

การศึกษาอัตราส่วนขนาดทางออกต่อทางเข้า ของช่องทางอากาศไหล  
ส่วนที่หนึ่งต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้

EFFECT OF OUTLET/INLET OF PRIMARY AIR PORT ON PULVERIZED  
COMBUSTION PERFORMANCE



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2564

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาอัตราส่วนขนาดทางออกต่อทางเข้า ของช่องทางอากาศไหล  
ส่วนที่หนึ่งต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้

EFFECT OF OUTLET/INLET OF PRIMARY AIR PORT ON PULVERIZED  
COMBUSTION PERFORMANCE



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2564

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EFFECT OF OUTLET/INLET OF PRIMARY AIR PORT ON PULVERIZED  
COMBUSTION PERFORMANCE



A THESIS SUBMITTED IN PARTAIL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2021

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2564

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาอัตราส่วนขนาดทางออกต่อทางเข้า ของช่องทางอากาศการไหลส่วนที่หนึ่ง  
ต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้

EFFECT OF OUTLET/INLET OF PRIMARY AIR PORT ON PULVERIZED  
COMBUSTION PERFORMANCE

ผู้จัดทำ

- |   |
|---|
| 1. นายกฤษณ์ สุวรรณภูมิ รหัสประจำตัว 61010040        |
| 2. นายฐิติรุจน์ ลำพาย รหัสประจำตัว 61010274         |
| 3. นายชัยวัฒน์ กอเจริญเกียรติ รหัสประจำตัว 61010500 |

**กมลพิษ ลภีรัตนกุล.**

อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.ดร.ภรณ์เพ็ญ ลภีรัตนกุล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาอัตราส่วนขนาดทางออกต่อทางเข้า ของช่องทางอากาศการไหลส่วนที่หนึ่ง ต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้

นายกฤษฎ์ สุวรรณภูมิ	61010040
นายฐิติรุจน์ ลำพวย	61010274
นายธัญวัฒน์ กอเจริญเกียรติ	61010500
ผศ.ดร.ภรณ์เพ็ญ ลภีรัตนากุล	อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2564

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาและเปรียบเทียบเสถียรภาพเปลวไฟในการเผาไหม้อันเนื่องมาจากอัตราส่วนขนาดทางออกต่อทางเข้าที่แตกต่างกัน ของช่องทางไหลอากาศส่วนที่หนึ่ง ภายใต้การจำลองผลทางคณิตศาสตร์แบบสองมิติ โดยใช้ยางพาราผงที่มีความชื้น 20% เป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ ขอบเขตงานวิจัยนี้คือการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง 300 กิโลวัตต์ความร้อน ใช้อากาศส่วนเกิน 15% อากาศที่ป้อนเข้าห้องเผาไหม้แบ่งออกเป็นสามส่วนคือ 25:65:10 โดยการทดลองนำแบบจำลองผลการไหลอากาศทางคณิตศาสตร์ของหัวเผาขนาดแตกต่างกัน 3 ขนาด มาเปรียบเทียบ วิเคราะห์ โดยที่หัวเผาขนาด 1.5 เท่าให้ขนาดการหมุนวนที่กว้างสุดและเกิดการหมุนตัวของอากาศกลับมาสู่บริเวณกลางห้องเผาไหม้อย่างรุนแรง ขณะที่หัวเผาขนาด 1 เท่าสร้างอากาศที่ไหลไปด้านหน้าอย่างรุนแรงจึงทำให้เกิดการหมุนวนในบริเวณแคบเฉพาะหลังวัตถุวางการไหลเท่านั้น อย่างไรก็ตามเพื่อประเมินผลการทดลองการเผาไหม้จริงจึงเขียนแบบหัวเผาขนาด 1.25 เท่าพร้อมส่งผลิตเพื่อนำไปทำการทดลองการเผาไหม้ หลังจากได้ทำการทดลองเผาไหม้ของหัวเผาทั้ง 3 ขนาดพบว่าหัวเผาขนาด 1.5 เท่า ซึ่งเป็นการขยายขนาดทางออกของเชื้อเพลิงกับอากาศส่วนปฐมภูมิส่งผลให้พื้นที่ทางออกของอากาศส่วนทุติยภูมิลดลง มีความเร็วที่สูงขึ้น ทำให้อากาศมีการกระจายได้ถึงผนังห้องเผาไหม้ ทั้งยังสร้างเป็นพื้นที่การไหลหมุนวนที่กว้างกว่า เกิดการหมุนวนเชื้อเพลิงกลับมาถ่ายเทความร้อนและแลกเปลี่ยนออกซิเจนในอากาศที่มากกว่า ความเข้มข้นสารระเหยมีความเข้มข้นมากกว่า ซึ่งปัจจัยที่กล่าวมาทั้งหมดส่งผลทำให้การเผาไหม้มีประสิทธิภาพที่สุด ส่วนหัวเผาขนาด 1.25 เท่าแม้จะเป็นการขยายขนาดทางออกเหมือนกัน แต่ด้วยขนาดที่ไม่ขยายทางออกของเชื้อเพลิงและอากาศส่วนปฐมภูมิที่มากพอ รวมกับการบดบังอากาศส่วนทุติยภูมิที่น้อยจนไม่เกิดผลกระทบต่อ การไหล ทำให้ได้ผลที่ใกล้เคียงกับหัวเผาขนาด 1 เท่า

EFFECT OF OUTLET/INLET OF PRIMARY AIR PORT ON PULVERIZED COMBUSTION  
PERFORMANCE

Krit	Suwannagoot	61010040
Thitirut	Lampai	61010274
Thanwarat	Korcharoenkiat	61010500
Asst.Prof.Ponepen	Laphirattanakul	Advisor

Year 2564

**Abstract**

The purpose of this research was to study and compare the performance of combustion due to the expansion of primary air outlet port diameter with the ratio 1 (Base case), 1.25 and 1.5 times of inlet. The experiment was conducted by using a pulverized fuel with 1MW pulverized burner in the laboratory. To access a stable flame, firing rate was set to be 300 kW with 15% of excess air. The total air was divided and fed separately with the ratio of 25:65:10 for primary, secondary and tertiary air. The preliminary study done by the non-reacting 2D simulation was reported that the 1.5 stepped burner provided the largest internal recirculation and strongest backward flow. Meanwhile, the base case burner produced the strong forward flow and created the shortest internal recirculation behind the bluff body. After the combustion was conducted, it was shown that the 1.5 stepped burner could provide the highest combustion performance in aspect of temperature level. The expansion of primary port led to decreasing of the secondary air inlet area. The high velocity of secondary flow promoted the strong flow hitting the refractory wall and flew reversely to the center of furnace, where the low velocity of mixture was located. This create the strong and wide internal recirculation, resulting in great mixing between the hot flue gas and the upcoming particle in the primary air stream. The highest volatile concentration was also reported in the 1.5 stepped burner results. Meanwhile, the 1 and 1.25 times burner

gave the similarly lower level of temperature. It could be concluded that the 1.25 expanding did not give any significant changing on the combustion performance.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จัดทำขึ้นเพื่อประกอบการเรียนวิชา PROJECT ให้ศึกษาได้นำความรู้ ความสามารถในภาคทฤษฎีมาทำการปฏิบัติการ เป็นการเพิ่มพูนความรู้ ความสามารถ และ ประสบการณ์ให้แก่นักศึกษา

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ดีก็เพราะความกรุณาที่ให้ความช่วยเหลือของ ผศ.ดร.ภรณ์เพ็ญ ลภีรัตนากุล อาจารย์ที่ปรึกษา จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ที่ได้ให้ความรู้และเป็นพี่ปรึกษา ตลอดระยะเวลาที่ได้ทำปริญญานิพนธ์และขอบคุณคณะกรรมการสอบปริญญานิพนธ์ ที่ได้ให้ คำแนะนำเพิ่มเติม และช่วยให้ความรู้ จนทำให้ปริญญานิพนธ์นี้สมบูรณ์

ขอขอบคุณอาจารย์ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่ช่วยเหลือแก้ไขให้คำแนะนำ รวมทั้งเมตตา ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ซึ่งมีส่วนช่วยเหลือให้นักศึกษาเข้าใจปัญหานั้น ขอขอบคุณ เพื่อนพี่น้องนักศึกษาทุกคนที่ช่วยเหลือ ให้คำแนะนำต่าง ๆ จนสมบูรณ์

นายกฤษฎี สุวรรณภูมิ  
นายฐิติรุจน์ ลำพาย  
นายธัญวรัตน์ กอเจริญเกียรติ

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	IV
สารบัญ.....	V
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูป.....	X
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	XIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1    ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2    ความมุ่งหมายและจุดประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3    สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4    ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.5    ขั้นตอนการศึกษา.....	3
1.6    ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทรรศน์.....	4
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	8
3.1    เชื้อเพลิงแข็ง (Solid fuel).....	8
3.2    เชื้อเพลิงชีวมวล (Biomass).....	9
3.3    การเผาไหม้ (Combustion).....	11
3.3.1    การเผาไหม้ตามปริมาณสารสัมพันธ์ (Stoichiometry Combustion).....	12
3.3.2    การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง (Solid fuel combustion).....	13
3.3.2.1    การทำแห้งเชื้อเพลิงแข็ง (Drying).....	13

## สารบัญ (ต่อ)

3.3.2.2 การปลดปล่อยสารระเหย (Devolatillization).....	14
3.3.2.3 การเผาไหม้ถ่านชาร์ (Burning of carbon).....	14
3.4 การปลดปล่อยมลพิษและการควบคุม (Pollutants Emission and Control)	15
3.4.1 การก่อตัวของคาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon monoxide).....	16
3.4.2 ออกไซด์ของไนโตรเจน (NO <sub>x</sub> ).....	17
3.4.2.1 Thermal - NO <sub>x</sub> .....	17
3.4.2.2 Prompt - NO <sub>x</sub> .....	18
3.4.2.3 Fuel - NO <sub>x</sub> .....	18
3.4.3 ฝุ่นและเขม่า (Particulates and Soot).....	18
3.5 การรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟ.....	19
3.5.1 อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควง (Swirl generator).....	20
3.5.1.1 ตัวเลขการหมุนควง (Swirl number).....	21
3.5.2 วัตถุขวางการไหล (Bluff body).....	22
3.6 โมเดลการจำลองการเผาไหม้.....	23
3.6.1 สมการความต่อเนื่องและโมเมนตัม.....	23
3.6.2 แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent model).....	24
3.6.2.1 แบบจำลอง k- ε ชนิด มาตรฐาน.....	25
3.6.2.1.1 แบบจำลองความหนืดปั่นป่วน.....	26
3.6.2.2 แบบจำลอง k- ε ชนิด Re-Normalization Group (RNG)	26
3.6.2.2.1 แบบจำลองประสิทธิภาพ( Effective Viscosity)	27
3.6.2.3 แบบจำลอง k- ε ชนิด Realizable.....	28
3.6.2.3.1 Turbulence viscosity.....	29

3.6.3 แบบจำลองการแผ่รังสี(Radiation model).....	31
3.6.3.1 แบบจำลองการแผ่รังสี Discrete Ordinates (DO).....	31
3.6.4 Discrete Phase Models.....	31
3.6.5 การแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchange).....	32
3.6.6 การแลกเปลี่ยนมวล (Mass Exchange).....	33
3.6.7 แบบจำลองการถ่ายโอนสปีชีส์ (Modeling Species Transport).....	33
3.6.7.1 Volumetric Reactions.....	33
บทที่ 4 ทฤษฎีอุปกรณ์และโมเดลการจำลองการเผาไหม้.....	34
4.1 อุปกรณ์และระบบสนับสนุนการทดลอง.....	34
4.1.1 ห้องเผาไหม้ช่วย (Pre-chamber).....	34
4.1.2 ระบบเผาไหม้เชื้อเพลิง.....	36
4.1.3 ระบบป้อนเชื้อเพลิง.....	37
4.1.4 ระบบบำบัดไอเสีย.....	38
4.1.5 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ.....	38
4.1.6 อุปกรณ์ตรวจวัดไอเสีย.....	40
4.1.7 ระบบควบคุมการทดลอง.....	40
4.1.8 ระบบป้อนอากาศ.....	41
4.2 วิธีการทดลอง.....	42
4.2.1 ออกแบบหัวเผา 3 ขนาด.....	42
4.2.2 คำนวณหาปริมาณอากาศของปฐมภูมิ อากาศหตุติภูมิ และอากาศตติภูมิ	42
4.2.2.1 องค์ประกอบธาตุทางเคมีของเชื้อเพลิง.....	43
4.2.2.2 สมการการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงยางพารา.....	43
4.2.3 เตรียมเชื้อเพลิงชีวมวลผง.....	44

4.2.4 การอุ่นเตาด้วย LPG.....	44
4.2.5 บันทึกผลการทดลอง.....	45
4.3 โมเดลการจำลองการเผาไหม้.....	45
4.4 การจำลองและการหากริดที่เหมาะสม.....	46
4.4.1 ขั้นตอนการทำโมเดลห้องเผาไหม้.....	46
4.4.2 Grid independent.....	48
บทที่ 5 อภิปรายผลการทดลอง.....	49
5.1 ผลการจำลองเปรียบเทียบของหัวเผา 3 ขนาด.....	49
5.1.1 การเปรียบเทียบอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ช่วย.....	49
5.1.2 การกระจายตัวของอุณหภูมิ.....	51
5.1.3 ความเร็วในห้องเผาไหม้.....	53
5.1.4 สัดส่วนโดยมวลของสารระเหยเผาไหม้ได้.....	55
บทที่ 6 สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	57
6.1 บทสรุป.....	57
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	58

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	แสดงเปรียบเทียบลักษณะของถ่านหิน.....	8
3.2	แสดงสมบัติของซีเมนต์.....	11
4.1	แสดงส่วนประกอบของยางพารา.....	43
4.2	แสดงอัตราการไหลของอากาศสามส่วนสำหรับเชื้อเพลิงยางพารา.....	44
4.3	แสดงโมเดลที่คณะวิจัยได้ใช้ในการจำลองการเผาไหม้.....	45

