลิงในอุตสาหกรรมแก้ว และอุตสาหกรรมเหล็ก

การใช้ประโยชน์จากถ่านหินส่วนใหญ่ใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าการถลุงโลหะ การผลิตปูนซีเมนต์ และอุตสาหกรรมที่ใช้เครื่องจักรไอน้ำ การผลิตกระแสไฟฟ้าทั่วโลกใช้พลังงานจากถ่านหินประมาณร้อยละ 37

2.2.2 ชีวมวล

ชีวมวล (Biomass) เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติที่อยู่ในรูปของสารอินทรีย์และสามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้ ตัวอย่างชีวมวล เช่น เศษไม้ ขยะ วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เป็นต้น โครงสร้างของชีวมวลประกอบด้วยธาตุหลัก ๆ คือ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน และไนโตรเจนในรูปของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน [2]

โดยทั่วไปชีวมวลสามารถจำแนกได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้

1. ไม้และเศษไม้ (Wood and wood wastes) เช่น ไม้ยืนต้น ฟืน ขี้เลื่อยไม้ และเศษไม้
2. พืชผลทางการเกษตรและวัสดุเหลือใช้ (Agricultural crops and waste materials) เช่น ข้าวโพด ถั่วเหลือง อ้อย และสาหร่าย
3. วัสดุไบโอจีนิกในขยะชุมชน (Biogenic materials in municipal solid waste) เช่น กระดาษ ฝ้าย และผลิตภัณฑ์ขนสัตว์

การนำชีวมวลมาใช้ประโยชน์ในกระบวนการการผลิตไฟฟ้าสามารถทำได้โดยการเผาไหม้ชีวมวลโดยตรง (Direct combustion) และกระบวนการเคมีความร้อน (Thermochemical conversion)

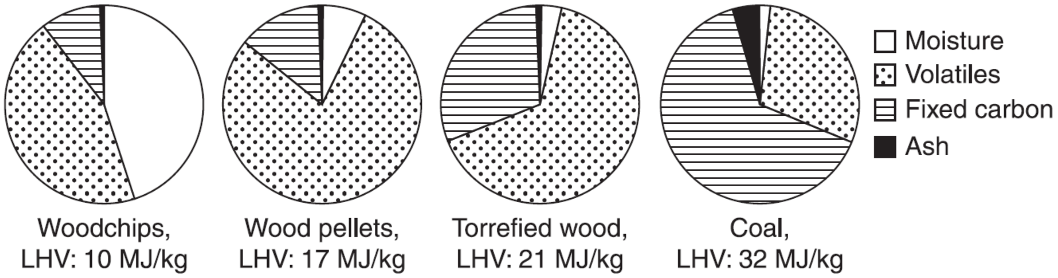
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.2.3 การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง

การเผาไหม้ (Combustion) เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนระหว่างเชื้อเพลิงและออกซิเจน เพื่อสร้างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำเป็นส่วนใหญ่ ความร้อนที่ปล่อยออกมาสามารถใช้เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าผ่านวัฏจักรแรงคิน (Rankine cycle) ขึ้นอยู่กับสภาวะและคุณสมบัติการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง [2]

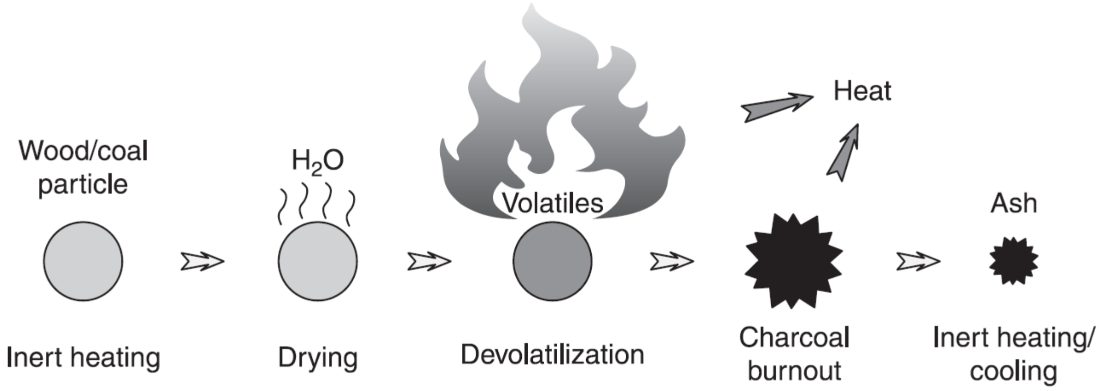
ถ่านหินและชีวมวลมีโครงสร้างและคุณสมบัติทางเคมีแตกต่างกันอย่างชัดเจน ดังรูปที่ 2-5 แสดงองค์ประกอบทั่วไปด้วยการวิเคราะห์โดยประมาณ (Proximate analysis) ของไม้สามชนิดที่เตรียมโดยการแปรรูปที่แตกต่างกันและถ่านหิน พบว่าเศษไม้ไม่ได้ผ่านการทำให้แห้งและมีความชื้นอยู่มาก ความชื้นจะระเหยออกไปเมื่อเชื้อเพลิงถูกเผาไหม้ ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงจะลดลง

เมื่อมีความชื้น และเป็นการยากมากที่จะรักษาการเผาไหม้โดยให้มีความชื้นเกิน 55 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณน้ำยังส่งผลต่อเวลาในการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง และด้วยเหตุนี้จึงต้องขยายเวลาของเชื้อเพลิงตั้งต้นที่อยู่ในเตาเผา




*รูปที่ 2-5 ผลวิเคราะห์โดยประมาณของไม้สามชนิดที่เตรียมโดยการแปรรูปที่แตกต่างกันและถ่านหิน [2]*

ลำดับการเผาไหม้พื้นฐานของเชื้อเพลิงแข็งแสดงในรูปที่ 2-6 สารระเหยจะถูกปล่อยออกมาจากเชื้อเพลิงแข็งในรูปของแก๊สเมื่อได้รับความร้อน และจะเกิดการเผาไหม้เมื่อผสมกับออกซิเจน การเผาไหม้ของสารระเหยที่เป็นแก๊สรวดเร็วมากเมื่อเทียบกับการเผาไหม้ของถ่านแข็ง และอัตราส่วนของสารระเหยที่สูงจะลดเวลาการคงอยู่ของเชื้อเพลิงในเตาเผา ถ่านที่เหลืออยู่จะคงรูปร่างเดิมไว้อย่างเด่นชัดและจะลดลงเป็นเถ้าในระหว่างที่เกิดการเผาไหม้




*รูปที่ 2-6 ลำดับการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแข็ง [2]*

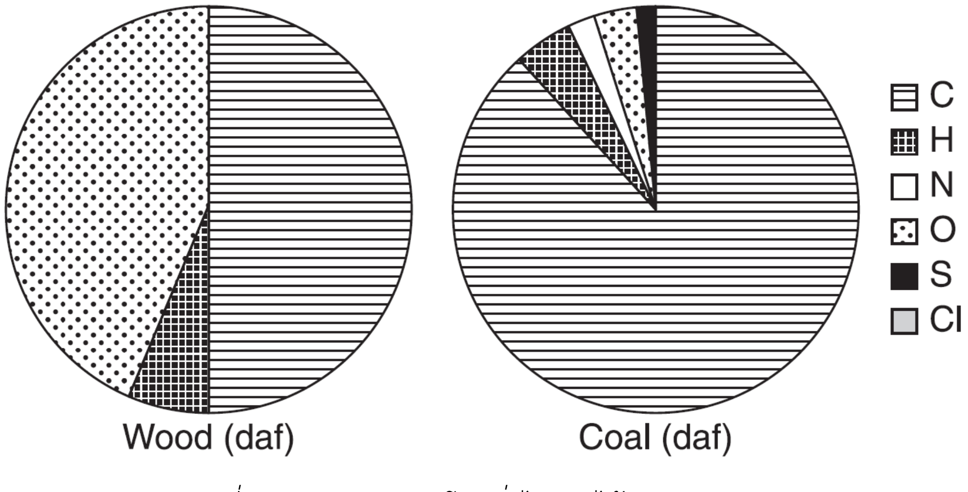
ปฏิกิริยาการเผาไหม้โดยทั่วไป คือ

$$C_{X_1}H_{X_2}O_{X_3}N_{X_4}S_{X_5} + n \cdot (3.76N_2 + O_2) \rightarrow aCO_2 + bH_2O + cO_2 + dN_2 + eCO + fNO_x + gSO_x$$

ปฏิกิริยาการเผาไหม้จะเปลี่ยนเชื้อเพลิงเป็นความร้อน คาร์บอนไดออกไซด์ ($CO_2$) และน้ำ ซึ่งไม่ได้สะท้อนถึงธรรมชาติที่แท้จริงของการเผาไหม้ กลไกที่ซับซ้อนของการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งต้องได้รับการพิจารณาอย่างครบถ้วน แต่เนื่องจากข้อจำกัดในทรัพยากรการคำนวณ การจำลองกระบวนการเผาไหม้มักจะพิจารณาเพียงโมเลกุล 6 ชนิด คือ ไนโตรเจน ($N_2$), ออกซิเจน ($O_2$), ไอน้ำ ($H_2O$), คาร์บอนไดออกไซด์ ($CO_2$), คาร์บอนมอนออกไซด์ (CO), และสารระเหย ($CH_XO_Y$) สามารถแสดงปฏิกิริยาของแก๊ส 2 ปฏิกิริยา ดังนี้

$$CH_XO_Y + aO_2 \rightarrow CO + bH_2O$$
$$CO + 0.5O_2 \rightarrow CO_2$$

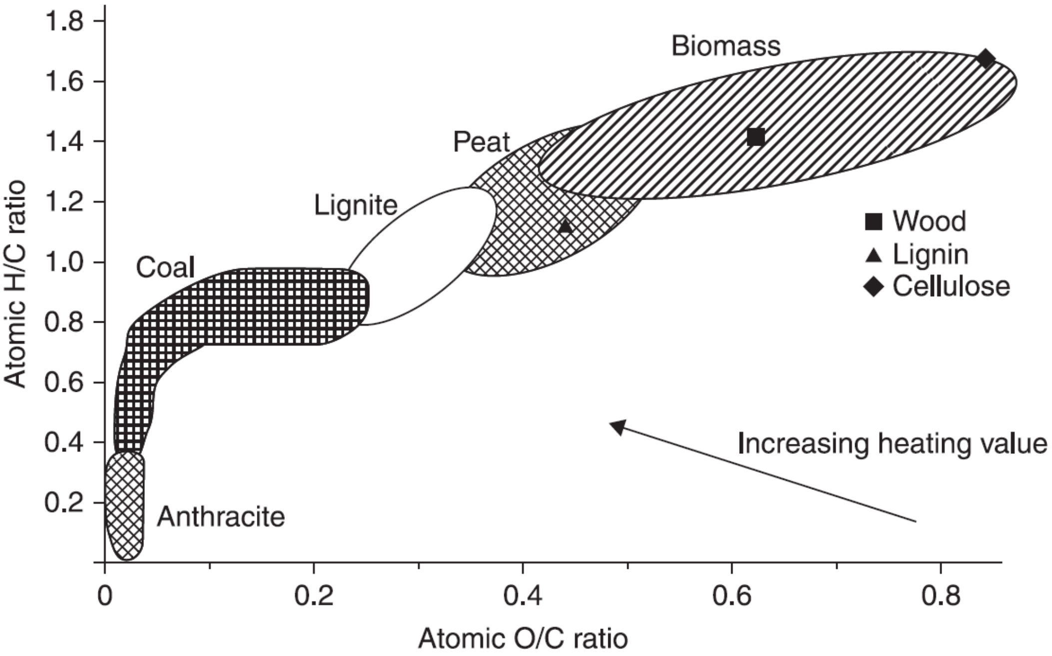
องค์ประกอบสารระเหยสามารถหาได้จากการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ดังรูปที่ 2-7 จะเห็นได้ว่าไม้ซึ่งเป็นตัวแทนของชีวมวลมีออกซิเจนเป็นส่วนใหญ่เมื่อเทียบกับถ่านหินซึ่งประกอบด้วยคาร์บอนเป็นส่วนใหญ่ ไม้ยังมีไนโตรเจนและกำมะถันน้อยมาก อย่างไรก็ตามปริมาณไนโตรเจนและกำมะถันจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของวัตถุดิบชีวมวล




*รูปที่ 2-7 ส่วนประกอบโดยทั่วไปของไม้และถ่านหิน [2]*

การวิเคราะห์โดยประมาณและการวิเคราะห์แบบแยกธาตุเป็นวิธีที่ใช้ในการประเมินเชื้อเพลิงแข็งที่นอกเหนือจากการวัดค่าความร้อนและปริมาณโลหะหนัก ถ่านหินสามารถพิจารณาความเป็นเนื้อเดียวกันได้ง่ายกว่าชีวมวล เนื่องจากชีวมวลมีองค์ประกอบอินทรีย์ในปริมาณต่างกันทำให้มีลักษณะการเผาไหม้ที่แตกต่างกันด้วย ซึ่งองค์ประกอบอินทรีย์นี้ไม่ได้ถูกวิเคราะห์ด้วยการวิเคราะห์โดยประมาณและการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (องค์ประกอบหลักของชีวมวล ได้แก่

เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน) องค์ประกอบหลักของชีวมวลสามารถวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก (Thermogravimetric analysis ; TGA) องค์ประกอบของเชื้อเพลิงแข็งมักจะแสดงโดยใช้แผนภาพแวนเครเวเลน (Van Krevelen diagram) ซึ่งแสดงเชื้อเพลิงตามอัตราส่วนอะตอมไฮโดรเจนต่อคาร์บอน (H/C) และอัตราส่วนอะตอมออกซิเจนต่อคาร์บอน (O/C) ดังรูปที่ 2-8 จะพบว่าเชื้อเพลิงชีวมวลมีอัตราส่วน H/C และ O/C สูงกว่าถ่านหินอย่างเห็นได้ชัด




จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

*รูปที่ 2-8 แผนภาพแวนเครเวเลน (Van Krevelen diagram) สำหรับเชื้อเพลิงแข็งต่างๆ [2]*

2.2.4 การเผาร่วม

การเผาร่วม (Co-firing หรือ Co-combustion) คือการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงสองชนิดที่แตกต่างกันในระบบการเผาไหม้เดียวกัน การเผาร่วมชีวมวลกับถ่านหินในโรงไฟฟ้าเป็นทางเลือกที่น่าสนใจสำหรับการเพิ่มการใช้ทรัพยากรพลังงานหมุนเวียนและลดการปล่อยมลพิษอย่างมีนัยสำคัญ [4]

การใช้เทคนิคเผาร่วมในโรงไฟฟ้าครอบคลุมช่วงของเทคโนโลยีการเผาไหม้ ประเภทเชื้อเพลิงและสัดส่วนของเชื้อเพลิงเผาร่วม [5] ดังแสดงในตารางที่ 2-1

*ตารางที่ 2-1 สรุปรายละเอียดเกี่ยวกับการเผาร่วม*

| เรื่อง | รายละเอียด |
|---|---|
| กำลังผลิตของโรงไฟฟ้า | 5 – 4,000 เมกะวัตต์ โดยส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 50 - 700 เมกะวัตต์ |
| ถ่านหิน | ถ่านหินที่สำคัญ เช่น ลิกไนต์ บิทูมินัส และปิโตรเลียมโค้ก |
| ชีวมวล | ชีวมวลที่สำคัญ เช่น ไม้ และเศษเหลือจากการเกษตร |
| เทคโนโลยีการเผาไหม้ | Pulverized fuel (PF) boilers 48 %<br>Fluidized bed (BFB) boilers 24 %<br>Circulating fluidized bed (CFB) boilers 19 %<br>Grate-fired boilers 9% |
| ลักษณะของการเผาร่วม | Direct co-firing 95.4%<br>Indirect co-firing with pre-gasification or pre-pyrolysis 3.6%<br>Parallel co-firing 1% |
| อุณหภูมิเบด (Bed temperature) | 815–870°C สำหรับ CFB |
| ก๊าซมลพิษ | กรณี CFB จะปล่อย $SO_x$ ต่ำมากเนื่องจากการดักจับกำมะถันในเบดโดยการเติมหินปูน (Limestone) และมีการปล่อย $NO_x$ ที่ต่ำมาก โดยมีสาเหตุหลักมาจากการวนกลับของเถ้าไปยังเบด |

จากตารางที่ 2-1 แสดงให้เห็นว่าเทคนิคการเผาร่วมในโรงไฟฟ้าสามารถใช้เชื้อเพลิงถ่านหินกับชีวมวลได้หลากหลาย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะของการเผาร่วมและเทคโนโลยีการเผาไหม้ที่เหมาะสม การศึกษาเรื่องการเผาไหม้เป็นเรื่องที่สำคัญเพื่อช่วยในการออกแบบและเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการเผาร่วมในโรงไฟฟ้า งานวิจัยนี้ศึกษาการเผาร่วมของถ่านหินและชีวมวลแบบป้อนเชื้อเพลิงแข็งโดยตรง (Direct co-firing) ในกระบวนการเผาไหม้แบบฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียน

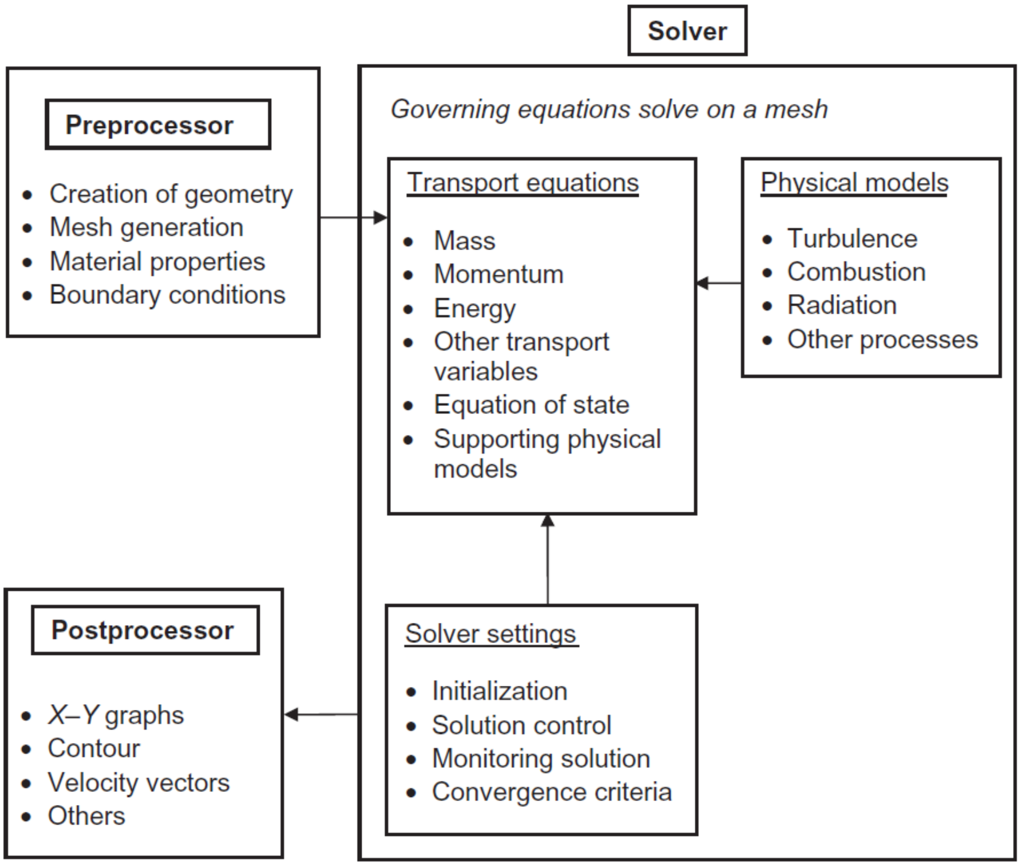
การเผาไหม้แบบฟลูอิไดซ์เบด เป็นการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นบนเบดที่มีการผสมของแก๊สและของแข็งอย่างเข้มข้น มีการถ่ายเทความร้อนสูงไปยังเตาเผา และมีอุณหภูมิการเผาไหม้ต่ำ การไหลของอากาศและเชื้อเพลิงไปยังเบดจะถูกควบคุมเพื่อให้ปริมาณความร้อนที่ต้องการถูกปล่อยไปยังเตาเผาอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากเชื้อเพลิงมีระยะเวลาในเตาที่นานและมีการผสมที่ดี เชื้อเพลิงจึงสามารถเผาไหม้ได้อย่างมีประสิทธิภาพในเตาเผาไหม้แบบฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่อุณหภูมิต่ำกว่าเทคโนโลยีการเผาไหม้แบบอื่น

## 2.3 การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational fluid dynamics; CFD) เป็นการวิเคราะห์เชิงตัวเลขสำหรับศึกษาพฤติกรรมต่างๆ ของของไหล เช่น การไหล การถ่ายเทความร้อน การแพร่กระจายของอนุภาค และการเกิดปฏิกิริยาเคมี เป็นต้น [6]

2.3.1 ขั้นตอนการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ มี 3 ขั้นตอน ดังรูปที่ 2-9




*รูปที่ 2-9 ขั้นตอนการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ [6]*

1) ขั้นตอนก่อนการคำนวณ (Preprocessor) เป็นการจัดการข้อมูลเพื่อป้อนให้กับขั้นตอนการคำนวณ ดังนี้

- กำหนดลักษณะทางกายภาพของบริเวณที่สนใจ (Geometry)
- สร้างโครงข่ายการคำนวณ (Mesh) เพื่อแบ่งปริมาตรภายในบริเวณที่สนใจ
- กำหนดคุณสมบัติต่างๆของของไหลที่จะทำการคำนวณ เช่น ความหนาแน่น ความหนืด เป็นต้น

- เลือกลักษณะของสภาวะขอบ (Boundary conditions)
- กำหนดข้อมูลสภาวะเริ่มต้นก่อนทดสอบ เช่น อัตราการป้อนอากาศ อัตราการป้อนเชื้อเพลิง เป็นต้น

2) ขั้นตอนการคำนวณ (Solver) เป็นการหาผลลัพธ์ด้วยการแก้สมการสำหรับการจำลองพลศาสตร์ของไหล ดังนี้

- กำหนดสมการควบคุมของการไหล (Governing equation of fluid dynamic) สำหรับการจำลองพฤติกรรมทางกายภาพ ได้แก่ สมการอนุรักษ์มวล (Mass conservation equation) สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Momentum conservation equation) และสมการอนุรักษ์พลังงาน (Energy conservation equation)
- แก้สมการควบคุมซึ่งเป็นสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยให้เป็นสมการพีชคณิต (Algebraic equation) ซึ่งอยู่ในรูปของการ บวก ลบ คูณ หาร ซึ่งสามารถหาผลเฉลยได้ง่ายขึ้นด้วยการใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical method) มี 3 วิธี คือ วิธีผลต่างสืบเนื่อง (Finite difference) วิธีชิ้นประกอบจำกัด (Finite element) และวิธีปริมาตรจำกัด (Finite volume) สมการควบคุมจะถูกแก้โดยอาศัยวิธีการทำซ้ำ (Iteration)

3) ขั้นตอนหลังการคำนวณ (Postprocessor) เป็นขั้นตอนการแสดงผลที่ได้จากการคำนวณในรูปแบบต่างๆ เช่น เส้นแสดงรูปร่าง (Contour) หรือเวกเตอร์ (Vector) ของตัวแปรที่สนใจ เป็นต้น

<u>ข้อดีและข้อควรคำนึงของการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ</u>

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

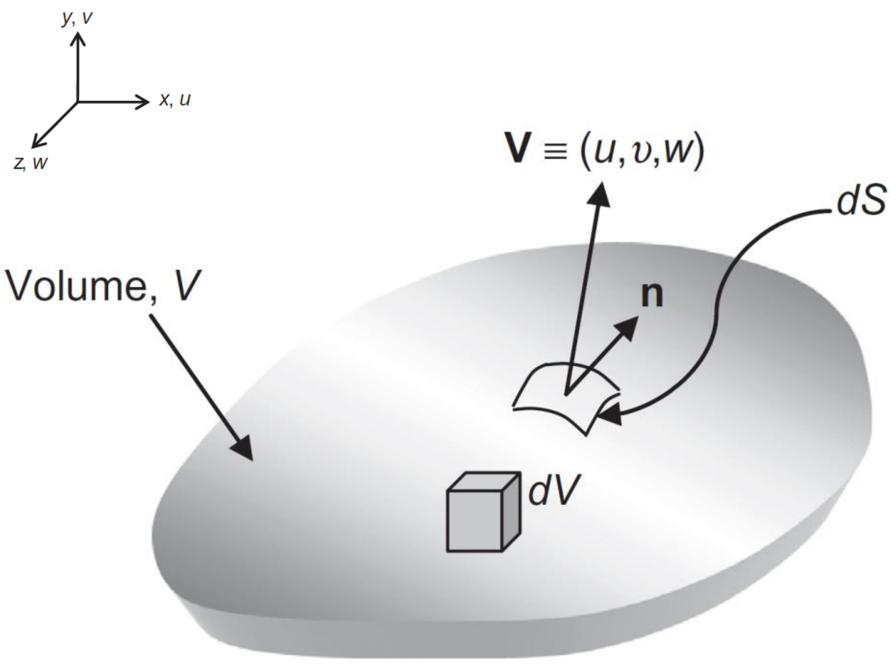
การศึกษาพฤติกรรมของของไหลด้วยวิธีการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมีข้อดีมากกว่าการใช้วิธีทดลองโดยตรง แต่การศึกษาด้วยวิธีการจำลองนี้ยังมีข้อควรคำนึงที่ต้องพิจารณาซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2-2

*ตารางที่ 2-2 ข้อดีและข้อควรคำนึงของการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ*

| **ข้อดี** | **ข้อควรคำนึง** |
|---|---|
| • รวดเร็วและประหยัดเวลา<br>• ลดต้นทุน<br>• ศึกษาได้ในระบบที่หลากหลาย<br>• ไม่มีความเสี่ยงต่ออันตราย | • ใช้ทรัพยากรคอมพิวเตอร์ค่อนข้างสูง<br>• โปรแกรมจำลองมีราคาสูงและมีลิทสิทธิ์ในการใช้งาน<br>• ขึ้นกับความสามารถของผู้ศึกษา<br>• ขึ้นกับข้อมูลนำเข้า |

2.3.2 การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณด้วยวิธีปริมาตรจำกัด

วิธีปริมาตรจำกัด (Finite volume) เป็นหนึ่งในวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้แก้สมการควบคุม ซึ่งวิธีปริมาตรจำกัดถูกใช้ในโปรแกรมสำหรับงานวิจัยนี้ สมการควบคุมจะถูกแก้โดยพิจารณาให้เป็นปริมาตรควบคุมแบบเป็นช่วง (Discrete control volumes) และอาศัยการอินทิกรัลเพื่อให้ได้ปริมาณที่มีการอนุรักษ์ ดังรูปที่ 2-10




*รูปที่ 2-10 ปริมาตรควบคุมในระบบ 3 มิติ [6]*

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

<u>สมการควบคุมของการไหล (Governing equation of fluid dynamic)</u>

สำหรับงานวิจัยนี้จะพิจารณาการไหลของของไหลอัดตัวได้ (Compressible fluid) อยู่ในสภาวะคงตัว (Steady state) และพิจารณาแบบ 3 มิติ (Three dimensions) ซึ่งสามารถแสดงสมการควบคุมของการอนุรักษ์ได้ดังนี้

1) สมการอนุรักษ์มวล (Mass conservation equation)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho w)}{\partial z} = 0$$

เมื่อ $\rho$ คือ ความหนาแน่น (kg/m$^3$)

$u, v, w$ คือ ความเร็วตามแนวแกน x, y, z (m/s)

$t$ คือ เวลา (s)

2) สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Momentum conservation equation)

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho uu)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho vu)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho wu)}{\partial z}=\frac{\partial\sigma_{xx}}{\partial x}+\frac{\partial\tau_{yx}}{\partial y}+\frac{\partial\tau_{zx}}{\partial z}+\sum F_x$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho uv)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho vv)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho wv)}{\partial z}=\frac{\partial\tau_{xy}}{\partial x}+\frac{\partial\sigma_{yy}}{\partial y}+\frac{\partial\tau_{zy}}{\partial z}+\sum F_y$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho uw)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho vw)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho ww)}{\partial z}=\frac{\partial\tau_{xz}}{\partial x}+\frac{\partial\tau_{yz}}{\partial y}+\frac{\partial\sigma_{zz}}{\partial z}+\sum F_z$$

เมื่อ $\sigma$ คือ ความเค้นตั้งฉาก (N/m$^3$)

$\tau$ คือ ความเค้นเฉือน (N/m$^3$)

$F$ คือ แรงต้านการไหล (N)

3) สมการอนุรักษ์พลังงาน (Energy conservation equation)

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho uh)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho vh)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho wh)}{\partial z}=\frac{\partial p}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}\left[\lambda\frac{\partial T}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[\lambda\frac{\partial T}{\partial y}\right]+\frac{\partial}{\partial z}\lambda\left[k\frac{\partial T}{\partial z}\right]+\Phi$$

เมื่อ $h$ คือ เอนทาลปี (kJ)

$\lambda$ คือ ค่าการนำความร้อน (W/m·K)

$\Phi$ คือ ฟังก์ชันของแหล่งพลังงาน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

การศึกษาพลศาสตร์ของไหลจำเป็นจะต้องพิจารณาลักษณะการไหลของของไหล ซึ่งหาได้จากค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number, Re) ดังสมการ

$$\mathrm{Re} = \rho LU/\mu$$

เมื่อ $\rho$ คือ ความหนาแน่นของของไหล (kg/m$^3$)

$L$ คือ ความยาว (m)

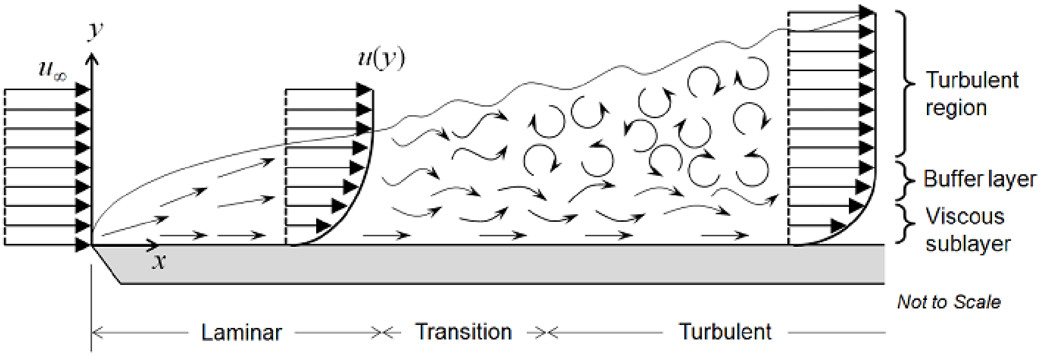
$U$ คือ ความเร็วการไหล (m/s)

$\mu$ คือ ความหนืดพลวัตของของไหล (kg/m·s)

ค่าตัวเลขเรย์โนลด์บอกถึงลักษณะการไหลของของไหลได้ดังตารางที่ 2-3 และมีลักษณะการไหลตามรูปที่ 2-11

*ตารางที่ 2-3 ค่าตัวเลขเรย์โนลด์และลักษณะการไหล*

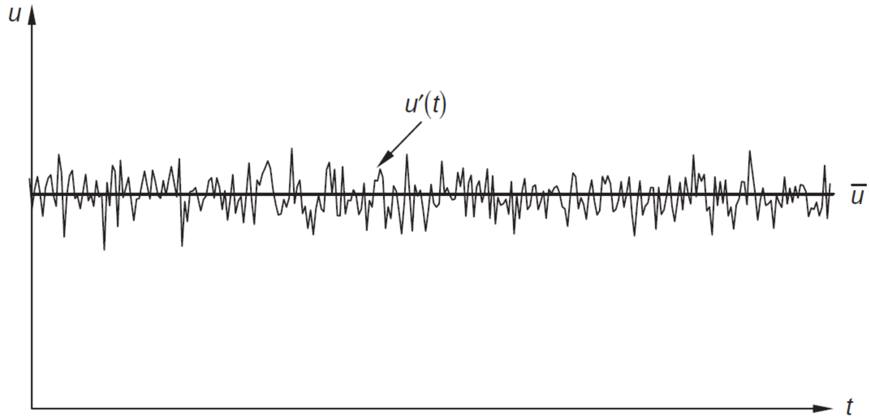
| ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ | ลักษณะการไหล |
|---|---|
| Re $\leq$ 2,000 | การไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) |
| 2,000 $<$ Re $<$ 4,000 | ช่วงการเปลี่ยนแปลงการไหล (Transition) จากการไหลราบเรียบเป็นการไหลแบบปั่นป่วน |
| 4,000 $<$ Re | การไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) |




*รูปที่ 2-11 ลักษณะการไหลของของไหล [7]*

เมื่อพิจารณาลักษณะการไหลของของไหลแล้วพบว่าเป็นการไหลแบบปั่นป่วน จึงจำเป็นต้องพิจารณาความปั่นป่วนในการจำลองพลศาสตร์ของไหล

โดยปกติแล้วค่าของตัวแปรในการไหลแบบปั่นป่วนจะมีค่าไม่คงที่ และเปลี่ยนแปลงตามเวลา ดังเช่นตัวอย่างของความเร็ว $u$ ที่แสดงในรูปที่ 2-12 ซึ่งลักษณะเช่นนี้ทำให้การคำนวณค่าตัวแปรมีความยุ่งยากเพิ่มมากขึ้น เพราะฉะนั้นจึงต้องใช้หลักการ Reynolds decomposition คือ แบ่งออกเป็นส่วนค่าเฉลี่ยที่ไม่ขึ้นกับเวลา $\bar{u}$ กับส่วนที่แทนผลของความผันผวนที่ขึ้นกับเวลา $u'(t)$ ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการ คือ $u(t) = \bar{u} + u'(t)$




*รูปที่ 2-12 ความเร็วผันผวนตามเวลา ณ จุดหนึ่งของการไหลแบบปั่นป่วน [6]*

เมื่อทำการ Reynolds decomposition ทุกตัวแปรในสมการควบคุมของการไหล จะได้สมการ ดังนี้

สมการ 1 : $$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho v)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho w)}{\partial z}=0$$

สมการ 2 : $$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho uu)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho vu)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho wu)}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial x}\left[(\mu+\mu_T)\frac{\partial u}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[(\mu+\mu_T)\frac{\partial u}{\partial y}\right]+\frac{\partial}{\partial z}\left[(\mu+\mu_T)\frac{\partial u}{\partial z}\right]+\left(S_u=-\frac{\partial p}{\partial x}+S'_u\right)$$

สมการ 3 : $$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho uv)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho vv)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho wv)}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial x}\left[(\mu+\mu_T)\frac{\partial v}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[(\mu+\mu_T)\frac{\partial v}{\partial y}\right]+\frac{\partial}{\partial z}\left[(\mu+\mu_T)\frac{\partial v}{\partial z}\right]+\left(S_v=-\frac{\partial p}{\partial y}+S'_v\right)$$

สมการ 4 : $$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho uw)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho vw)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho ww)}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial x}\left[(\mu+\mu_T)\frac{\partial w}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[(\mu+\mu_T)\frac{\partial w}{\partial y}\right]+\frac{\partial}{\partial z}\left[(\mu+\mu_T)\frac{\partial w}{\partial z}\right]+\left(S_w=-\frac{\partial p}{\partial z}+S'_w\right)$$

สมการ 5 : $$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho uh)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho vh)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho wh)}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial x}\left[\lambda\frac{\partial T}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[\lambda\frac{\partial T}{\partial y}\right]+\frac{\partial}{\partial z}\left[\lambda\frac{\partial T}{\partial z}\right]+\frac{\partial}{\partial x}\left[\frac{\mu_T}{\Pr_T}\frac{\partial h}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[\frac{\mu_T}{\Pr_T}\frac{\partial h}{\partial y}\right]+\frac{\partial}{\partial z}\left[\frac{\mu_T}{\Pr_T}\frac{\partial h}{\partial z}\right]+\frac{\partial p}{\partial t}+\Phi+S_T$$

สมการ 2 - 5 เรียกว่าสมการ Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) ซึ่งต่างกับสมการควบคุมก่อนหน้านี้ โดยมีการเพิ่มเทอม Reynolds stress expression ในสมการ 2 - 4 และเทอม Extra temperature transport ในสมการ 5 ซึ่งเทอมที่เพิ่มขึ้นมานี้มีผลทำให้ไม่สามารถแก้สมการได้ เนื่องมาจากจำนวนตัวแปรที่มากกว่าสมการ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulence model) เข้ามาช่วยเพื่อทำให้ปัญหาที่เกิดขึ้นเป็นปัญหาแบบปิด (Close problem) ทำให้สามารถหาผลเฉลยได้

แบบจำลองความปั่นป่วนที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ คือ แบบจำลองความปั่นป่วนของ k- ε (k-epsilon) เป็นแบบจำลองที่สร้างขึ้นโดยใช้สมมุติฐานของบูสซิเนส (Boussinesq hypothesis) ซึ่งสมการ RANS จะถูกแก้ด้วยพลังงานจลน์ปั่นป่วน (Turbulent kinetic energy ; k) และอัตราการกระจายตัวของพลังงานจลน์ (Rate of dissipation of turbulent energy ; ε) ได้เป็นสมการความปั่นป่วนดังนี้

เทอม k ;
$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho uk)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho vk)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho wk)}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial x}\left[\frac{\mu_T}{\sigma_k}\frac{\partial k}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[\frac{\mu_T}{\sigma_k}\frac{\partial k}{\partial y}\right]+\frac{\partial}{\partial z}\left[\frac{\mu_T}{\sigma_k}\frac{\partial k}{\partial z}\right]+\left(S_k=\rho(P-D)\right)$$

เทอม ε ;
$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u\varepsilon)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho v\varepsilon)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho w\varepsilon)}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial x}\left[\frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon}\frac{\partial \varepsilon}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[\frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon}\frac{\partial \varepsilon}{\partial y}\right]+\frac{\partial}{\partial z}\left[\frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon}\frac{\partial \varepsilon}{\partial z}\right]+\left(S_\varepsilon=\rho\frac{\varepsilon}{k}(C_{\varepsilon 1}P-C_{\varepsilon 2}D)\right)$$

เมื่อ

$$P=2\mu_T\left[\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2+\left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)^2\right]+\mu_T\left[\left(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial v}{\partial z}+\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2+\left(\frac{\partial w}{\partial x}+\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2\right]$$
$$-\tfrac{2}{3}\mu_T\left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}\right)^2-\frac{2}{3}\rho\mu_T k\left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}\right)$$

$$D=\varepsilon$$

CHULALONGKORN UNIVERSITY

<u>รูปแบบทั่วไปของสมการควบคุมสำหรับการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ</u>

สำหรับการใช้วิธีปริมาตรจำกัดในการแก้ไขปัญหาการไหลแบบปั่นป่วนสามารถจัดรูปสมการควบคุมให้อยู่ในรูปของสมการตัวแปร $\phi$ ตามสมการด้านล่าง ได้ดังตารางที่ 2-4

$$\underbrace{\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t}}_{(1)}+\underbrace{\frac{\partial(\rho u\phi)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho v\phi)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho w\phi)}{\partial z}}_{(2)}=\underbrace{\frac{\partial}{\partial x}\left[\Gamma\frac{\partial\phi}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[\Gamma\frac{\partial\phi}{\partial y}\right]+\frac{\partial}{\partial z}\left[\Gamma\frac{\partial\phi}{\partial z}\right]}_{(3)}+\underbrace{S_\phi}_{(4)}$$

เมื่อ พจน์ (1) คือ การเพิ่มขององค์ประกอบของไหล (Accumulation term)

พจน์ (2) คือ การพา (Convection term)

พจน์ (3) คือ การแพร่กระจาย (Diffusion term)

พจน์ (4) คือ Source term

*ตารางที่ 2-4 สมการของการไหลแบบปั่นป่วนในรูปของตัวแปร $\phi$*

| $\boldsymbol{\Phi}$ | $\boldsymbol{\Gamma_{\Phi}}$ | $\boldsymbol{S_{\Phi}}$ |
|---|---|---|
| 1 | 0 | 0 |
| $u$ | $\mu+\mu_T$ | $-\frac{\partial p}{\partial x}+S'_u$ |
| $v$ | $\mu+\mu_T$ | $-\frac{\partial p}{\partial y}+S'_v$ |
| $w$ | $\mu+\mu_T$ | $-\frac{\partial p}{\partial z}+S'_w$ |
| $h$ | $\frac{\mu_T}{Pr_T}$ | $\frac{\partial}{\partial x}\left[\lambda\frac{\partial T}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[\lambda\frac{\partial T}{\partial y}\right]+\frac{\partial}{\partial z}\left[\lambda\frac{\partial T}{\partial z}\right]+\frac{\partial p}{\partial t}+\Phi+S_T$ |
| $k$ | $\frac{\mu_T}{\sigma_k}$ | $P-D$ |
| $\varepsilon$ | $\frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon}$ | $\frac{\varepsilon}{k}(C_{\varepsilon 1}P-C_{\varepsilon 2}D)$ |

เมื่อ $C_\mu=0.09,\ \sigma_k=1.0,\ \sigma_e=1.3,\ C_{\varepsilon 1}=1.44,\ C_{\varepsilon 2}=1.92$

## 2.4 ฝาแฝดดิจิทัล

ฝาแฝดดิจิทัล (Digital twin) คือ แบบจำลองเสมือนของวัตถุทางกายภาพที่ถูกสร้างขึ้นจากการบูรณาการเทคโนโลยีหลายอย่างเพื่อสร้างแบบจำลองที่สามารถแสดงรายละเอียดคุณสมบัติเกือบเทียบเท่าวัตถุจริง สามารถแสดงคุณลักษณะในอดีตและทำนายสิ่งที่อาจเกิดขึ้นในอนาคต การสร้างฝาแฝดดิจิทัลที่มีประสิทธิภาพจะต้องมีคุณสมบัติคล้ายคลึงกับวัตถุทางกายภาพมากที่สุดเพื่อให้ได้มาซึ่งผลลัพธ์ที่แม่นยำ และสามารถตอบสนองการใช้งานและจุดประสงค์ของผู้ใช้ได้ [8]

การสร้างฝาแฝดดิจิทัลเป็นวิธีการที่น่าสนใจในกระบวนการทางวิศวกรรมที่มีกลไกของไหลซับซ้อนและมีข้อจำกัดด้านการออกแบบ เทคนิคที่น่าสนใจคือการสร้างแบบจำลองโดยใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ โดยงานวิจัยของ Molinaro และคณะ [9] ได้นำพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมาสร้างแบบจำลองฝาแฝดดิจิทัลซึ่งทำให้ได้ผลการวิเคราะห์ข้อมูลอย่างมีประสิทธิภาพ เป็นข้อมูลยืนยันได้ว่าเทคนิคการใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสามารถสร้างแบบจำลองฝาแฝดดิจิทัลได้

**2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง**

ปัจจุบันมีงานวิจัยที่ใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมาศึกษาพฤติกรรมของหม้อไอน้ำถ่านหิน เช่น Xu และคณะ [10] พัฒนาแบบจำลอง CFD การเผาไหม้ของหม้อไอน้ำยิ่งยวดฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียน (Supercritical CFB boiler) ด้วยการวิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ โดยแบบจำลองประกอบด้วยอุทกพลศาสตร์ของของแข็งและก๊าซ การเผาไหม้ถ่านหิน การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนในเตาเผา และการถ่ายเทความร้อนระหว่างเตาเผากับน้ำในท่อถ่ายเทความร้อน แบบจำลองนี้สามารถทำนายการกระจายของความเข้มข้นของของแข็ง ออกซิเจน ฟลักซ์ความร้อน และอุณหภูมิของน้ำ ส่วนงานวิจัยของ Chang และคณะ [11] ได้พัฒนาแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเพื่อแก้ปัญหาความไม่เสถียรของการเผาไหม้ถ่านหินและการปล่อยก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน ($NO_x$) ของหม้อไอน้ำพัลเวอร์ไรซ์ (Pulverized boiler) ในภาวะกำลังการผลิตต่ำ โดยแบบจำลองจะทำนายอุณหภูมิ องค์ประกอบของก๊าซ และการปล่อย $NO_x$ ทำให้พบว่ามุมในการวางหัวเผาไหม้มีผลต่อการเผาไหม้ ฟลักซ์ความร้อน ปริมาณคาร์บอนมอนออกไซด์ (CO) และการปล่อย $NO_x$

ด้านงานวิจัยที่ศึกษาการใช้ชีวมวลในหม้อไอน้ำด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ เช่น Centeno-González และคณะ [12] ศึกษาการใช้ชานอ้อยเป็นเชื้อเพลิงหม้อไอน้ำอุตสาหกรรม พัฒนาแบบจำลองการเผาไหม้ด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ และกำหนดปฏิกิริยาการปลดปล่อยสารระเหย (Devolatilization) ในการจำลอง พบว่าปฏิกิริยาการปลดปล่อยสารระเหยเป็นปฏิกิริยาหลักที่เกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้หม้อไอน้ำชีวมวล ด้วยเหตุนี้จึงเป็นปัจจัยสำคัญในการทำนายสนามความร้อนของเตาเผาหม้อไอน้ำ โดยแบบจำลองการเผาไหม้สามารถนำไปใช้ออกแบบและเปรียบเทียบภาวะในการปฏิบัติงานที่แตกต่างกันได้ ส่วน Shanmukharadhya [13] ศึกษาการไหลและพฤติกรรมทางความร้อนของเชื้อเพลิงชานอ้อยในเตาเผาชนิดมีแผงตะกรับของหม้อไอน้ำ โดยใช้แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณซึ่งประกอบไปด้วยแบบจำลองมาตรฐาน k-epsilon สำหรับการไหลแบบปั่นป่วน และแบบจำลองพีหนึ่ง (P-1 model) สำหรับการถ่ายเทความร้อนแบบแผ่รังสีและปฏิกิริยาการเผาไหม้ แบบจำลองในงานวิจัยสามารถทำนายการกระจายอุณหภูมิและการไหลของของไหลแบบปั่นป่วนได้ดี และยังสามารถตรวจสอบพฤติกรรมทางความร้อนของเชื้อเพลิงที่มีผลต่อการเผาไหม้ ส่วน Manic และคณะ [14] พัฒนาแบบจำลองความปั่นป่วนเพื่อศึกษาอุทกพลศาสตร์และการถ่ายเทความร้อนในหม้อไอน้ำขนาดเล็ก แบบจำลองนี้แสดงรูปร่างของความเร็วและความรุนแรงของการไหลแบบปั่นป่วน ซึ่งสามารถทำนายอุทกพลศาสตร์และการถ่ายเทความร้อน

ดังที่กล่าวไปข้างต้น การนำชีวมวลมาเผาร่วมกับถ่านหินในหม้อไอน้ำเป็นเรื่องที่น่าสนใจ จึงได้มีงานวิจัยนำพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมาศึกษากระบวนการดังกล่าว เช่น Perez-Jeldre และคณะ [15] พัฒนาแบบจำลอง CFD เพื่อทำนายประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำพัลเวอร์ไรซ์ถ่านหินร่วมกับขี้เลื่อยสน โดยศึกษาการเผาไหม้ ความร้อนและอุทกพลศาสตร์ ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าเชื้อเพลิงชีวมวลจะลดการปล่อย $SO_2$ และ CO ส่วนการปล่อย $CO_2$ จะสูงขึ้นและความร้อนที่ถ่ายเทไปยังท่อน้ำลดลงเล็กน้อย โดยการแทนที่ถ่านหินด้วยชีวมวลในปริมาณน้อยจะสามารถปรับปรุงกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงและประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำได้อย่างมีนัยสำคัญ งานวิจัยของ Li และคณะ [16] ได้ศึกษาการใช้ชีวมวลทอร์รีไฟด์ (Torrefied biomass) ที่มีความหนาแน่นของพลังงานสูงเผาไหม้ร่วมกับถ่านหินในหม้อไอน้ำพัลเวอร์ไรซ์ โดยสร้างแบบจำลอง CFD เพื่อหาประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำเมื่อมีการเผาร่วม แบบจำลองได้ศึกษาปฏิกิริยาการปลดปล่อยสารระเหยและปฏิกิริยาออกซิเดชันของถ่าน (Char oxidation) ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าชีวมวลทอร์รีไฟด์ไม่ลดประสิทธิภาพและความผันผวนของ หม้อไอน้ำ ในทางตรงกันข้ามมีการปล่อย $CO_2$ และ $NO_x$ ลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อมีการใช้ชีวมวลทดแทนถ่านหินเพิ่มขึ้น การศึกษาของ Karampinis และคณะ [17] นำเสนอแบบจำลองสามมิติสำหรับการเผาไหม้ถ่านลิกไนต์และชีวมวลร่วมในหม้อไอน้ำขนาดขนาด 300 เมกกะวัตต์ แบบจำลองคำนึงถึงรูปแบบที่ไม่ใช่ทรงกลมของอนุภาคชีวมวล ซึ่งมีอิทธิพลต่อสัมประสิทธิ์ของแรงต้านอากาศและกลไกการเผาไหม้ แบบจำลองได้แสดงถึงขนาดอนุภาคและอัตราส่วนของชีวมวลที่เหมาะสมสำหรับการทำงานของหม้อไอน้ำที่มีประสิทธิภาพ

Gungor [18] พัฒนาแบบจำลอง 2 มิติสำหรับหม้อไอน้ำ CFB ซึ่งจะทำนายลักษณะอุทกพลศาสตร์ การถ่ายเทความร้อน และการเผาไหม้พร้อมกัน โดยแบบจำลองจำลองจะคำนวณความเร็ว การกระจายขนาดอนุภาค ความดันลด การปล่อยแก๊ส และอุณหภูมิในแต่ละช่วงเวลาสำหรับวัฏภาคแก๊สและของแข็ง ผลของแบบจำลองพบว่าการเผาไหม้ที่ปล่อยอากาศเป็นระยะๆ จะสามารถปรับปรุงการเผาไหม้และการลดลงของ $NO_x$ แต่จะทำให้ CO สูงเนื่องจากอัตราส่วนของอากาศลดลง ส่วน Xie และคณะ [19] ได้ทำการศึกษาปฏิกิริยาเคมีในหม้อไอน้ำด้วยการพัฒนาแบบจำลองการเผาไหม้ของขยะมูลฝอยชุมชนและถ่านหินในหม้อไอน้ำฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียนในระดับอุตสาหกรรม แบบจำลองนี้ผ่านการตรวจสอบโดยพิจารณาจากความแตกต่างของอุณหภูมิสูงสุดที่ประมาณ 50 °C และยอมรับองค์ประกอบของแก๊สที่เกิดขึ้นในเตาเผาได้ ทางด้าน Liu และคณะ [20] พัฒนาแบบจำลองการเผาไหม้ของฟางและถ่านหินบิทูมินัสในฟลูอิไดซ์เบดที่ใช้เชื้อเพลิงเป็นออกซิเจน แบบจำลอง CFD ได้รับการตรวจสอบด้วยกระบวนการไดนามิกของการเกิด $CO_2$ ผลปรากฏว่าแบบจำลองการเผาไหม้มีความถูกต้อง โดยเส้นกราฟจุดสูงสุดของความเข้มข้นของ $CO_2$ มีความคล้ายคลึงกัน

จากการรวบรวมงานวิจัยข้างต้น พบว่าการศึกษาพฤติกรรมของหม้อไอน้ำจะแตกต่างกันไปตามประเภทของหม้อไอน้ำและชนิดของเชื้อเพลิง เนื่องจากคุณสมบัติของชีวมวลที่แตกต่างกัน การเลือกใช้ชีวมวลแต่ละประเภทจะส่งผลต่อลักษณะอุทกพลศาสตร์ การถ่ายเทความร้อน และการเผาไหม้ โดยผลการทำนายของแบบจำลอง CFD ของหม้อไอน้ำแบบ Co-firing สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2-5

*ตารางที่ 2-5 สรุปผลการทำนายของแบบจำลอง CFD ของหม้อไอน้ำแบบ Co-firing*

| **ประเภทหม้อไอน้ำ** | **เชื้อเพลิง** | **ผลการทำนายจากแบบจำลอง** | | | | | | **ที่มา** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | **อุณหภูมิ (°C)** | **O2 (%)** | **CO2 (%)** | **CO (ppm)** | **$SO_2$ (ppm)** | **NO (ppm)** | |
| PF | Sawdust and coal | 1187 | 9.7 | 9.5 | 0 | 212 | - | [15] |
| PF | Torrefied biomass and coal | 1027 | 6 | - | 80 | - | 224 | [16] |
| PF | Cardoon and coal | 1020 | 4.62 | 18.18 | - | 50 | 285 | [17] |
| CFB | Wood chips and coal | 850 | 7 | - | 50 | - | 300 | [18] |
| CFB | Municipal solid waste and coal | 900 | 6 | 13 | 70 | 900 | 120 | [19] |

หมายเหตุ PF คือ Pulverized fuel boilers
CFB คือ Circulating fluidized bed boilers

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

# บทที่ 3
# อุปกรณ์และวิธีดำเนินงานวิจัย

## 3.1 อุปกรณ์

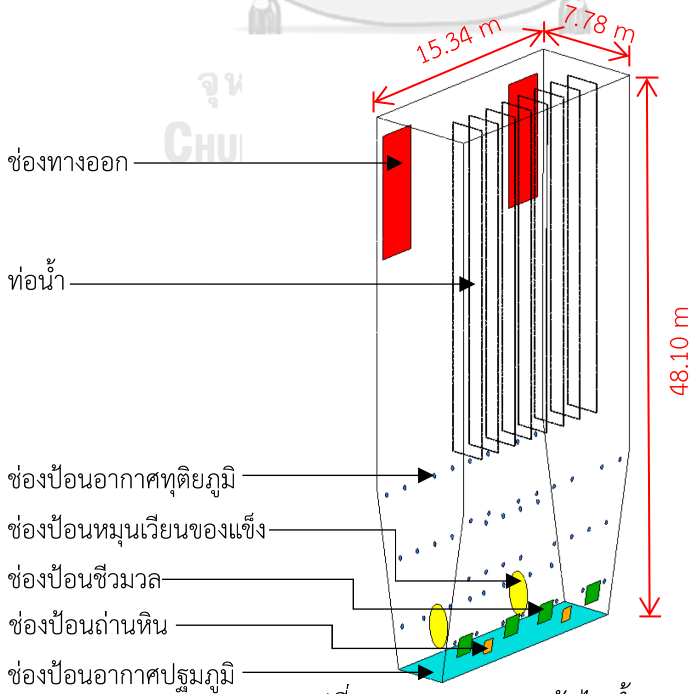
### 3.1.1 หม้อไอน้ำ

หม้อไอน้ำที่ศึกษาในงานวิจัยนี้มีข้อมูลพื้นฐานดังแสดงในตารางที่ 3-1

*ตารางที่ 3-1 ข้อมูลพื้นฐานของหม้อไอน้ำ*

| หัวข้อ | รายละเอียด |
|---|---|
| ประเภทหม้อไอน้ำ | ฟลูอิไดซ์เบดหมุนเวียน (Circulating fluidized bed ; CFB) |
| กำลังผลิต | 1 เมกะวัตต์ (MW) |
| เชื้อเพลิง | เชื้อเพลิงเผาร่วม (Co-firing) ถ่านหินและชีวมวล |

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่เตาเผาของหม้อไอน้ำ ซึ่งมีขนาดพื้นที่หน้าตัด 15.34 × 7.78 m และสูง 48.10 m เตาเผาประกอบด้วยช่องป้อนถ่านหิน 2 ช่อง ช่องป้อนชีวมวล 4 ช่อง และช่องป้อนอากาศ 2 ส่วน คือ ช่องป้อนอากาศปฐมภูมิ (Primary air) บริเวณด้านล่างเตาเผา และช่องป้อนอากาศทุติยภูมิ (Secondary air) อยู่เหนือช่องป้อนเชื้อเพลิงจำนวน 48 ช่อง เตาเผามีช่องทางออก (Outlet) 2 ช่อง และช่องป้อนหมุนเวียนของแข็ง (Recirculation) 2 ช่องอยู่ตรงข้ามช่องป้อนเชื้อเพลิง และมีท่อน้ำ (Water tube) 6 แผง ภายในเตาเผา ดังแสดงในรูป 3-1




*รูปที่ 3-1 เตาเผาของหม้อไอน้ำ*

3.1.2 เชื้อเพลิง

เชื้อเพลิงที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ได้แก่ ถ่านหินและชีวมวล โดยถ่านหินเป็นประเภทซับบิทูมินัส และชีวมวลที่น่าสนใจคือไม้สับและเปลือกไม้ซึ่งมีค่าความร้อนสูงและหาได้ง่ายในประเทศไทย เมื่อเปรียบเทียบค่าความร้อนของเชื้อเพลิง พบว่าถ่านหินมีค่าความร้อนสูงสุด รองลงมาคือ ไม้สับและเปลือกไม้ ตามลำดับ นอกจากนี้ถ่านหินมีคาร์บอนคงตัวมากที่สุด (เช่นเดียวกับปริมาณคาร์บอน) ในขณะที่ไม้สับมีสารระเหยสูงที่สุด (เช่นเดียวกับปริมาณไฮโดรเจนและออกซิเจน) ผลของการวิเคราะห์เชื้อเพลิงประกอบด้วยการวิเคราะห์โดยประมาณ (Proximate analysis) การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ค่าความร้อน (Calorific value) และขนาดตัวอย่าง (Sample size) แสดงดังตารางที่ 3-2

*ตารางที่ 3-2 ผลของการวิเคราะห์เชื้อเพลิง*

| **การวิเคราะห์เชื้อเพลิง** | | **ถ่านหิน** | **ไม้สับ** | **เปลือกไม้** |
|---|---|---|---|---|
| การวิเคราะห์โดยประมาณ (%w/w) | ความชื้น (Moisture) | 36.07 | 36.67 | 62.43 |
| | เถ้า (Ash) | 4.78 | 1.90 | 3.67 |
| | สารระเหย (Volatile matter) | 30.98 | 49.05 | 26.71 |
| | คาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) | 28.17 | 12.38 | 7.19 |
| การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (%w/w) | คาร์บอน (C) | 41.81 | 30.87 | 17.42 |
| | ไฮโดรเจน (H) | 2.95 | 3.66 | 1.80 |
| | ออกซิเจน (O) | 13.30 | 26.52 | 14.41 |
| | ไนโตรเจน (N) | 0.87 | 0.29 | 0.13 |
| | ซัลเฟอร์ (S) | 0.373 | 0.028 | 0.030 |
| | คลอรีน (Cl) | 0.00 | 0.07 | 0.14 |
| ค่าความร้อน (kcal/kg) | | 6,232.71 | 4,584.85 | 4,490.28 |
| ขนาดตัวอย่าง (mm) | | 2.75 | 10 | 10 |

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.1.3 โปรแกรมสำเร็จรูป

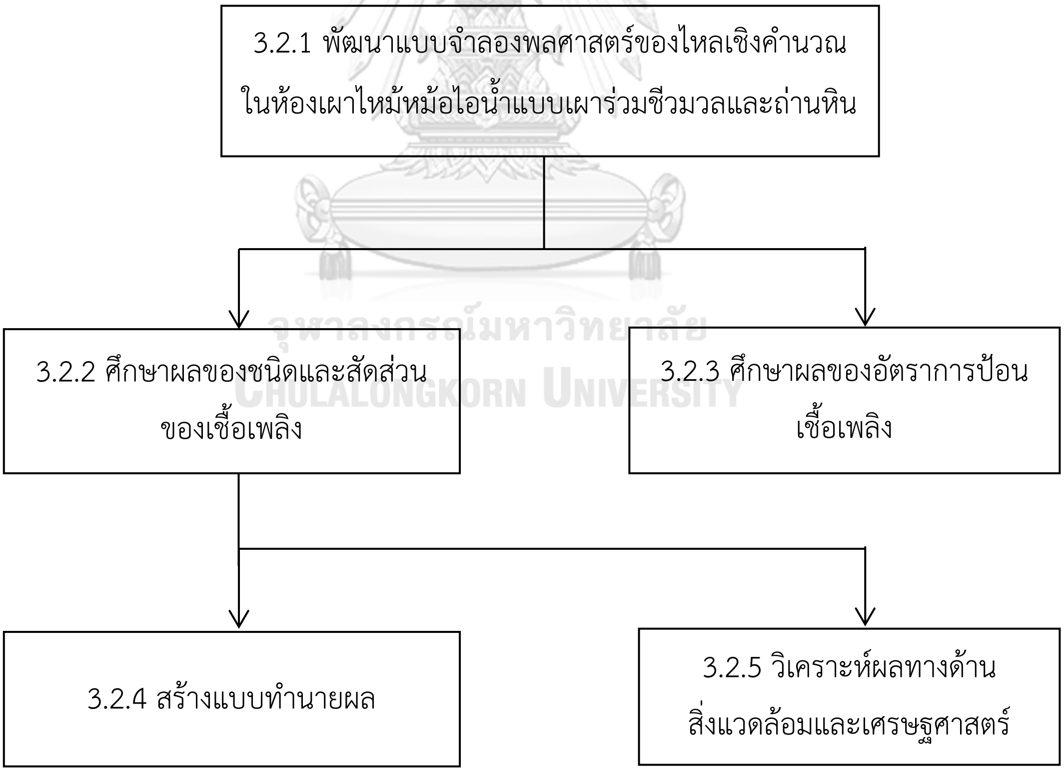
งานวิจัยนี้ได้เลือกโปรแกรมสำเร็จรูปมาใช้ในการออกแบบและพัฒนาแบบจำลอง ดังแสดงในตารางที่ 3-3