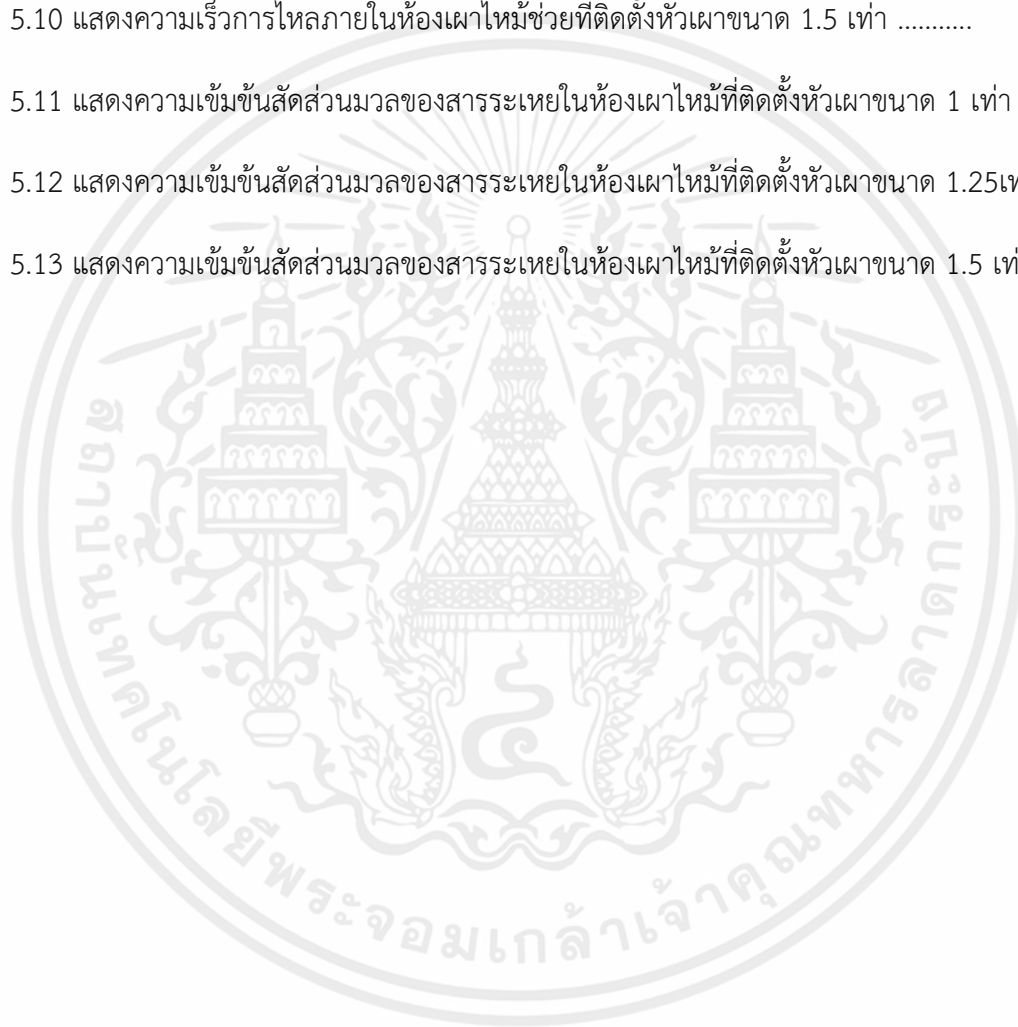


## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงทิศทางและความเร็วของอากาศกับร้อนด้วยหัวเผาเชื้อเพลิงดั้งเดิม.....	5
2.2 แสดงทิศทางและความเร็วของอากาศกับร้อนด้วยหัวเผาเชื้อเพลิงที่ถูกขยาย.....	5
2.3 อุณหภูมิของการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลด้วยหัวเผาเชื้อเพลิงดั้งเดิม.....	6
2.4 อุณหภูมิของการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลด้วยหัวเผาเชื้อเพลิงที่ถูกขยาย.....	6
3.1 ตัวอย่างเชื้อเพลิงแข็งบิทูมินัส.....	9
3.2ก กากใยปาล์ม.....	9
3.2ข ไม้พิน.....	9
3.2ค ชั่งข้าวโพด.....	9
3.2ง กะลาปาล์ม.....	9
3.2จ แกลบ.....	9
3.2ฉ กะลามะพร้าว.....	9
3.3 กลไกการเผาไหม้เชื้อเพลิงอนุภาคขนาดเล็ก.....	13
3.4 กระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล.....	15
3.5 ความเข้มข้นที่สถานะสมดุลของ $\text{NO}_2$ ที่มีจำนวนออกซิเจนที่แตกต่างกัน.....	17
3.6 แสดงอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควง.....	20
3.7 แสดงพฤติกรรมของการเผาไหม้ภายใน.....	20
3.8 แสดงลักษณะวัตถุขวางการไหลของ Minghou Xu.....	22
4.1 แสดงองค์ประกอบของชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบระบบเผาไหม้เชื้อเพลิง.....	34
4.2 ห้องเผาไหม้ช่วย.....	35
4.3 แสดงการไหลของอากาศในเครื่องเผาไหม้ช่วย.....	35
4.4 เครื่องเผาไหม้หลัก และเครื่องเผาไหม้ช่วย.....	35

4.5 แสดงห้องเผาไหม้หลัก.....	36
4.6 แสดงชุดสกรูระบายไถ่หนัก.....	36
4.7 ถังพักไถ่หนัก.....	37
4.8 แสดงถังพักเชื้อเพลิง (Hopper).....	37
4.9 ระบบสกรูขนส่ง.....	38
4.10 แสดงหอบำบัดไอเสีย (Wet scrubber) .....	38
4.11 Thermocouple Type-K.....	39
4.12 แสดงตำแหน่งการติดตั้ง Thermocouple Type-K ที่ห้องเผาไหม้ช่วย.....	39
4.13 แสดงตำแหน่งการติดตั้ง Thermocouple Type-K.....	39
4.14 เครื่องวัด Testo 330-LL.....	40
4.15 โปรแกรมควบคุมการเผาไหม้.....	41
4.16 โบลเวอร์ที่ใช้ในการป้อนอากาศสู่ห้องเผาไหม้.....	42
4.17 ลักษณะของวัตถุขวางการไหล.....	42
4.18 แสดงตัวอย่างแบบจำลองห้องเผาไหม้ที่หัวเผาขนาด 1 เท่า.....	46
4.19 แสดงระยะต่างๆในห้องเผาไหม้ช่วย.....	47
4.20 แสดงความยาวของห้องเผาไหม้.....	47
4.21 แสดงระยะต่างๆของห้องเผาไหม้หลัก.....	47
4.22 แสดง Mesh independence.....	48
5.1 แสดงอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ ณ ตำแหน่งเดียวกันของผลการจำลองและผลการทดลองของหัวเผาทั้ง 3 ขนาด.....	49
5.2 แสดงอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ที่ติดตั้งหัวเผาขนาด 1 เท่า.....	51
5.3 แสดงอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ที่ติดตั้งหัวเผาขนาด 1.25 เท่า.....	51
5.4 แสดงอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ที่ติดตั้งหัวเผาขนาด 1.5 เท่า.....	51

5.5 แสดงอุณหภูมิที่แกนกลางภายในห้องเผาไหม้ของผลการจำลอง.....	52
5.6 แสดงความเร็วการไหลภายในห้องเผาไหม้ที่ติดตั้งหัวเผาขนาด 1 เท่า.....	53
5.7 แสดงความเร็วการไหลภายในห้องเผาไหม้ที่ติดตั้งหัวเผาขนาด 1.25 เท่า.....	53
5.8 แสดงความเร็วการไหลภายในห้องเผาไหม้ที่ติดตั้งหัวเผาขนาด 1.5 เท่า.....	53
5.9 แสดงความเร็วการไหลภายในห้องเผาไหม้ช่วยที่ติดตั้งหัวเผาขนาด 1.25 เท่า.....	54
5.10 แสดงความเร็วการไหลภายในห้องเผาไหม้ช่วยที่ติดตั้งหัวเผาขนาด 1.5 เท่า .....	54
5.11 แสดงความเข้มข้นสัดส่วนมวลของสารระเหยในห้องเผาไหม้ที่ติดตั้งหัวเผาขนาด 1 เท่า	55
5.12 แสดงความเข้มข้นสัดส่วนมวลของสารระเหยในห้องเผาไหม้ที่ติดตั้งหัวเผาขนาด 1.25 เท่า	55
5.13 แสดงความเข้มข้นสัดส่วนมวลของสารระเหยในห้องเผาไหม้ที่ติดตั้งหัวเผาขนาด 1.5 เท่า	55



## รายการย่อและสัญลักษณ์

$G_\emptyset$	ฟลักซ์ตามแนวแกนของโมเมนตัมเชิงมุม
$G_x$	ฟลักซ์ของโมเมนตัมเชิงเส้น
$r_0$	รัศมีบริเวณทางออก swirler
$U_x$	ความเร็วตามแนวแกนตามแนวรัศมี
$U_\theta$	ความเร็วตามแนวสัมผัสตามแนวรัศมี
$d$	เส้นผ่านศูนย์กลางของวัตถุขวางการไหล
$D$	เส้นผ่านศูนย์กลางของทางออกช่องการไหลอากาศปฐุมภูมิ
$\Phi$	อัตราส่วนสมมูล Equivalent ratio
$E$	ค่าความร้อนจำเพาะ
$\rho$	ความหนาแน่น
$\vec{J}_j$	ฟลักซ์การแพร่ของสปีชีส์ $j$
$S_h$	ความร้อนจากปฏิกิริยาเคมี และแหล่งพลังงานอื่นๆ
$h_j^0$	เอนทัลปีการก่อเกิดของสปีชีส์ $j$
$R_j$	อัตราการก่อเกิดโดยปริมาตรของสปีชีส์ $J$
$k_{eff}$	ค่าประสิทธิผลการนำความร้อนประสิทธิผลระหว่างเฟส
$G_k$	ค่าการก่อกำเนิดพลังงานจลน์ระหว่างความชันของความเร็วเฉลี่ย
$G_b$	ค่าการก่อกำเนิดพลังงานจลน์ระหว่างแรงลอยตัว
$Y_M$	ค่าของความผันผวนในการขยายตัวบนความปั่นป่วนแบบอัดตัวได้ต่ออัตราการกระจายตัวโดยรวม

$C_{1\varepsilon}$  ,  $C_{2\varepsilon}$  ,  $C_{3\varepsilon}$  ค่าคงที่ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.44 , 1.92 , ไม่ได้ระบุ ตามลำดับ

$\sigma_k , \sigma_\epsilon$	ค่า Prandtl ของ k และ $\epsilon$ มีค่าเท่ากับ 1.0 และ 1.3 ตามลำดับ
$S_k , S_\epsilon$	ค่าเทอมของการก่อกำเนิด
$G_k$	ค่าการก่อกำเนิดพลังงานจลน์ระหว่างความชันของความเร็วเฉลี่ย
$G_b$	ค่าการก่อกำเนิดพลังงานจลน์ระหว่างแรงลอยตัว
$Y_M$	ค่าของความผันผวนในการขยายตัวบนความปั่นป่วนแบบอัดตัวได้ต่ออัตราการกระจายตัวโดยรวม
$C_{1\epsilon} , C_{2\epsilon} , C_{3\epsilon}$	ค่าคงที่ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.42 , 1.68 , ไม่ได้ระบุ ตามลำดับ
$\sigma_k , \sigma_\epsilon$	ค่า Prandtl ของ k และ $\epsilon$ มีค่าเท่ากับ 1.0 และ 1.3 ตามลำดับ
$S_k , S_\epsilon$	ค่าเทอมของการก่อกำเนิด
$C_\mu$	ค่าคงที่ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.0845 และมีค่าใกล้เคียงกับ แบบจำลอง k- $\epsilon$ standard
$C_\mu$	ค่าคงที่ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.09
$G_k$	ค่าการก่อกำเนิดพลังงานจลน์ระหว่างความชันของความเร็วเฉลี่ย
$G_b$	ค่าการก่อกำเนิดพลังงานจลน์ระหว่างแรงลอยตัว
$Y_M$	ค่าของความผันผวนในการขยายตัวบนความปั่นป่วนแบบอัดตัวได้ต่ออัตราการกระจายตัวโดยรวม
$C_{1\epsilon} , C_{2\epsilon} , C_{3\epsilon}$	ค่าคงที่ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.44 , 1.9 , ไม่ได้ระบุ ตามลำดับ
$\sigma_k , \sigma_\epsilon$	ค่า Prandtl ของ k และ $\epsilon$ มีค่าเท่ากับ 1.0 และ 1.2 ตามลำดับ
$S_k , S_\epsilon$	ค่าเทอมของการก่อกำเนิด
$\bar{m}_p$	ค่าเฉลี่ยของอนุภาคในปริมาตรควบคุม
$m_{p,0}$	มวลเริ่มต้นของอนุภาค
$C_p$	ค่าความจุความร้อนของอนุภาค
$\Delta T_p$	อุณหภูมิที่เปลี่ยนไปของอนุภาคในปริมาตรควบคุม

$\Delta m_p$	มวลที่เปลี่ยนไปของอนุภาคในปริมาตรควบคุม
$m_{p,0}$	มวลเริ่มต้นของอนุภาค
$h_{fg}$	ความร้อนแฝงของสารระเหย
$h_{pyrol}$	ค่าความร้อนของสารระเหย
$T_p$	อุณหภูมิของอนุภาคที่บริเวณทางออกของปริมาตรควบคุม
$T_{ref}$	อุณหภูมิอ้างอิงบริเวณทางเข้า
$C_{p,i}$	ค่าความจุความร้อนของสารระเหย
$\dot{m}_{p,0}$	อัตราการไหลเชิงมวลเริ่มของอนุภาค
$R_i$	อัตราการเกิดผลิตภัณฑ์สุทธิ
$S_i$	อัตราการสร้าง
$\bar{J}_i$	ฟลักซ์การแพร่ของสปีชีส์

## บทที่ 1

### บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงความสำคัญของการสร้างหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดผง เพื่อเป็นการพึ่งพาตนเองทางพลังงานและตอบสนองความต้องการหัวเผาที่สามารถใช้งานได้กับเชื้อเพลิงที่อยู่ในประเทศ วัตถุประสงค์และขอบเขตการศึกษาสมมติฐานของการศึกษา ขั้นตอนการศึกษาและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ถ่านหิน (coal) เป็นเชื้อเพลิงธรรมชาติ เกิดจากการสะสมตัวตามธรรมชาติของซากพืชในแอ่งตะกอนน้ำตื้น ถ่านหินเป็นหินตะกอนชนิดหนึ่งซึ่งสามารถติดไฟได้ มีส่วนประกอบที่สำคัญคือ สารประกอบของคาร์บอน ซึ่งจะมีอยู่ประมาณไม่น้อยกว่าร้อยละ 50 โดยปริมาตร ปัจจุบันการใช้ประโยชน์จากถ่านหินส่วนใหญ่ใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า การถลุงโลหะ การผลิตปูนซีเมนต์ และอุตสาหกรรมที่ใช้เครื่องจักรไอน้ำ การผลิตกระแสไฟฟ้าทั่วโลกใช้พลังงานจากถ่านหินประมาณร้อยละ 39

เนื่องจากเป็นเชื้อเพลิงที่มีพลังงานสูง ถ่านหินราคาผันผวน มีการใช้งานจำนวนมาก ส่งผลทำให้เกิดก๊าซเรือนกระจก จึงมีการรณรงค์ด้วยการพัฒนาและปรับปรุงเทคโนโลยีการเผาไหม้ใหม่ รวมถึงจัดหาแหล่งพลังงานใหม่ เช่น การใช้พลังงานลม น้ำ ก๊าซชีวภาพและพลังงานชีวมวล ซึ่งผู้ศึกษาได้ศึกษาเกี่ยวกับพลังงานชีวมวล โดย ชีวมวลชีวมวล (Biomass) คือ สารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติและสามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้ สารอินทรีย์เหล่านี้ได้มาจากพืชและสัตว์ต่าง ๆ เช่น เศษไม้ ขยะ วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ซึ่งในประเทศไทยจะเห็นได้ว่าประชากรส่วนใหญ่ประกอบอาชีพเกษตรกรรม พลังงานชีวมวลจึงเป็นพลังงานที่น่าสนใจเป็นพิเศษในการที่จะนำพลังงานนี้มาพัฒนา เนื่องจากชีวมวลมีจำนวนมากจากการเหลือใช้จากภาคเกษตรกรรม และอุตสาหกรรมจำนวนมากโดยเฉพาะชีวมวลแข็ง (Solid biomass) เช่น กากไยปาล์ม ไม้พิน ชังข้าวโพด กะลาปาล์ม แกลบ กะลามะพร้าว เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลกับถ่านหินพบว่า(กลไกการเผาไหม้ชีวมวล)การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งเกิดได้ช้าเนื่องจากมีกระบวนการย่อยภายในจำนวนมาก เช่นการปลดปล่อยสารระเหยภายในเชื้อเพลิง การระเหยของน้ำภายในเชื้อเพลิง มีรูปร่างไม่สม่ำเสมอส่งผลทำให้เกิดการลำเลียงไปได้อย่างลำบาก อีกทั้งยังมีช่องว่างในอนุภาคที่สูง เหล่านี้ส่งผลทำให้ต้นทุนสูงและเกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ สถาบันเทคโนโลยีพระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จึงได้รับทุนวิจัยในการออกแบบพัฒนาหัวเผาชีวมวลชนิดผง (Pulverized biomass) มีห้องเผาไหม้ช่วยเพื่อช่วยให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ และเสถียรภายในห้องเผาไหม้หลัก ในการนำชีวมวลชนิดผงมาเป็นเชื้อเพลิงหลักในการเผาไหม้ เพื่อนำแก๊สร้อนไปใช้ในหม้อไอน้ำ (Boiler) จำเป็นต้องหาเทคโนโลยี ความรู้ หรือเทคนิคมาประยุกต์ใช้ ซึ่งหากต้องการนำชีวมวลชนิดผงมาใช้ คณะวิจัยจึงได้ออกแบบ และพัฒนาหัวเผา (Burner) ให้มีความเหมาะสม โดยศึกษาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวเผา ซึ่งหวังว่าจะทำให้เกิดความเร็วต่ำบริเวณกลางที่ห้องเผาไหม้ ช่วยให้เกิดการหมุนวนของแก๊สร้อนและเปลวไฟมีเสถียรภาพยิ่งขึ้น และมีการทำแบบจำลองการเผาไหม้ และศึกษาอิทธิพล สมรรถนะ เพื่อนำไปสู่การเผาไหม้ที่มีประสิทธิภาพดี และมีการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมเชิงพาณิชย์ต่อไป

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์เล่มนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาและพัฒนาหัวเผาชีวมวล

- 1.2.1 ออกแบบขนาดทางออกของหัวเผาให้มีลักษณะให้มีลักษณะขยายออกเป็น 1.25 และ 1.5 เท่า และทำการจำลอง 2 มิติ แบบไม่มีการเผาไหม้เพื่อวิเคราะห์ลักษณะการไหลเชิงเปรียบเทียบ
- 1.2.2 ทดลองการเผาไหม้ทั้งหัวเผาขนาด 1, 1.25 และ 1.5 เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะการเผาไหม้
- 1.2.3 จัดทำการทดลองการเผาไหม้ของหัวเผาทั้ง 3 ขนาด เพื่อศึกษาปรากฏการณ์ภายใน

## 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

- 1.3.1 การขยายขนาดหัวเผาจะทำให้เกิดความเร็วต่ำจนเกิดการหมุนวนภายใน (Recirculation) ในบริเวณที่กว้างตามแนวรัศมีในห้องเผาไหม้
- 1.3.2 อิทธิพลของการไหลของอากาศเข้าไปถ่ายเทความร้อนให้กับอากาศที่กำลังเข้าสู่ห้องเผาไหม้ทำให้เกิดการกระจายตัวที่ดีของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้
- 1.3.3 การหมุนของแก๊สไอเสียทำให้เกิดการกระจายตัวที่ดีของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้

## 1.4 ขอบเขตของการศึกษา

- 1.4.1 ออกแบบหัวเผาเชื้อเพลิงให้มีความเหมาะสมกับเตาขนาด 300 กิโลวัตต์ความร้อน
- 1.4.2 การเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลที่ 300 กิโลวัตต์ความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1.4.3 ใช้เชื้อเพลิงธรรมชาติเหลว (LPG) ในการอุ่นห้องเผาไหม้และชีวมวลจากไม้ยางพารา
- 1.4.4 สมรรถนะการเผาไหม้ที่จะทำการศึกษา ได้แก่ การกระจายของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วย ประสิทธิภาพการเผาไหม้ องค์ประกอบของก๊าซไอเสีย

## 1.5 ขั้นตอนการศึกษา

- 1.5.1 กำหนดหัวข้อ วัตถุประสงค์และขอบเขตการศึกษา
- 1.5.2 สำรวจและหาข้อมูลวิจัยที่เกี่ยวข้องกับลักษณะของเชื้อเพลิงชีวมวล การเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล การเผาไหม้เชื้อเพลิงผง เทคนิคในการสร้างความเสถียรและการลดปริมาณมลพิษ การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณและเทคนิคการใช้แบบจำลอง
- 1.5.3 ออกแบบและสร้างหัวเผาขนาด 1.25 เทา แล้วส่งผลิต
- 1.5.4 ทำแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์การเผาไหม้ กำหนดเงื่อนไขกรณิต่างๆ สำหรับการศึกษามลกระทบ

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.6.1 สามารถนำพลังงานทางเลือกที่หาได้ง่ายและนำเทคโนโลยีมาใช้ให้เกิดประโยชน์ เพื่อลดปัญหาพลังงานหลักที่ลดเหลือน้อยลงทุกๆวัน ในปัจจุบัน
- 1.6.2 สามารถปรับปรุงการเผาไหม้โดยการลดปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์
- 1.6.3 ได้ศึกษาและเปรียบเทียบขนาดของหัวเผาที่มีความเหมาะสมกับเชื้อเพลิง เพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ มีประสิทธิภาพสูง และมีมลพิษน้อยที่สุด

## บทที่ 2

### วรรณกรรมปริทรรศน์

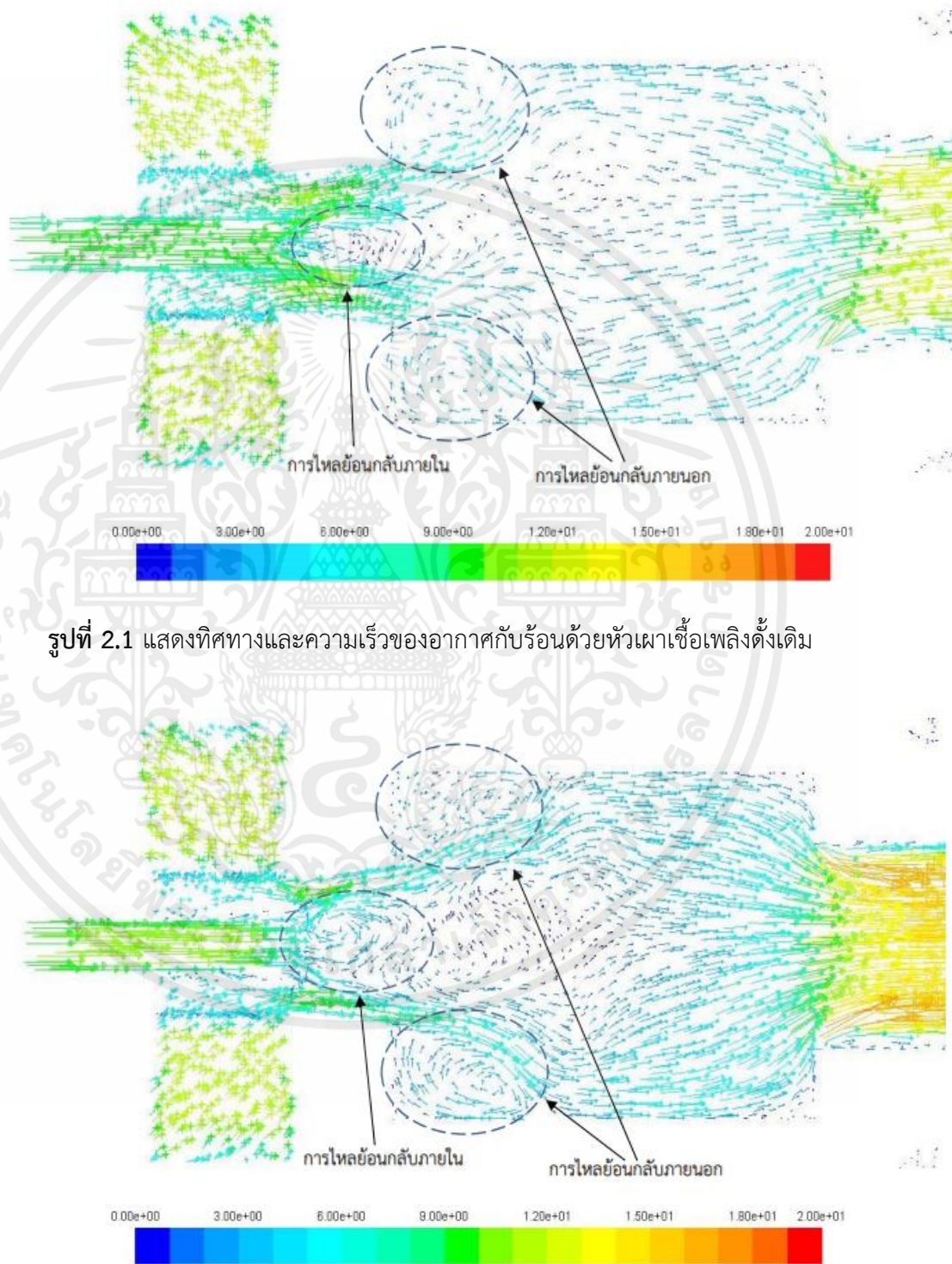
จากบทที่ 1 แสดงให้เห็นแล้วว่างานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ที่มุ่งเน้นในการออกแบบ และพัฒนาหัวเผาให้เหมาะสมสำหรับเชื้อเพลิงชีวมวล นอกจากนี้ยังมุ่งเน้นให้ศึกษาระยะ จุดบริเวณการทำงาน และสมรรถนะของหัวเผา ซึ่งการออกแบบได้ศึกษาหลักการการทำงานของหัวเผา รวมทั้งศึกษางานวิจัยที่มีผู้ทำมาก่อน เพื่อให้ทราบแนวคิด สมบัติ และปัจจัยต่างๆที่ส่งผลต่อสมรรถนะของหัวเผา เพื่อให้ทราบถึงแนวคิด และปัจจัยที่อาจส่งผลต่อสมรรถนะของหัวเผา รวมถึงการป้องกันการละเมิดสิทธิบัตรของผู้วิจัยท่านอื่น จึงขอกล่าวถึงหัวข้อที่เกี่ยวข้องกับเรื่องของผู้วิจัยกำลังศึกษา อาทิเช่น

Shan Xue และคณะ [11] ได้ศึกษาตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อการเกิดไนโตรเจนออกไซด์ (NOx) และปริมาณคาร์บอน ( $C_{FA}$ ) คงเหลือในเถ้าของการเผาไหม้ถ่านหินภายในเตาขนาด 1 MW จะเห็นว่าอัตราส่วนอากาศปฐุมภูมิ,อากาศหตุยภูมิ,Swirl number และองค์ประกอบต่างๆของเชื้อเพลิง ล้วนส่งผลต่อการเกิดไนโตรเจนออกไซด์และคาร์บอนคงเหลือทั้งสิ้น

ธิติพัทธ์ ลิ้มกุล และคณะ [12] พบว่าลักษณะพฤติกรรมมวลไหลของอากาศที่เกิดจากการใช้หลักการหมุนควง จะทำให้เกิดระยะทางในการเคลื่อนที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาที่อากาศและเชื้อเพลิงอยู่ในเตาเผาที่มากขึ้นเอื้อต่อการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ได้นานขึ้น ทำให้เกิดอุณหภูมิสูงพอที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ได้อย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ลักษณะการไหลแบบหมุนควงของอากาศและเชื้อเพลิง จะช่วยเพิ่มความรุนแรงของความปั่นป่วนของกระแสการไหล ซึ่งจะกระตุ้นให้เถ้าที่เกาะอยู่ที่ผิวด้านนอกของเชื้อเพลิงหลุดออกทำให้อากาศสามารถเข้าทำปฏิกิริยาด้านในของเชื้อเพลิงได้ช่วยให้การเผาไหม้มีความสมบูรณ์มากขึ้น

รังสินันท์ ณ รังสี และคณะ [6] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงสมรรถนะหัวพ่นเชื้อเพลิงผง โดยการเพิ่มพื้นที่ช่องการไหลของอากาศปฐุมภูมิ โดยการเพิ่มพื้นที่ช่องทางการไหลของอากาศปฐุม ในกรณีของหัวเผาเชื้อเพลิงดั้งเดิม อากาศปฐุมภูมิกับเชื้อเพลิงสู่ห้องเผาไหม้ด้วยความเร็วสูง แต่อากาศหตุยภูมิที่ผ่านใบมีดโค้งมีความเร็วที่ต่ำ ซึ่งส่งผลให้กระแสการไหลเกิดการไหลย้อนกลับและการหมุนควงที่เกิดขึ้นของอากาศหตุยภูมิในห้องเผาไหม้ช่วยนั้นไม่ดี และยังส่งผลให้เกิดการคลุกเคล้าระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศนั้นไม่ดี ซึ่งส่งผลให้เกิดอัตราการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ต่ำดังรูปที่ 2.1 ในกรณีของหัวเผาเชื้อเพลิงที่ถูกขยาย อากาศปฐุมภูมิกับเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ด้วยความเร็วที่ต่ำกว่าหัวเผาดั้งเดิม แต่อากาศหตุยภูมิที่ผ่านใบมีดโค้งมีความเร็วที่สูงกว่าหัวเผาแบบดั้งเดิมส่งผลให้