*ตารางที่ 3-3 โปรแกรมสำเร็จรูปในงานวิจัย*

| โปรแกรมสำเร็จรูป | รุ่น | บริษัทผู้ผลิต | การใช้ในงานวิจัย |
|---|---|---|---|
| Ansys DesignModeler | 2023 R1 | Ansys | สร้างขอบเขตทางกายภาพ |
| Ansys Fluent | 2023 R1 | Ansys | สร้างแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ |
| Design-Expert | 13 | Stat-Ease | ออกแบบการทดลอง และสร้างแบบทำนายผล |

## 3.2 วิธีดำเนินงานวิจัย

**แผนผังการดำเนินงานวิจัย**




จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.2.1 การพัฒนาแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

3.2.1.1 ขั้นตอนก่อนพัฒนาแบบจำลอง

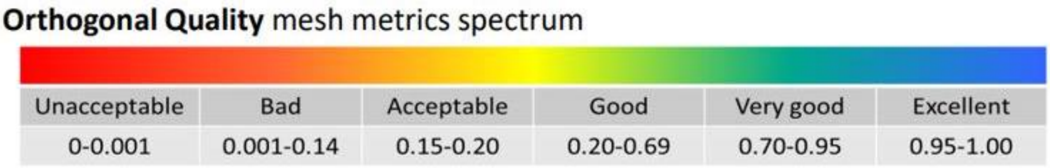
1) หม้อไอน้ำ

สร้างขอบเขตทางกายภาพของของไหลในเตาเผาของหม้อไอน้ำที่ศึกษาในรูปสามมิติด้วยโปรแกรม Ansys DesignModeler แล้วสร้างโครงข่ายการคำนวณ (Mesh) เพื่อแบ่งปริมาตรของของไหล หลังจากนั้นทำการตรวจสอบคุณภาพของ Mesh โดยพิจารณาค่า Aspect Ratio และ Orthogonal Quality [21] ซึ่ง Aspect Ratio คือการบอกความสมส่วนของรูปทรงของ Mesh ซึ่งนิยามอย่างง่ายคืออัตราส่วนระหว่างความยาวมากที่สุดต่อความยาวน้อยที่สุด ส่วน Orthogonal Quality คือ คุณภาพของมุมเวกเตอร์ที่เชื่อมระหว่างเซลล์ที่อยู่ติดกัน โดยมีเกณฑ์ในการพิจารณาดังตารางที่ 3-4 และรูปที่ 3-2

*ตารางที่ 3-4 ค่า Orthogonal Quality และ Aspect Ratio*

| **คุณภาพของ Mesh** | **ค่ากำหนด** | **ค่าที่แนะนำ** |
|---|---|---|
| Aspect Ratio | ไม่เกิน 20 | 10 |
| Orthogonal Quality | มากกว่า 0.01 | มากกว่า 0.20 |

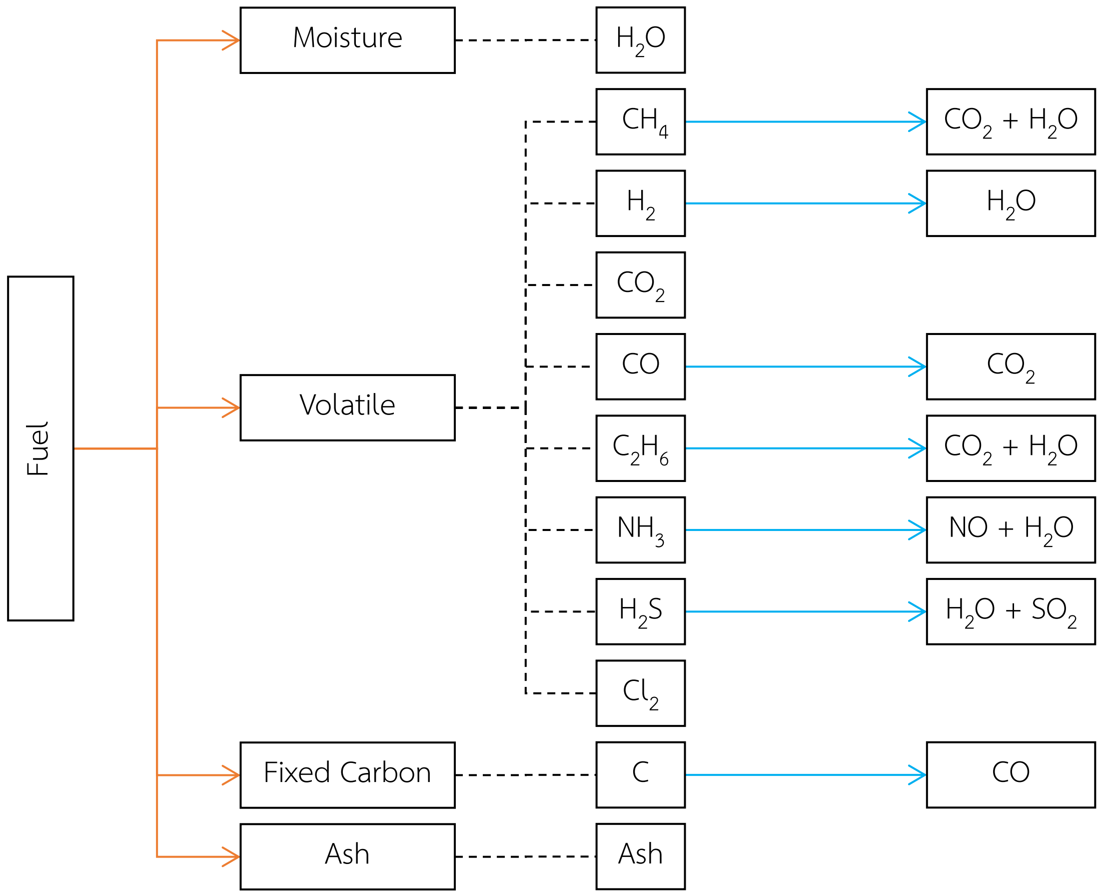
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY




*รูปที่ 3-2 ค่า Orthogonal quality [22]*

2) เชื้อเพลิง

คำนวณองค์ประกอบของเชื้อเพลิงเทียบเท่าเพื่อนำไปป้อนในแบบจำลอง โดยจะกำหนดกลไกการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง แสดงดังรูปที่ 3-3 และสามารถเขียนเป็นปฏิกิริยาเคมีได้ทั้งหมด 12 ปฏิกิริยา ดังตารางที่ 3-5




คำอธิบายสัญลักษณ์ → การสลายตัวด้วยความร้อน (Thermal decomposition)

- - - - การแยกองค์ประกอบในแบบจำลอง

→ ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

*รูปที่ 3-3 กลไกการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งในแบบจำลอง*

หมายเหตุ $H_2O$ คือไอน้ำ, $CH_4$ คือมีเทน, $H_2$ คือไฮโดรเจน, $CO_2$ คือคาร์บอนไดออกไซด์, CO คือคาร์บอนมอนออกไซด์, $C_2H_6$ คืออีเทน, $H_2S$ คือไฮโดรเจนซัลไฟด์, $Cl_2$ คือคลอรีน, $NH_3$ คือแอมโมเนีย, Ash คือปริมาณเถ้า, C คือถ่านคงตัว, NO คือไนตริกออกไซด์ และ $SO_2$ คือซัลเฟอร์ไดออกไซด์

*ตารางที่ 3-5 ปฏิกิริยาเคมีของการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง*

| ที่ | ปฏิกิริยาเคมี | อัตราการเกิดปฏิกิริยา ($kmol/m^3s$) | ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา ($s^{-1}$) |
|---|---|---|---|
| 1 | Coal $\rightarrow H_2O + CH_4 + H_2 + CO_2 + CO + C_2H_6 + NH_3 + H_2S + C_{coal}$ + Ash | $k_1$[Coal] | $k_1=8.3x10^3$ |
| 2 | Woodchips $\rightarrow H_2O + CH_4 + H_2 + CO_2 + CO + C_2H_6 + NH_3 + H_2S + Cl_2 + C_{Woodchips}$ + Ash | $k_2$[Woodchips] | $k_2=1.9x10^3$ |
| 3 | Bark $\rightarrow H_2O + CH_4 + H_2 + CO_2 + CO + C_2H_6 + NH_3 + H_2S + Cl_2 + C_{Bark}$ + Ash | $k_3$[Bark] | $k_3=1.9x10^3$ |
| 4 | $CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$ | $k_4[CH_4][O_2]$ | $k_4=4.3x10^{10}$ |
| 5 | $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$ | $k_5[H_4]^{1.5}[O_2]$ | $k_5=5.1x10^{15}$ |
| 6 | $2CO + O_2 \rightarrow 2CO_2$ | $k_6[CO][O_2]^{0.5}$ | $k_6=1.0x10^4$ |
| 7 | $C_2H_6 + 3.5O_2 \rightarrow 2CO_2 + 3H_2O$ | $k_7[C_2H_6][O_2]$ | $k_7=3.8x10^{10}$ |
| 8 | $4NH_3 + 5O_2 \rightarrow 4NO + 6H_2O$ | $k_8[NH_3][O_2]$ | $k_8=5.0x10^7$ |
| 9 | $2H_2S + 3O_2 \rightarrow 2H_2O + 2SO_2$ | $k_9[H_2S][O_2]$ | $k_9=3.6x10^7$ |
| 10 | $C_{coal} + 0.5O_2 \rightarrow CO$ | $k_{10}[O_2]$ | $k_{10}=1.7x10^7$ |
| 11 | $C_{Woodchips} + 0.5O_2 \rightarrow CO$ | $k_{11}[O_2]$ | $k_{11}=7.5x10^6$ |
| 12 | $C_{Bark} + 0.5O_2 \rightarrow CO$ | $k_{12}[O_2]$ | $k_{12}=9x10^5$ |

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

หมายเหตุ 1) โมเลกุลในสมการเคมีสามารถอธิบายได้ ดังนี้ Coal คือถ่านหิน, Woodchips คือไม้สับ, Bark คือเปลือกไม้, Ash คือปริมาณเถ้า และ C คือถ่านคงตัว

2) การคำนวณหาเลขดุลสมการของปฏิกิริยาเคมีระบุไว้ในภาคผนวก ก

3) ปฏิกิริยาเคมีที่ 1-3 และ 8-12 อ้างอิงจาก Xie และคณะ [19] ส่วนปฏิกิริยาเคมีที่ 4-7 อ้างอิงจาก Kang และคณะ [23]

3.2.1.2 การพัฒนาแบบจำลอง

1) พัฒนาแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณในห้องเผาไหม้ของหม้อไอน้ำด้วยโปรแกรม Ansys Fluent ซึ่งจะตั้งค่าตามตารางที่ 3-6 ได้แก่ การตั้งค่าแบบจำลอง (Model) วัสดุ (Material) และสภาวะขอบ (Boundary Condition) ซึ่งขั้นตอนใช้งานโปรแกรม Ansys Fluent ระบุไว้ในภาคผนวก ข

*ตารางที่ 3-6 การตั้งค่าแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ*

| รายการ | ตัวแปร | การตั้งค่า |
|---|---|---|
| Models | Multiphase | Model: Eulerian<br>Phases*: Gas, Solid, Sand<br>Forces: Gas-Solid, Gas-Sand > Drag Coefficients > EMMS (Energy Minimization Multi-Scale)<br>Phase Interaction: Combustion model (กำหนดปฏิกิริยาเคมีของการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง ตามตารางที่ 3-5) |
| | Energy | On |
| | Viscous | Model: Realizable k-epsilon<br>Near-wall Treatment: Standard Wall Functions<br>Turbulence: Dispersed |
| | Species | Species Transport |
| Materials | Fluid | $H_2O$ , $CH_4$ , $H_2$ , $N_2$ , $CO_2$ , CO , $C_2H_6$ , $NH_3$ , $H_2S$ , $Cl_2$ , NO และ $SO_2$ |
| | Solid | Coal, Woodchips, Bark, $C_{Coal}$ , $C_{Woodchips}$ , $C_{Bark}$ , Ash |
| Boundary Conditions | Inlet | Primary Air Inlet , Secondary Air Inlets<br>Biomass Inlets, Coal Inlets, Recirculation Inlet |
| | Outlet | Pressure Outlet |
| | Wall | Boiler walls: Shear Condition > No Slip<br>Water tube walls: Shear Condition > No Slip |

จากตารางที่ 3-6 วัฏภาค (Phases) มีรายละเอียดดังนี้

1. Gas ประกอบด้วยอากาศและแก๊สที่เกิดจากเชื้อเพลิงแข็ง ได้แก่ $H_2O$ , $CH_4$ , $H_2$ , $N_2$ , $CO_2$ , CO , $C_2H_6$ , $NH_3$ , $H_2S$ , $Cl_2$ , NO และ $SO_2$

2. Solid ประกอบด้วยของแข็งที่เกิดจากเชื้อเพลิงแข็ง ได้แก่ Coal, Woodchips, Bark, $C_{Coal}$ , $C_{Woodchips}$ , $C_{Bark}$ , Ash

3. Sand คือ เบดของเตาเผา ได้แก่ Sand

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2) ทดสอบแบบจำลองด้วยการป้อนค่าสภาวะต่างๆ ที่ได้ข้อมูลจากโรงไฟฟ้าต้นแบบ คือ อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 1,941 ton/day หรือ 22.5 kg/s มีสัดส่วนของเชื้อเพลิงตามตารางที่ 3-7 และมีอัตราการป้อนอากาศตามตารางที่ 3-8 โดยการตั้งชื่อการทดลองว่า “Base case” การคำนวณเชื้อเพลิงเพื่อป้อนในแบบจำลองสามารถทำได้ดังนี้

$$\text{อัตราการป้อนเชื้อเพลิงต่อ 1 ช่องป้อน(kg/s)} = \frac{\text{อัตราการป้อนเชื้อเพลิงรวม(kg/s)} \times \text{สัดส่วนของเชื้อเพลิง}}{\text{จำนวนช่องป้อนเชื้อเพลิง}}$$

โดย 1.การป้อนชีวมวลให้รวมสัดส่วนของไม้สับและเปลือกไม้ เนื่องจากใช้ช่องป้อนเดียวกัน

2.จำนวนช่องป้อนถ่านหินคือ 2 ช่องป้อน และจำนวนช่องป้อนชีวมวลคือ 4 ช่องป้อน

*ตารางที่ 3-7 การป้อนเชื้อเพลิงต่อ 1 ช่องป้อน*

| สัดส่วนเชื้อเพลิง | | | การป้อนเชื้อเพลิงต่อ 1 ช่องป้อน | | | | ขนาดเชื้อเพลิง (m) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | ช่องป้อนถ่านหิน | ช่องป้อนชีวมวล | | | |
| ถ่านหิน | ไม้สับ | เปลือกไม้ | อัตราป้อน (kg/s) | อัตราป้อน (kg/s) | สัดส่วนในช่องป้อน | | |
| | | | | | ไม้สับ | เปลือกไม้ | |
| 0.47 | 0.29 | 0.24 | 5.28 | 2.98 | 0.55 | 0.45 | 0.007 |

*ตารางที่ 3-8 การป้อนอากาศต่อ 1 ช่องป้อน*

| ช่องป้อนอากาศปฐมภูมิ | | ช่องป้อนอากาศทุติยภูมิ | |
|---|---|---|---|
| อัตราป้อน (kg/s) | อุณหภูมิ (°C) | อัตราป้อน (kg/s) | อุณหภูมิ (°C) |
| 59.08 | 179 | 0.96 | 253 |

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.2.1.3 การทวนสอบแบบจำลอง

ทำการเปรียบเทียบผลของแบบจำลองกับผลการทดสอบจริงของโรงไฟฟ้าต้นแบบ โดยมีค่าเปรียบเทียบคือ อุณหภูมิของเบด (Bed Temperature) โดยเกณฑ์ยอมรับความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 5% (ระดับความเชื่อมั่นที่ 95) และเปรียบเทียบองค์ประกอบของแก๊สเผาไหม้ (Flue gas) ได้แก่ $O_2$, $CO_2$, CO, NO และ $SO_2$ กับผลสรุปของจากการทบทวนงานวิจัยจากตารางที่ 2.5 ซึ่งจะได้ค่าทวนสอบแบบจำลองแสดงดังตารางที่ 3-9

*ตารางที่ 3-9 ค่าผลการทดสอบจริงจากโรงไฟฟ้าและการทบทวนงานวิจัย*

| Bed temperature (°C) | $O_2$ (%) | $CO_2$ (%) | CO (ppm) | NO (ppm) | $SO_2$ (ppm) |
|---|---|---|---|---|---|
| 899 | 4.6 – 9.7 | 9.5 – 18.2 | 0 - 80 | 120 -300 | 50 -900 |

3.2.2 การศึกษาผลของชนิดและสัดส่วนของเชื้อเพลิง

3.2.2.1 กำหนดตัวแปรในการศึกษาดังตารางที่ 3-10 ดังนี้

*ตารางที่ 3-10 ตัวแปรในการศึกษา*

| ตัวแปรต้น | ตัวแปรตาม | ตัวแปรควบคุม |
|---|---|---|
| - ชนิดของเชื้อเพลิง ได้แก่ ถ่านหิน ชิ้นไม้สับ และเปลือกไม้<br>- สัดส่วนของเชื้อเพลิง | - อุณหภูมิภายในเตา ได้แก่ Overall, Bed, Freeboard และ Outlet<br>- ฟลักซ์ความร้อนของผนังท่อน้ำ (Heat flux)<br>- ปริมาณเถ้า (Ash)<br>- แก๊สมลพิษ (CO, $CO_2$, NO, $SO_2$ และ $Cl_2$) | - อัตราการป้อนเชื้อเพลิง<br>- อัตราการป้อนอากาศ |

3.2.2.2 ออกแบบการทดลองโดยจัดการทดลองแบบผสมซิมเพล็กซ์เซนทรอยด์ (Simplex centroid mixture design) ซึ่งเป็นการกำหนดปัจจัยที่ศึกษาแบบไม่กำหนดช่วง [24] โดยศึกษาทั้งหมด 3 ปัจจัย คือ ปริมาณถ่านหิน ปริมาณชิ้นไม้สับ และปริมาณเปลือกไม้เป็นสัดส่วน 0 ถึง 1 ซึ่งได้จำนวนการทดลองทั้งหมด 10 การทดลอง แสดงดังตารางที่ 3-11

*ตารางที่ 3-11 การป้อนเชื้อเพลิงของ 10 การทดลอง*

| การทดลอง | สัดส่วนเชื้อเพลิง | | | การป้อนเชื้อเพลิงต่อ 1 ช่องป้อน | | | | ขนาดเชื้อเพลิง (m) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | ช่องป้อนถ่านหิน | ช่องป้อนชีวมวล | | | |
| | | | | | อัตราป้อน (kg/s) | สัดส่วนในช่องป้อน | | |
| | ถ่านหิน | ไม้สับ | เปลือกไม้ | อัตราป้อน (kg/s) | | ไม้สับ | เปลือกไม้ | |
| 1 | 1.00 | 0.00 | 0.00 | 11.23 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.003 |
| 2 | 0.00 | 1.00 | 0.00 | 0.00 | 5.62 | 1.00 | 0.00 | 0.010 |
| 3 | 0.00 | 0.00 | 1.00 | 0.00 | 5.62 | 0.00 | 1.00 | 0.010 |
| 4 | 0.50 | 0.50 | 0.00 | 5.62 | 2.81 | 1.00 | 0.00 | 0.006 |
| 5 | 0.50 | 0.00 | 0.50 | 5.62 | 2.81 | 0.00 | 1.00 | 0.006 |
| 6 | 0.00 | 0.50 | 0.50 | 0.00 | 5.62 | 0.50 | 0.50 | 0.010 |
| 7 | 0.66 | 0.17 | 0.17 | 7.41 | 1.91 | 0.50 | 0.50 | 0.005 |
| 8 | 0.17 | 0.66 | 0.17 | 1.91 | 4.66 | 0.80 | 0.20 | 0.009 |
| 9 | 0.17 | 0.17 | 0.66 | 1.91 | 4.66 | 0.20 | 0.80 | 0.009 |
| 10 | 0.33 | 0.33 | 0.33 | 3.71 | 3.71 | 0.50 | 0.50 | 0.008 |

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.2.3 การศึกษาผลของอัตราการป้อนเชื้อเพลิง

โดยนำการทดลอง Base case ที่มีอัตราการป้อนเชื้อเพลิง 1,941 ton/day มาปรับเป็น 3,000 และ 1,000 ton/day จะได้เป็นการทดลองที่ 11 และ 12 ตามลำดับ ดังตารางที่ 3-12 หลังจากนั้นทำการทดสอบแบบจำลองและพิจารณาผลตัวแปรตามของการทดลองทั้งสองเทียบกับการทดลองเดิม

*ตารางที่ 3-12 การป้อนเชื้อเพลิงของการทดลองที่ 11 และ 12*

| การทดลอง | อัตราการป้อนเชื้อเพลิง (ton/day) | การป้อนเชื้อเพลิงต่อ 1 ช่องป้อน | | | | ขนาดเชื้อเพลิง (m) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | ช่องป้อนถ่านหิน | ช่องป้อนชีวมวล | | | |
| | | อัตราป้อน (kg/s) | อัตราป้อน (kg/s) | สัดส่วนในช่องป้อน | | |
| | | | | ไม้สับ | เปลือกไม้ | |
| 11 | 3,000 | 8.16 | 4.60 | 0.55 | 0.45 | 0.007 |
| 12 | 1,000 | 2.72 | 1.53 | 0.55 | 0.45 | 0.007 |

3.2.4 การสร้างแบบการทำนายผล

นำผลการทดลองมาวิเคราะห์ผลโดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA) เพื่อทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของตัวแปรตาม ผ่านโปรแกรม Design-Expert ซึ่งจะได้เป็นแบบการทำนายผลตัวแปรตาม 2 รูปแบบ คือ สมการและกราฟคอนทัวร์ (Contour plot)

3.2.4.1 สมการซึ่งสร้างจากการทดสอบ ANOVA แล้วได้ผลสัมประสิทธิ์ของตัวแปรต้นมาสร้างเป็นสมการทำนายผลตัวแปรตามในรูปแบบดังนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

$$y = x_1A + x_2B + x_3C$$

เมื่อ y คือ ตัวแปรตาม

A, B, C คือ ตัวแปรต้น (สัดส่วนของเชื้อเพลิงถ่านหิน ไม้สับ และเปลือกไม้ ตามลำดับ)

$x_1$, $x_2$, $x_3$ คือ สัมประสิทธิ์ของตัวแปรต้น (ถ่านหิน ไม้สับ และเปลือกไม้ ตามลำดับ)

3.2.4.2 กราฟคอนทัวร์ซึ่งสร้างจากการทดสอบ ANOVA แล้วได้กราฟคอนทัวร์สามแกน (Ternary contour plot) โดยแกน X, Y และ Z คือสัดส่วนของเชื้อเพลิงถ่านหิน ไม้สับและเปลือกไม้ ตามลำดับ

3.2.4.3 สร้างกราฟคอนทัวร์เพื่อการเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ของหม้อไอน้ำ โดยจะเป็นกราฟที่พิจารณาผลของตัวแปรตามมากกว่า 1 ตัวแปร ซึ่งจะกำหนดให้ตัวแปรต้นหรือชนิดของเชื้อเพลิงมีความสำคัญเท่ากันและกำหนดค่าเป้าหมายของตัวแปรตามดังตารางที่ 3-13 แล้วคำนวณค่า Desirability หรือค่าการออกแบบของตัวแปรแต่ละตัวด้วยการใช้ฮิลไคลมิงอัลกอริทึม (Hill Climbing Algorithm) เพื่อนำมาสร้างกราฟคอนทัวร์ [25] [26] จะได้สัดส่วนของเชื้อเพลิงที่เหมาะสม โดยจะนำค่าดังกล่าวมาคำนวณแบบจำลอง CFD แล้วพิจารณาค่า %Error ผลของแบบจำลองเทียบกับผลจากกราฟ Desirability

*ตารางที่ 3-13 ค่าเป้าหมายของตัวแปรตามเพื่อการเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ของหม้อไอน้ำ*

| **อุณหภูมิภายในเตา** | **ฟลักซ์ความร้อน** | **ปริมาณเถ้า** | **แก๊สมลพิษ** |
|---|---|---|---|
| สูงสุด | สูงสุด | ต่ำสุด | ต่ำสุด |

3.2.5 การวิเคราะห์ข้อมูลด้านสิ่งแวดล้อมและด้านเศรษฐศาสตร์

3.2.5.1 วิเคราะห์ข้อมูลด้านสิ่งแวดล้อม โดยการเปรียบเทียบปริมาณแก๊สมลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแต่ละการทดลองกับค่ามาตรฐานควบคุมการปล่อยทิ้งอากาศเสียจากโรงไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง ดังตารางที่ 3-14 เมื่อพบว่าค่าปริมาณแก๊สมลพิษเกินกว่าค่ามาตรฐานกำหนด แสดงว่าการใช้เชื้อเพลิงดังกล่าวส่งผลกระทบเชิงลบต่อสิ่งแวดล้อม

*ตารางที่ 3-14 ค่ามาตรฐานควบคุมการปล่อยทิ้งอากาศเสียจากโรงไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง*

| **ข้อกำหนด** | **ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ($SO_2$) (ppm)** | **ออกไซด์ของไนโตรเจน ($NO_x$) (ppm)** |
|---|---|---|
| ประกาศกระทรวงฯ[1] | ไม่เกิน 360 | ไม่เกิน 200 |
| EIA โรงไฟฟ้า[2] | ไม่เกิน 50 | ไม่เกิน 160 |

ที่มา : [1] ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการปล่อยทิ้งอากาศเสียจากโรงไฟฟ้าใหม่ 2553

[2] Emission Data for EIA report ของบริษัท อินทิเกรทเต็ด รีเสิร์ช เซ็นเตอร์ จำกัด

3.2.5.2 วิเคราะห์ข้อมูลด้านเศรษฐศาสตร์ด้วยการเปรียบเทียบราคาของเชื้อเพลิงแต่ละชนิด ดังตารางที่ 3-15 ซึ่งจะคำนวณราคาของเชื้อเพลิงทั้ง 10 การทดลอง โดยจะคิดต้นทุนของเชื้อเพลิงต่อระยะเวลา 1 วัน, 1 เดือนและ 1 ปี ตามลำดับ ซึ่งต้นทุนของเชื้อเพลิงสามารถคำนวณได้ดังนี้

ต้นทุนเชื้อเพลิง (Baht/day) = ปริมาณการใช้เชื้อเพลิง (ton/day) x ราคาเชื้อเพลิง (Baht/ton)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากการคำนวณจะได้ต้นทุนเชื้อเพลิงต่อ 1 วัน หลังจากนั้นนำต้นทุนเชื้อเพลิงดังกล่าวมาคิดต้นทุนระยะยาว คือ 1 เดือน (30 วัน) และ1 ปี (365 วัน)  ถัดมาจะคำนวณ % การลดลงของต้นทุนเชื้อเพลิงของทุกการทดลองโดยเปรียบเทียบกับการใช้ถ่านหินเพียงอย่างเดียว (การทดลองที่ 1) ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\% \text{ การลดลงของต้นทุนเชื้อเพลิงที่ศึกษา} = \frac{\text{ต้นทุนเชื้อเพลิงการทดลองที่ 1} - \text{ต้นทุนการทดลองที่ศึกษา}}{\text{ต้นทุนเชื้อเพลิงการทดลองที่ 1}} \times 100$$

*ตารางที่ 3-15 ราคาเชื้อเพลิงแข็ง*

| **ชนิดเชื้อเพลิง** | ถ่านหิน (ซับบิทูมินัส) | ไม้สับ | เปลือกไม้ |
|---|---|---|---|
| **ราคา (Baht/ton)** | 3,512.00 | 909.00 | 689.00 |

ที่มา :	ราคาเชื้อเพลิงของบริษัท อินทิเกรทเต็ด รีเสิร์ช เซ็นเตอร์ จำกัด ณ วันที่ 11 กุมภาพันธ์ พ.ศ.2566

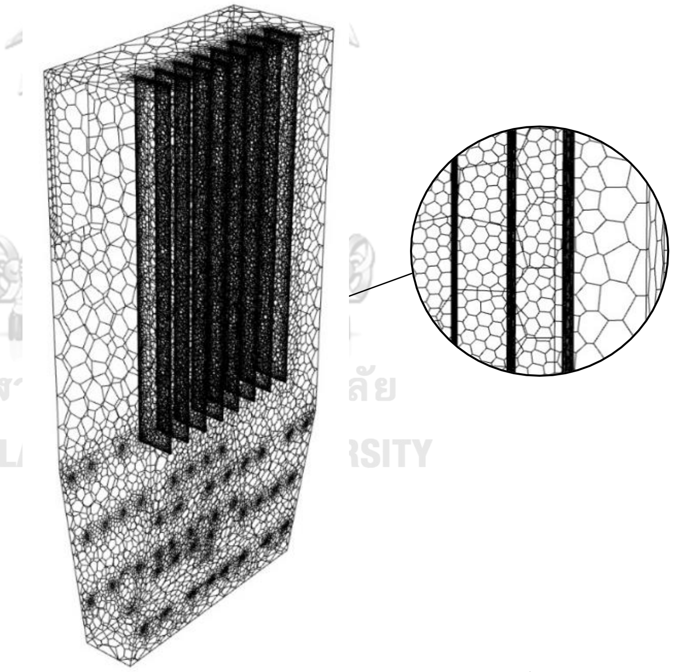
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