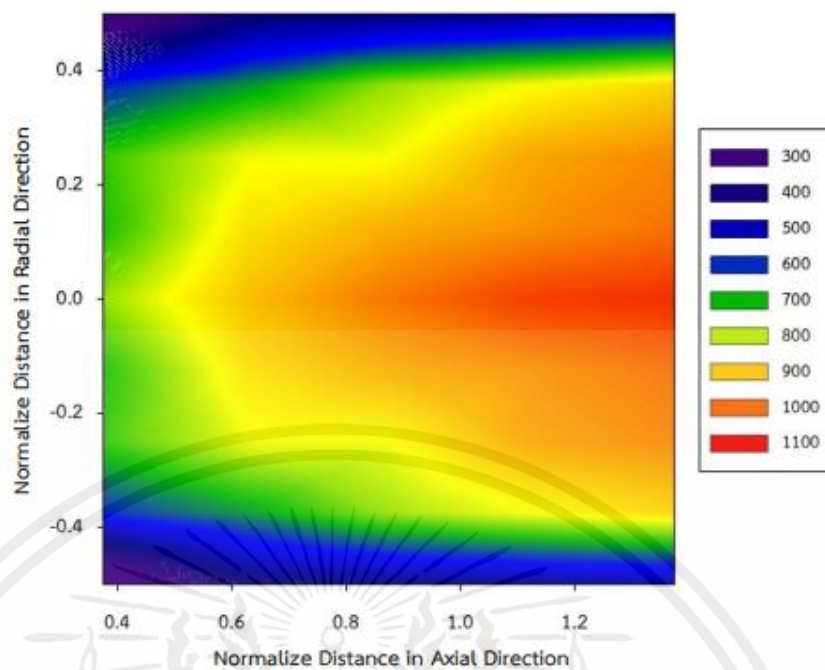
กระแสการไหลที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้ช่วยเกิดการไหลย้อนกลับที่ดีกว่าและยังส่งผลให้เกิดการหมุนควงของอากาศทุติยภูมิที่มีความรุนแรงมากกว่า เมื่อเทียบกับหัวเผาแบบดั้งเดิมดังรูปที่ 2.2



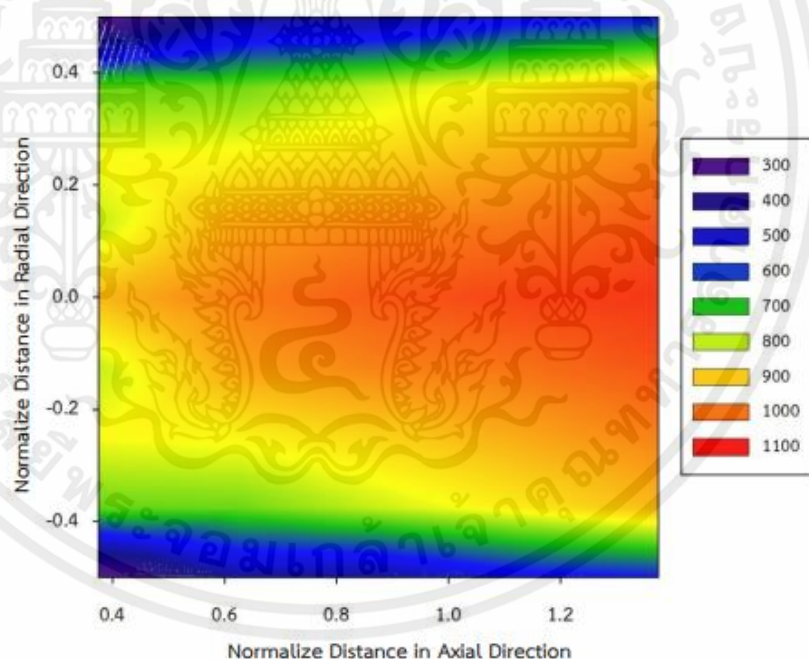
รูปที่ 2.1 แสดงทิศทางและความเร็วของอากาศกับร้อนด้วยหัวเผาเชื้อเพลิงดั้งเดิม

รูปที่ 2.2 แสดงทิศทางและความเร็วของอากาศกับร้อนด้วยหัวเผาเชื้อเพลิงที่ถูกขยาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 อุณหภูมิของการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลด้วยหัวเผาเชื้อเพลิงดั้งเดิม



รูปที่ 2.4 อุณหภูมิของการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลด้วยหัวเผาเชื้อเพลิงที่ถูกขยาย

หากดูรูปที่ 2.3 เทียบกับรูปที่ 2.4 จะเห็นว่า การเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลของหัวเผาที่ถูกขยาย ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ดีกว่าและอุณหภูมิที่สูงกว่า เกิดการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ดีกว่า และส่งผลให้เกิดการเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้ได้นานขึ้น เพราะว่า ความเร็วของอากาศป้อนและเชื้อเพลิงมีค่าต่ำ แต่อากาศป้อนมีความเร็วเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้เชื้อเพลิงและอากาศมีการปั่นป่วน ,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคลุกเคล้าของอากาศกับเชื้อเพลิงข้างในห้องเผาไหม้นั้นดียิ่งขึ้น และอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำ เนื่องจากอากาศปฐมภูมิ อากาศทุติยภูมิที่เข้ามาทำให้อุณหภูมิการเผาไหม้มีค่าลดลง และยังพบอีกว่า ยิ่งการเผาไหม้นั้นห่างจากหัวเผามากเท่าไร ยิ่งทำให้อากาศปฐมภูมิและทุติยภูมิที่เข้ามาในห้องเผาไหม้มีค่าน้อยลง และการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลโดยที่ใช้หัวเผาที่ขยาย มาให้เชื้อเพลิงที่หลีกเลี่ยงจากการถูกเผาไหม้และก๊าซไอเสียนั้นมีค่าลดลง

ฉัตรเฉลิม แก้วชมภู และคณะ [1] ได้ศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวล โดยการจำลองผลของหัวเผาที่ถูกขยาย โดยใช้เกลาปาล์มบดละเอียดเป็นเชื้อเพลิง ที่การเผาไหม้มีปริมาณความร้อนที่ 300 kW โดยมีอากาศส่วนเกินที่ 15% อัตราส่วนของอากาศดังนี้ อากาศปฐมภูมิ 25% ทุติยภูมิ 65% และ ตติยภูมิ 10% ซึ่งผลที่เกิดขึ้นสามารถสรุปได้ว่า ลมปฐมภูมิในบริเวณที่ขยายขึ้นในหัวเผา นั้นเกิดการลดลงของความเร็วและเกิดการหมุนวนบริเวณใกล้กำแพง เมื่อวิเคราะห์ผลของอนุภาคที่เกิดการกระทบกันบนวัตถุขวางการไหล จะเห็นการกระจายตัวที่ดีกว่าเดิม เนื่องจากมีการขยายหัวเผาส่งผลให้ Swirl number ของลมทุติยภูมิมีค่า ส่งผลให้เกิดการไหลย้อนกลับที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้ช่วยดีขึ้น ในส่วนของการกระจายตัวของอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ช่วยของหัวเผาที่ถูกขยาย ค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับหัวเผาเริ่มต้นและชนิดของความเข้มข้นของสารที่เกิดการระเหยคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และออกซิเจน (O<sub>2</sub>) นั้นลดลงในขณะที่คาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) มีค่าเพิ่มขึ้น ในส่วนการเคลื่อนที่ของอนุภาคของหัวเผาที่ถูกขยายในห้องเผาไหม้ช่วยนั้นมีการกระจายตัวได้ดีกว่าหัวเผาเริ่มต้น ความเร็วของอนุภาคจะถูกลดลงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่ของอนุภาคอย่างรวดเร็วซึ่งสาเหตุนี้ทำให้เกิดการไหลหมุนวน

จากการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่า การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหล ความเร็วการไหล หรือ การเปลี่ยนรูปร่างทางโครงสร้าง เช่น ขนาดท่อ การนำใบพัดมาขวางทางการไหล เป็นต้น ล้วนเป็นความแตกต่างของการป้อนอากาศ ซึ่งส่งผลอย่างมีนัยสำคัญที่ทำให้การเผาไหม้เปลี่ยนไปได้[13]

## บทที่ 3

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

สำหรับบทนี้จะนำเสนอเกี่ยวกับทฤษฎีต่างๆที่นำมาใช้คำนวณและออกแบบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในระหว่างการเผา ซึ่งเป็นผลจากอิทธิพลของอุปกรณ์ต่างๆ

#### 3.1 เชื้อเพลิงแข็ง (Solid fuel)[2]

เชื้อเพลิง หมายถึง สารใดๆเมื่อเกิดการเผาไหม้แล้ว จะให้พลังงานความร้อนออกมา ซึ่งนำไปใช้ประโยชน์ได้ธาตุที่เป็นองค์ประกอบที่สำคัญของเชื้อเพลิงคือ คาร์บอน (C) และไฮโดรเจน (H) เมื่อเชื้อเพลิงถูกเผาไหม้ ธาตุคาร์บอนและไฮโดรเจนจะทำปฏิกิริยากับก๊าซออกซิเจน แล้วเกิดพลังงานความร้อนน้ำและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ หรือในบางครั้งอาจจะเกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ หรือเขม่า

เชื้อเพลิงแข็งที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติมีมากมาย ยกตัวอย่างเช่น ไม้ ชีวมวล พืช ถ่านหิน โดยในเชื้อเพลิงจะมีความชื้นอยู่ แบ่งได้เป็นสองรูปแบบ รูปแบบแรกเป็นน้ำอิสระ (free water) แทรกตัวในรูพรุนเล็กๆของถ่านหิน หรืออยู่ในระหว่างผนังเซลล์ของไม้ รูปแบบที่สองเป็นน้ำที่ดูดกลืนไว้อย่างเชิงกายภาพ (physical absorption หรือ bound water) โดยความชื้นในเชื้อเพลิงแข็งส่งผลกระทบโดยตรงกับการเผาไหม้

ถ้ำคือสารอินทรีย์ที่เหลือหลังจากเชื้อเพลิงเผาหมดแล้ว ไม่มีถ้ำน้อยมาก ในขณะที่ถ่านหินมีถ้ำสูงมากกว่า 10% โดยถ้ำมีความสำคัญโดยตรงกับการออกแบบอุปกรณ์การเผาไหม้ และอุปกรณ์การถ่ายเทความร้อน ทั้งนี้เพื่อลดปัญหาการเกิดการ (slag fouling) การกัดกร่อน (erosion) และการผุกร่อน (corrosion) ลงได้

ตารางที่ 3.1 แสดงเปรียบเทียบลักษณะของถ่านหิน [1,8]

ชนิดถ่านหิน	ค่าความร้อน	ความชื้น	ปริมาณกำมะถัน	ปริมาณเถ้า
แอนทราไซต์	สูง	ต่ำ	ต่ำ	ต่ำ
บิทูมินัส	สูง	ต่ำ	ต่ำ	ต่ำ
ซับบิทูมินัส	สูง-ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง
ลิกไนต์	ปานกลาง-ต่ำ	สูง	สูง	ปานกลาง-สูง
พีต	ต่ำ	สูง	สูง	ขึ้นอยู่กับแหล่งที่มา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างเชื้อเพลิงแข็งปิโตรมิเนส

### 3.2 เชื้อเพลิงชีวมวล ( Biomass )[2]

ชีวมวล (Biomass) คือ สารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติและสามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้ การใช้งานชีวมวลเพื่อให้ได้พลังงานอาจจะทำโดยนำมาเผาไหม้เพื่อนำพลังงานความร้อนที่ได้ไปใช้ในกระบวนการผลิตไฟฟ้าทดแทนพลังงานจากฟอสซิล (เช่น น้ำมัน) ซึ่งมีอยู่อย่างจำกัดและอาจหมดลงได้ ชีวมวลเหล่านี้มีแหล่งที่มาต่าง ๆ กัน อาทิ พืชผลทางการเกษตร (agricultural crops) เศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร (agricultural residues) ไม้และเศษไม้ (wood and wood residues) หรือของเหลือจากอุตสาหกรรมและชุมชน ยกตัวอย่างเช่น กากโยปาล์ม ไม้ฟืน ช้างข้าวโพด เหง้ามันสำปะหลัง กะลามะพร้าว กะลาปาล์ม แกลบ



รูปที่ 3.2ก) กากโยปาล์ม



รูปที่ 3.2ข.) ไม้ฟืน



รูปที่ 3.2ค.) ช้าง



รูปที่ 3.2ง.) กะลาปาล์ม



รูปที่ 3.2จ.) แกลบ



รูปที่ 3.2ฉ.) กะลามะพร้าว

โดยชีวมวลส่วนใหญ่มีองค์ประกอบของเซลลูโลส ( $C_8H_{10}O_5$ ) และลิกนิน ( $C_{40}H_{44}O_6$ ) ซึ่งชีวมวลที่คณะวิจัยได้นำมาใช้ในนั้นคือกะลาปาล์ม เชื้อเพลิงชีวมวลจากกะลาปาล์ม เป็นวัสดุเหลือจากอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม้ยางพารา (Rubberwood) เป็นส่วนประกอบหนึ่งของต้นยางพารา โดย เมื่อต้นยางพารา อายุตั้งแต่ 20-25 ปี ขึ้นไป ให้ผลผลิตน้ำยางไม่คุ้มค่าเชิงเศรษฐกิจ ต้นยางจะถูกตัดโค่นและจะมีการ นำไม้ยางพาราที่ตัดโค่น ซึ่งสามารถแบ่งเป็นส่วนหลักๆ ดังนี้ รากไม้หรือต่อไม้ , กิ่งหรือปลายไม้ , ไม้ ท่อนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่มีขนาด 5 นิ้ว ขึ้นไป ส่วน เหล่านี้จะถูกนำไปใช้ไปแปรรูปเป็นไม้ ยางพาราแปรรูปอบแห้ง ที่จะนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่อเนื่อง โดยจะเหลือส่วนรากไม้ และ ปลายไม้ หรือกิ่งไม้ที่ไม่ได้ใช้ประโยชน์แล้ว ล้างของเสียจากโรงงานแปรรูปไม้และโรงงานผลิตผลิตภัณฑ์ไม้ ยางพารา ยกตัวอย่างเช่น ปีกไม้ ชี้เลื่อย ตาไม้(ส่วนที่มีตำหนิ) และซีกบ ที่เป็นวัตถุดิบที่สามารถนำไป สร้างมูลค่าเพิ่มโดยการผลิตเป็นชีวมวลอัดแท่ง (Wood Pellet) ที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับผลิตพลังงาน ทดแทน โดยกระบวนการผลิตชีวมวลอัดเม็ดจะนำเศษไม้ยางพาราที่ทำได้ มาย่อยให้มีขนาดเล็กลง และอบไล่ความชื้นเพื่อจะเข้าสู่กระบวนการผลิตชีวมวลต่อไป ซึ่งไม้ยางพารามีคุณสมบัติเบื้องต้นดังนี้ ค่าความร้อน ( Net Calorific Value) 18.41 MJ/kg

อุตสาหกรรมชีวมวลอัดเม็ดจากไม้ยางพาราของประเทศไทยนั้นเติบโตเป็นอย่างมาก ซึ่งเกิด จากความ ต้องการใช้พลังงานทดแทน ทั้งในประเทศและนอกประเทศ และนโยบายการแก้ไขปัญหา ราคาขายตกต่ำและ ควบคุมปริมาณการผลิตยางพาราของประเทศไทย โดยโค่นต้นยางเก่าเพื่อลด ปริมาณผลผลิตยางพารา ล้นตลาด โดยกำหนดให้มีการโค่นต้นยางปีละ 400,000 ไร่ จาก นโยบาย การโค่นต้นยางดังกล่าวจะส่งผลให้ สามารถนำต้นยางพาราที่โค่นไปแปรรูปเป็นไม้ยางพาราอบแห้งได้ ประมาณ 3.4 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี และมี เศษเหลือทิ้ง จากกระบวนการแปรรูป ปีละประมาณ 11.6 ล้านตัน ซึ่งสามารถนำไปใช้ผลิตชีวมวลอัดแท่งได้ถึงปีละ 3 ล้านตัน