# บทที่ 4
# ผลการทดลองและการอภิปรายผล

## 4.1 ผลการพัฒนาแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

4.1.1 ผลการสร้างขอบเขตทางกายภาพของของไหลในเตาเผาของหม้อไอน้ำ

รูปร่างของ Mesh เป็นทรงหลายหน้า (Polyhedron) ดังแสดงในรูปที่ 4-1 มีจำนวน 121,833 เซลล์ และแบ่งโซนตามขนาดของเซลล์ได้ทั้งหมด 15 โซน ขนาดของเซลล์จะเป็นตัวกำหนดความละเอียดในการคำนวณ ซึ่งบริเวณที่ต้องการความละเอียดสูงจะกำหนดให้เซลล์มีขนาดเล็ก เช่น ช่องป้อนเชื้อเพลิง และแผงท่อน้ำ เป็นต้น และได้ทำการตรวจสอบคุณภาพของ Mesh แล้วพบว่ามีค่า Orthogonal Quality 0.203 และ Aspect Ratio 7.522 ดังตารางที่ 4-1 ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในขอบเขตของค่าที่แนะนำ ซึ่งทำให้มีรูปทรงของ Mesh และมีพื้นที่ติดกันระหว่างเซลล์ที่เหมาะสม จึงเหมาะแก่การนำไปสร้างแบบจำลอง CFD



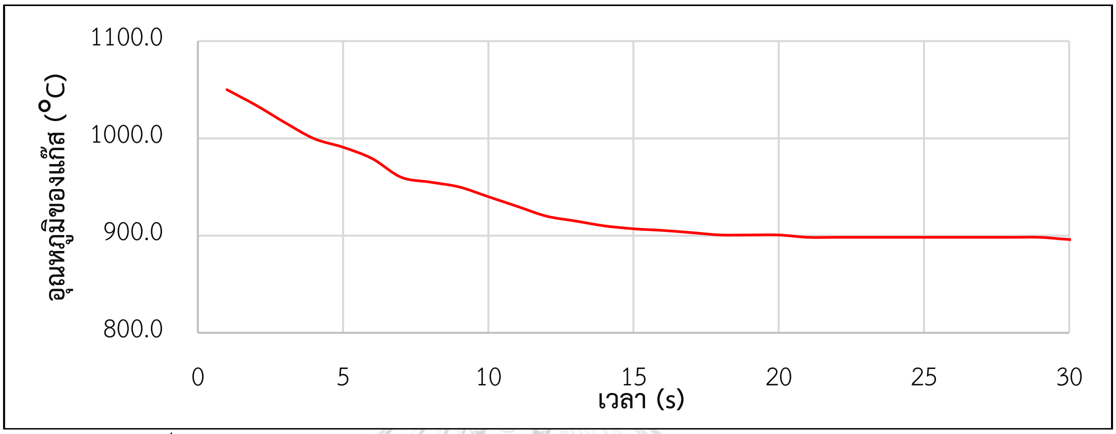
*รูปที่ 4-1 Mesh ของของไหลในห้องเผาไหม้ของหม้อไอน้ำ*

*ตารางที่ 4-1 ผลการตรวจสอบคุณภาพของ Mesh*

| คุณภาพของ Mesh | ค่ากำหนด | ค่าที่แนะนำ | ค่าของการทดลอง |
|---|---|---|---|
| Orthogonal Quality | มากกว่า 0.01 | มากกว่า 0.20 | 0.203 |
| Aspect Ratio | ไม่เกิน 20 | 10 | 7.522 |

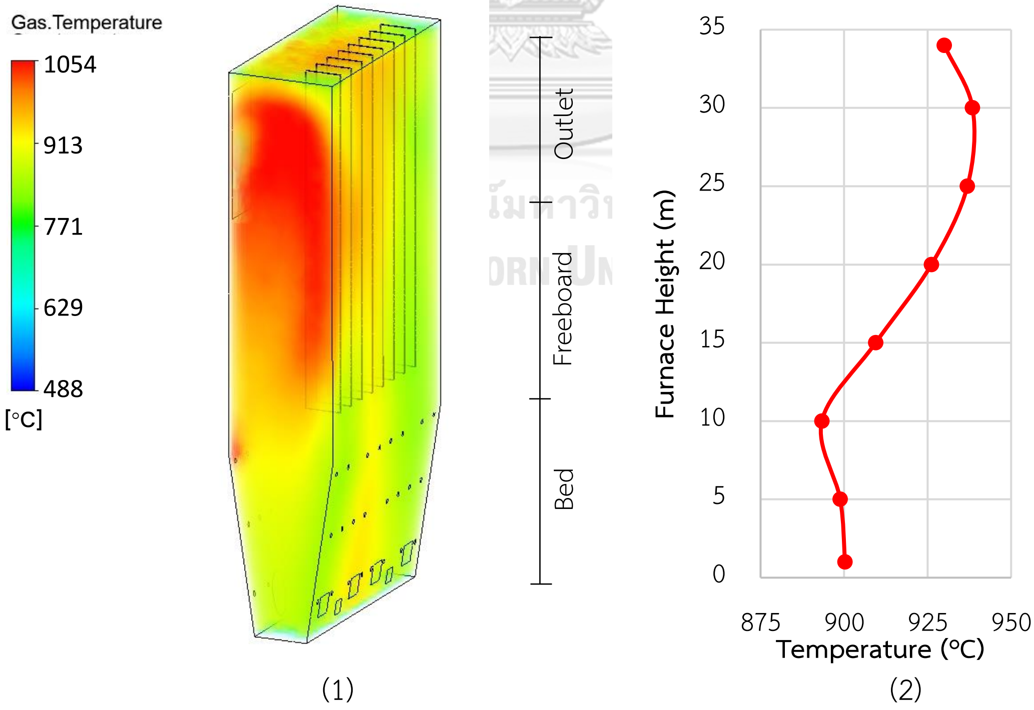
4.1.2 ผลการพัฒนาแบบจำลอง CFD

การหาเวลาที่เหมาะสมในการคำนวณ โดยพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของแก๊สบริเวณเบดกับเวลาของ Base case แสดงดังรูปที่ 4-2 ซึ่งเวลาที่เหมาะสมที่ใช้ในการคำนวณ คือ 20 – 25 s เนื่องจากอุณหภูมิของแก๊สมีค่ากวัดแกว่งเพียงเล็กน้อย จึงถือว่าระบบเข้าสู่ภาวะเสมือนค่าคงตัว




*รูปที่ 4-2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแก๊สบริเวณเบดกับเวลาของ Base case*

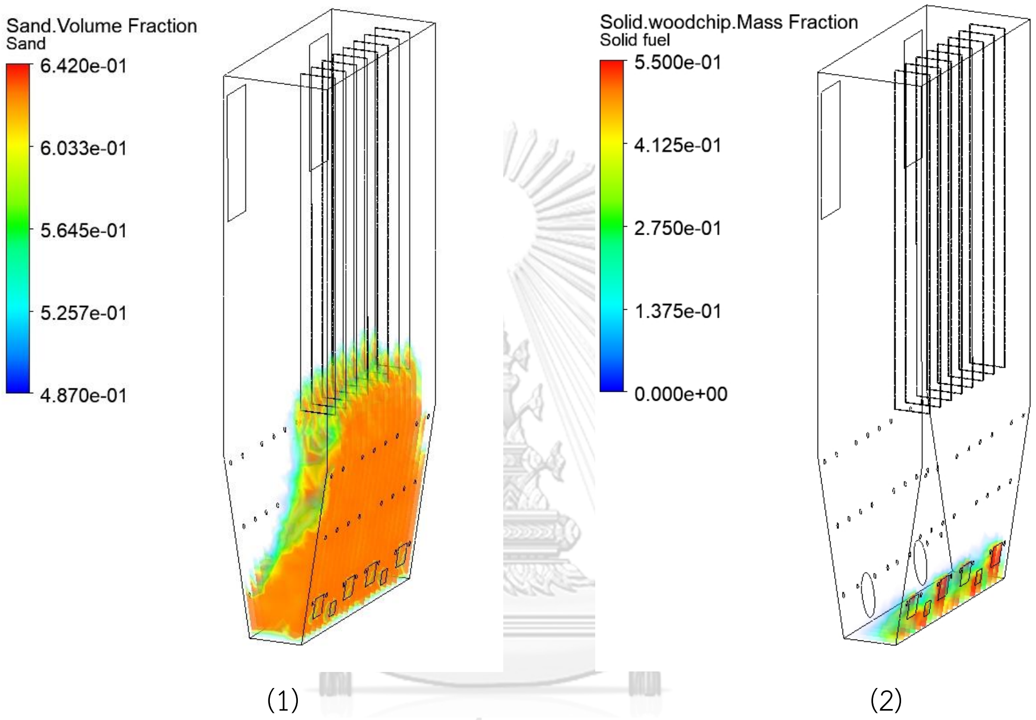
อุณหภูมิภายในเตาเผาจะพิจารณาจากอุณหภูมิของวัฏภาคแก๊ส แสดงดังรูปที่ 4-3




*รูปที่ 4-3 อุณหภูมิภายในเตาเผาของ Base case ; (1) ภาพคอนทัวร์ของอุณหภูมิ (2) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความสูงของเตา*

จากรูปที่ 4-3 พบว่าอุณหภูมิจะเปลี่ยนแปลงตามระยะความสูงของเตาเผา ซึ่งอุณหภูมิบริเวณ Bed มีค่า 900.3 ℃ และอุณหภูมิจะต่ำลงที่บริเวณ Secondary air inlet เนื่องจากมีความหนาแน่นของอากาศสูง หลังจากนั้นอุณหภูมิจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นในบริเวณ Freeboard และ Outlet เนื่องจากการทำปฏิกิริยาเผาไหม้ของสารระเหยที่บริเวณดังกล่าว

แบบจำลอง CFD ที่ได้รับการพัฒนาสามารถแสดงองค์ประกอบต่างๆ ในเตาเผา ได้แก่ เบดเชื้อเพลิง (ไม้สับ) ออกซิเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ ดังรูปที่ 4-4 และ 4-5

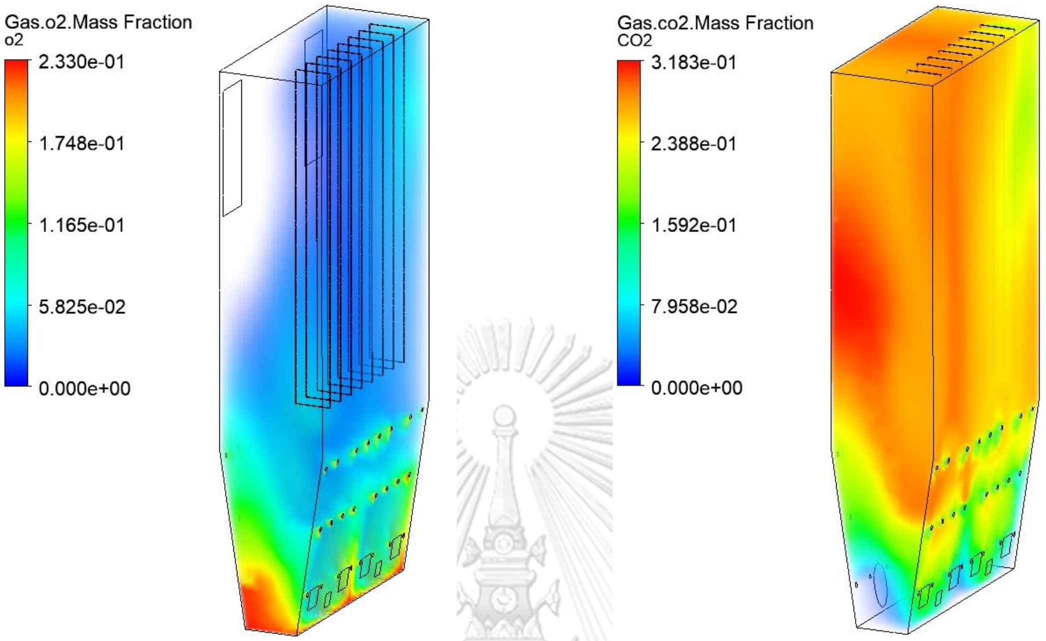



*รูปที่ 4-4 ภาพคอนทัวร์ขององค์ประกอบต่างๆในเตาเผา ; (1) เบด และ (2) เชื้อเพลิง*

จากรูปที่ 4-4 (1) จะแสดงถึงปริมาณของเบดที่อยู่บริเวณด้านล่างของเตาเผาและมีการกระจายตัวเนื่องจากการเคลื่อนที่ผ่านของ Primary air สอดคล้องกับทฤษฎี Fluidization ส่วนรูปที่ 4-4 (2) จะแสดงถึงปริมาณของเชื้อเพลิงซึ่งในภาพคือไม้สับ โดยเชื้อเพลิงจะมีปริมาณสูงบริเวณช่องป้อนเชื้อเพลิงและจะลดปริมาณลงเมื่อเข้าสู่เตาเผา ซึ่งเกิดมาจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกับอากาศในเตาเผา

รูปที่ 4-5 (1) จะแสดงถึงปริมาณ $O_2$ ที่ถูกป้อนเข้ามาในรูปแบบของอากาศ โดยปริมาณ $O_2$ จะค่อนข้างน้อยบริเวณเบดหรือบริเวณที่เกิดการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแข็ง และจะมีปริมาณลดลงเมื่อเข้าสู่บริเวณ Freeboard เนื่องจากเกิดการเผาไหม้ของแก๊สสารระเหย เช่น CO เปลี่ยนเป็น $CO_2$ ส่วนรูปที่ 4-5 (2) จะแสดงถึงปริมาณ $CO_2$ ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ จะเห็นว่าบริเวณเบดมี $CO_2$ น้อย เนื่องจากเกิดการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งแล้วได้ CO มากกว่า ซึ่งการเผาไหม้แบบสมบูรณ์จะเกิดบริเวณ Freeboard ทำให้มีปริมาณ $CO_2$ ที่ค่อนข้างสูง

ผลการพัฒนาแบบจำลอง CFD ดังรูป 4-3 ถึง 4-5 แสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบต่างๆ ที่เกิดขึ้นในเตาเผามีความเป็นไปได้และสอดคล้องกับผลของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในเตาเผาดังกล่าว




(1) (2)

*รูปที่ 4-5 ภาพคอนทัวร์ขององค์ประกอบต่างๆในเตาเผา ; (1) $O_2$ และ (2) $CO_2$*

4.1.3 ผลการทวนสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

ผลการทวนสอบความถูกต้องของแบบจำลองแสดงดังตารางที่ 4-2 พบว่า Bed temperature ของแบบจำลองคลาดเคลื่อนจากโรงไฟฟ้า 0.1 % ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ยอมรับความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 5 % ส่วนองค์ประกอบของแก๊สเผาไหม้ (Flue gas) ได้แก่ $O_2$, $CO_2$, CO, NO และ $SO_2$ เปรียบเทียบกับผลสรุปของจากการทบทวนงานวิจัยพบว่าค่าอยู่ในช่วงข้อมูลจากงานวิจัย จากข้อมูลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองมีความถูกต้องสามารถเป็นตัวแทนเตาเผาของโรงฟ้าได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

*ตารางที่ 4-2 ผลการทวนสอบความถูกต้องของแบบจำลอง*

| **ข้อมูล** | Bed temperature (°C) | $O_2$ (%) | $CO_2$ (%) | CO (ppm) | NO (ppm) | $SO_2$ (ppm) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **ค่าเปรียบเทียบ** | 899 | 4.6 – 9.7 | 9.5 – 18.2 | 0 - 80 | 120 -300 | 50 -900 |
| Base case | 900.3 | 8.7 | 9.8 | 0.0060 | 139.7 | 75.0 |
| %Error | -0.1 | | | | | |

### 4.2 ผลการศึกษาชนิดและสัดส่วนของเชื้อเพลิง

ผลของตัวแปรตามเนื่องมาจากชนิดและสัดส่วนของเชื้อเพลิงแสดงดังตารางที่ 4-3 ถึง 4-4 และรูปที่ 4-6 ถึง 4-12

*ตารางที่ 4-3 ผลอุณหภูมิและฟลักซ์ความร้อนของแบบจำลอง*

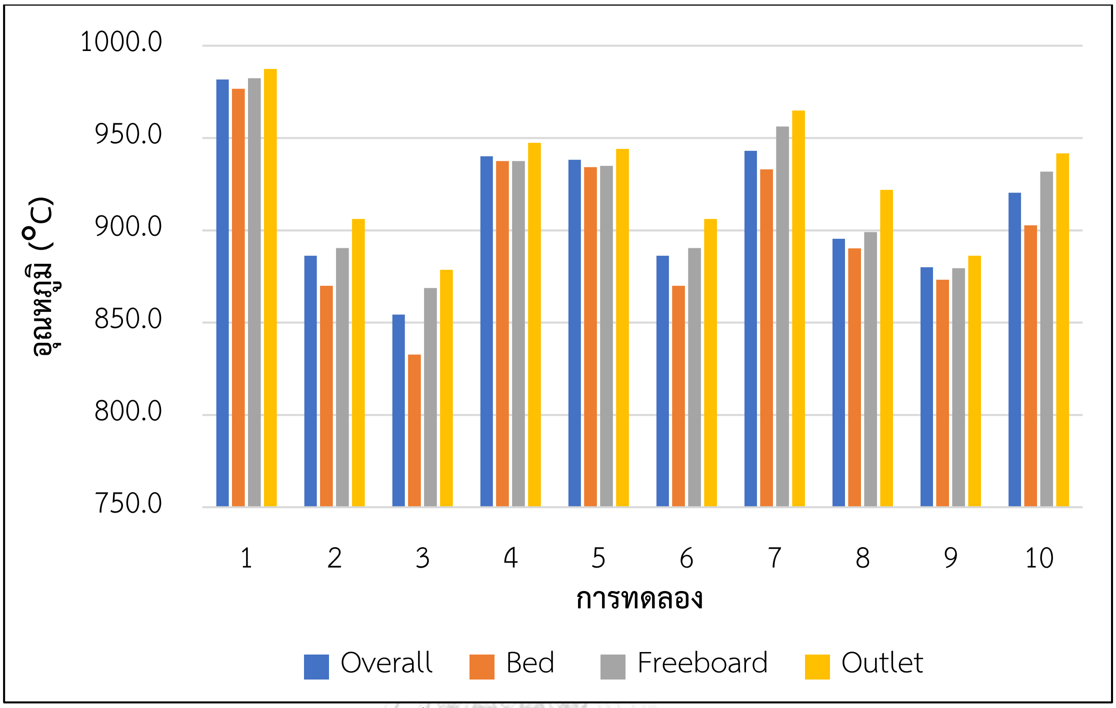
| การทดลอง | สัดส่วนเชื้อเพลิง | | | อุณหภูมิ (°C) | | | | ฟลักซ์ความร้อน ($W/m^2$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | ถ่านหิน | ไม้สับ | เปลือกไม้ | Overall | Bed | Freeboard | Outlet | |
| 1 | 1.00 | 0.00 | 0.00 | 981.6 | 976.7 | 982.4 | 987.4 | 3296 |
| 2 | 0.00 | 1.00 | 0.00 | 886.2 | 870.0 | 890.4 | 906.2 | 2568 |
| 3 | 0.00 | 0.00 | 1.00 | 854.4 | 832.7 | 868.7 | 878.6 | 2202 |
| 4 | 0.50 | 0.50 | 0.00 | 940.2 | 937.6 | 937.5 | 947.5 | 2997 |
| 5 | 0.50 | 0.00 | 0.50 | 938.2 | 934.3 | 934.9 | 944.1 | 2874 |
| 6 | 0.00 | 0.50 | 0.50 | 886.2 | 870.0 | 890.4 | 906.2 | 2468 |
| 7 | 0.66 | 0.17 | 0.17 | 943.0 | 933.1 | 956.2 | 964.9 | 3060 |
| 8 | 0.17 | 0.66 | 0.17 | 895.4 | 890.2 | 899.1 | 922.0 | 2597 |
| 9 | 0.17 | 0.17 | 0.66 | 879.9 | 873.2 | 879.4 | 886.2 | 2560 |
| 10 | 0.33 | 0.33 | 0.33 | 920.5 | 902.7 | 931.8 | 941.6 | 2666 |

*ตารางที่ 4-4 ผลสารมลพิษของแบบจำลอง*

| การทดลอง | สัดส่วนเชื้อเพลิง | | | แก๊สมลพิษ | | | | | Ash ($kg/m^3$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | ถ่านหิน | ไม้สับ | เปลือกไม้ | $CO_2$ (%) | CO (ppm) | NO (ppm) | $SO_2$ (ppm) | $Cl_2$ (ppm) | |
| 1 | 1.00 | 0.00 | 0.00 | 12.5 | 0.0089 | 364.6 | 188.3 | 0.0 | 299.5 |
| 2 | 0.00 | 1.00 | 0.00 | 9.9 | 0.0083 | 86.5 | 22.1 | 9.7 | 250.4 |
| 3 | 0.00 | 0.00 | 1.00 | 7.4 | 0.0081 | 40.0 | 35.3 | 20.0 | 286.0 |
| 4 | 0.50 | 0.50 | 0.00 | 10.3 | 0.0066 | 193.4 | 99.9 | 3.1 | 283.7 |
| 5 | 0.50 | 0.00 | 0.50 | 10.1 | 0.0064 | 192.3 | 105.3 | 6.1 | 295.7 |
| 6 | 0.00 | 0.50 | 0.50 | 9.1 | 0.0063 | 52.7 | 28.5 | 11.5 | 283.0 |
| 7 | 0.66 | 0.17 | 0.17 | 10.1 | 0.0068 | 211.4 | 106.6 | 3.0 | 295.9 |
| 8 | 0.17 | 0.66 | 0.17 | 8.4 | 0.0064 | 80.7 | 27.5 | 7.0 | 276.3 |
| 9 | 0.17 | 0.17 | 0.66 | 8.3 | 0.0060 | 55.5 | 32.3 | 8.9 | 285.3 |
| 10 | 0.33 | 0.33 | 0.33 | 9.1 | 0.0060 | 125.5 | 65.3 | 6.2 | 288.3 |

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.2.1 อุณหภูมิภายในเตาเผา




*รูปที่ 4-6 อุณหภูมิของแบบจำลอง*

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากรูปที่ 4-6 การทดลองที่มีถ่านหินในสัดส่วนที่สูงจะทำให้อุณหภูมิภายในเตาสูง เนื่องจากมีปริมาณของคาร์บอนคงตัวที่สูงซึ่งจะเกิดการเผาไหม้แล้วได้อุณหภูมิสูง ส่วนชีวมวลจะมีปริมาณคาร์บอนคงตัวต่ำกว่าถ่านหินทำให้เกิดการเผาไหม้แล้วได้อุณหภูมิต่ำกว่า [27] สามารถเรียงลำดับเชื้อเพลิงที่ทำให้อุณหภูมิภายในเตาเผาสูงจากมากไปน้อย คือ ถ่านหิน ไม้สับ และเปลือกไม้ โดยการทดลองที่ 1 มีสัดส่วนของถ่านหินสูงที่สุดจึงทำให้อุณหภูมิภายในเตาเผาโดยเฉลี่ยสูงที่สุด และการทดลองที่ 3 มีสัดส่วนของเปลือกไม้สูงที่สุดทำให้มีอุณหภูมิภายในเตาเผาโดยเฉลี่ยต่ำที่สุด และนอกจากนี้อุณหภูมิภายในเตาเผายังสอดคล้องกับค่าความร้อนของเชื้อเพลิงในตารางที่ 3-2 เนื่องจากถ่านหินมีค่าความร้อนสูงสุด รองลงมาคือไม้สับและเปลือกไม้ ตามลำดับ

อิทธิพลของชนิดของเชื้อเพลิงต่ออุณหภูมิภายในเตาพิจารณาได้จากการวิเคราะห์ ANOVA ดังตารางที่ 4-5 โดยชนิดเชื้อเพลิงมีผลต่ออุณหภูมิภายในเตา ทั้ง Overall, Bed, Freeboard และ Outlet อย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อพิจารณาแยกแต่ละชนิดของเชื้อเพลิงจะพบว่า ถ่านหินมีผลเชิงบวกทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น ส่วนไม้สับและเปลือกไม้มีผลเชิงลบทำให้อุณหภูมิลดลง

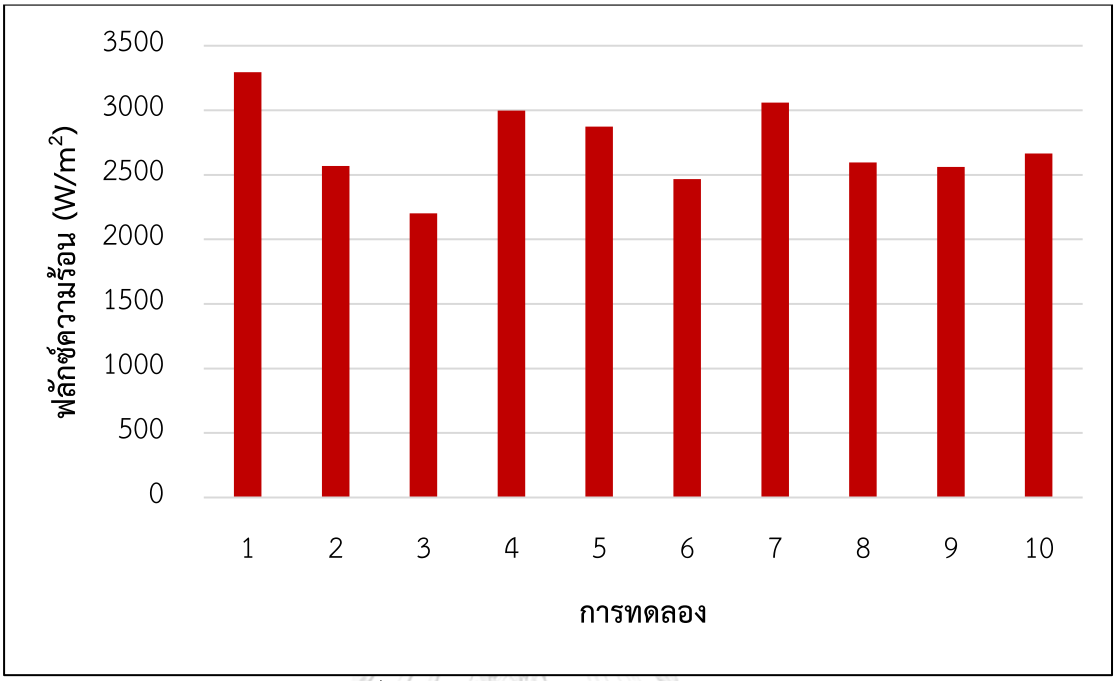
*ตารางที่ 4-5 ผล ANOVA ของอุณหภูมิภายในเตา*

| ANOVA Table | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Temp. | Source | Sum of Squares | df | Mean Square | F-value | p-value | Conclusion |
| Overall | Linear Mixture | 12716.34 | 2 | 6358.17 | 74.85 | < 0.0001 | significant |
| | Residual | 594.63 | 7 | 84.95 | | | |
| | Cor Total | 13310.96 | 9 | | | | |
| Bed | Linear Mixture | 15816.76 | 2 | 7908.38 | 64.31 | < 0.0001 | significant |
| | Residual | 860.82 | 7 | 122.97 | | | |
| | Cor Total | 16677.58 | 9 | | | | |
| Freeboard | Linear Mixture | 11605.27 | 2 | 5802.63 | 62.46 | < 0.0001 | significant |
| | Residual | 650.35 | 7 | 92.91 | | | |
| | Cor Total | 12255.62 | 9 | | | | |
| Outlet | Linear Mixture | 10089.92 | 2 | 5044.96 | 44.35 | 0.0001 | significant |
| | Residual | 796.34 | 7 | 113.76 | | | |
| | Cor Total | 10886.26 | 9 | | | | |

| Component Effects (Cox) | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Temp. | Component | Gradient in Reals | Component Effect | Gradient Std Error | Approx t for $H_0$ Gradient=0 | Prob > \|t\| | Conclusion |
| Overall | A-Coal | 110.68 | 110.68 | 9.25 | 11.97 | < 0.0001 | significant |
| | B-Woodchips | -35.01 | -35.01 | 9.25 | -3.79 | 0.0068 | significant |
| | C-Bark | -75.67 | -75.67 | 9.25 | -8.18 | < 0.0001 | significant |
| Bed | A-Coal | 123.15 | 123.15 | 11.13 | 11.07 | < 0.0001 | significant |
| | B-Woodchips | -37.78 | -37.78 | 11.13 | -3.40 | 0.0115 | significant |
| | C-Bark | -85.37 | -85.37 | 11.13 | -7.67 | 0.0001 | significant |
| Freeboard | A-Coal | 106.41 | 106.41 | 9.67 | 11.00 | < 0.0001 | significant |
| | B-Woodchips | -36.77 | -36.77 | 9.67 | -3.80 | 0.0067 | significant |
| | C-Bark | -69.64 | -69.64 | 9.67 | -7.20 | 0.0002 | significant |
| Outlet | A-Coal | 97.04 | 97.04 | 10.70 | 9.07 | < 0.0001 | significant |
| | B-Woodchips | -24.94 | -24.94 | 10.70 | -2.33 | 0.0526 | |
| | C-Bark | -72.09 | -72.09 | 10.70 | -6.74 | 0.0003 | significant |

หมายเหตุ p-values น้อยกว่า 0.0500 แสดงว่าตัวแปรต้นให้ผลที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

4.2.2 ฟลักซ์ความร้อน




*รูปที่ 4-7 ฟลักซ์ความร้อนของแบบจำลอง*

ผลของฟลักซ์ความร้อนของผนังท่อน้ำสอดคล้องกับอุณหภูมิภายในเตาเผา เนื่องจากความร้อนภายในเตาเผาจะถ่ายเทไปยังผนังท่อน้ำผ่านการพาความร้อนของวัฏภาคแก๊ส เมื่ออุณหภูมิภายในเตาเผาสูงจะทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงส่งผลให้ผนังท่อน้ำมีฟลักซ์ความร้อนสูง [27] โดยผนังท่อน้ำของแบบจำลองจะกำหนดเงื่อนไขขอบเขตอุณหภูมิคงที่และเมื่อมีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจะสามารถคำนวณฟลักซ์ความร้อนได้ [28] การทดลองที่มีเชื้อเพลิงถ่านหินในสัดส่วนที่สูงจะทำให้ฟลักซ์ความร้อนสูง รองลงมาคือคือไม้สับและเปลือกไม้ ตามลำดับ การทดลองที่มีฟลักซ์ความร้อนสูงสุดคือการทดลองที่ 1 และการทดลองที่มีฟลักซ์ความร้อนต่ำสุดคือการทดลองที่ 3

พิจารณาฟลักซ์ความร้อนดังตารางที่ 4-6 พบว่าชนิดเชื้อเพลิงมีผลต่อฟลักซ์ความร้อนของท่อน้ำในเตาเผาอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อพิจารณาแยกแต่ละชนิดของเชื้อเพลิงจะพบว่า ถ่านหินมีผลเชิงบวกทำให้ ฟลักซ์ความร้อนสูงขึ้น ส่วนไม้สับและเปลือกไม้มีผลเชิงลบทำให้ฟลักซ์ความร้อนลดลง

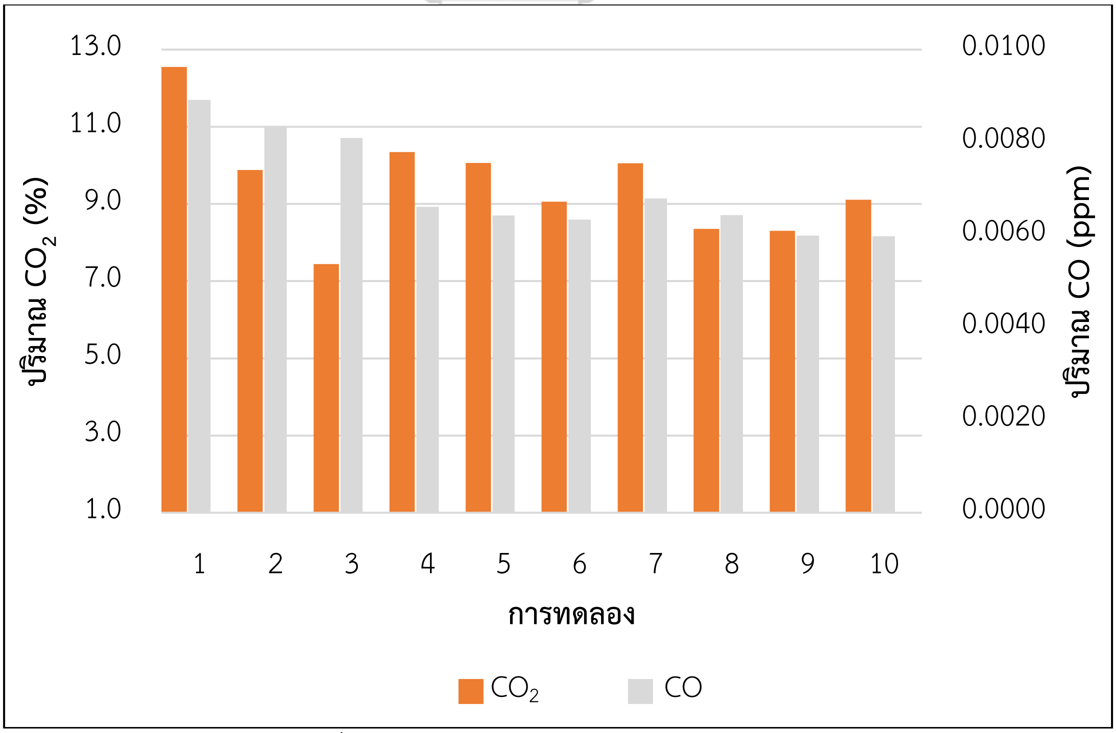
*ตารางที่ 4-6 ผล ANOVA ของฟลักซ์ความร้อน*

| ANOVA Table | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Source | Sum of Squares | df | Mean Square | F-value | p-value | Conclusion |
| Linear Mixture | 9.195E+05 | 2 | 4.598E+05 | 123.22 | < 0.0001 | significant |
| Residual | 26119.03 | 7 | 3731.29 | | | |
| Cor Total | 9.456E+05 | 9 | | | | |

| Component Effects (Cox) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Component | Gradient in Reals | Component Effect | Gradient Std Error | Approx t for $H_0$ Gradient=0 | Prob > \|t\| | Conclusion |
| A-Coal | 926.57 | 926.57 | 61.29 | 15.12 | < 0.0001 | significant |
| B-Woodchips | -238.99 | -238.99 | 61.29 | -3.90 | 0.0059 | significant |
| C-Bark | -687.58 | -687.58 | 61.29 | -11.22 | < 0.0001 | significant |

หมายเหตุ p-values น้อยกว่า 0.0500 แสดงว่าตัวแปรต้นให้ผลที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

4.2.3 ปริมาณ $CO_2$ และ CO




*รูปที่ 4-8 ปริมาณ $CO_2$ และ CO ของแบบจำลอง*

จากรูปที่ 4-8 การทดลองที่มีสัดส่วนของถ่านหินที่สูงจะมีปริมาณของ $CO_2$ ที่สูง สอดคล้องกับองค์ประกอบธาตุคาร์บอนที่สูงของถ่านหิน [29] เช่นเดียวกับชีวมวลซึ่งมีองค์ประกอบธาตุคาร์บอนที่ต่ำกว่าถ่านหินทำให้มีปริมาณ $CO_2$ ที่ต่ำกว่า โดยการทดลองที่มีสัดส่วนของถ่านหินสูงจะมีปริมาณของ $CO_2$ สูง รองลงมาคือ ไม้สับ และเปลือกไม้จะมีปริมาณ $CO_2$ ต่ำที่สุด ส่วนปริมาณ CO สอดคล้องกับปริมาณ $CO_2$ คือถ่านหินมีปริมาณ CO ที่สูงที่สุด รองลงมาคือ ไม้สับ และเปลือกไม้ตามลำดับ [20]

พิจารณาปริมาณ $CO_2$ จากตารางที่ 4-7 พบว่าชนิดเชื้อเพลิงมีผลต่อปริมาณ $CO_2$ อย่างมีนัยสำคัญ โดยถ่านหินจะมีผลเชิงบวกทำให้ปริมาณ $CO_2$ เพิ่มขึ้น และเปลือกไม้มีผลเชิงลบทำให้ปริมาณ $CO_2$ ลดลง ส่วนไม้สับไม่มีผลต่อปริมาณ $CO_2$ อย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อพิจารณาปริมาณ CO จากตารางที่ 4-8 แสดงว่าชนิดเชื้อเพลิงมีผลต่อปริมาณ CO อย่างมีนัยสำคัญ โดยเป็นผลมาจากการใช้เชื้อเพลิงผสมเท่านั้น

*ตารางที่ 4-7 ผล ANOVA ของปริมาณ $CO_2$*

| ANOVA Table | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Source | Sum of Squares | df | Mean Square | F-value | p-value | Conclusion |
| Linear Mixture | 14.72 | 2 | 7.36 | 16.23 | 0.0024 | significant |
| Residual | 14.72 | 2 | 7.36 | 16.23 | 0.0024 | |
| Cor Total | 3.17 | 7 | 0.4535 | | | |

| Component Effects (Cox) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Component | Gradient in Reals | Component Effect | Gradient Std Error | Approx t for $H_0$ Gradient=0 | Prob > \|t\| | Conclusion |
| A-Coal | 3.53 | 3.53 | 0.6757 | 5.22 | 0.0012 | significant |
| B-Woodchips | -0.4308 | -0.4308 | 0.6757 | -0.6376 | 0.5440 | |
| C-Bark | -3.10 | -3.10 | 0.6757 | -4.58 | 0.0025 | significant |

หมายเหตุ p-values น้อยกว่า 0.0500 แสดงว่าตัวแปรต้นให้ผลที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

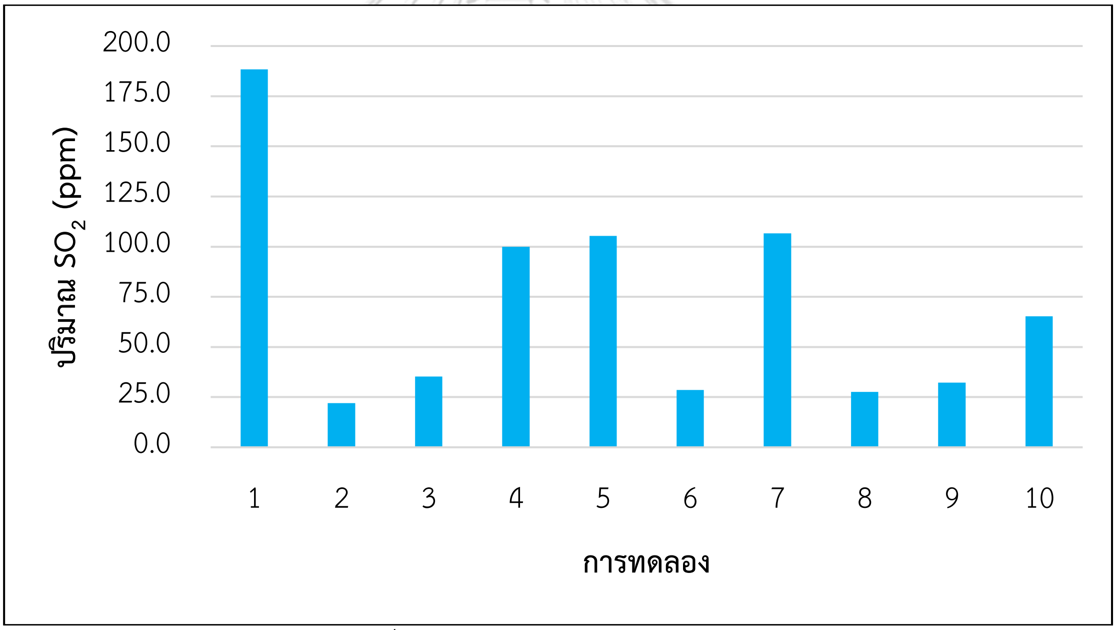
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

*ตารางที่ 4-8 ผล ANOVA ของปริมาณ CO*

| Source | Sum of Squares | df | Mean Square | F-value | p-value | Conclusion |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Linear Mixture | 6.180E-07 | 2 | 3.090E-07 | 9.96 | 0.0280 | significant |
| AB | 2.970E-06 | 1 | 2.970E-06 | 95.74 | 0.0006 | |
| AC | 3.414E-06 | 1 | 3.414E-06 | 110.05 | 0.0005 | |
| BC | 2.854E-06 | 1 | 2.854E-06 | 91.99 | 0.0007 | |
| Residual | 1.241E-07 | 4 | 3.103E-08 | | | |
| Cor Total | 9.916E-06 | 9 | | | | |

หมายเหตุ p-values น้อยกว่า 0.0500 แสดงว่าตัวแปรต้นให้ผลที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

4.2.4 ปริมาณ $SO_2$




*รูปที่ 4-9 ปริมาณ $SO_2$ ของแบบจำลอง*

พิจารณาปริมาณ $SO_2$ จากรูปที่ 4-9 ซึ่งปกติแล้วถ่านหินจะมีองค์ประกอบธาตุซัลเฟอร์หรือกำมะถันสูงกว่าชีวมวล สามารถเรียงลำดับองค์ประกอบธาตุซัลเฟอร์เรียงจากมากไปน้อยของเชื้อเพลิงในงานวิจัยนี้ได้ คือ ถ่านหิน เปลือกไม้ และไม้สับ โดยปริมาณ $SO_2$ ของแบบจำลองสอดคล้องกับประกอบธาตุซัลเฟอร์ของเชื้อเพลิง คือ ถ่านหินมีปริมาณ $SO_2$ ที่ค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับชีวมวล ส่วนปริมาณ $SO_2$ ของชีวมวลแตกต่างกันเล็กน้อย ซึ่งเปลือกไม้มีปริมาณ $SO_2$ มากกว่าไม้สับ [20]

พิจารณาตารางที่ 4-9 พบว่าชนิดเชื้อเพลิงมีผลต่อปริมาณ $SO_2$ อย่างมีนัยสำคัญ โดยถ่านหินจะมีผลเชิงบวกทำให้ปริมาณ $SO_2$ เพิ่มขึ้น ส่วนไม้สับและเปลือกไม้มีผลเชิงลบทำให้ปริมาณ $SO_2$ ลดลง

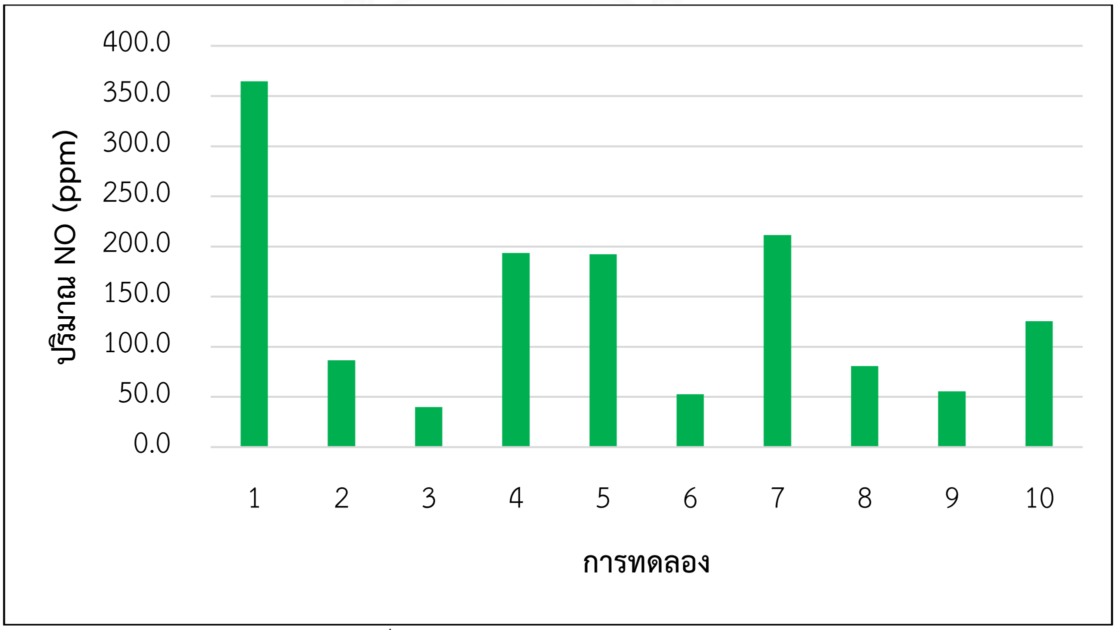
*ตารางที่ 4-9 ผล ANOVA ของปริมาณ $SO_2$*

| ANOVA Table | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Source | Sum of Squares | df | Mean Square | F-value | p-value | Conclusion |
| Linear Mixture | 24658.28 | 2 | 12329.14 | 67.72 | < 0.0001 | significant |
| Residual | 1274.33 | 7 | 182.05 | | | |
| Cor Total | 25932.61 | 9 | | | | |

| Component Effects (Cox) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Component | Gradient in Reals | Component Effect | Gradient Std Error | Approx t for $H_0$ Gradient=0 | Prob > \|t\| | Conclusion |
| A-Coal | 157.19 | 157.19 | 13.54 | 11.61 | < 0.0001 | significant |
| B-Woodchips | -87.78 | -87.78 | 13.54 | -6.48 | 0.0003 | significant |
| C-Bark | -69.41 | -69.41 | 13.54 | -5.13 | 0.0014 | significant |

หมายเหตุ p-values น้อยกว่า 0.0500 แสดงว่าตัวแปรต้นให้ผลที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

4.2.5 ปริมาณ NO




*รูปที่ 4-10 ปริมาณ NO ของแบบจำลอง*

พิจารณาปริมาณ NO จากรูปที่ 4-10 ซึ่งในแบบจำลองจะพิจารณาเฉพาะ NO ที่เกิดจากเชื้อเพลิง (Fuel NO) เท่านั้น โดยปกติแล้วถ่านหินจะมีองค์ประกอบธาตุไนโตรเจนน้อยกว่าชีวมวล แต่เนื่องจากงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ไม้สับและเปลือกไม้ซึ่งได้มาจากไม้ยืนต้น ทำให้มีองค์ประกอบธาตุไนโตรเจนที่ค่อนข้างน้อยและน้อยกว่าถ่านหินที่เลือกใช้ในงานวิจัยด้วย เพราะฉะนั้นปริมาณองค์ประกอบธาตุไนโตรเจนของเชื้อเพลิงเรียงลำดับจากมากไปน้อยคือ ถ่านหิน ไม้สับ และเปลือกไม้ ผลปริมาณ NO ของแบบจำลองก็สอดคล้องกับองค์ประกอบธาตุไนโตรเจนของเชื้อเพลิงเช่นกัน โดยถ่านหินจะทำให้เกิด NO มากที่สุด รองลงมาคือ ไม้สับ และเปลือกไม้ ตามลำดับ [20]

พิจารณาตารางที่ 4-9 พบว่าชนิดเชื้อเพลิงมีผลต่อปริมาณ NO อย่างมีนัยสำคัญ โดยถ่านหินจะมีผลเชิงบวกทำให้ปริมาณ NO เพิ่มขึ้น ส่วนไม้สับและเปลือกไม้มีผลเชิงลบทำให้ปริมาณ NO ลดลง

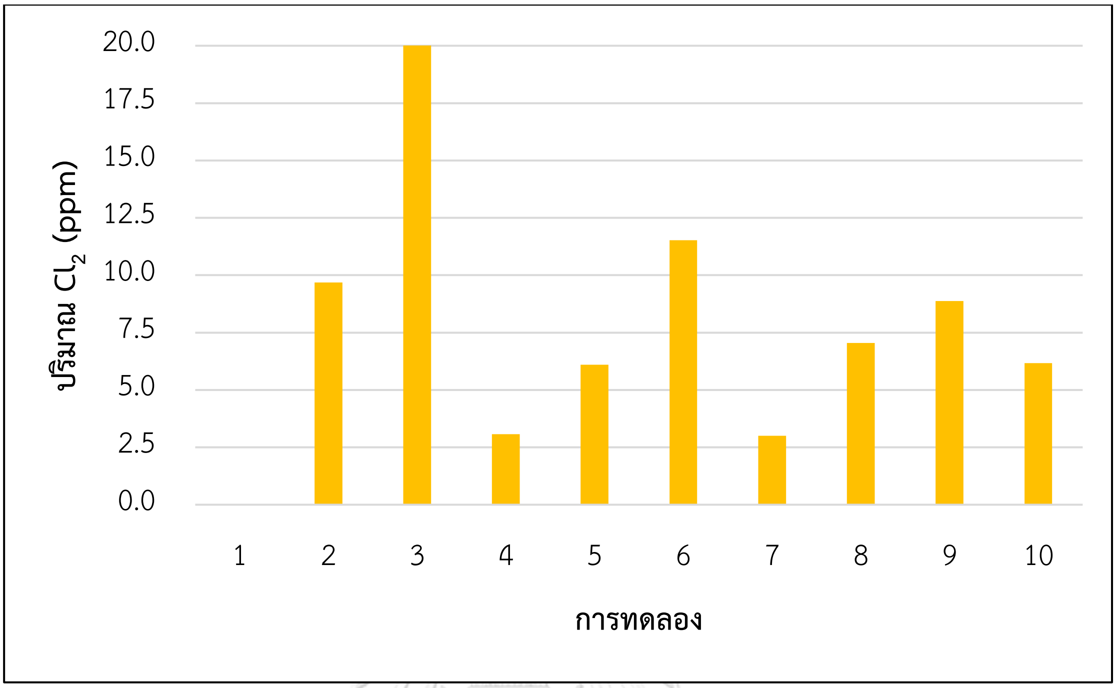
*ตารางที่ 4-10 ผล ANOVA ของปริมาณ NO*

| ANOVA Table | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Source | Sum of Squares | df | Mean Square | F-value | p-value | Conclusion |
| Linear Mixture | 88447.64 | 2 | 44223.82 | 76.77 | 88447.64 | significant |
| Residual | 4032.18 | 7 | 576.03 | | 4032.18 | |
| Cor Total | 92479.82 | 9 | | | 92479.82 | |

| Component Effects (Cox) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Component | Gradient in Reals | Component Effect | Gradient Std Error | Approx t for $H_0$ Gradient=0 | Prob > \|t\| | Conclusion |
| A-Coal | 296.38 | 296.38 | 24.08 | 12.31 | < 0.0001 | significant |
| B-Woodchips | -118.30 | -118.30 | 24.08 | -4.91 | 0.0017 | significant |
| C-Bark | -178.09 | -178.09 | 24.08 | -7.40 | 0.0001 | significant |

หมายเหตุ p-values น้อยกว่า 0.0500 แสดงว่าตัวแปรต้นให้ผลที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

4.2.5 ปริมาณ $Cl_2$




*รูปที่ 4-11 ปริมาณ $Cl_2$ ของแบบจำลอง*

จากรูปที่ 4-11 พบว่าการทดลองที่มีถ่านหินในสัดส่วนที่สูงจะทำให้เกิด $Cl_2$ ที่น้อย ซึ่งเห็นได้ชัดเจนในการทดลองที่ 1 ที่ใช้เพียงถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงจะไม่เกิด $Cl_2$ ในเตาเผา เนื่องจากในงานวิจัยกำหนดให้ถ่านหินไม่มีองค์ประกอบธาตุคลอรีนตามผลวิเคราะห์ในตารางที่ 3-2 ส่วนการทดลองที่มีชีวมวลจะเกิด $Cl_2$ ซึ่งสอดคล้องกับองค์ประกอบธาตุคลอรีน โดยเปลือกไม้มีธาตุคลอรีนมากกว่าไม้สับทำให้เกิด $Cl_2$ ปริมาณที่สูงกว่า [30] [31]

พิจารณาอิทธิพลของชนิดเชื้อเพลิงจากตารางที่ 4-11 พบว่าชนิดเชื้อเพลิงมีผลต่อปริมาณ $Cl_2$ อย่างมีนัยสำคัญ โดยถ่านหินจะมีผลเชิงบวกทำให้ปริมาณ $Cl_2$ เพิ่มขึ้น และเปลือกไม้มีผลเชิงลบทำให้ปริมาณ $Cl_2$ ลดลง ส่วนไม้สับไม่มีผลต่อปริมาณ $Cl_2$ อย่างมีนัยสำคัญ

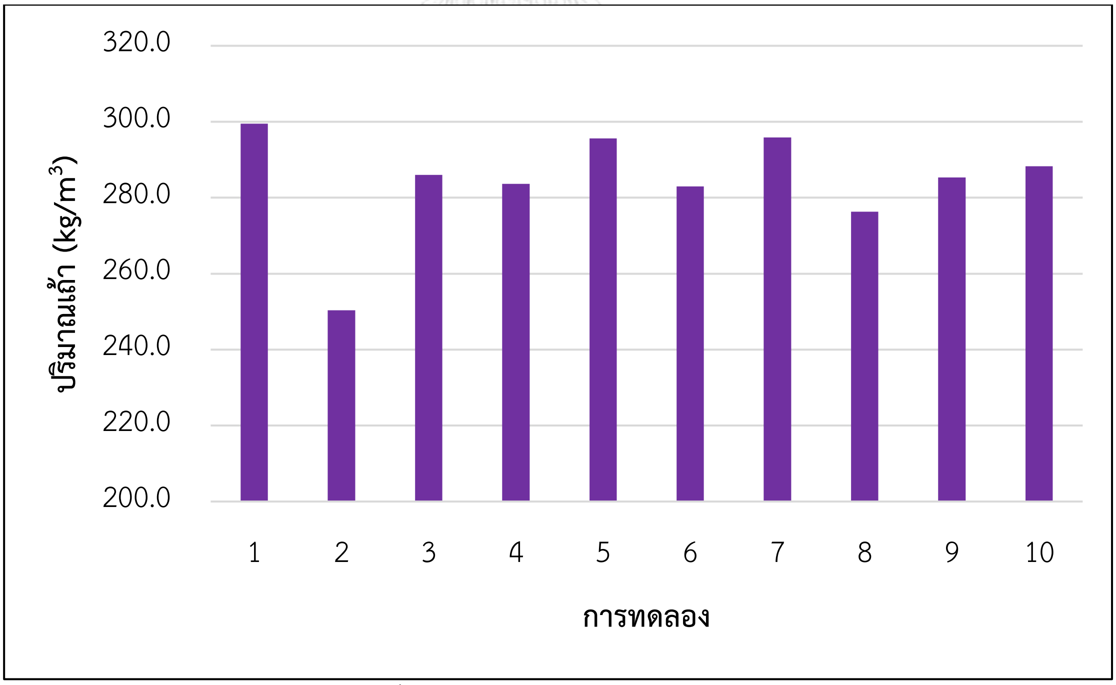
*ตารางที่ 4-11 ผล ANOVA ของปริมาณ $Cl_2$*

| ANOVA Table | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Source | Sum of Squares | df | Mean Square | F-value | p-value | Conclusion |
| Linear Mixture | 246.56 | 2 | 123.28 | 26.78 | 0.0005 | significant |
| Residual | 32.22 | 7 | 4.60 | | | |
| Cor Total | 278.78 | 9 | | | | |

| Component Effects (Cox) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Component | Gradient in Reals | Component Effect | Gradient Std Error | Approx t for $H_0$ Gradient=0 | Prob > \|t\| | Conclusion |
| A-Coal | -13.91 | -13.91 | 2.15 | -6.46 | 0.0003 | significant |
| B-Woodchips | 0.5466 | 0.5466 | 2.15 | 0.2539 | 0.8068 | |
| C-Bark | 13.36 | 13.36 | 2.15 | 6.21 | 0.0004 | significant |

หมายเหตุ p-values น้อยกว่า 0.0500 แสดงว่าตัวแปรต้นให้ผลที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

4.2.6 ปริมาณเถ้า




*รูปที่ 4-12 ปริมาณเถ้าของแบบจำลอง*

จากรูปที่ 4-12 จะเป็นการแสดงปริมาณเถ้าบริเวณทางออกของเตาเผา (Outlet) เท่านั้น ทำให้ปริมาณเถ้าที่แสดงคือ เถ้าลอย (Fly ash) ส่วนเถ้าหนัก (Bottom ash) ไม่ได้นำมาคิด [32] โดยผลปริมาณเถ้าของแบบจำลองเรียงลำดับจากมากไปน้อย คือ ถ่านหิน เปลือกไม้ และไม้สับ ซึ่งสอดคล้องกับผลปริมาณเถ้าจากการวิเคราะห์โดยประมาณของเชื้อเพลิงในตารางที่ 3-2 ที่ผ่านมา [31] และการพิจารณาอิทธิพลของชนิดเชื้อเพลิงดังตารางที่ 4-12 พบว่าชนิดเชื้อเพลิงมีผลต่อปริมาณเถ้าอย่างมีนัยสำคัญ โดยเป็นผลมาจากการใช้เชื้อเพลิงผสมเท่านั้น

*ตารางที่ 4-12 ผล ANOVA ของปริมาณเถ้า*

| Source | Sum of Squares | df | Mean Square | F-value | p-value | Conclusion |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Linear Mixture | 1501.38 | 2 | 750.69 | 112.16 | 0.0003 | significant |
| AB | 54.93 | 1 | 54.93 | 8.21 | 0.0457 | |
| AC | 1.83 | 1 | 1.83 | 0.2740 | 0.6283 | |
| BC | 146.49 | 1 | 146.49 | 21.89 | 0.0095 | |
| Residual | 26.77 | 4 | 6.69 | | | |
| Cor Total | 1730.59 | 9 | | | | |

หมายเหตุ p-values น้อยกว่า 0.0500 แสดงว่าตัวแปรต้นให้ผลที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

**4.3 ผลการศึกษาอัตราการป้อนเชื้อเพลิง**

ผลการศึกษาอัตราการป้อนเชื้อเพลิงแสดงดังตารางที่ 4-13 และ 4-14 ซึ่งพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนเชื้อเพลิง (การทดลองที่ 11) จะทำให้อุณหภูมิภายในเตาและฟลักซ์ความร้อนเพิ่มขึ้น และปล่อยแก๊สมลพิษและปริมาณเถ้าจะเพิ่มขึ้นด้วย ในทางตรงกันข้ามเมื่อลดอัตราการป้อนเชื้อเพลิง (การทดลองที่ 12) จะทำอุณหภูมิภายในเตาและฟลักซ์ความร้อนลดลง เช่นเดียวกับการลดลงของแก๊สมลพิษและปริมาณเถ้า ทั้งนี้ผลของตัวแปรตามทั้ง 2 การทดลองเกิดจากปริมาณเชื้อเพลิงที่เปลี่ยนไปทำให้องค์ประกอบต่าง ๆ ในห้องเผาไหม้เปลี่ยนไปจากเดิม ซึ่งปริมาณเชื้อเพลิงมีผลโดยตรงกับการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ในเตาเผา

*ตารางที่ 4-13 ผลอุณหภูมิและฟลักซ์ความร้อนของการศึกษาอัตราการป้อนเชื้อเพลิง*

| การทดลอง | อัตราการป้อนเชื้อเพลิง (ton/day) | อุณหภูมิ (°C) | | | | ฟลักซ์ความร้อน ($W/m^2$) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Overall | Bed | Freeboard | Outlet | |
| Base case | 1,941 | 912.8 | 900.3 | 926.2 | 938.5 | 2628 |
| 11 | 3,000 | 999.1 | 998.8 | 1000.7 | 1003.0 | 3122 |
| 12 | 1,000 | 868.3 | 862.6 | 866.7 | 873.1 | 2234 |

*ตารางที่ 4-14 ผลสารมลพิษของของการศึกษาอัตราการป้อนเชื้อเพลิง*

| การทดลอง | อัตราการป้อนเชื้อเพลิง (ton/day) | แก๊สมลพิษ | | | | | Ash ($kg/m^3$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $CO_2$ (%) | CO (ppm) | NO (ppm) | $SO_2$ (ppm) | $Cl_2$ (ppm) | |
| Base case | 1,941 | 9.8 | 0.0060 | 139.7 | 75.0 | 3.8 | 287.6 |
| 11 | 3,000 | 18.7 | 0.0090 | 250.0 | 110.3 | 7.3 | 311.3 |
| 12 | 1,000 | 6.6 | 0.0058 | 38.0 | 21.3 | 0.9 | 266.0 |

การเพิ่มปริมาณเชื้อเพลิงทำให้เกิดการเผาไหม้ได้มากขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิภายในเตาและฟลักซ์ความร้อนเพิ่มขึ้น แต่ผลที่ตามมาคือการการปล่อยมลพิษที่มากขึ้นด้วย การลดปริมาณเชื้อเพลิงช่วยให้มลพิษลดลง ส่วนอุณหภูมิภายในเตาและฟลักซ์ความร้อนก็ลดลง [33] ดังตารางที่ 4-15 และ 4-16 ข้อควรคำนึงสำหรับในการใช้งานจริงจะต้องพิจารณาถึงกำลังการผลิตไอน้ำที่เกิดขึ้นด้วย

*ตารางที่ 4-15 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของอุณหภูมิและฟลักซ์ความร้อนเมื่อเทียบกับ Base case*

| การทดลอง | อัตราการป้อนเชื้อเพลิง (ton/day) | อุณหภูมิ (°C) | | | | ฟลักซ์ความร้อน ($W/m^2$) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Overall | Bed | Freeboard | Outlet | |
| 11 | 3,000 | 9.5 | 10.9 | 8.0 | 6.9 | 18.8 |
| 12 | 1,000 | 4.9 | 4.2 | 6.4 | 7.0 | 15.0 |