ความต้องการชีวมวลเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมากในตลาดต่างประเทศ ซึ่งเป็นผลมาจากราคา น้ำมันดิบราคาเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง และการที่หลายๆ ประเทศมีการร่วมมือกันในการลดภาวะเรือน กระจกส่งผลให้ มีการกำหนดการลดปริมาณถ่านหินในการผลิตพลังงานและเพิ่มปริมาณการใช้ เชื้อเพลิงชีวมวลมากขึ้น ในหลายประเทศ เช่น เกาหลีใต้ ญี่ปุ่น

ตารางที่ 3.2 แสดงสมบัติของชีวมวล[10]

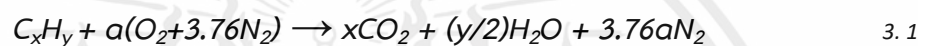
พืช	ส่วนประกอบ	ค่าความร้อน (KJ/kg)	ความชื้น (%)	ความหนาแน่น (kg/m <sup>3</sup> )
ข้าว	ฟางข้าว	12,333	10.00	125
	แกลบ	14,204	8.20	150
อ้อยโรงงาน	ใบ	15,479	9.20	100
	ชานอ้อย	7,368	50.73	120
มันสำปะหลัง	เหง้ามันสำปะหลัง	5,494	59.40	250
	ลำต้น	7,560	48.40	NA
	ทางใบ	1,760	78.40	NA
ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์	ชังข้าวโพด	16,220	7.00	NA
	ลำต้น	9,830	41.7	NA
ปาล์มน้ำมัน	ทะลายปาล์ม	7,240	58.60	380
	เส้นใยปาล์ม	11,800	31.84	250
	กะลาปาล์ม	18,267	12.00	400
	ลำต้นปาล์ม	7,540	48.40	NA
ยางพารา	ไม้ยางพารา	8,600	45.00	450
ยูคาลิปตัส	เปลือกไม้ยูคาลิปตัส	6,745	50.00	NA
มะพร้าว	ชุกมะพร้าว	6,272	NA	270

### 3.3 การเผาไหม้ ( Combustion )

รูปแบบการเผาไหม้สำหรับการคำนวณพลศาสตร์ของไหล ซึ่งการเผาไหม้เกิดจากปฏิกิริยาเคมีที่เชื้อเพลิงทำปฏิกิริยากับออกซิเจน ได้ผลิตภัณฑ์คือ คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) กำมะถัน (S) พร้อมกับปลดปล่อยพลังงานความร้อน โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือปฏิกิริยาออกซิเดชัน จะเกิดอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูง เป็นปฏิกิริยาคลายความร้อน ปฏิกิริยาการเผาไหม้จะเกิดขึ้นได้เมื่อมีปัจจัยครบสามอย่างคือเชื้อเพลิง ออกซิไดเซอร์ และสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่องและสมบูรณ์

### 3.3.1. การเผาไหม้ตามปริมาณสารสัมพันธ์ (Stoichiometry Combustion)[5]

การเผาไหม้ตามปริมาณสารสัมพันธ์ หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าการเผาไหม้ทางทฤษฎี (theoretical combustion) คือการเผาไหม้ที่ต้องการปริมาณออกซิเจนในปริมาณที่พอดี หากอากาศที่ไหลเข้าสู่กระบวนการเผาไหม้มีปริมาณมาก จะถูกเรียกว่า อากาศส่วนเกิน (excess air) ปริมาณตัวออกซิไดเซอร์มากกว่าสตอยซิโอเมตรี เป็นผลกระทบทำให้ส่วนผสมบาง (fuel lean) ในทางกลับกัน เมื่อปริมาณอากาศที่ใช้ในกระบวนการเผาไหม้น้อยกว่าปริมาณสารสัมพันธ์ ปริมาณตัวออกซิไดเซอร์น้อยกว่าสตอยซิโอเมตรี เรียกว่า ส่วนผสมหนา (rich mixture หรือ fuel rich) โดยสามารถคำนวณการเกิดสตอยซิโอเมตรีได้จากสมการการเผาไหม้สำหรับเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอน ( $C_xH_y$ ) ได้ดังนี้



เมื่อ

$$a = x + y/4 \quad 3.2$$

จากสัดส่วนปริมาณออกซิเจนในอากาศคือ 21% โดยปริมาตร และไนโตรเจน 79% โดยปริมาตร นั่นแต่ละโมลของออกซิเจนมีไนโตรเจน 3.76 โมล หาอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงตามทฤษฎี (stoichiometry)

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{stoic} = \left(\frac{m_{air}}{m_{fuel}}\right) = \frac{4.76a}{I} \left(\frac{MW_{air}}{MW_{fuel}}\right) \quad 3.3$$

เมื่อ  $MW_{air}$  และ  $MW_{fuel}$  เป็นน้ำหนักโมเลกุลของอากาศ และเชื้อเพลิงตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีปริมาณอื่นๆที่เกี่ยวข้อง อัตราส่วนสมมูล (Equivalent ratio,  $\Phi$ ) เป็นค่าที่ใช้บ่งบอกว่าส่วนผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง Stoichiometry หนาหรือบาง เป็นผลดังสมการนี้

$$\Phi = \frac{(A/F)_{stoic}}{(A/F)} = \frac{(A/F)}{(A/F)_{stoic}} \quad 3.4$$

เมื่อ  $\Phi > 1$  สำหรับส่วนผสมหนา ส่วน  $\Phi < 1$  สำหรับส่วนผสมบาง และสำหรับ Stoichiometry  $\Phi = 1$  ซึ่งอัตราส่วนสมมูลนั้นเป็นพารามิเตอร์ที่มีประโยชน์ต่อการบอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมรรถนะของพารามิเตอร์อื่นๆ ได้แก่ %Stoichiometry air คือ ปริมาณอากาศที่ใช้จริงในการเผาไหม้คิดเป็นกี่เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอากาศตามทฤษฎี มีความสัมพันธ์ดังนี้

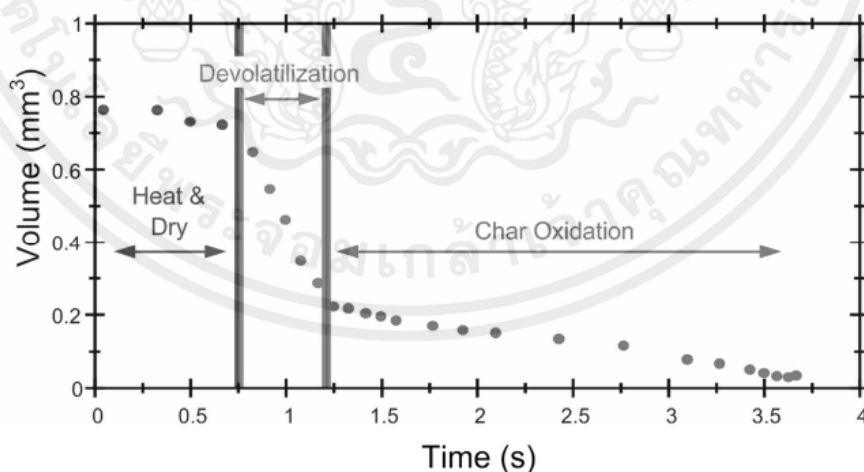
$$\%stoichiometry\ air = \frac{100\%}{\phi} \quad 3.5$$

เปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน (%excess air) คือปริมาณที่บอกค่าอากาศส่วนเกินที่เปอร์เซ็นต์โดยคิดจากอากาศทางทฤษฎีที่มีค่าเท่ากับ 100

$$\%excess\ air = \frac{1-\phi}{\phi} \cdot 100\% \quad 3.6$$

### 3.3.2. การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง ( Solid fuel combustion ) [2,4]

ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงประเภทถ่านหินและเชื้อเพลิงประเภทชีวมวลนั้น เมื่ออุณหภูมิของเชื้อเพลิงได้รับความร้อนเชื้อเพลิงจะมีการสูญเสียมวลสามช่วงได้แก่ (i) การทำแห้ง (drying) โดยความชื้นที่อยู่ในเชื้อเพลิงหลังจากได้รับความร้อนจะเกิดการแยกสลายตัวด้วยความร้อน (ii) การปล่อยสารระเหย (devolatilization) โดยหลังจากที่เชื้อเพลิงเกิดการแยกสลายตัวจากความร้อนจะได้สารอินทรีย์ และถ่านชาร์ (iii) การเผาไหม้ถ่านชาร์ (char combustion) เกิดขึ้นหลังจากที่การแยกสลายตัวจากความร้อนสิ้นสุดลง โดยสารระเหยจะถูกเผาพร้อมกับการเผาไหม้ถ่านชาร์ กระบวนการทั้งสามเกิดขึ้นดังรูป 3.1



รูปที่ 3.3 กลไกการเผาไหม้เชื้อเพลิงอนุภาคขนาดเล็ก

#### 3.3.2.1 การทำแห้งของเชื้อเพลิงแข็ง (Drying)

ความชื้นที่อยู่ในเชื้อเพลิงมีอยู่ 2 รูปแบบ รูปแบบแรกคือน้ำที่อยู่ระหว่างช่องว่างโมเลกุลในเชื้อเพลิง และรูปแบบที่สองคือน้ำที่ยึดเหนี่ยว ซึ่งเป็นน้ำที่ถูกดูดแอกสารนี้เป็นแอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซับไว้บนโครงสร้างพื้นผิวของเชื้อเพลิง จะมีการถ่ายเทความร้อนด้วยการพา และการแผ่รังสี เป็นผลทำให้อุณหภูมิของอนุภาคสูงขึ้นจนถึงจุดเดือดของน้ำ และเกิดการระเหยออกมา

### 3.3.2.2 การปลดปล่อยสารระเหย (Devolatilization)

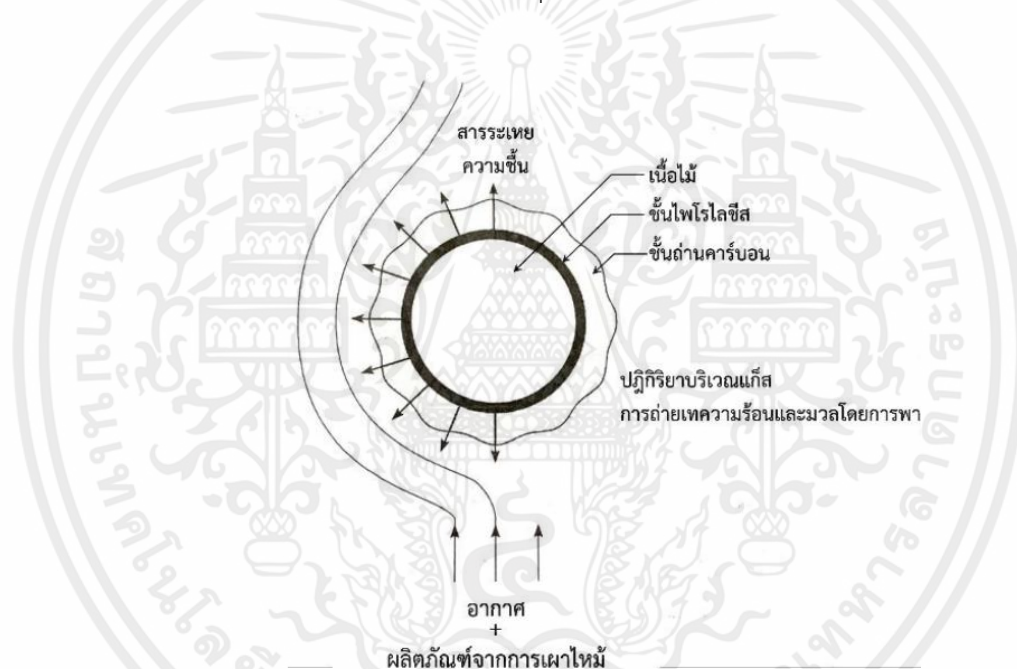
หลังจากการทำแห้งสิ้นสุดลง ในขณะที่อุณหภูมิสูงขึ้น จะเกิดการย่อยสลายด้วยความร้อน ส่งผลทำให้สารอินทรีย์ออกมาภายนอก และมีกระบวนการปลดปล่อยสารระเหย สามารถเรียกกระบวนการนี้ว่าไพโรไลซิส (pyrolysis) ซึ่งอัตราการปลดปล่อยสารระเหยและการเกิดกระบวนการไพโรไลซิสจะเกิดได้ดีก็ต่อเมื่ออุณหภูมิ และชนิดของเชื้อเพลิงมีค่าเหมาะสมกัน หลังจากที่สารระเหยถูกปลดปล่อยออกมาแล้วจะเข้าไปผสมกับอากาศ มีความชื้นทำให้อุณหภูมิของเปลวไฟรอบเชื้อเพลิงต่ำลงด้วย

### 3.3.2.3 การเผาไหม้ถ่านชาร์ (Burning of carbon)[6]

การเผาไหม้ชาร์เป็นขั้นตอนสุดท้ายของการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง โดยถ่านชาร์จะมีลักษณะเป็นรูพรุนสูงมาก (Porous) ส่งผลทำให้จำนวนพื้นผิวสัมผัสในการเผาไหม้เพิ่ม ในระดับ 100 ตารางเมตรต่อกรัมสำหรับชาร์จากถ่านหิน และ 10,000 ตารางเมตรต่อกรัม สำหรับชาร์จากไม้ โดยเมื่อมีจำนวนรูพรุนจำนวนมากออกซิเจนในอากาศก็สามารถแพร่เข้าไปในถ่านชาร์ได้ โดยการเผาไหม้ถ่านชาร์แบบนี้เรียกว่ากระบวนการเผาไหม้ที่ผิวสัมผัส (Surface burning) ระหว่างสองสถานะที่ไม่เหมือนกัน หรือเรียกว่าการเผาไหม้แบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous combustion) โดยการเผาไหม้จะมีกระบวนการดังนี้

1. กระบวนการแพร่หรือการพาของออกซิเจนไปยังพื้นผิวของเชื้อเพลิง
2. กระบวนการดูดซับออกซิเจนไว้บนผิวเชื้อเพลิง
3. ออกซิเจนที่จับกับพื้นผิวเชื้อเพลิงทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงได้สารผลิตภัณฑ์ และถูกดูดกลืนไว้ที่ผิวเชื้อเพลิง
4. สารผลิตภัณฑ์ถูกปล่อยออกมาที่ผิวเชื้อเพลิง
5. สารผลิตภัณฑ์ถูกแพร่ออกจากเชื้อเพลิง

ขั้นตอนที่เกิดขึ้นตามลำดับ ขั้นตอนไหนเกิดขึ้นช้าที่สุดจะเป็นตัวกำหนดอัตราการเผาไหม้ขอเชื้อเพลิงนั้น ยกตัวอย่างเช่น หากอนุภาคมีขนาดเล็ก อุณหภูมิค่อนข้างต่ำ และการไหลของอนุภาคเป็นไปอย่างช้าๆ จะพบว่าขั้นตอนที่ 3 (ปฏิกิริยาการเผาไหม้) จะเกิดขึ้นช้ากว่าขั้นตอนการจั่นตอนที่ 5 (สารผลิตภัณฑ์ถูกแพร่ออกจากเชื้อเพลิง) ทำให้อัตราการเผาไหม้ถูกควบคุมด้วยอัตราจั่นทางเคมี (Chemical kinetics) เป็นหลัก ซึ่งอัตราจั่นทางเคมีไม่ขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคและการไหล แต่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ เอ็กโซเนนเซียล นอกจากนี้หากอัตราการแพร่สูงกว่าอัตราการเผาไหม้ จะส่งผลทำให้ความเข้มข้นของการเผาไหม้ที่ผิวเชื้อเพลิงจะไม่แตกต่างจากบริเวณกระแสวิกฤตที่อยู่ห่างจากผิว แต่ในทางตรงกันข้าม หากอนุภาคมีขนาดใหญ่ อุณหภูมิสูงการไหลของอากาศรอบอนุภาคจะเร็ว เป็นผลให้ขั้นตอนที่ 3 เร็วกว่าขั้นตอนที่ 1 และ 5 มาก ส่งผลทำให้การแพร่ของออกซิเจนไปยังผิวเชื้อเพลิงได้เร็ว ซึ่งอัตราการเผาไหม้จะขึ้นกับขนาดของอนุภาคมากกว่า



รูปภาพที่ 3.4 กระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล

### 3.4 การปลดปล่อยมลพิษและการควบคุม (Pollutants Emission and Control)[9]

การเผาไหม้เชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอน เป็นสาเหตุหลักของการทำลายสิ่งแวดล้อม ไฮโดรคาร์บอนที่เข้าสู่บรรยากาศอันเนื่องจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ หรือการระเหยก็ดี ไม่ได้เป็นอันตรายโดยตรงต่อชีวิตและสุขภาพ แต่จะเกิดผลร้ายเมื่อก๊าซนี้ไปทำปฏิกิริยากับไนโตรเจนออกไซด์ ( $\text{NO}_x$ ) โดยมีแสงแดดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งเรียกว่า ปฏิกิริยาโฟโตเคมีคัล หรือปรากฏการณ์หมอกพิษ (Photochemical Smog) ซึ่งกระบวนการดังกล่าวเกิดจากแสงเป็นตัวกระตุ้น ทำให้เกิดสารพิษขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลายชนิด เช่นโอโซน สารกลุ่มอัลดีไฮด์ และคีโตน เป็นต้น สารเหล่านี้เมื่อรวมตัวกับหมอกหรือควันก็จะกลายเป็นหมอกควันพิษ

การเผาไหม้ก็ให้เกิดมลพิษหลักๆ ได้แก่  $\text{NO}_x$  ,  $\text{SO}_x$  ,  $\text{CO}$  ,  $\text{C}_x\text{H}_y$  Tar,  $\text{HCl/Cl}_2$ , PAH (polyaromatic hydrocarbon), PCDD (polychlorinated dibenzo – dioxins), PCDF (polychlorinated dibenzofurans) , โลหะหนัก , ฝุ่น , เเขม่า โดยทางคณะวิจัยต้องการลดปริมาณ  $\text{CO}$  และ  $\text{NO}_x$

### 3.4.1 การก่อตัวของคาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon monoxide)[2,4,7]

ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ( $\text{CO}$ ) เป็นก๊าซที่มีคุณสมบัติไม่มีสี ไม่มีกลิ่น มีน้ำหนักเบากว่าอากาศและเมื่อเผาไหม้จะให้เปลวไฟเป็นสีฟ้า เมื่อก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เข้าสู่ร่างกายทางระบบหายใจจะเป็นพิษต่อร่างกายเพราะว่าจะเข้ามาแทนที่ออกซิเจนในกระแสโลหิต ทำให้ร่างกายไม่สามารถใช้ก๊าซออกซิเจนได้ จะทำให้เกิดอาการปวดศีรษะ หัวใจเต้นถี่ขึ้น และทำให้เป็นลมหมดสติ

คาร์บอนมอนอกไซด์เกิดได้จากหลายประการ เช่น การเผาไหม้แบบส่วผสมหนาเกินไป การคลุกเคล้ากันดีไม่พอ ปริมาณอากาศไม่เพียงพอ และยังมี การเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงทำให้เกิดการแตกสลายของคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) มาเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ ได้ดังสมการ



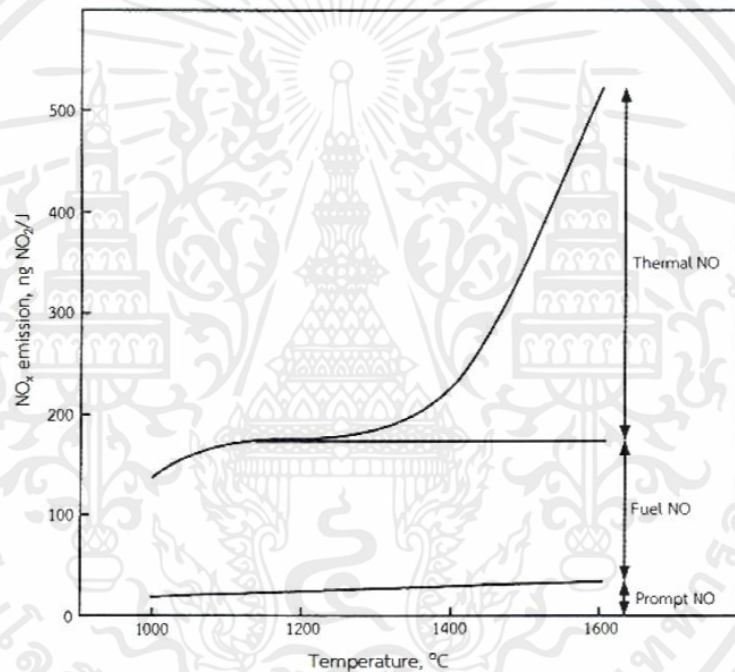
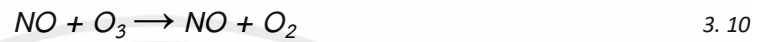
สาเหตุสำคัญอีกหนึ่งประการที่ทำให้เกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ คือเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้สั้นเกินไป เหตุผลเพราะว่าหากเวลาในการเผาไหม้น้อย การระบายไอเสียเกิดขึ้นเร็ว อุณหภูมิ และความดันจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหัน คาร์บอนจึงจับตัวกับออกซิเจนแค่โมเลกุลเดียว ทำให้เกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ เกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ได้ไม่เต็มที่ เพราะถูกจำกัดด้วยการแย่งเข้าทำปฏิกิริยาของ  $\text{OH}$  กับ  $\text{H}$



ปริมาณคาร์บอนคาร์บอนมอนอกไซด์สามารถควบคุมได้จากอัตราส่วนผสม หรือ ปริมาณออกซิเจนในปฏิกิริยาการเผาไหม้ เราสามารถลดการปลดปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์จ่ายอากาศทุกชนิด

### 3.4.2 ออกไซด์ของไนโตรเจน (NO<sub>x</sub>)[2,4]

ออกไซด์ของไนโตรเจน (NO<sub>x</sub>) ที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงไฮโดคาร์บอนมีสาเหตุมาจากการเกิดหมอกทางโฟโตเคมี หรือแก๊สโอโซนระดับต่ำ (ground level ozone) ซึ่งเกิดจาก NO<sub>x</sub> และ HC ที่มาจากไอเสียจากรถยนต์เป็นส่วนใหญ่ มาทำปฏิกิริยากับแสงแดดทำให้เกิดเป็นโอโซน O<sub>3</sub> NO<sub>x</sub> นอกจะยังเป็นสาเหตุหลักของการเกิดโอโซนในระดับต่ำที่เป็นพิษแล้ว ยังเป็นตัวทำลายโอโซนที่อยู่ในระดับชั้นบรรยากาศของโลกดังสมการดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.5 ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุลของ NO<sub>2</sub> ที่มีจำนวนออกซิเจนที่แตกต่างกัน

#### 3.4.2.1 Thermal - NO<sub>x</sub>

Thermal-NO<sub>x</sub> หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Zeldovich NO<sub>x</sub>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การลดปริมาณ Thermal-NO<sub>x</sub> สามารถทำได้โดยการลดอุณหภูมิในห้องเผาไหม้

### 3.4.2.2 Prompt – NO<sub>x</sub> [33]

เมื่อวัดปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ (NO) จากจุดที่ห่างจากเปลวไฟเข้าหาแนวของเปลวไฟพบว่าในไนโตรเจนออกไซด์อยู่ ทั้งนี้เพราะเกิดอนุมูลอิสระ CH ที่เกิดในลักษณะไปขึ้นกลางบริเวณแนวของเปลวไฟ จากนั้น CH ทำปฏิกิริยากับไนโตรเจนในอากาศ ทำให้เกิดกรดไฮโดรไซยานิค (HCN) และจะทำปฏิกิริยาต่อไปจนเกิด NO ดังสมการดังต่อไปนี้



### 3.4.2.3 Fuel – NO<sub>x</sub>

NO<sub>x</sub> เกิดจากการออกซิเดชันไนโตรเจน ส่งผลทำให้เกิด NO<sub>x</sub> จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งและของเสีย สามารถลดการเกิด Fuel – NO<sub>x</sub> ได้โดยการรักษาสัดส่วนของออกซิเจนในแก๊สที่อุณหภูมิสูงในเปลวไฟให้ต่ำ เพื่อให้ไนโตรเจนในเชื้อเพลิงเปลี่ยนเป็น NO น้อยลง

### 3.4.3 ฝุ่นและเขม่า ( Particulates and Soot ) [1,16]

ฝุ่น คือ ของแข็งในอากาศที่มีขนาดเล็กเป็นอนุภาค สาเหตุที่เกิดฝุ่นนั้นเนื่องมาจากการที่มีสารอนินทรีย์ปะปนอยู่ในส่วนของเชื้อเพลิง ซึ่งสารอนินทรีย์จะถูกเผาไหม้จนกลายเป็นฝุ่นและออกมาพร้อมกับไอเสีย ฝุ่นที่มีขนาดกับน้ำหนักที่มากจะสามารถแยกออกมาจากไอเสียได้ง่าย แต่ในฝุ่นบางชนิดที่มีขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน จะปะปนอยู่ในไอเสียไปตลอด ฝุ่นเหล่านี้ถูกเรียกว่าเถ้าลอย ( Fly ash ) ซึ่งฝุ่นเหล่านี้ไม่สามารถแยกออกด้วยวิธีปกติได้ จึงต้องใช้วิธีเฉพาะ เช่น การใช้ถุงกรอง ( Bag filter ) , การใช้เครื่องแยกอนุภาคด้วยไฟฟ้าสถิต ( Electrostatic precipitator ) และ การใช้ไซโคลน ( Cyclone ) เป็นต้น

เขม่า คือ ละอองสีดำที่เกิดจากควันไฟดินปืน หรือการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่ไม่สมบูรณ์ ซึ่งเป็นอนุภาคของคาร์บอนที่มีอัตราส่วนของไฮโดรเจนรวมอยู่ด้วยอย่างน้อย 1% จากมวลทั้งหมด และมักเกิดในบริเวณที่มีเชื้อเพลิงอยู่อย่างเข้มข้น หรือมีจำนวนมาก ซึ่งขั้นตอนการเกิดของเขม่ามีขั้นตอนดังนี้

1. การเกิดขึ้นเป็นอนุภาค ( Particle inception ) ในระหว่างที่เกิดปฏิกิริยาการเกิดเขม่า จะเกิดการก่อตัวเป็นนิวเคลียส ( Nucleation ) ซึ่งมีขนาดเล็กในระดับโมเลกุล โดยที่มีสารอนุมูลเป็นสารตั้งต้น ซึ่งนิวเคลียสนี้มักจะเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีโครงสร้างเป็นวงแหวน ยกตัวอย่างเช่น Polycyclic aromatic hydrocarbons ( PAH ) ซึ่งเป็นสารชั้นกลาง และจากนั้น อะเซทิลีน (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>) จะทำปฏิกิริยากับสารไฮโดรคาร์บอนแบบห่วง และจะรวมกันเป็นกลุ่มก้อนของโมเลกุลขนาดใหญ่
2. การเติบโตบนผิวรอบนอก ( Surface growth ) ซึ่งจะขยายใหญ่ขึ้นเนื่องจากการเกาะตัวของสารชั้นกลาง บริเวณผิว ซึ่งสารส่วนใหญ่จะเป็นอะเซทิลีน (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>) ประมาณ 85% ของมวลทั้งหมด
3. การเกาะรวมตัวกัน ( Coagulation ) อนุภาคของเขม่าเกิดการเคลื่อนที่และรวมตัวกันเป็นกลุ่ม ซึ่งมีลักษณะคล้ายห่วงโซ่
4. การออกซิไดซ์เขม่า ( Soot oxidation ) หลังจากที่เกิดเขม่าแล้ว ในบริเวณด้านล่างของ Reaction zone ที่อยู่บริเวณปลายของเปลวไฟ ( Flame tip ) เขม่าจะเคลื่อนที่ไปตามเส้นกระแสผ่านเข้าไปในบริเวณปลายของเปลวไฟ ( Flame tip ) ซึ่งในกรณีที่เขม่าถูกเผาไหม้จนหมดจะเรียกว่าเปลวไฟไร้เขม่า แต่ในกรณีที่เขม่าเผาไหม้ไม่หมดจะเรียกว่าเปลวไฟมีเขม่า

### 3.5 การรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟ

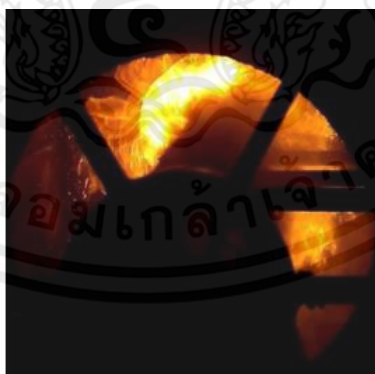
หากปรับเปลี่ยนเงื่อนไขในการเผาไหม้ เช่น การเพิ่มอัตราการไหลของเชื้อเพลิงหรืออากาศ จะส่งผลต่อเสถียรของเปลวไฟ สำหรับการรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟ ทำโดยการใช้หลังการอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamic) โดยใช้อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควง และวัตถุขวางการไหล

### 3.5.1 อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควง ( Swirl generator ) [1,6]

อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงนำมาใช้กับหัวเผาเพื่อสร้างการไหลหมุนควงส่งผลทำให้เกิดการผสมกันระหว่างเชื้อเพลิงชีวมวลกับอากาศ เพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ และยังช่วยลดความยาวของเปลวไฟเพื่อลดความยาวและลดงบประมาณการสร้างห้องเผาไหม้ ทำให้เกิดความเร็วในแนวแกนพร้อมกับความเร็วตามแนวแกน เมื่ออากาศมีความเร็วตามแนวรัศมีมาก จะยิ่งทำให้ระยะตามแนวแกนสั้นลง จากนั้นจะพัฒนาไปเป็นพื้นที่การไหลหมุนควงภายใน ( Recirculation zone ) อีกทั้งยังช่วยเพิ่มเวลาในการเคลื่อนที่ของอนุภาคเชื้อเพลิงภายในห้องเผาไหม้ โดยสิ่งเหล่านี้จะเกิดเมื่ออากาศหรือเชื้อเพลิงวิ่งผ่านอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควง ( Swirl generator )