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

*ตารางที่ 4-16 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของสารมลพิษเมื่อเทียบกับ Base case*

| การทดลอง | อัตราการป้อนเชื้อเพลิง (ton/day) | แก๊สมลพิษ | | | | | Ash ($kg/m^3$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $CO_2$ (%) | CO (ppm) | NO (ppm) | $SO_2$ (ppm) | $Cl_2$ (ppm) | |
| 11 | 3,000 | 90.8 | 50.0 | 78.9 | 47.0 | 92.5 | 8.2 |
| 12 | 1,000 | 32.7 | 3.3 | 72.8 | 71.6 | 76.3 | 7.5 |

**4.4 ผลการสร้างแบบการทำนายผล**

4.4.1 ผลแบบการทำนายผลการทดลอง

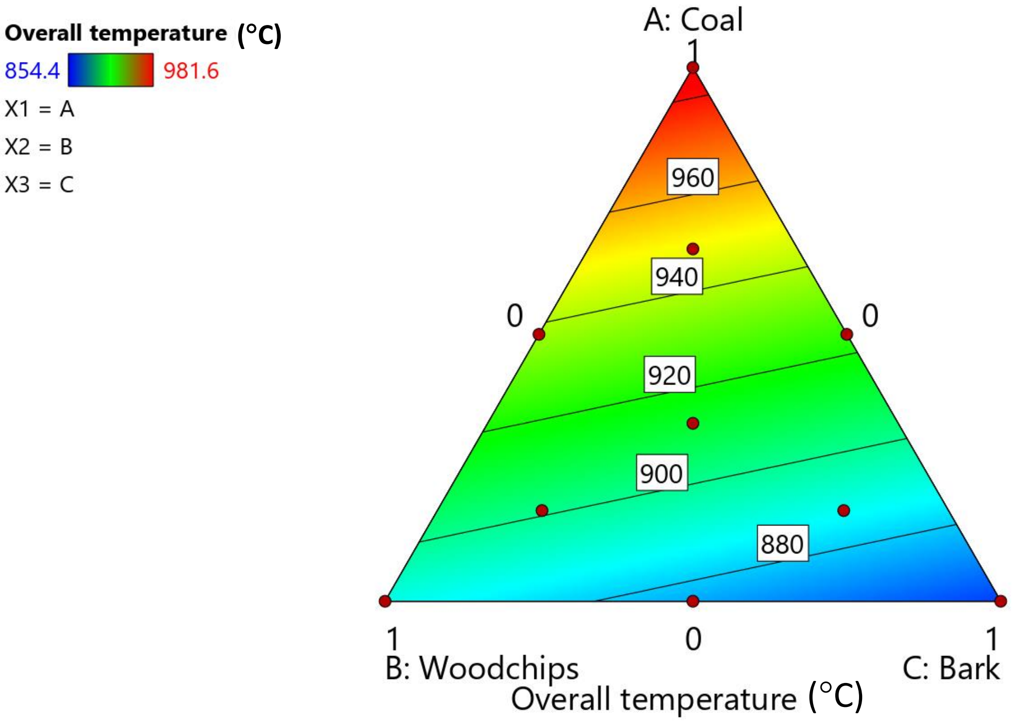
ในงานวิจัยได้นำเสนอแบบทำนายผลเพื่อให้ง่ายต่อการใช้งานใน 2 รูปแบบ คือ สมการ (ตารางที่ 4-17) และกราฟ (รูปที่ 4-13 ถึง 4-18) โดยสมการจะเป็นการแทนค่า A, B และ C ด้วยสัดส่วนของถ่านหิน ไม้สับ และเปลือกไม้ ตามลำดับ เพื่อหาค่าตัวแปรตามที่ต้องการ ได้สมการทั้งหมด 11 สมการ โดยจะมี 1 สมการต่อการทำนาย 1 ตัวแปรตาม ส่วนกราฟสำหรับทำนายผลจะเป็นลักษณะของกราฟสามแกน โดยแกนคือสัดส่วนของเชื้อเพลิง และมีค่าตัวแปรตามเป็นคอนทัวร์ที่บ่งบอกความสูงต่ำของข้อมูล ได้กราฟทั้งหมด 11 กราฟ โดยมี 1 กราฟต่อ 1 ตัวแปรตามเช่นกัน

*ตารางที่ 4-17 สมการทำนายผลตัวแปรตาม*

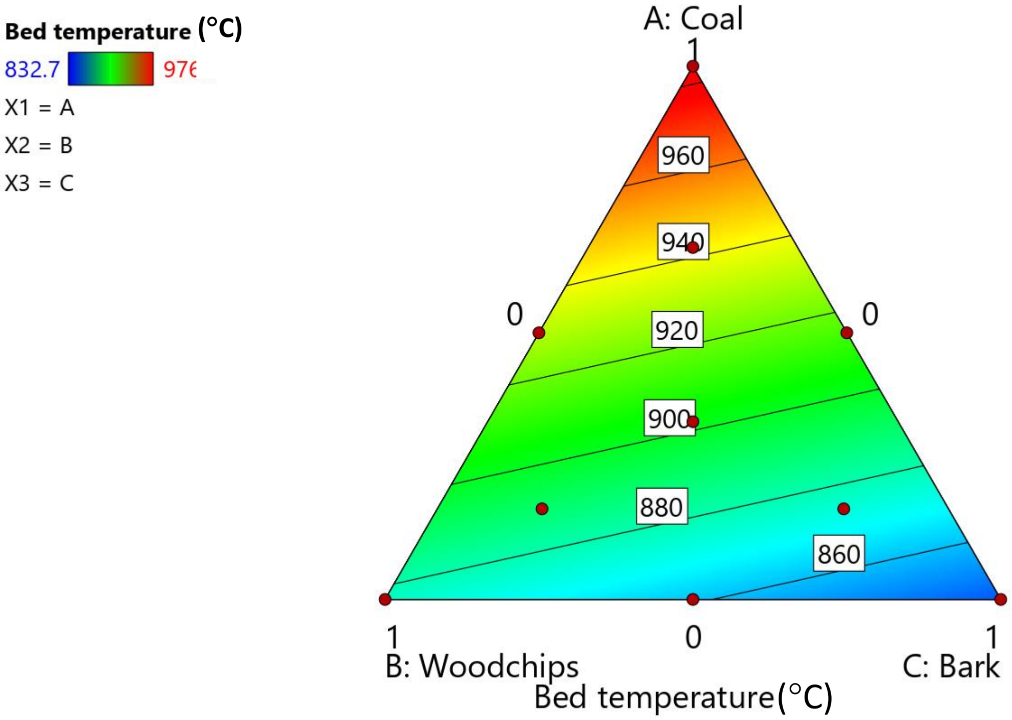
| ค่าทำนายผล | สมการ |
|---|---|
| Overall temperature (ºC) | 986.35A + 889.22B + 862.11C |
| Bed temperature (ºC) | 984.15A + 876.86B + 845.13C |
| Freeboard temperature (ºC) | 988.02A + 892.57B + 870.65C |
| Outlet temperature (ºC) | 993.16A + 911.84B + 880.41C |
| Heat flux ($W/m^2$) | 3346.51A + 2569.47B + 2270.41C |
| $CO_2$ (%) | 11.87A + 9.23B + 7.46C |
| CO (ppm) | 0.0089A + 0.0083B + 0.0080C - 0.0076AB - 0.0082AC - 0.0075BC |
| $SO_2$ (ppm) | 175.91A + 12.59B + 24.84C |
| NO (ppm) | 337.85A + 61.40B + 21.53C |
| $Cl_2$ (ppm) | -1.72A + 7.91B + 16.46C |
| Ash ($kg/m^3$) | 300.07A + 251.11B + 284.98C + 32.88AB + 6.01AC + 53.70BC |

หมายเหตุ A, B และ C คือ สัดส่วนของเชื้อเพลิง โดย A คือถ่านหิน, B คือไม้สับ และ C คือเปลือกไม้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

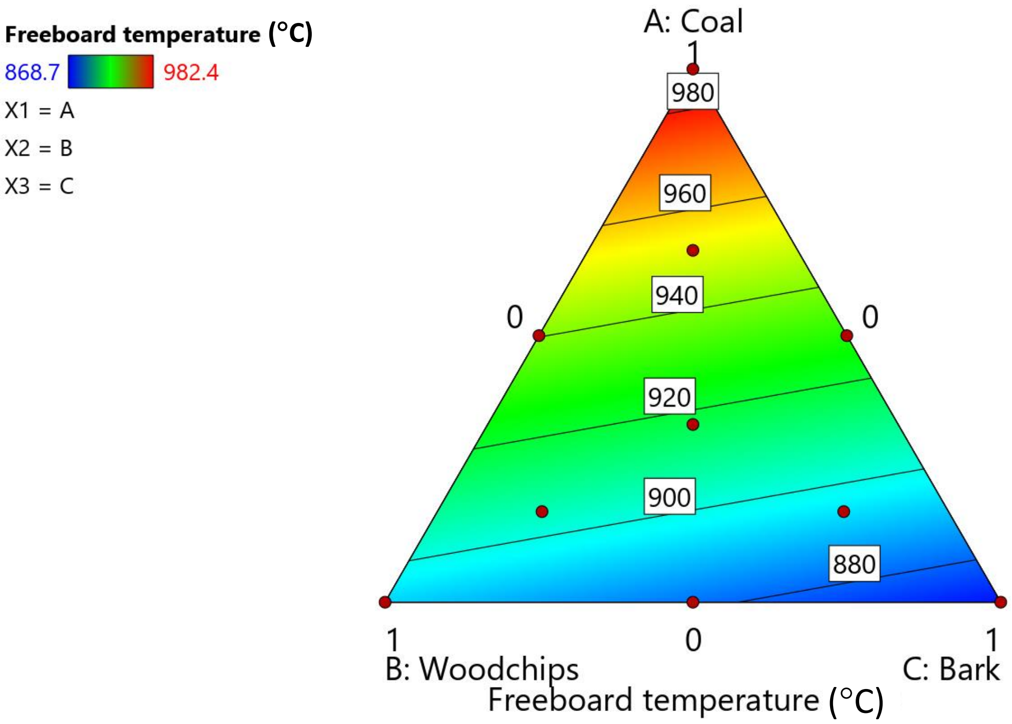



(1)

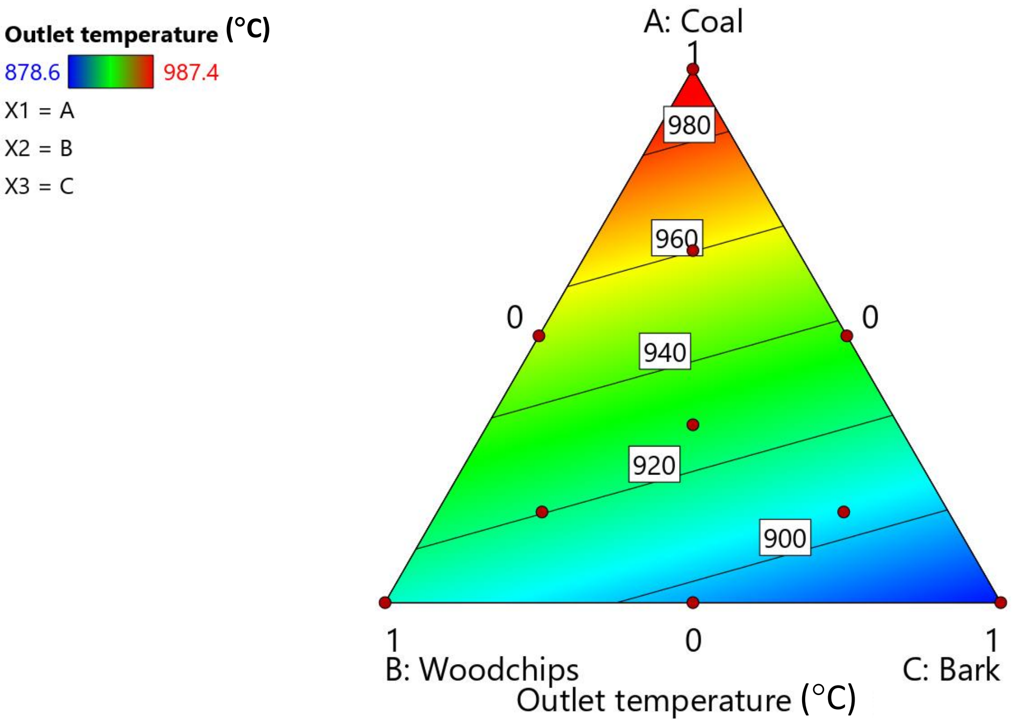



(2)

*รูปที่ 4-13 กราฟคอนทัวร์สามแกน ; (1) Overall temperature และ (2) Bed temperature*

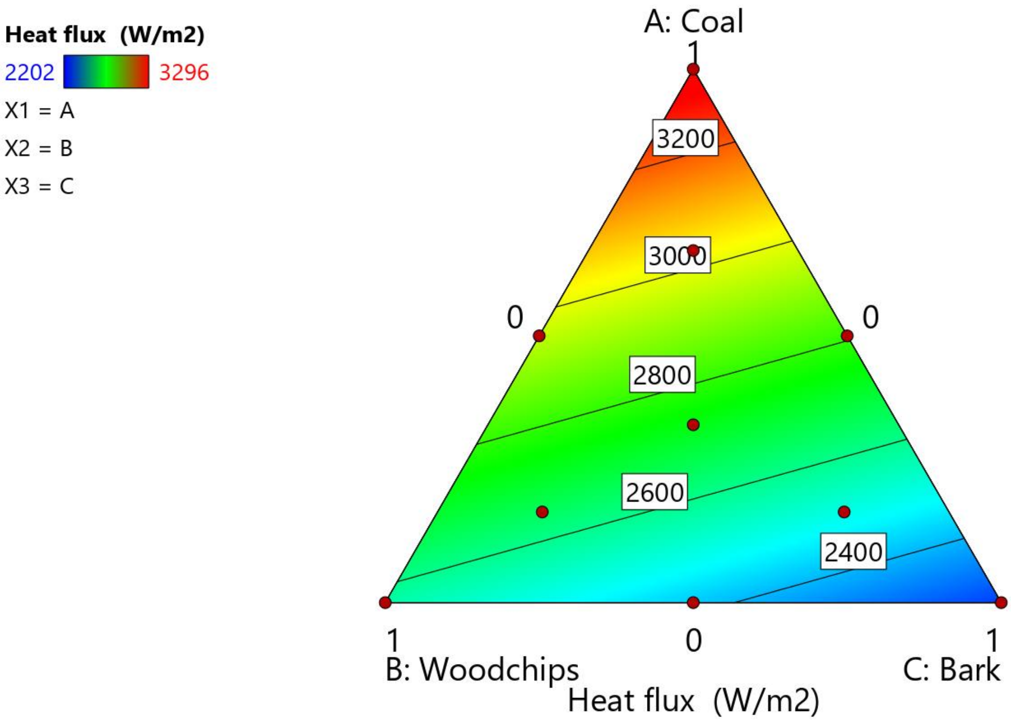



(1)

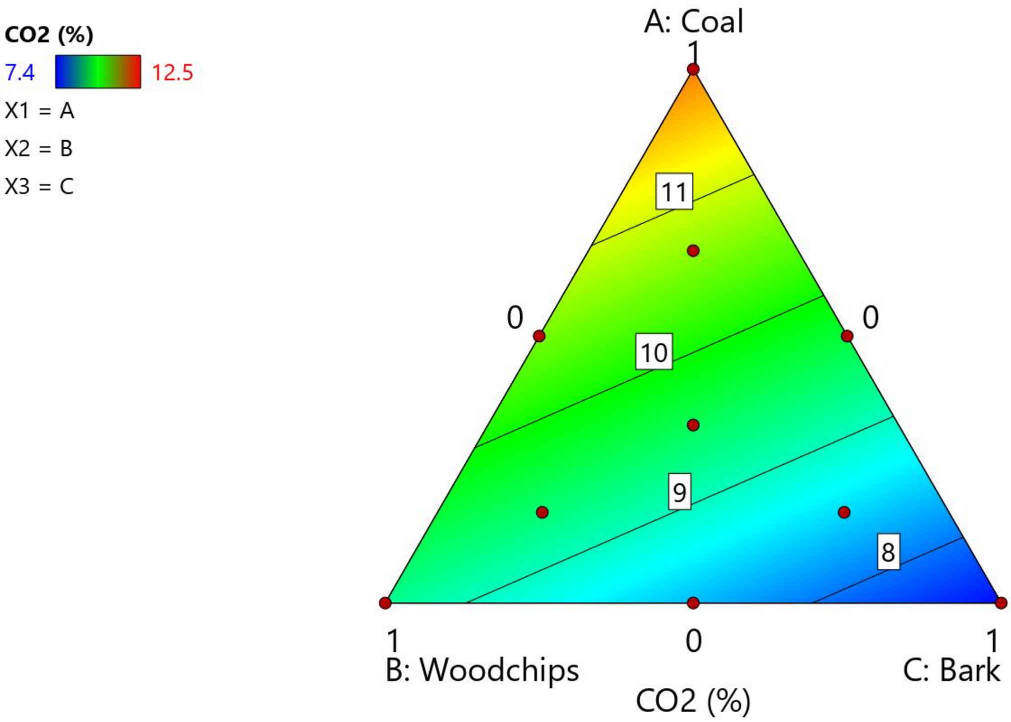



(2)

*รูปที่ 4-14 กราฟคอนทัวร์สามแกน ; (1) Freeboard temperature และ (2) Outlet temperature*

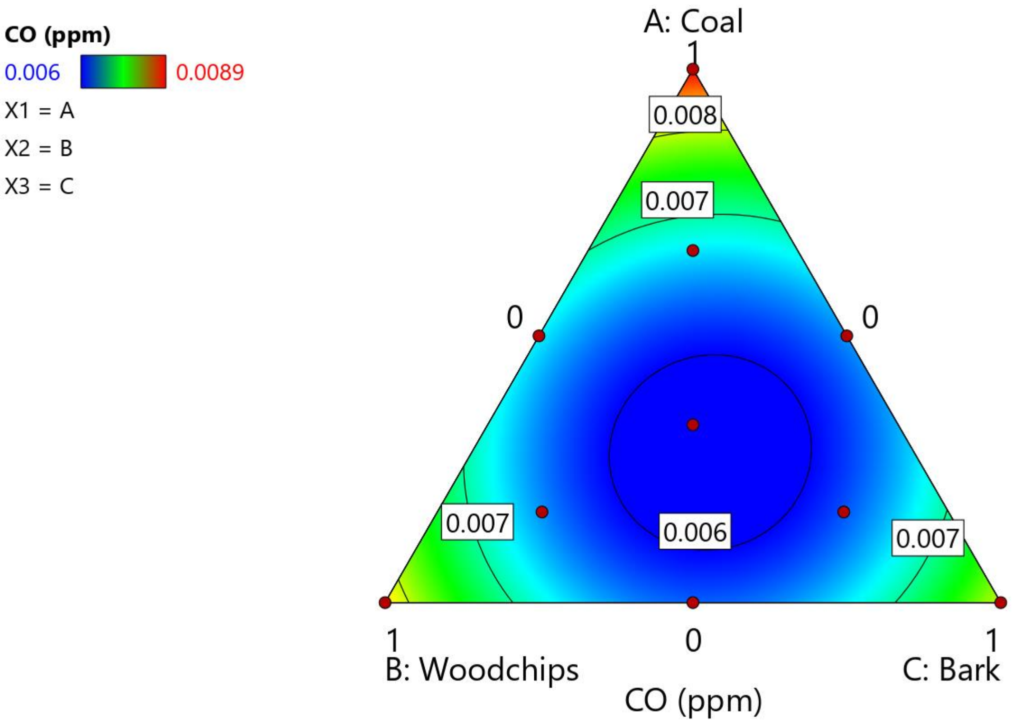



(1)

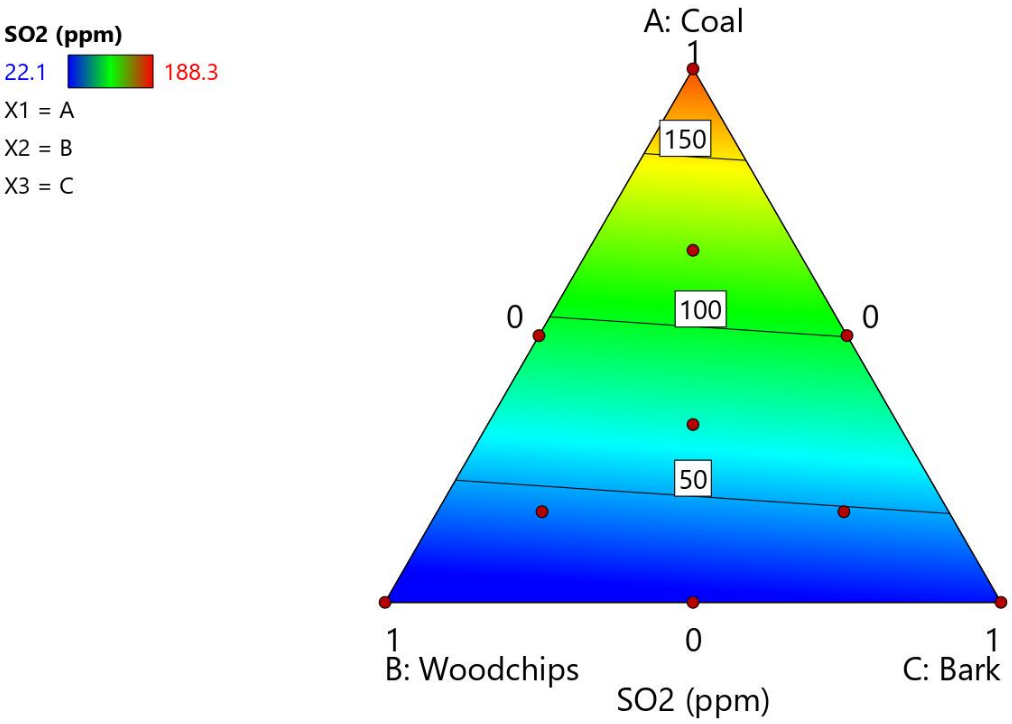



(2)

*รูปที่ 4-15 กราฟคอนทัวร์สามแกน ; (1) Heat flux และ (2)* $CO_2$

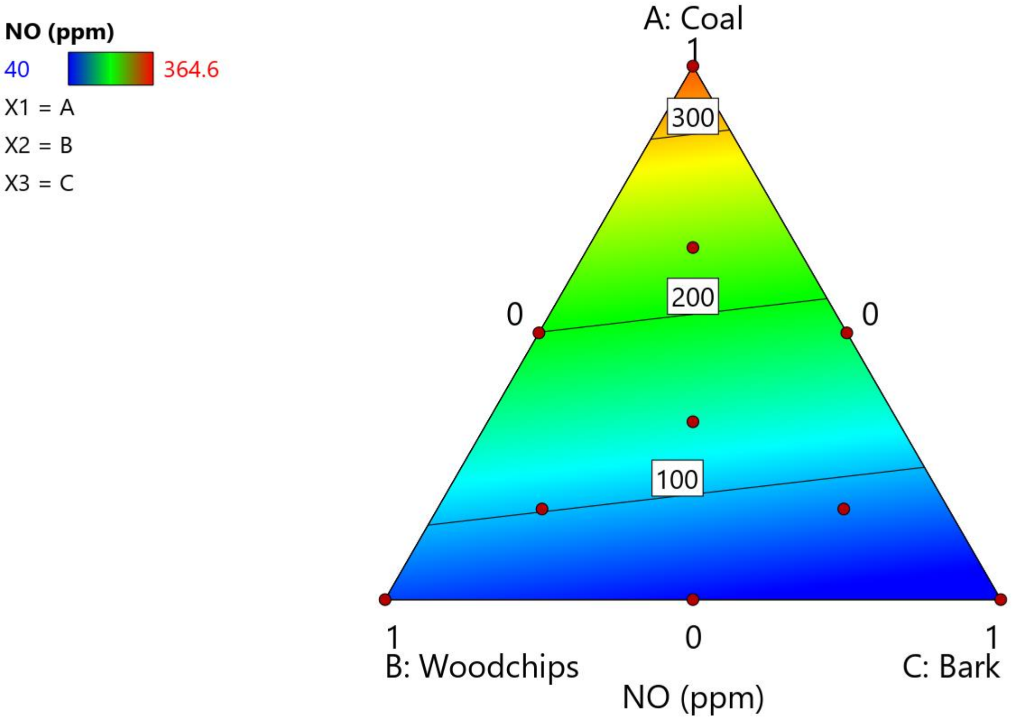



(1)

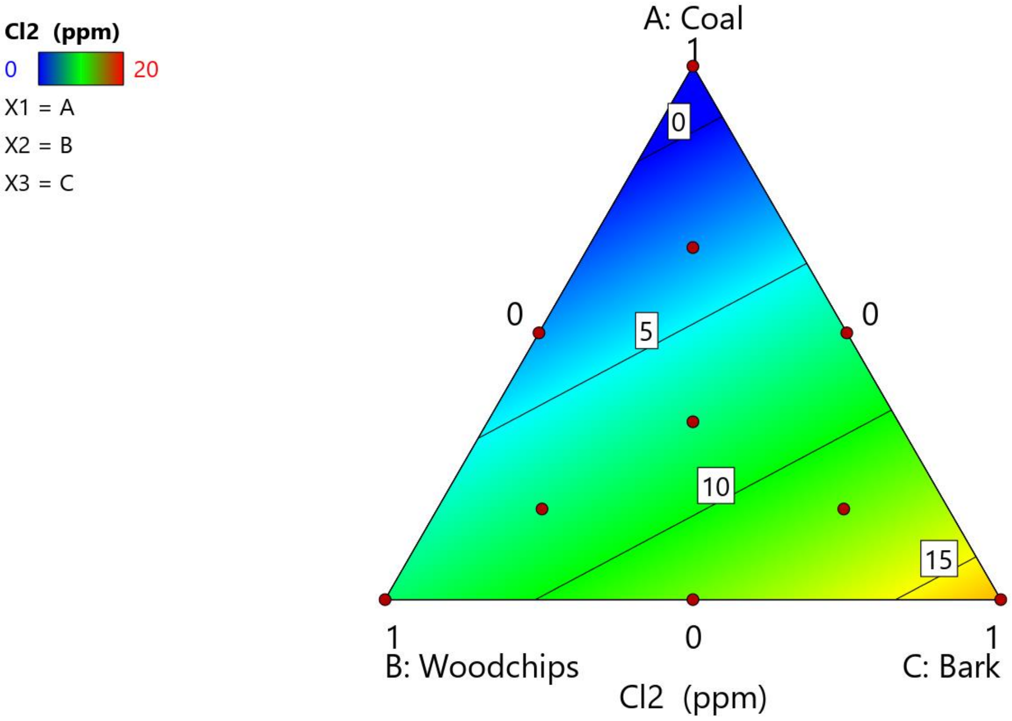



(2)

*รูปที่ 4-16 กราฟคอนทัวร์สามแกน ; (1) CO และ (2) $SO_2$*

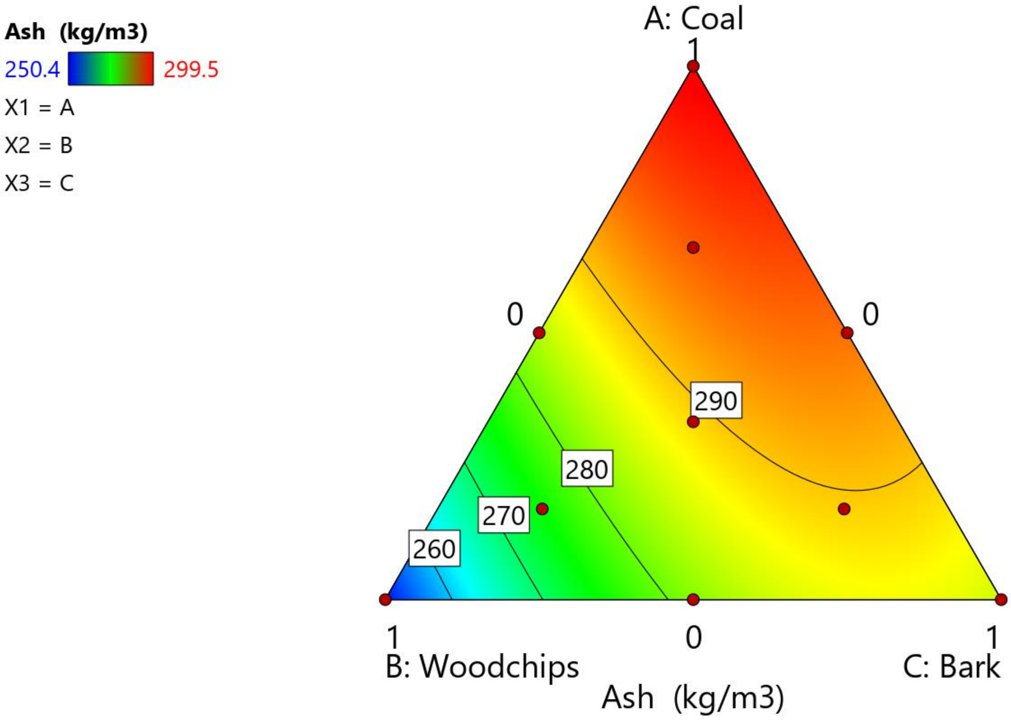



(1)




(2)

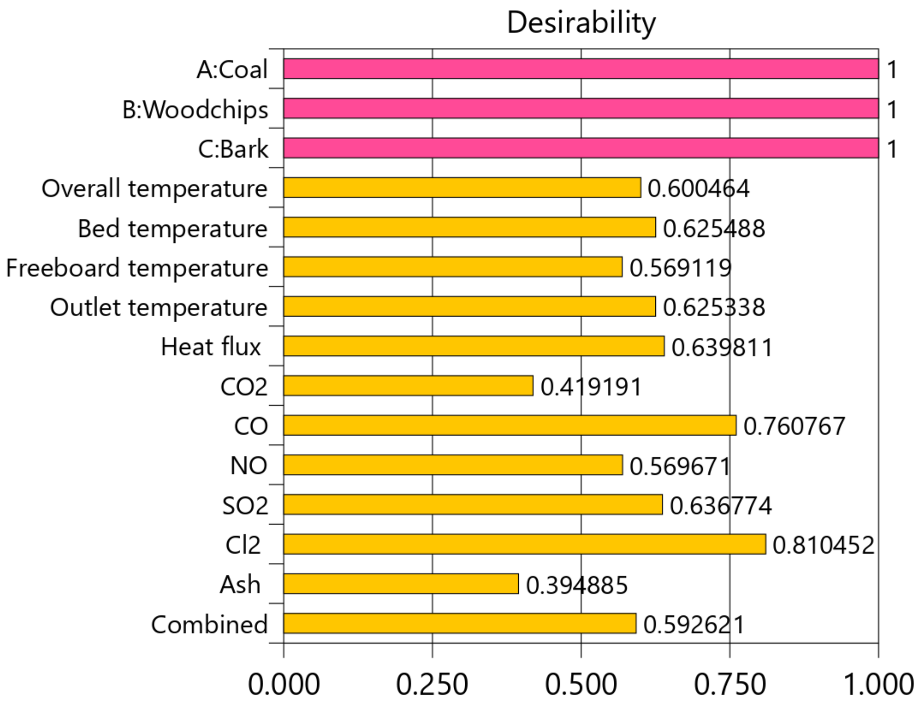
*รูปที่ 4-17 กราฟคอนทัวร์สามแกน ; (1) NO และ (2)* $Cl_2$