รูปที่ 3.6 แสดงอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควง



รูปที่ 3.7 แสดงพฤติกรรมของการเผาไหม้ภายใน

### 3.5.1.1 ตัวเลขการหมุนควง ( Swirl number ) [1,17]

ตัวเลขการหมุนควง ( Swirl number ) คือตัวแปรที่แสดงความเข้มข้นของการไหลหมุนควงในพื้นที่ปิดและการกระจายของการไหล โดยการหาฟลักซ์ของโมเมนตัมเชิงมุมและเชิงเส้น ดังสมการต่อไปนี้

$$S' = \frac{G_{\theta}}{G_x r_0} \quad 3.20$$

$G_{\theta}$  คือ ฟลักซ์ตามแนวแกนของโมเมนตัมเชิงมุม

$$G_{\theta} = 2\pi \int_0^{\infty} \rho U_x U_{\theta} r^2 dr \quad 3.21$$

$G_x$  คือ ฟลักซ์ของโมเมนตัมเชิงเส้น

$$G_x = 2\pi \int_0^{\infty} \rho U_x^2 r dr + 2\pi \int_0^{\infty} \rho r dr \quad 3.22$$

$r_0$  คือ รัศมีบริเวณทางออก swirler

$U_x$  คือ ความเร็วตามแนวแกนตามแนวรัศมี

$U_{\theta}$  คือ ความเร็วตามแนวสัมผัสตามแนวรัศมี

ในทางปฏิบัติจะเว้นพจน์ของความดันไว้เนื่องจาก พจน์ของความดันเป็นความดันสถิตย์ ซึ่งการที่จะวัดค่าที่แท้จริงได้เป็นเรื่องยาก จึงเขียนสมการใหม่ได้เป็น

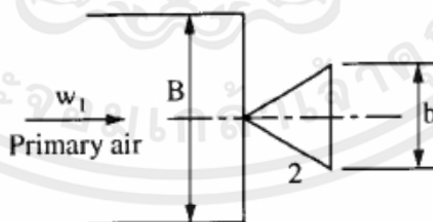
$$G_x = 2\pi \int_0^{\infty} \rho U_x^2 r dr \quad 3.23$$

ค่าการไหลหมุนควงสามารถวัดจากรูปทางของความเร็วและความดันสถิต ซึ่งค่าเหล่านี้ต้องใช้ความชำนาญในการทดลองเพื่อให้ได้ค่าออกมาแม่นยำ จึงทำให้เป็นปัญหาในการศึกษาค่าการไหลหมุนควง

### 3.5.2 วัตถุขวางการไหล ( Bluff body )[1]

วัตถุขวางการไหลถูกนำมาใช้กับงานวิศวกรรมอย่างมากมายเช่น การออกแบบระบบระบายอากาศ สะพาน อุตสาหกรรมการนอขายฝั่ง ตึกอาคาร และอื่นๆอีกมากมาย โดยส่วนใหญ่แล้ววัตถุขวางการไหลจะหยุดนิ่ง ( Stagnation point ) สำหรับการเผาไหม้ นั้นการนำวัตถุขวางการไหลมาติดตั้งเพื่อทำให้เกิดเสถียรภาพ ลดขนาดของความยาวของเปลวไฟเพื่อสร้างพื้นที่การไหลหมุนวน ลดความเร็วของอนุภาคการไหลของเชื้อเพลิงเพื่อเพิ่มความปั่นป่วน ส่งผลต่อระยะเวลาที่เชื้อเพลิงอยู่ในห้องเผาไหม้ช่วยทำให้ความร้อนของแก๊สร้อนเข้าไปผสมกับอากาศส่วนที่ 3 ที่ไหลเข้าไปให้ห้องเผาไหม้หลักและช่วยให้สามารถเกิดการเผาไหม้ได้อย่างสมบูรณ์ในห้องเผาไหม้หลัก

เมื่ออากาศและเชื้อเพลิงผ่านวัตถุขวางการไหล ความเร็วจะลดลงเพราะเกิดการกระทบกับผนัง ส่งผลทำให้ด้านหน้าความดันสูง ด้านหลังความดันต่ำ ทำให้เกิดกระแสไหลวน บริเวณที่ไม่มีเส้นกระแสจะเกิดความดันที่สวนทางกับกระแสการไหลที่ปลายกระแสไหลวนสูงมาก ทำให้เกิดการแบ่งขอบเขตและบริเวณที่เกิดกระแสไหลวน ( Recirculation zone ) จะถูกสร้างบริเวณหลังวัตถุขวางการไหล ซึ่งเป็นบริเวณนี้เป็นบริเวณที่มีการถ่ายเทความร้อนสูงมาก สารผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้ที่มีอุณหภูมิสูงจะแทรกซึมเข้าสู่กระแสไหลวนและถูกส่งมาที่ต้นกระแสการไหล (Upstream) คลุกเคล้ากับส่วนผสมใหม่ ( Fresh combustible mixture ) จนถึงจุดติดไฟ อย่างไรก็ตามวัตถุขวางการไหลยังมีข้อเสียเช่น ไม่สามารถทนความร้อนที่อุณหภูมิสูง สึกหรือจากอนุภาคถ่านหิน



รูปที่ 3.8 แสดงลักษณะวัตถุขวางการไหลของ Minghou Xu

สิ่งที่ส่งผลต่อการไหลหมุนวนภายในหลังวัตถุขวางการไหลขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่าง ซึ่งใช้ค่า Blockage ratio

$$Blockage\ ratio = (d/D)^2$$

3. 24

เมื่อ  $d$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของวัตถุขวางการไหล

$D$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของทางออกช่องการไหลอากาศปฐมภูมิ

### 3.6 โมเดลการจำลองการเผาไหม้

#### 3.6.1 สมการความต่อเนื่องและโมเมนตัม[14]

สมการความต่อเนื่องและโมเมนตัม คือ หนึ่งในสมการในการคำนวณการจำลองการไหลโดยการแก้ไขสมการอนุพันธ์พลังงาน ซึ่งการไหลที่มีการแลกเปลี่ยนความร้อนจะนำสมการพลังงานเข้ามาใช้ในการคำนวณ และเมื่อการจำลองมีการผสมกันของสปีชีส์หรือมีการทำปฏิกิริยาจะใช้สมการอนุพันธ์สปีชีส์ และในกรณีที่มีการไหลแบบปั่นป่วนจะนำสมการโอนถ่ายมาคำนวณ

สมการพลังงาน (Energy Equation)

สมการพลังงานในการถ่ายโอนระหว่างเฟส สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + P)) = \nabla \cdot \left( k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\tau_{eff} \cdot \vec{v}) \right) + S_h \quad 3.25$$

และ

$$S_{h,rxn} = -\sum \frac{h_j^0}{M_j} R_j \quad 3.26$$

กำหนดให้

$E$  คือ ค่าความร้อนจำเพาะ

$\rho$  คือ ความหนาแน่น

$\vec{J}_j$  คือ ฟลักซ์การแพร่ของสปีชีส์  $j$

$S_h$  คือ ความร้อนจากปฏิกิริยาเคมี และแหล่งพลังงานอื่นๆ

$h_j^0$  คือ เอนทัลปีการก่อเกิดของสปีชีส์  $j$

$R_j$  คือ อัตราการก่อเกิดโดยปริมาตรของสปีชีส์  $J$

$k_{eff}$  คือ ค่าประสิทธิผลการนำความร้อนประสิทธิผลระหว่างเฟส

### 3.6.2 แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent model)[14]

สมการ Navier-Stokes เป็นสมการที่สามารถนำมาอธิบายปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ของของไหลได้เป็นอย่างดีจึงมีการนำสมการมาประยุกต์ใช้ในการจำลองการไหลแบบปั่นป่วนเพื่ออธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นโดยการจำลอง Navier-Stokes เฉลี่ย (Reynolds averaged Navier-Stokes ,RANS) การจำลองการหมุนวนขนาดใหญ่ (Large eddy simulation ,LES) และการจำลองทางคณิตศาสตร์โดยตรง (Direct numerical simulation ,DNS) ยิ่งเราต้องการจำลองที่แม่นยำมากขึ้นนั้นเราต้องแลกมาด้วยคุณภาพ,ความละเอียดของอุปกรณ์และเวลาที่ใช้ในการคำนวณที่นานมากขึ้นตามความละเอียดเราจึงได้นำวิธีการจำลอง Navier-Stokes เฉลี่ย มาใช้งานในการจำลองอยู่บ่อยครั้งเนื่องจากความแม่นยำที่สามารถเสถียร,ยอมรับได้และเวลาที่ใช้ในการจำลองที่ค่อนข้างรวดเร็วกว่าวิธีการจำลองอื่นๆ รูปแบบของสมการการไหลปั่นป่วนที่มักพบในทั่วไปเช่น แบบจำลอง  $k-\omega$  , แบบจำลอง  $k-\epsilon$  ,แบบจำลองแรงเค้นเรย์โนลด์ส (Reynolds Stress Model)

### 3.6.2.1 แบบจำลอง k- $\epsilon$ ชนิด มาตรฐาน

ได้มีการพัฒนาโดย Launder and Spalding ( ปัจจุบันใช้ชื่อว่า k-  $\epsilon$  standard ) ซึ่งประกอบไปด้วย 2 สมการถ่ายโอน คือ

Turbulence kinetic energy , k

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad 3.27$$

Rate of dissipation

$$\epsilon \frac{\partial}{\partial t} (\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad 3.28$$

กำหนดให้

$G_k$  = ค่าการก่อกำเนิดพลังงานจลน์ระหว่างความชันของความเร็วเฉลี่ย

$G_b$  = ค่าการก่อกำเนิดพลังงานจลน์ระหว่างแรงลอยตัว

$Y_M$  = ค่าของความผันผวนในการขยายตัวบนความปั่นป่วนแบบอัดตัวได้ต่ออัตราการกระจายตัวโดยรวม

$C_{1\epsilon}$  ,  $C_{2\epsilon}$  ,  $C_{3\epsilon}$  = ค่าคงที่ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.44 , 1.92 , ไม่ได้ระบุ ตามลำดับ

$\sigma_k$  ,  $\sigma_\epsilon$  = ค่า Prandtl ของ k และ  $\epsilon$  มีค่าเท่ากับ 1.0 และ 1.3 ตามลำดับ

$S_k$  ,  $S_\epsilon$  = ค่าเทอมของการก่อกำเนิด

### 3.6.2.1.1 แบบจำลองความหนืดปั่นป่วน (Turbulent Viscosity)

ค่าความหนืดปั่นป่วนได้ทำการรวมระหว่างเทอมของ  $k$  และ  $\epsilon$  ดังสมการ

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad 3.29$$

กำหนดให้

$$C_\mu = 0.09 \text{ (ค่าคงที่)}$$

จากข้อดีและข้อเสียของแบบจำลอง  $k-\epsilon$  จึงทำให้เกิดการพัฒนาแบบจำลอง  $k-\epsilon$

เพิ่มเติมได้แก่ Re-Normalization Group (RNG) และ Realizable

### 3.6.2.2 แบบจำลอง $k-\epsilon$ ชนิด Re-Normalization Group (RNG)

Re-Normalization Group (RNG) เกิดขึ้นมาจากการพัฒนาแบบจำลอง  $k$ -standard ซึ่งได้ใช้กระบวนการทางคณิตศาสตร์ในการสร้างสมการ Navier-Stokes ในรูปแบบอย่างง่าย เพื่อที่จะอธิบายผลกระทบจากการเคลื่อนที่ขนาดเล็กซึ่งแตกต่างจากแบบก่อนๆ ที่ความหนืดของการหมุนวนมาจากการประมาณจากความหนืดของการหมุนวนขนาดใหญ่และคำนวณการแพร่ของความปั่นป่วน ซึ่งในขณะที่ความเป็นจริงการแพร่ของความปั่นป่วนเกิดขึ้นที่ทุกระดับของการ หมุนวน Re-Normalization Group (RNG) ซึ่งแสดงผลลัพธ์ที่ดีขึ้นสำหรับการจำลอง การไหลหมุนวน

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (a_k \mu_{eff}) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad 3.30$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ a_\epsilon \mu_{eff} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - R_\epsilon + S_\epsilon \quad 3.31$$

กำหนดให้

$G_k$  = ค่าการก่อกำเนิดพลังงานจลน์ระหว่างความชันของความเร็วเฉลี่ย

$G_b$  = ค่าการก่อกำเนิดพลังงานจลน์ระหว่างแรงลอยตัว

$Y_M$  = ค่าของความผันผวนในการขยายตัวบนความปั่นป่วนแบบอัดตัวได้ต่ออัตราการ กระจายตัว โดยรวม

$C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$  = ค่าคงที่ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.42, 1.68, ไม่ได้ระบุ ตามลำดับ

$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$  = ค่า Prandtl ของ  $k$  และ  $\varepsilon$  มีค่าเท่ากับ 1.0 และ 1.3 ตามลำดับ

$S_k, S_\varepsilon$  = ค่าเทอมของการก่อกำเนิด

### 3.6.2.2.1 แบบจำลองประสิทธิภาพ( Effective Viscosity)

ขนาดของการกระจัดในทฤษฎี Re-Normalization Group ให้ผลลัพธ์ในรูปของสมการอนุพันธ์ สำหรับ ความหนืดปั่นป่วน

$$d\left(\frac{\rho^2 k}{\sqrt{\varepsilon\mu}}\right) = 1.72 - \frac{\hat{\nu}}{\sqrt{\hat{\nu}^3 - 1 + C_\nu}} d\hat{\nu} \quad 3.32$$

$$\text{เมื่อ } \hat{\nu} = \frac{\mu_{eff}}{\mu}, C_\nu \approx 100$$

ที่ค่าเรย์โนลด์สูง ค่าความหนืดปั่นป่วนสามารถหาได้จาก

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad 3.33$$

เมื่อ

$C_\mu$  = ค่าคงที่ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.0845 และมีค่าใกล้เคียงกับ แบบจำลอง k-  $\varepsilon$  standard

$C_\mu$  = ค่าคงที่ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.09

เทอมของ  $R_\varepsilon$  ในสมการ  $\varepsilon$  แสดงถึงความแตกต่างระหว่างแบบจำลอง k-  $\varepsilon$  standard และแบบจำลอง

k-  $\epsilon$  RNG ตามสมการนี้

$$R_\epsilon = \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta/\eta_0) \epsilon^2}{(1 + \beta \eta^3) k} \quad 3.34$$

เมื่อ

$$\eta = \frac{Sk}{\epsilon}, \eta_0 = 4.38, \beta = 0.012$$

### 3.6.2.3 แบบจำลอง k- $\epsilon$ ชนิด Realizable

Realizable เกิดขึ้นมาจากการพัฒนาแบบจำลอง k- standard ซึ่งมีความแตกต่างจากสมการแบบจำลอง k-  $\epsilon$  แบบมาตรฐาน โดยการสร้างสมการความหนืดของ การปั่นป่วนใหม่และสมการ การถ่ายโอนรูปแบบใหม่สำหรับอัตราการกระจาย ( $\epsilon$ ) ที่ประยุกต์มาจากสมการ แม่นตรงของการถ่ายโอนความปั่นป่วนจากค่าเฉลี่ยของความแปรปรวนยกกำลังสอง (mean-square vorticity fluctuation) และ ผลการจำลองจากสมการนี้สามารถคาดการณ์การแพร่กระจายแนวระนาบ นอกจากนี้ยังให้เพิ่มประสิทธิภาพของการจำลอง การไหลหมุนวน ของเขตของความต่างในด้านความดันที่สูง การกระจายตัว และการไหลหมุนวน

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k$$

3.35

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_{1\epsilon} S_\epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} C_{3\epsilon} C_b S_\epsilon + S_\epsilon$$

3.36

เมื่อ

$$C_1 = \max \left[ 0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right] \text{ และ } \eta = S \frac{k}{\varepsilon}$$

กำหนดให้

$G_k$  คือ ค่าการก่อกำเนิดพลังงานจลน์ระหว่างความชันของความเร็วเฉลี่ย

$G_b$  คือ ค่าการก่อกำเนิดพลังงานจลน์ระหว่างแรงลอยตัว

$Y_M$  คือ ค่าของความผันผวนในการขยายตัวบนความปั่นป่วนแบบอัดตัวได้ต่ออัตราการกระจายตัวโดยรวม

$C_{1\varepsilon}$ ,  $C_{2\varepsilon}$ ,  $C_{3\varepsilon}$  คือ ค่าคงที่ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.44, 1.9, ไม่ได้ระบุ ตามลำดับ

$\sigma_k$ ,  $\sigma_\varepsilon$  คือ ค่า Prandtl ของ  $k$  และ  $\varepsilon$  มีค่าเท่ากับ 1.0 และ 1.2 ตามลำดับ

$S_k$ ,  $S_\varepsilon$  คือ ค่าเทอมของการก่อกำเนิด

### 3.6.2.3.1 Turbulence viscosity

รูปแบบของความหนืดในแบบจำลอง  $k$ - $\varepsilon$  โดยปกติสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad 3.37$$

จากการพัฒนาแบบจำลองเพื่อเพิ่มความแม่นยำที่มากขึ้นจึงเกิดความแตกต่างในค่า  $C_\mu$  ที่ไม่ใช่ค่าคงที่เหมือนแบบจำลองที่ได้กล่าวมาก่อนหน้านี้ ซึ่งค่า  $C_\mu$  สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_S \frac{kU^*}{\varepsilon}} \quad 3.38$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

$$U^* = \sqrt{S_{ij}S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij}\tilde{\Omega}_{ij}}$$

$$\tilde{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2\varepsilon_{ijk}\omega_k$$

$$\Omega_{ij} = \bar{\Omega}_{ij} - \varepsilon_{ijk}\omega_k$$

ซึ่งค่า  $\tilde{\Omega}_{ij}$  คือ ค่า การหมุนเฉลี่ยในมุมมองของ tensor ในกรอบอ้างอิงกับค่า  $\omega_k$

ค่า  $A_0, A_S$  เป็นค่าคงที่มีค่าเท่ากับ 4.04 และ  $\sqrt{6} \cos \phi$  ตามลำดับ

เมื่อ

$$\phi = \frac{1}{3} \cos^{-1}(\sqrt{6}W)$$

$$W = \frac{S_{ij}S_{jk}S_{ki}}{\tilde{S}}$$

$$\tilde{S} = \sqrt{S_{ij}S_{ij}}$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6.3 แบบจำลองการแผ่รังสี(Radiation model)[14]

แบบจำลองการแผ่รังสีที่ได้รับความนิยมมีจำนวน 5 แบบ สำหรับการจำลอง ได้แก่

1. Discrete Transfer Radiation Model (DTRM)
2. P-1 Radiation Model
3. Rosseland Radiation Model
4. Surface-to-Surface (S2S) Radiation Model
5. Discrete Ordinates (DO) Radiation Model

ซึ่งในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะนำเสนอเพียงแบบจำลองการแผ่รังสีแบบที่ 5. Discrete Ordinates (DO)

#### 3.6.3.1 แบบจำลองการแผ่รังสี Discrete Ordinates (DO)

ธรรมชาติของการแผ่รังสี ปริมาณความร้อนที่แผ่ออกมาสู่อนุภาคตัวรับ ความร้อนที่แผ่ออกมาจะขึ้นอยู่กับมุมที่แผ่ออกมาจากวัสดุ เมื่อรังสีแผ่ไปถึงอนุภาคตัวรับ ความร้อนที่ได้รับจะขึ้นอยู่กับมุมตกกระทบและการดูดซับรังสีและความถี่ ที่มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามรังสีรวมถึงระยะห่างระหว่างอนุภาคด้วย

การถ่ายเทความร้อนแบบแผ่รังสี เป็นการถ่ายเทความร้อนที่มีความยุ่งยาก จึงตั้งสมมติฐานว่าการแผ่รังสีมีทิศทางที่ชัดเจน และจำนวนครั้งในการจำลองจะขึ้นอยู่กับทิศทาง แบบจำลองการแผ่รังสี Discrete Ordinates (DO) เป็นแบบจำลองที่ได้รับความนิยมใช้แก้สมการการถ่ายโอนรังสี Radiative Transfer Equation (RTE) สำหรับจำกัดจำนวนของมุมต้นไม่ต่อเนื่อง ซึ่งเกี่ยวข้องกับเวกเตอร์ในระบบพิกัดคาที่เขียน โดยสมการที่ใช้ในการจำลองได้แก่

$$\nabla \cdot (I(\vec{r}, \vec{s}) \vec{s}) + (a + \sigma_s) I(\vec{r}, \vec{s}) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{s}, \vec{s}') \Phi(\vec{r}, \vec{s}, \vec{s}') d\Phi' \quad 3.39$$

#### 3.6.4 Discrete Phase Models[14]

สมการโอนถ่ายสำหรับการไหลแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (2 สถานะ) ในสถานะที่สอง เรามีสมมติฐานว่าอนุภาคเชื้อเพลิงกระจายทั่วในของไหลสถานะแรก การคำนวณวิถีของสมการสถานะที่ไม่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อเนื่องจะทำการคำนวณทั้งการถ่ายโอนความร้อน และถ่ายโอนในทั้งสองสถานะ โดยการใช้สมการ Lagrangian ที่คำนึงถึง แรงต้านทานพลศาสตร์ แรงเฉื่อยจากความไม่ต่อเนื่อง แรงโน้มถ่วง ผลกระทบจากการไหลปั่นป่วน ในส่วนของการเผาไหม้ อนุภาคเชื้อเพลิง จะมาคำนวณในส่วนของ การปลดปล่อย สารระเหย ข้อจำกัดของการคำนวณโดยใช้แบบจำลองคือการที่อนุภาคไหลในลักษณะบางเบา

### 3.6.5 การแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchange)

การถ่ายโอนความร้อนระหว่างสถานะของแข็งและของไหลสามารถคำนวณพลังงานความร้อนโดยศึกษาผ่านปริมาตรควบคุมโดยใช้สมการนี้

$$Q = \left[ \frac{\bar{m}_p}{\dot{m}_{p,0}} C_p \Delta T_p + \frac{\Delta m_p}{\dot{m}_{p,0}} (-h_{fg} + h_{pyrol} + \int_{T_{ref}}^{T_p} c_{p,i} dT) \right] \dot{m}_{p,0} \quad 3.40$$

เมื่อ  $\bar{m}_p$  คือ ค่าเฉลี่ยของอนุภาคในปริมาตรควบคุม

$\dot{m}_{p,0}$  คือ มวลเริ่มต้นของอนุภาค

$C_p$  คือ ค่าความจุความร้อนของอนุภาค

$\Delta T_p$  คือ อุณหภูมิที่เปลี่ยนไปของอนุภาคในปริมาตรควบคุม

$\Delta m_p$  คือ มวลที่เปลี่ยนไปของอนุภาคในปริมาตรควบคุม

$\dot{m}_{p,0}$  คือ มวลเริ่มต้นของอนุภาค

$h_{fg}$  คือ ความร้อนแฝงของสารระเหย

$h_{pyrol}$  คือ ค่าความร้อนของสารระเหย

$T_p$  คือ อุณหภูมิของอนุภาคที่บริเวณทางออกของปริมาตรควบคุม

$T_{ref}$  คือ อุณหภูมิอ้างอิงบริเวณทางเข้า

$c_{p,i}$  คือ ค่าความจุความร้อนของสารระเหย

$\dot{m}_{p,0}$  คือ อัตราการไหลเชิงมวลเริ่มต้นของอนุภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6.6 การแลกเปลี่ยนมวล (Mass Exchange)

การแลกเปลี่ยนมวลระหว่างของแข็งและแก๊ส สามารถคำนวณจากอนุภาคที่เคลื่อนที่ผ่าน ปริมาตรควบคุมเขียนได้โดยสมการนี้

$$M = \frac{\Delta m_p}{m_{p0}} \dot{m}_{p0} \quad 3.41$$

### 3.6.7 แบบจำลองการถ่ายโอนสปีชีส์ (Modeling Species Transport)[14]

แบบจำลองชนิดนี้คือแบบทดลองการถ่ายโอนทางเคมีจะคาดการณ์การผสมของสารเคมี โดยการนำสมการอนุรักษ์มาใช้ในการคำนวณที่อธิบายด้วยการพา การแพร่ แหล่งปฏิกิริยาของแต่ละสปีชีส์ อีกทั้งยังสามารถนำมาใช้จำลองรูปแบบปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น bulk phase (volumetric reactions) หรือบนผิวอนุภาค

#### 3.6.7.1 Volumetric Reactions[15]

การจำลองปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นใน volumetric reactions สามารถทำได้โดยการจำลองสัดส่วนมวล ( $Y_i$ ) ของสปีชีส์นั้นๆ ด้วยวิธีการแก้สมการการพาและการแพร่ ด้วยสมการดังต่อไปนี้

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} Y_i) = -\nabla \cdot \bar{J}_i + R_i + S_i \quad 3.42$$

เมื่อ

$R_i$  คือ อัตราการเกิดผลิตภัณฑ์สุทธิ

$S_i$  คือ อัตราการสร้าง

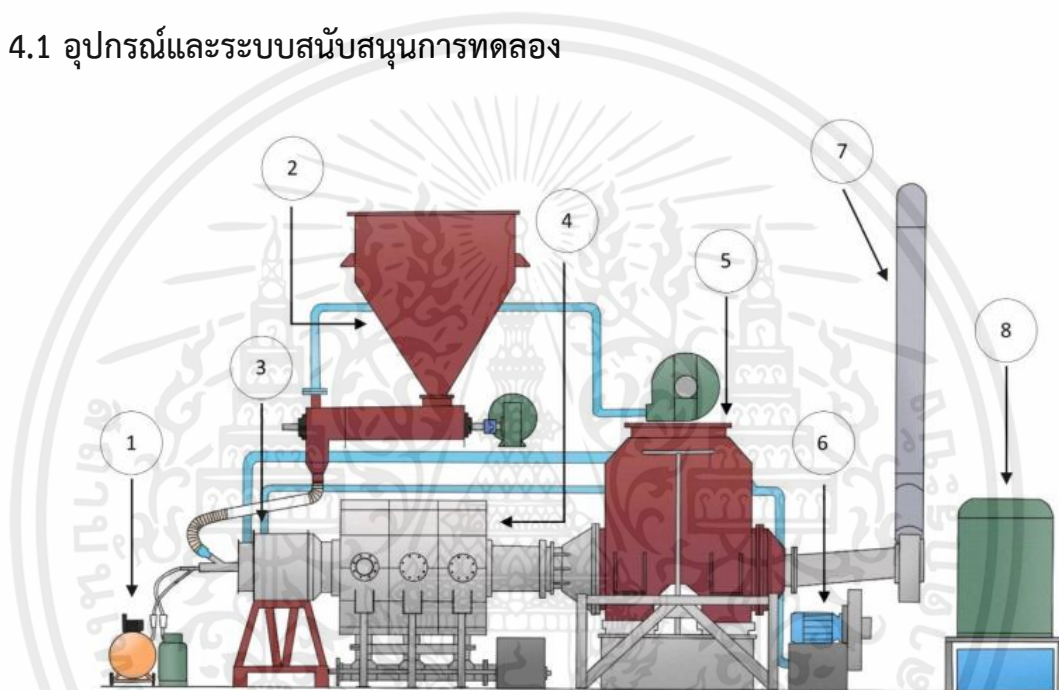
$\bar{J}_i$  คือ แฟลักซ์การแพร่ของสปีชีส์

## บทที่ 4

### ทฤษฎีอุปกรณ์และโมเดลการจำลองการเผาไหม้

จากเนื้อหาเรื่องทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย นำไปสู่การเลือกใช้งานอุปกรณ์และออกแบบการทดลองต่างๆ โดยบทนี้จะกล่าวถึงอุปกรณ์การทดลองในการเผาไหม้เชื้อเพลิง เครื่องมือวัด รวมไปถึงข้อมูลที่เป็นต่อการจำลองพลศาสตร์ของไหล

#### 4.1 อุปกรณ์และระบบสนับสนุนการทดลอง



รูปที่ 4.1 แสดงองค์ประกอบของชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบระบบเผาไหม้เชื้อเพลิง (1) ระบบเผาไหม้เชื้อเพลิงแก๊ส, (2) ระบบจัดเก็บและลำเลียงเชื้อเพลิง, (3) ห้องเผาไหม้ช่วย, (4) ห้องเผาไหม้, (5)ระบบบำบัดไอเสีย wet scrubber, (6) ระบบป้อนอากาศ, (7) ระบบดักไอเสีย, (8) บ่อตกตะกอนและระบบหมุนเวียนน้ำ

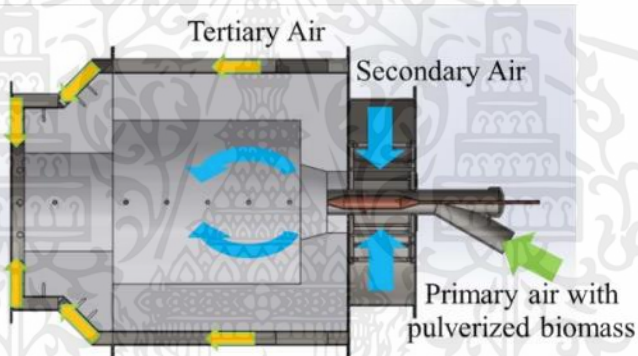
##### 4.1.1 ห้องเผาไหม้ช่วย (Pre-chamber)

ห้องเผาไหม้ที่คณะวิจัยใช้นั้นจะแบ่งการเผาไหม้เป็นหลักๆอยู่ 2 ตำแหน่ง คือห้องเผาไหม้หลัก และห้องเผาไหม้ช่วย (Pre-chamber) โดยห้องเผาไหม้ช่วยจะทำหน้าที่ช่