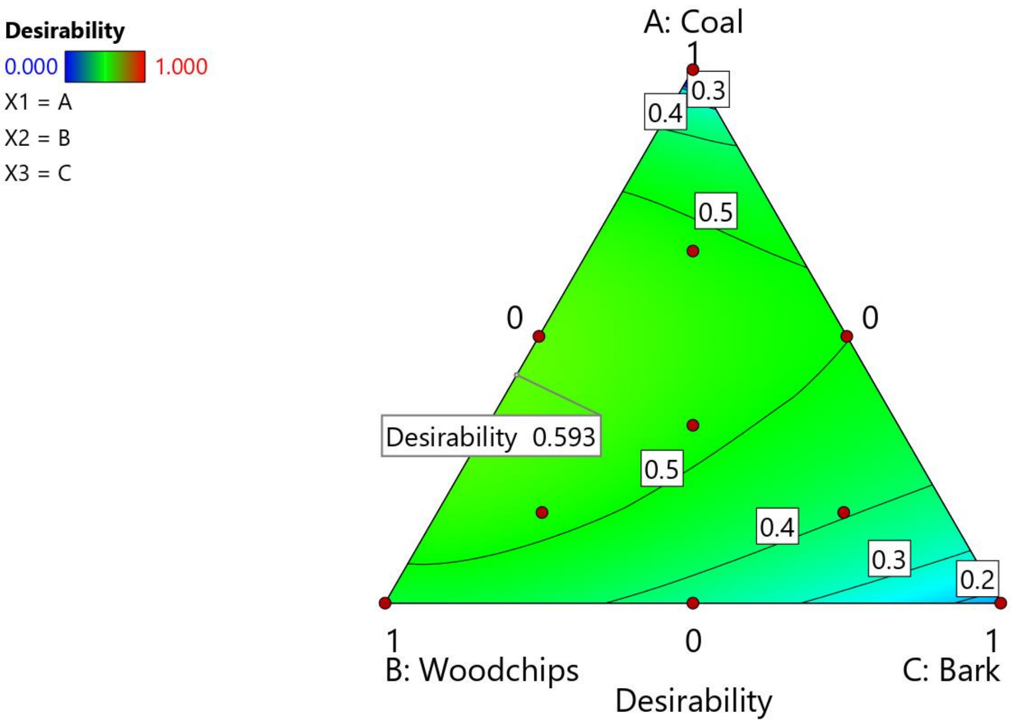

*รูปที่ 4-18 กราฟคอนทัวร์สามแกนของ Ash*

4.4.2 ผลกราฟทำนายผลเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ของหม้อไอน้ำ

จากการพิจารณาค่าเป้าหมายของตัวแปรตามจะได้ค่า Desirability ของตัวแปรดังรูปที่ 4-19 โดยมีผลรวมของค่า Desirability เท่ากับ 0.593 แล้วได้กราฟคอนทัวร์ดังรูปที่ 4-20 ซึ่งจุด Desirability บนกราฟคือจุดที่ควรเลือกชนิดและสัดส่วนที่ทำให้การคำนวณผลเป็นไปตามที่ตั้งเป้าหมายไว้ โดยจุดดังกล่าวจะมีสัดส่วนของเชื้อเพลิงคือ ถ่านหินเท่ากับ 0.43 และไม้สับเท่ากับ 0.57 และจะได้ผลตัวแปรตามดังตารางที่ 4-18 และเมื่อนำค่าสัดส่วนของเชื้อเพลิงใส่ในแบบจำลอง CFD จะได้ผลตัวแปรตามดังตารางที่ 4-18 ซึ่งผลอุณหภูมิ ฟลักซ์ความร้อน และปริมาณเถ้าที่ได้จากแบบจำลอง CFD มีค่าใกล้เคียงกับผลจากกราฟ Desirability ส่วนแก๊สมลพิษมีความแตกต่างกันมากกว่า เนื่องจากมีค่าของตัวแปรค่อนข้างน้อย อย่างไรก็ตามจะได้ภาวะที่เหมาะสมในการคำนวณ




*รูปที่ 4-19 ค่า Desirability ของตัวแปร*




*รูปที่ 4-20 กราฟ Desirability เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ของหม้อไอน้ำ*

*ตารางที่ 4-18 ผลตัวแปรตามเนื่องมาจากค่า Desirability และแบบจำลอง CFD*

| ตัวแปรตาม | กราฟ Desirability | แบบจำลอง CFD | % Error |
|---|---|---|---|
| Overall temperature (ºC) | 930.8 | 926.9 | 0.4 |
| Bed temperature (ºC) | 922.8 | 924.3 | -0.2 |
| Freeboard temperature (ºC) | 933.4 | 928.8 | 0.5 |
| Outlet temperature (ºC) | 946.6 | 931.5 | 1.6 |
| Heat flux (W/m$^2$) | 2902 | 2930 | -1.0 |
| $CO_2$ (%) | 10.4 | 9.0 | 13.1 |
| CO (ppm) | 0.0070 | 0.0081 | -15.7 |
| NO (ppm) | 179.7 | 154.0 | 14.3 |
| $SO_2$ (ppm) | 82.5 | 66.0 | 20.0 |
| $Cl_2$ (ppm) | 3.8 | 2.5 | 34.1 |
| Ash (kg/m$^3$) | 280.1 | 268.0 | 4.3 |

**4.5 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล**

4.5.1 ผลทางด้านสิ่งแวดล้อม

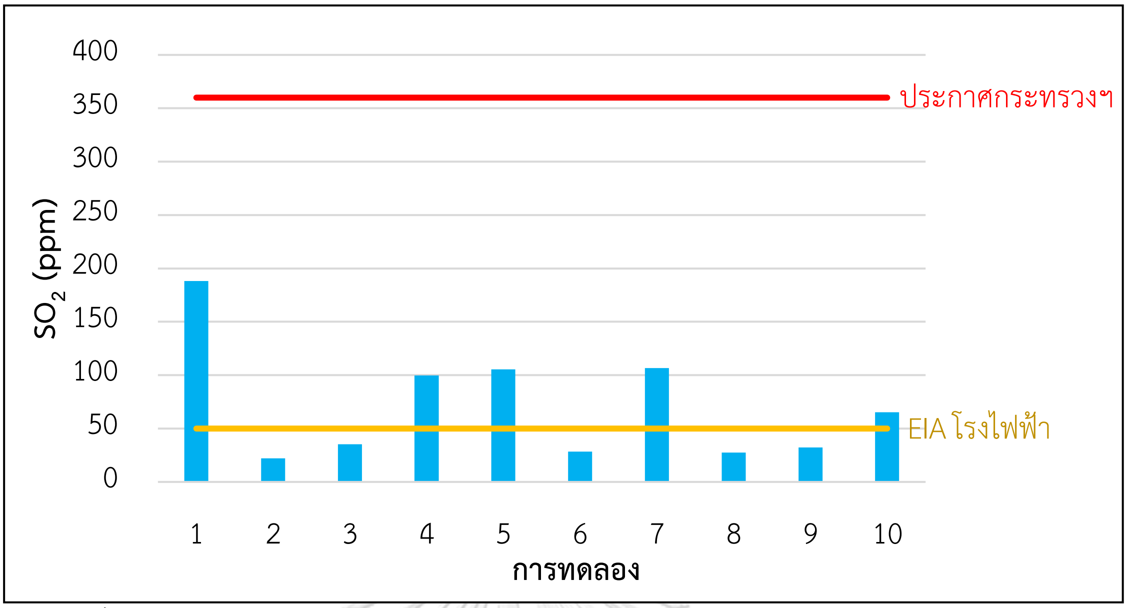
แบบจำลองสามารถรายงานค่าแก๊สมลพิษที่เป็นข้อกำหนดของการปล่อยอากาศเสียจากโรงไฟฟ้า ได้แก่ $SO_2$ และ NO ซึ่งได้เปรียบเทียบผลการทดลองกับข้อกำหนดจากประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมและข้อกำหนด EIA โรงไฟฟ้า ได้ผลแสดงตามรูปที่ 4-21 และ 4-22

ปริมาณ $SO_2$ ของการทดลองไม่เกินข้อกำหนดจากประกาศกระทรวงฯ แต่เมื่อเปรียบเทียบกับข้อกำหนด EIA ของโรงไฟฟ้าจะพบว่าการทดลองที่มีถ่านหินจะทำให้เกิดแก๊ส $SO_2$ ที่มีปริมาณเกินกว่าข้อกำหนด แต่ถ้าหากมีชีวมวลในสัดส่วนที่สูงจะทำให้มีปริมาณ $SO_2$ ต่ำกว่าข้อกำหนดดังกล่าว

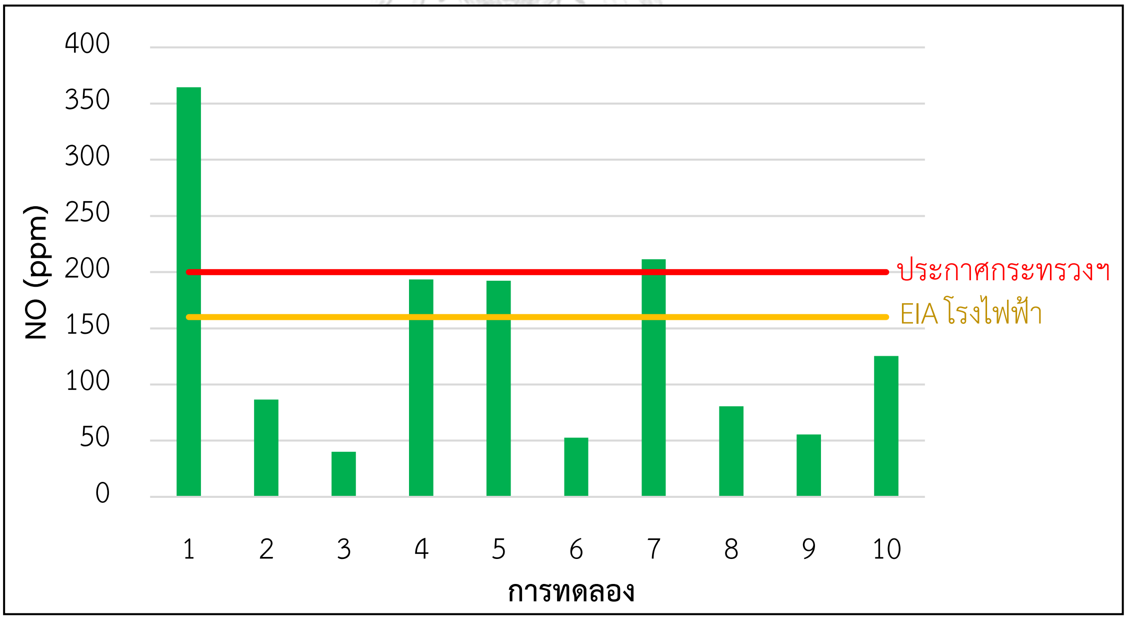
ปริมาณ NO ของการทดลองที่มีถ่านหินในสัดส่วนที่สูงจะทำให้มีปริมาณ NO ที่เกินกว่าข้อกำหนด และการเพิ่มชีวมวลในสัดส่วนที่สูงมากกว่า 50% จะทำให้ปริมาณ NO ต่ำกว่าข้อกำหนด

เพราะฉะนั้นการใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงจะส่งผลกระทบเชิงลบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่าการใช้ถ่านหิน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY




*รูปที่ 4-21 ปริมาณ $SO_2$ ของการทดลองเทียบกับข้อกำหนดจากประกาศกระทรวงฯและ EIA โรงไฟฟ้า*




*รูปที่ 4-22 ปริมาณ NO ของการทดลองเทียบกับข้อกำหนดจากประกาศกระทรวงฯและ EIA โรงไฟฟ้า*

4.5.2 ผลทางด้านเศรษฐศาสตร์

จากการคำนวณต้นทุนเชื้อเพลิงตามหัวข้อ 3.2.5.2 จะได้ต้นทุนเชื้อเพลิงของแต่ละการทดลองแสดงดังตารางที่ 4-19

*ตารางที่ 4-19 ต้นทุนเชื้อเพลิงของการทดลอง*

| การทดลอง | ปริมาณเชื้อเพลิง (ton/day) | | | ต้นทุนเชื้อเพลิง (MB/ton) | | | %ความแตกต่างของต้นทุนเชื้อเพลิง |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | ถ่านหิน | ไม้สับ | เปลือกไม้ | ต่อ 1 วัน | ต่อ 1 เดือน | ต่อ 1 ปี | |
| 1 | 1941.0 | 0.0 | 0.0 | 6.8 | 200 | 2500 | - |
| 2 | 0.0 | 1941.0 | 0.0 | 1.8 | 53 | 640 | 74.1 |
| 3 | 0.0 | 0.0 | 1941.0 | 1.3 | 40 | 480 | 80.4 |
| 4 | 970.5 | 970.5 | 0.0 | 4.3 | 130 | 1500 | 37.1 |
| 5 | 970.5 | 0.0 | 970.5 | 4.1 | 120 | 1500 | 40.2 |
| 6 | 0.0 | 970.5 | 970.5 | 1.6 | 47 | 560 | 77.2 |
| 7 | 1281.1 | 330.0 | 330.0 | 5 | 150 | 1800 | 26.3 |
| 8 | 330.0 | 1281.1 | 330.0 | 2.6 | 77 | 920 | 62.6 |
| 9 | 330.0 | 330.0 | 1281.1 | 2.3 | 70 | 840 | 65.7 |
| 10 | 640.5 | 0.1 | 0.1 | 2.2 | 67 | 810 | 67.0 |

หมายเหตุ 1) MB คือ 1 ล้านบาท (Million Baht)

2) ทุกการทดลองได้พลังงานมากกว่าข้อกำหนดขั้นต่ำที่ต้องการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4-20 สามารถเรียงลำดับต้นทุนเชื้อเพลิงจากสูงไปต่ำ คือ ถ่านหิน ไม้สับและเปลือกไม้ โดยการใช้ถ่านหินในปริมาณที่สูงจะทำให้ต้นทุนเชื้อเพลิงต่อ 1 วันค่อนข้างสูงและจะสูงกว่าชีวมวลอย่างเห็นได้ชัดเมื่อมีคิดต้นทุนในระยะยาวตั้งแต่ 1 เดือนจนถึง 1 ปี และเมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของต้นทุนเชื้อเพลิงเทียบกับการใช้ถ่านหินเพียงอย่างเดียว (การทดลองที่ 1) จะเห็นทุกการทดลองมีเปอร์เซ็นต์การลดลงอย่างชัดเจน โดยการใช้เปลือกไม้มาทดแทนถ่านหินจะสามารถลดต้นทุนของเชื้อเพลิงได้ถึง 80.4 % เพราะฉะนั้นการเลือกใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงจะมีความคุ้มค่าอันเนื่องมาจากต้นทุนเชื้อเพลิงที่ลดลง

# บทที่ 5
# สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมในห้องเผาไหม้ของหม้อไอน้ำฟลูอิไดซ์เบดหมุนเวียนโดยการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) ตัวแปรสำคัญคือการใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงผสมกับถ่านหิน ชีวมวลที่ศึกษาในครั้งนี้คือไม้สับและเปลือกไม้ แบบจำลอง CFD ประกอบด้วยแบบจำลองการไหลแบบหลายวัฏภาคของออยเลอร์ แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนของ k-epsilon และแบบจำลองการเผาไหม้ ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองแสดงให้เห็นว่าข้อมูลแบบจำลองมีความสอดคล้องกับข้อมูลจริงของโรงไฟฟ้าซึ่งอาจเป็นฝาแฝดดิจิทัลของหม้อไอน้ำที่ศึกษา จากนั้นจะใช้แบบจำลอง CFD เพื่อทำนายอุณหภูมิภายในเตา ฟลักซ์ความร้อน ปริมาณเถ้าและปริมาณของแก๊สมลพิษ ได้แก่ CO, $CO_2$, NO, $SO_2$ และ $Cl_2$ ด้วยการกำหนดชนิดและสัดส่วนของเชื้อเพลิงต่างๆผ่านการออกแบบการทดลองแบบผสมซิมเพล็กซ์เซนทรอยด์ได้ 10 การทดลอง ผลการทดลองพบว่าเชื้อเพลิงถ่านหินจะให้อุณหภูมิภายในเตาและฟลักซ์ความร้อนสูงสุด รองลงมาคือไม้สับและเปลือกไม้ ในทางกลับกันปริมาณของแก๊สมลพิษและปริมาณเถ้าของชีวมวลมีน้อยกว่าถ่านหิน นอกจากนี้ยังศึกษาการปรับอัตราการป้อนเชื้อเพลิง พบว่าการเพิ่มอัตราการป้อนเชื้อเพลิงสูงจะทำให้อุณหภูมิภายในเตาและฟลักซ์ความร้อนเพิ่มขึ้น แต่ผลที่ตามคือการเพิ่มของแก๊สมลพิษและปริมาณเถ้าที่มากกว่าวิธีการลดอัตราการป้อนเชื้อเพลิง โดยแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถทำนายผลของเชื้อเพลิงที่มีการป้อนหลายชนิดพร้อมกัน และมีความง่ายต่อการนำเข้าข้อมูลเพื่อป้อนในแบบจำลอง อีกทั้งแบบจำลองยังถูกพัฒนาให้สามารถทำนายผลได้ครอบคลุมข้อมูลที่จำเป็นต่อการนำไปใช้งานจริง

ผลการจำลอง CFD ถูกนำสร้างแบบทำนายผล 2 รูปแบบ คือ สมการและกราฟคอนทัวร์เพื่อให้ง่ายต่อการตัดสินใจเลือกชนิดและสัดส่วนของเชื้อเพลิงให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด จะเสมือนได้ฝาแฝดดิจิตอลของกระบวนการก่อนนำไปใช้งาน งานวิจัยนี้ได้เสนอกราฟทำนายผลเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ของหม้อไอน้ำ ซึ่งได้สัดส่วนของเชื้อเพลิงที่เหมาะสมคือ ถ่านหินเท่ากับ 0.43 และไม้สับเท่ากับ 0.57

นอกจากนี้ ผลการจำลอง CFD ยังถูกนำมาประเมินผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อมซึ่งพบว่าการใช้ถ่านหินในสัดส่วนที่สูงจะทำให้ปริมาณ NO และ $SO_2$ เกินข้อกำหนดด้านการปล่อยแก๊สมลพิษ ทั้งนี้การเลือกใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงจะช่วยลดปริมาณแก๊สมลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้ได้ ผลการจำลอง CFD ยังถูกประเมินทางด้านเศรษฐศาสตร์แล้วพบว่า การใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงแทน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ถ่านหินมีความคุ้มค่าต่อการผลิตมากกว่า เพราะสามารถลดต้นทุนเชื้อเพลิงได้มากถึง 80.4 % เชื้อเพลิงชีวมวลจึงเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์มากกว่าถ่านหิน

**ข้อเสนอแนะ**

แบบจำลอง CFD ที่พัฒนาในงานวิจัยนี้เป็นแบบจำลองเริ่มต้นที่ไม่อาจจะครอบคลุมการเกิดปฏิกิริยาเคมีทั้งหมดในห้องเผาไหม้ อย่างไรก็ตามเพื่อความถูกต้องแม่นยำจะต้องเพิ่มปฏิกิริยาของสารเคมีที่อาจจะเกิดขึ้นในห้องเผาไหม้ให้ครบถ้วน ประเด็นที่น่าสนใจอีกประการหนึ่งคือการพัฒนาแบบจำลองให้สามารถทำนายผลของเชื้อเพลิงที่มากกว่า 3 ชนิด เพื่อความหลากหลายและยืดหยุ่นต่อการนำแบบจำลองไปใช้งานจริง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

# บรรณานุกรม


1. Basu, P., *Circulating Fluidized Bed Boilers [electronic resource] : Design, Operation and Maintenance / by Prabir Basu*, in *Springer eBooks.* 2015, Springer International Publishing.
2. Miller, B.G. and D. Tillman, *Combustion engineering issues for solid fuel systems*. 2008: Academic Press.
3. White, W.M., W.H. Casey, and B. Marty, *Encyclopedia of geochemistry: a comprehensive reference source on the chemistry of the earth.* (No Title), 2018.
4. Tillman, D., D. Duong, and N.S. Harding, *Solid fuel blending: principles, practices, and problems*. 2012: Elsevier.
5. Rosendahl, L., *Biomass combustion science, technology and engineering*. 2013: Elsevier.
6. Tu, J., et al., *Computational fluid dynamics: a practical approach*. 2023: Elsevier.
7. Olichevis Halila, G.L., *A Numerical Study on Transitional Flows by Means of a Correlation-Based Transition Model (M.Eng. thesis, 2014, Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA)*. 2014.
8. Yoon, S., *Building digital twinning: Data, information, and models.* Journal of Building Engineering, 2023: p. 107021.
9. Molinaro, R., et al., *Embedding data analytics and CFD into the digital twin concept.* Computers & Fluids, 2021. **214**: p. 104759.
10. Xu, L., et al., *A comprehensive CFD combustion model for supercritical CFB boilers.* Particuology, 2019. **43**: p. 29-37.
11. Chang, J., et al., *CFD modeling of hydrodynamics, combustion and NOx emission in a tangentially fired pulverized-coal boiler at low load operating conditions.* Advanced Powder Technology, 2021. **32**(2): p. 290-303.
12. Centeno-González, F.O., et al., *CFD modeling of combustion of sugarcane bagasse in an industrial boiler.* Fuel, 2017. **193**: p. 31-38.
13. Shanmukharadhya, K., *Simulation and Experimental Analysis of Tangential Over*



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

*Fire Air System of an Industrial Boiler.* Journal Impact Factor (JIF), 2017. **2**: p. 31.

14. Manic, N., et al., *Application of different turbulence models for improving construction of small-scale boiler fired by solid fuel.* Thermal Science, 2017. **21**: p. S809-S823.
15. Pérez-Jeldres, R., et al., *A modeling approach to co-firing biomass/coal blends in pulverized coal utility boilers: Synergistic effects and emissions profiles.* Energy, 2017. **120**: p. 663-674.
16. Li, J., et al., *Co-firing based on biomass torrefaction in a pulverized coal boiler with aim of 100% fuel switching.* Applied Energy, 2012. **99**: p. 344-354.
17. Karampinis, E., et al., *Numerical investigation Greek lignite/cardoon co-firing in a tangentially fired furnace.* Applied Energy, 2012. **97**: p. 514-524.
18. Gungor, A., *Two-dimensional biomass combustion modeling of CFB.* Fuel, 2008. **87**(8-9): p. 1453-1468.
19. Xie, J., et al., *Simulation of combustion of municipal solid waste and coal in an industrial-scale circulating fluidized bed boiler.* Energy & fuels, 2017. **31**(12): p. 14248-14261.
20. Liu, Q., et al., *Three-dimensional simulation of the co-firing of coal and biomass in an oxy-fuel fluidized bed.* Powder Technology, 2020. **373**: p. 522-534.
21. *Mesh Quality | Mesh Visualization Tips | SimScale*. 2023; Available from: https://www.simscale.com/docs/simulation-setup/meshing/mesh-quality/.
22. Adam, N.M., et al., *Numerical Analysis for Solar Panel Subjected with an External Force to Overcome Adhesive Force in Desert Areas.* CFD Letters, 2020. **12**(9): p. 60-75.
23. Kang, P., et al., *Modeling and Optimization for Gas Distribution Patterns on Biomass Gasification Performance of a Bubbling Spout Fluidized Bed.* Energy & Fuels, 2020. **34**(2): p. 1750-1763.
24. Chen, Y., et al., *Preparation and performance of the ultra-high performance mortar based on simplex-centroid design method.* Journal of Materials Research and Technology, 2021. **15**: p. 3060-3077.
25. *Stat-Ease Optimization Overview Numerical Optimization*. 2023; Available from: https://www.statease.com/docs/v11/navigation/numerical-optimization/.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

26. Jacso, A., et al., *Bezier curve-based trochoidal tool path optimization using stochastic hill climbing algorithm.* Materials Today: Proceedings, 2023. **78**: p. 633-639.

27. Nowak, K. and S. Rabczak, *Co-combustion of biomass with coal in grate water boilers at low load boiler operation.* Energies, 2021. **14**(9): p. 2520.

28. *ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide - 13.2 Modeling Conductive and Convective Heat Transfer*. 2023; Available from: https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/node466.htm.

29. Křůmal, K., et al., *Comparison of emissions of gaseous and particulate pollutants from the combustion of biomass and coal in modern and old-type boilers used for residential heating in the Czech Republic, Central Europe.* Chemosphere, 2019. **229**: p. 51-59.

30. Islam, M., et al., *Thermal recycling of solid tire wastes for alternative liquid fuel: the first commercial step in Bangladesh.* Procedia engineering, 2013. **56**: p. 573-582.

31. Hariana, H., et al., *A comprehensive evaluation of co-firing biomass with coal and slagging-fouling tendency in pulverized coal-fired boilers Title Page (with AU credentials).* Ain Shams Eng. J, 2022.

32. Us Epa, O. *Coal Ash Basics*. [Overviews and Factsheets] 2023 2024-06-13; Available from: https://www.epa.gov/coalash/coal-ash-basics.

33. Fang, Q., et al., *Numerical simulation of multifuel combustion in a 200 MW tangentially fired utility boiler.* Energy & fuels, 2012. **26**(1): p. 313-323.

34. *ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide - Contents*. 2023; Available from: https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/node1.htm.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

# ภาคผนวก ก

# การคำนวณหาเลขดุลสมการ

ในปฏิกิริยาเคมี 1-3 ของตารางที่ 3-4 จะต้องมีการคำนวณหาเลขดุลสมการของสารผลิตภัณฑ์ โดยเปลี่ยนข้อมูลจากผลของการวิเคราะห์เชื้อเพลิงได้ดังตารางที่ ก-1

*ตารางที่ ก - 1 เลขดุลสมการของสารผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาเคมี 1-3*

| ลำดับ | เลขดุลสมการ | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $H_2O$ | $CH_4$ | $H_2$ | $CO_2$ | CO | $C_2H_6$ | $NH_3$ | $H_2S$ | $Cl_2$ | C | Ash |
| 1 | 1.997 | 0.315 | 0.680 | 0.039 | 0.749 | 0.021 | 0.062 | 0.012 | 0.000 | 2.339 | 0.149 |
| 2 | 2.037 | 0.275 | 1.194 | 0.429 | 0.801 | 0.019 | 0.021 | 0.001 | 0.001 | 1.031 | 0.059 |
| 3 | 3.467 | 0.158 | 0.537 | 0.227 | 0.446 | 0.011 | 0.009 | 0.001 | 0.002 | 0.599 | 0.115 |

**ตัวอย่างการคำนวณ**

ยกตัวอย่างจาก ปฏิกิริยาเคมี 2

Woodchips $\rightarrow$ $H_2O$ + $CH_4$ + $H_2$ + $CO_2$ + CO + $C_2H_6$ + $NH_3$ + $H_2S$ + $Cl_2$ + $C_{Woodchips}$ +Ash

ความชื้น ($H_2O$) สารระเหย ($CH_4$ ถึง $Cl_2$) คาร์บอนคงตัว ($C_{Woodchips}$) ปริมาณเถ้า (Ash)

กำหนดให้ Basis เชื้อเพลิง 100 g

1) หาเลขดุลสมการของ $H_2O$ จากข้อมูลไม้สับมี Moisture 36.67 % ได้ดังนี้

น้ำหนักของ $H_2O$ = 36.67 % x 100 g = 36.67 g

จำนวนโมล $H_2O$ = 36.67 g / 18 g/mol = 2.037 mol

เพราะฉะนั้น เลขดุลสมการของ $H_2O$ = จำนวนโมล $H_2O$ = 2.037

2) หาเลขดุลสมการของ $C_{Woodchips}$ จากข้อมูลไม้สับมี Fixed carbon 12.38 % ได้ดังนี้

น้ำหนักของ $C_{Woodchips}$ = 12.38 % x 100 g = 12.38 g

จำนวนโมล $C_{Woodchips}$ = 12.38 g / 12 g/mol = 1.031 mol

เพราะฉะนั้น เลขดุลสมการของ $C_{Woodchips}$ = จำนวนโมล $C_{Woodchips}$ = 1.031

3) หาเลขดุลสมการของ Ash จากข้อมูลไม้สับมี Ash 1.90 % ได้ดังนี้

น้ำหนักของ Ash = 1.90 % x 100 g = 1.90 g

จำนวนโมล Ash = 1.90 g / 32 g/mol = 0.059 mol

เพราะฉะนั้น เลขดุลสมการของ Ash = จำนวนโมล Ash = 0.059

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4) หาเลขดุลสมการของสารระเหย

จากตารางที่ 3-2 ไม้สับมีธาตุ C เท่ากับ 30.87 ซึ่งเป็นส่วนของถ่านคงตัวเท่ากับ 12.37 จะเหลือเป็นองค์ประกอบของสารระเหยเท่ากับ 18.50 เพราะฉะนั้นสารระเหยจะมีองค์ประกอบของธาตุต่างๆ ดังตารางที่ ก-2

*ตารางที่ ก - 2 องค์ประกอบของสารระเหย*

| **ธาตุ** | C | H | O | N | S | Cl |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **สัญลักษณ์โมล** | x | y | z | n | s | c |
| **ร้อยละโดยมวล (%)** | 18.50 | 3.66 | 26.52 | 0.29 | 0.03 | 0.07 |
| **น้ำหนัก (g)** | 18.50 | 3.66 | 26.52 | 0.29 | 0.03 | 0.07 |
| **มวลโมเลกุล (g/mol)** | 12 | 1 | 16 | 14 | 32 | 35.5 |
| **โมล (mol)** | 1.542 | 3.662 | 1.657 | 0.021 | 0.001 | 0.002 |

สารระเหยสามารถแบ่งเพื่อการคำนวณได้เป็น 2 ส่วน คือ

- แก๊สจำลอง (Psudo-gas) ได้แก่ $CH_4$ , $H_2$ , $CO_2$ , CO และ $C_2H_6$
- แก๊สมลพิษ ได้แก่ $NH_3$ , $H_2S$ และ $Cl_2$

สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$C_xH_yO_zN_nS_sCl_c = \underbrace{CH_4 + H_2 + CO_2 + CO + C_2H_6}_{\text{แก๊สจำลอง}} + \underbrace{NH_3 + H_2S + Cl_2}_{\text{แก๊ลมลพิษ}} \quad \text{(สมการ 3-1)}$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.1) หาเลขดุลสมการของแก๊สมลพิษ โดยกำหนดให้ N, S, Cl เปลี่ยนเป็นแก๊สในรูปของ $NH_3$ , $H_2S$ และ $Cl_2$ ตามลำดับ จากข้อมูลในตารางที่ ก-2 สามารถหาจำนวนโมลของ $NH_3$ , $H_2S$ และ $Cl_2$ ได้ดังตารางที่ ก-3

*ตารางที่ ก - 3 เลขดุลสมการของแก๊สมลพิษ*

| **แก๊สมลพิษ** | $NH_3$ | $H_2S$ | $Cl_2$ |
|---|---|---|---|
| **จำนวนโมล** | 0.021 | 0.001 | 0.001 |

4.2) หาเลขดุลสมการของแก๊สจำลอง จากสมการของ Gungor [18] ดังนี้

$[CH_4]$ = $120.72-0.1183T+(5x10^{-5})T^2$

$[H_2]$ = $140.51-0.01991T+(7x10^{-5})T^2$

$[CO_2]$ = $-74.44+0.1467T-(5x10^{-5})T^2$

$[CO]$ = $-49.345+0.1026T-(4x10^{-5})T^2$

$[C_2H_6]$ = $-37.401+0.068T-(3x10^{-5})T^2$

โดย $[CH_4]$, $[H_2]$, $[CO_2]$, $[CO]$ และ $[C_2H_6]$ คือสัดส่วนโดยมวลของ $CH_4$ , $H_2$ , $CO_2$ , CO และ $C_2H_6$ ตามลำดับ และ T คือ อุณหภูมิของเบด (Bed temperature) ซึ่งจะกำหนดให้ T เท่ากับ 1173 K (900 ºC) สามารถแสดงผลการคำนวณได้ตามตารางที่ ก-4

*ตารางที่ ก - 4 สัดส่วนโดยมวลของแก๊สจำลอง*

| **แก๊สจำลอง** | $CH_4$ | $H_2$ | $CO_2$ | CO | $C_2H_6$ |
|---|---|---|---|---|---|
| **สัดส่วนโดยมวล** | 0.101 | 0.439 | 0.158 | 0.295 | 0.007 |

จากตารางที่ ก-3 ถึง ตารางที่ ก-4 สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$C_xH_yO_zN_nS_sCl_c = \gamma(0.101CH_4 + 0.439H_2 + 0.158CO_2 + 0.295CO + 0.007C_2H_6) + 0.021NH_3 + 0.001H_2S + 0.001Cl_2$$ (สมการ 3-2)

เมื่อ $\gamma$ คือ เลขโมลของแก๊สจำลอง

จากเขียนสมการสมดุลของธาตุ C ได้ดังนี้

$$X = \gamma((0.101C) + (0.158C) + (0.295C) + (0.007(2C))$$

แทน X=1.542 และ C=1 ;

$$1.542 = \gamma((0.101x1) + (0.158x1) + (0.295x1) + (0.007x2))$$

$$\gamma = 2.716$$

แทนค่า $\gamma$ ในสมการ 3-2 จะได้เลขดุลสมการดังตารางที่ ก-5

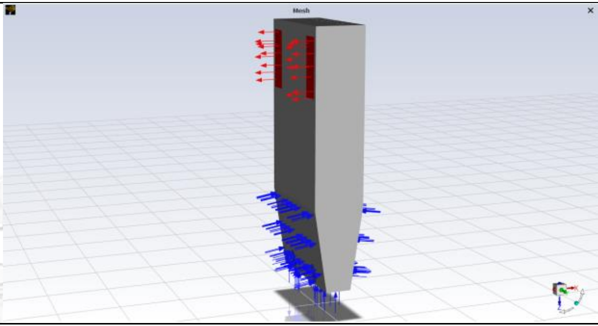
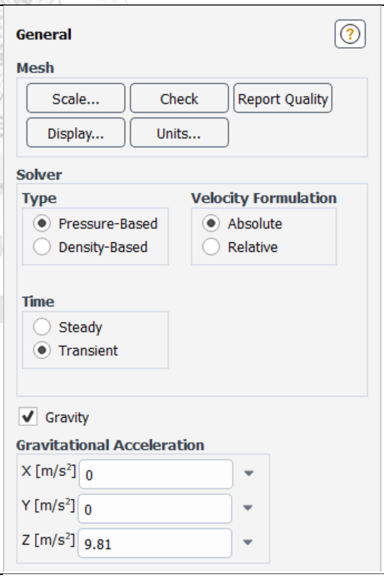
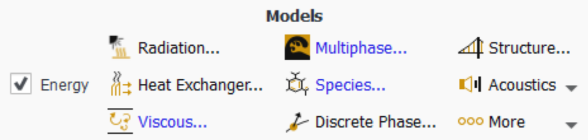
*ตารางที่ ก - 5 เลขดุลสมการของแก๊สจำลอง*

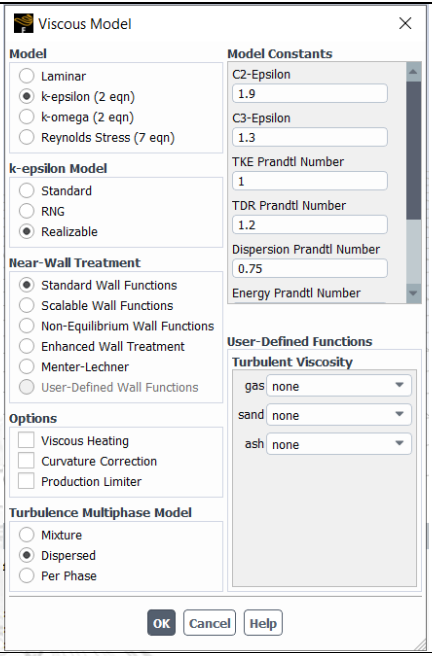
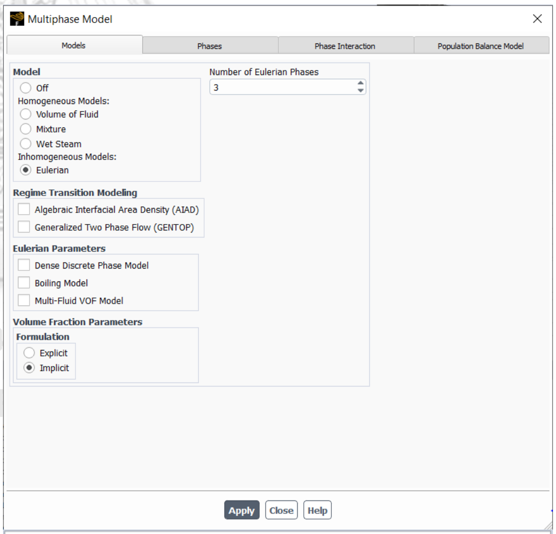
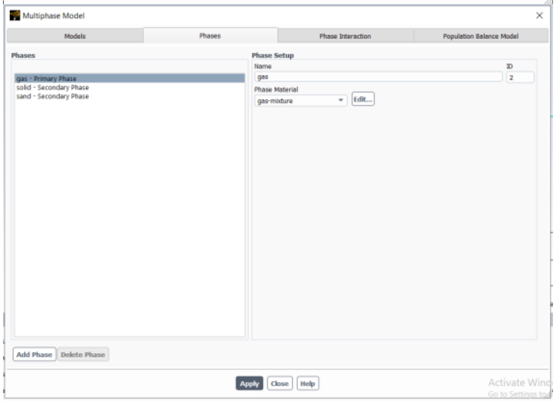
| **แก๊สจำลอง** | $CH_4$ | $H_2$ | $CO_2$ | CO | $C_2H_6$ |
|---|---|---|---|---|---|
| **เลขดุลสมการ** | 0.275 | 1.194 | 0.429 | 0.801 | 0.019 |

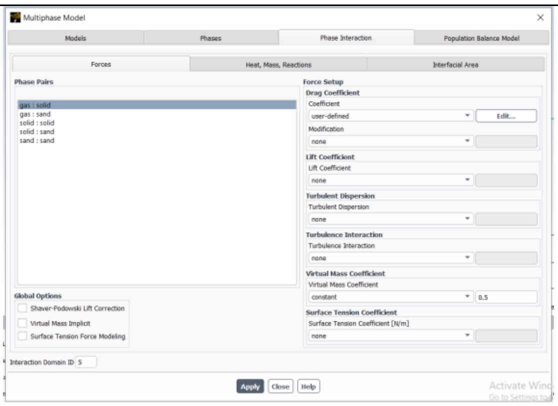
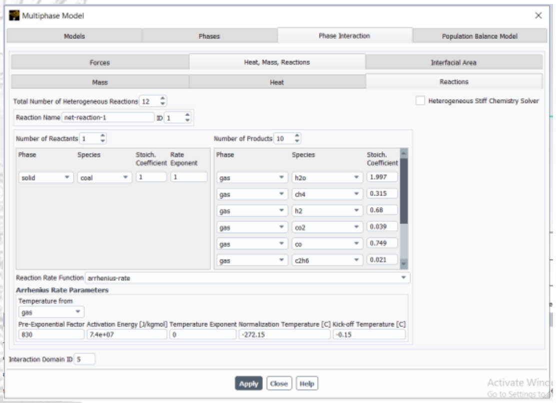
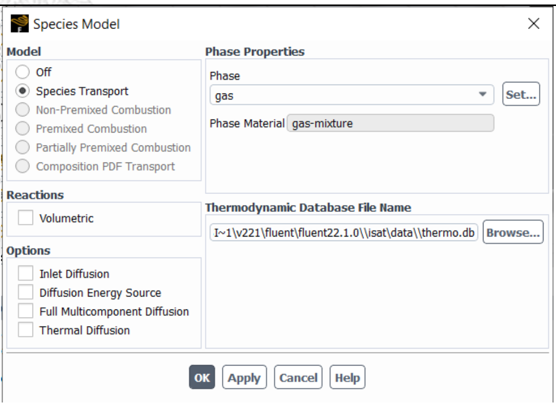
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

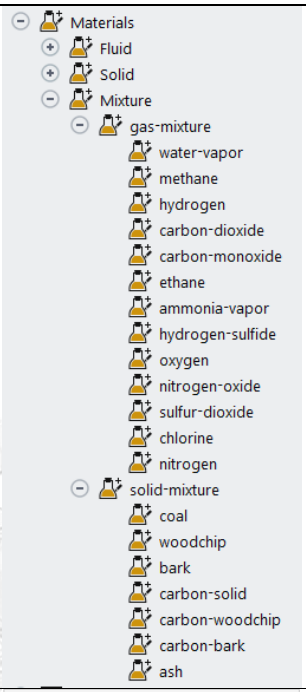
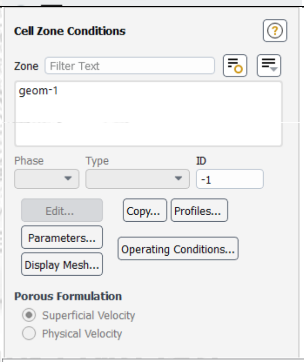
# ภาคผนวก ข
# ขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลอง CFD ด้วยโปรแกรม Ansys Fluent

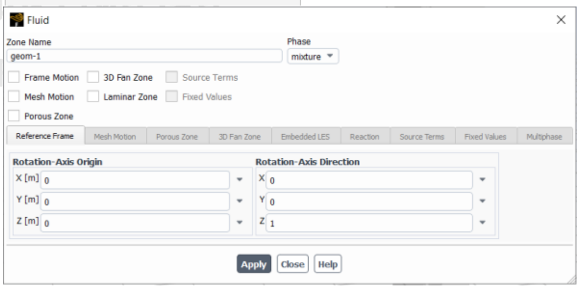
*ตารางที่ ข - 1 ขั้นตอนการใช้โปรแกรม Ansys Fluent [34]*

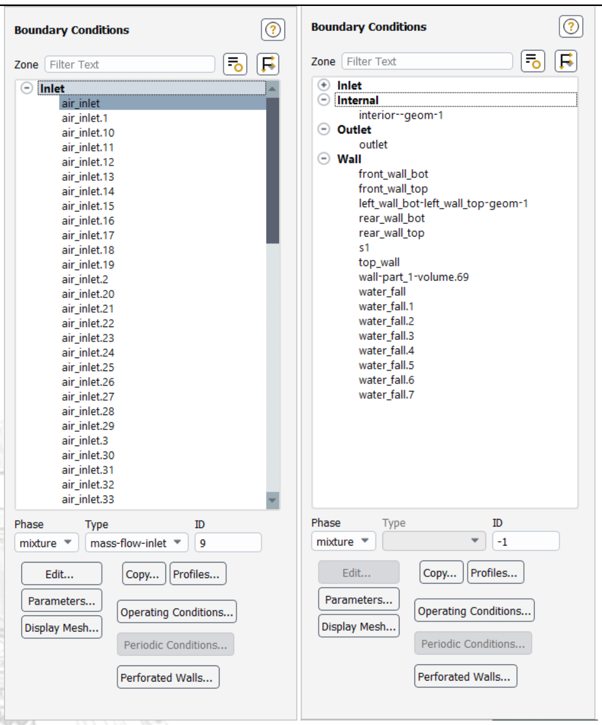
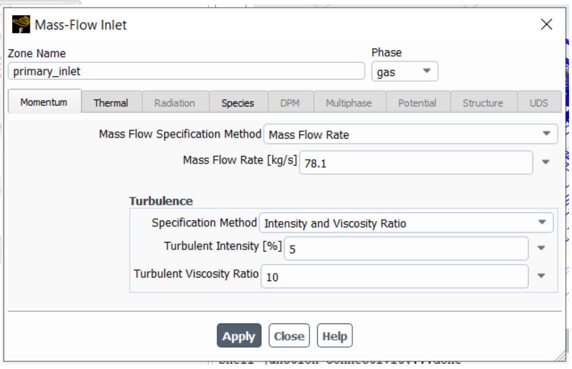
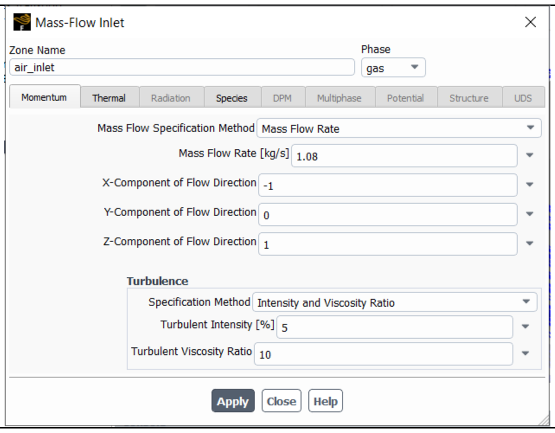
| ขั้นตอน | Ansys Fluent | ภาพประกอบ |
|---|---|---|
| 1.เปิดไฟล์ Mesh | File ⟶ Read ⟶ Mesh... |  |
| 2.ตรวจสอบ Mesh | Domain ⟶ Mesh ⟶ Quality ⟶ Evaluate Mesh Quality | Mesh Quality:<br>Minimum Orthogonal Quality = 2.03287e-01 cell 7325 on zone 595 (ID: 14037 on partition: 3) at location ( 6.15313e-01, 1.30774e+01, 9.86363e+00)<br>Maximum Aspect Ratio = 7.52233e+00 cell 6516 on zone 595 (ID: 56685 on partition: 3) at location ( 3.38322e+00, 1.32224e+01, 9.38004e+00) |
| 3.ตั้งค่า Physics<br>3.1 Solver | Physics ⟶ Solver ⟶ General |  |
| 3.2 Models<br>● Energy | Physics ⟶ Models ⟶ Energy |  |

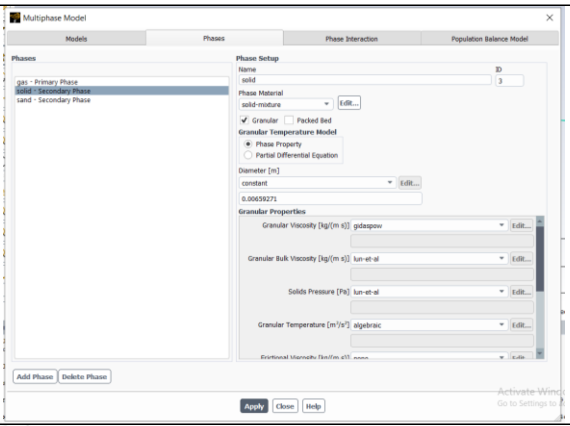
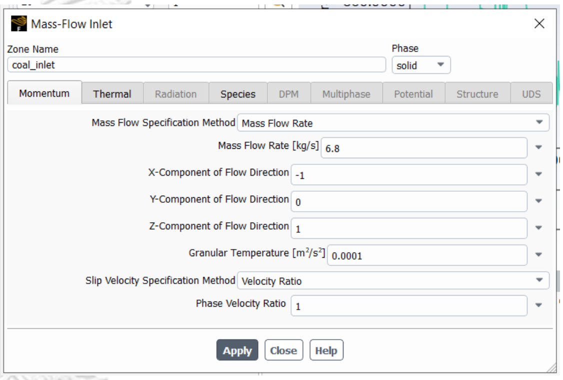
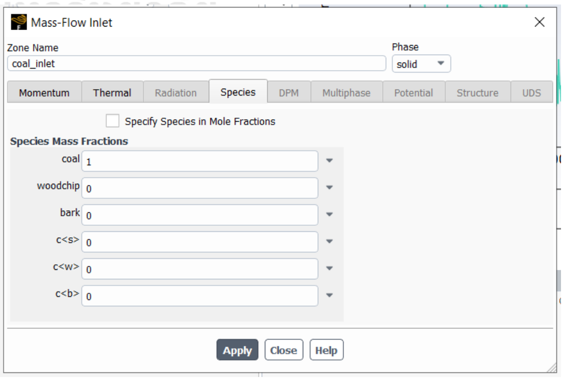
| ขั้นตอน | Ansys Fluent | ภาพประกอบ |
|---|---|---|
| ● Viscous | Physics ⟶<br>Models ⟶<br>Viscous… |  |
| ● Multiphase | Physics ⟶<br>Models ⟶<br>Multiphase… |  |

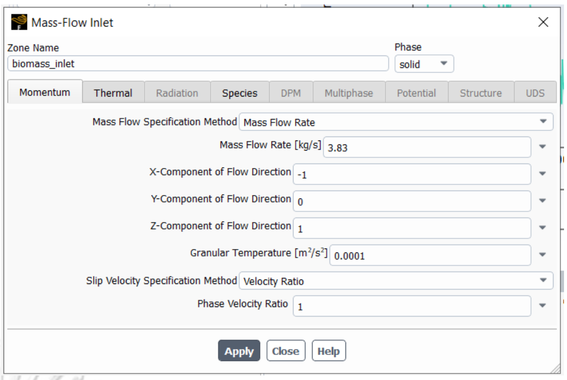
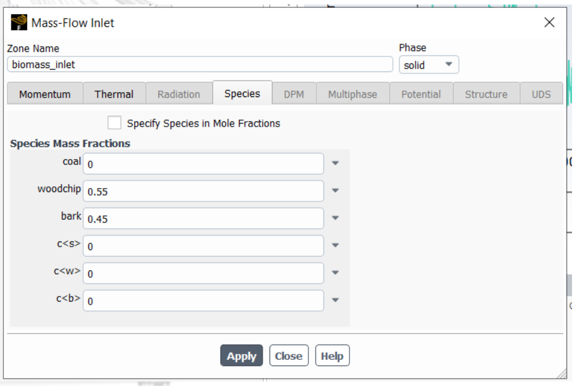
<table>
<tr><th>ขั้นตอน</th><th>Ansys Fluent</th><th>ภาพประกอบ</th></tr>
<tr><td></td><td><u>เพิ่ม Reactions</u><br>Physics ⟶<br>Models ⟶<br>Multiphase… ⟶<br>Phase Interaction<br>⟶ Heat, Mass,<br>Reactions ⟶<br>Reactions</td><td><br></td></tr>
<tr><td>● Species</td><td>Physics ⟶<br>Models ⟶<br>Species…</td><td></td></tr>
</table>

<table>
<tr><th>ขั้นตอน</th><th>Ansys Fluent</th><th>ภาพประกอบ</th></tr>
<tr><td>3.3 Materials</td><td>Physics ⟶ Materials ⟶ Create/Edit... เลือกข้อมูลจาก Fluent Database...</td><td>
</td></tr>
<tr><td>3.4 Zone<br>● Cell Zones</td><td>Physics ⟶ Zones ⟶ Cell Zones</td><td>

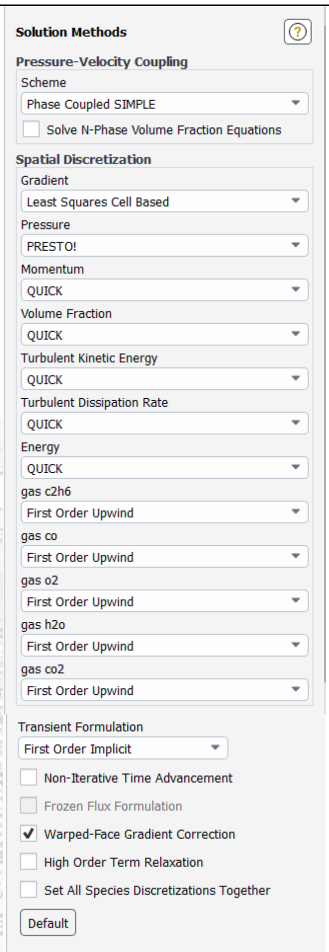
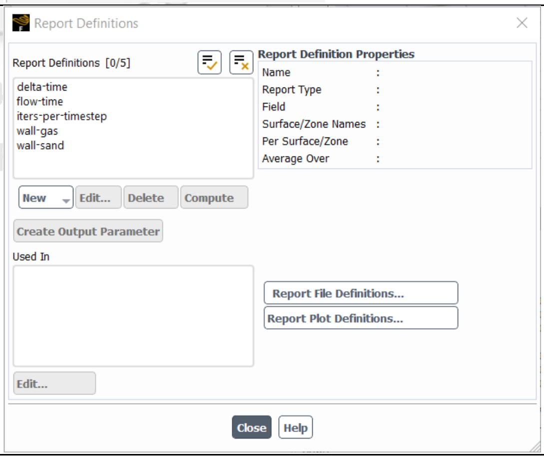

</td></tr>
</table>

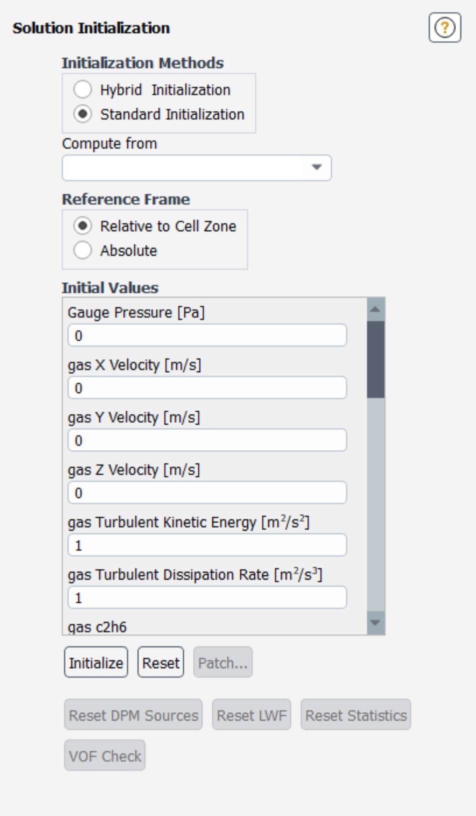
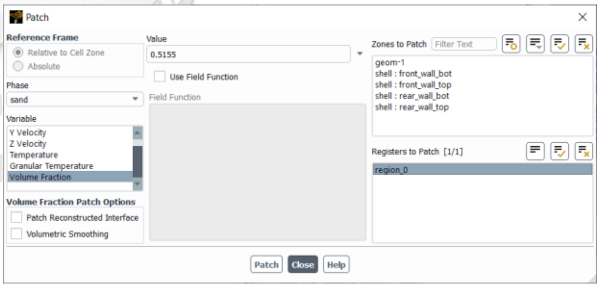
<table>
<tr><th>ขั้นตอน</th><th>Ansys Fluent</th><th>ภาพประกอบ</th></tr>
<tr><td>● Boundaries</td><td>Physics ⟶ Zones ⟶ Boundaries สร้าง Inlet (Primary air 1 ช่อง, Secondary air 48 ช่อง, Biomass inlet 4 ช่อง, Coal inlet 2 ช่อง, Recirculation 2 ช่อง และสร้าง Internal, Outlet และ wall ตามภาพประกอบด้านขวา</td><td>
</td></tr>
<tr><td>4.ตั้งค่า Air inlet<br>4.1 Primary air</td><td>Setup ⟶ Boundary condition ⟶ Inlet ⟶ Primary_inlet ⟶ Phase ⟶ gas ⟶ Mass Flow Rate</td><td>
</td></tr>
<tr><td>4.2 Secondary air</td><td>Setup ⟶ Boundary condition ⟶ Inlet ⟶ Primary_inlet ⟶ Phase ⟶ gas ⟶ Mass Flow Rate</td><td>
</td></tr>
</table>

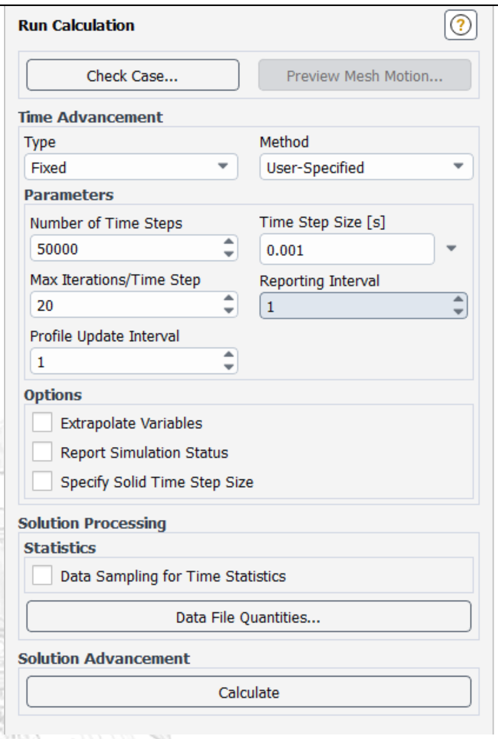
| ขั้นตอน | Ansys Fluent | ภาพประกอบ |
|---|---|---|
| 5.ตั้งค่าแบบจำลอง<br>5.1 Solid fuel dimeter | Physics ⟶ Models ⟶ Multiphase… ⟶ Phase ⟶ Solid ⟶ Phase Setup ⟶ Diameter |  |
| 5.2 Coal Inlet<br>● Mass Flow Rate (Gas Phase) | Setup ⟶ Boundary condition ⟶ Inlet ⟶ Coal_inlet ⟶ Phase ⟶ solid ⟶ Momentum ⟶ Mass Flow Rate |  |
| ● Mass Fractions (Gas Phase) | Setup ⟶ Boundary condition ⟶ Inlet ⟶ Coal_inlet ⟶ Phase ⟶ solid ⟶ Species ⟶ Species Mass Fractions |  |

| ขั้นตอน | Ansys Fluent | ภาพประกอบ |
|---|---|---|
| 5.3 Biomass Inlet<br>● Mass Flow Rate (Gas Phase) | Setup ⟶ Boundary condition ⟶ Inlet ⟶ biomass_inlet ⟶ Phase ⟶ solid ⟶ Momentum ⟶ Mass Flow Rate |  |
| ● Mass Fractions (Gas Phase) | Setup ⟶ Boundary condition ⟶ Inlet ⟶ biomass_inlet ⟶ Phase ⟶ solid ⟶ Species ⟶ Species Mass Fractions |  |

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

<table>
<tr><th>ขั้นตอน</th><th>Ansys Fluent</th><th>ภาพประกอบ</th></tr>
<tr><td>6.ตั้งค่า Solution<br>6.1 Solution Methods</td><td>Solution ⟶ Solution ⟶ Methods...</td><td>
</td></tr>
<tr><td>6.2 Reports Definitions</td><td>Solution ⟶ Reports ⟶ Definitions</td><td>
</td></tr>
</table>

<table>
<tr><th>ขั้นตอน</th><th>Ansys Fluent</th><th>ภาพประกอบ</th></tr>
<tr><td>6.3 Initialization</td><td>Solution ⟶ Initialization ⟶ Initialize</td><td>
</td></tr>
<tr><td>6.4 Patch</td><td>Solution ⟶ Initialization ⟶ Patch... (Phase = sand Variable = Volume Fraction Value = 0.5155 Registers to Patch = region_0)</td><td>
</td></tr>
</table>

<table>
<tr><th>ขั้นตอน</th><th>Ansys Fluent</th><th>ภาพประกอบ</th></tr>
<tr><td>7.คำนวน<br>แบบจำลอง</td><td>Solution ⟶ Run Calculation ⟶ Calculate</td><td>
</td></tr>
</table>

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

# ประวัติผู้เขียน

| | |
|---|---|
| **ชื่อ-สกุล** | ธนากรณ์ วาระเพียง |
| **วัน เดือน ปี เกิด** | 30 กรกฎาคม 2536 |
| **สถานที่เกิด** | สุราษฎร์ธานี ประเทศไทย |
| **วุฒิการศึกษา** | วท.บ.เคมีอุตสาหกรรม ม.เกษตรศาสตร์ |
| **ที่อยู่ปัจจุบัน** | 32/22 ม.1 ต.คลองหก อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120 |
| **ผลงานตีพิมพ์** | Varapiang, T., Rangton, N., Nukkhong, W., Wises, P., Piumsomboon, P., Piemjaiswang, R., and Chalermsinsuwan., B., Digital twin of biomass/coal co-firing circulating fluidized bed boiler by using computational fluid dynamics simulation. Energy Reports, 2023. (Accepted) |

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY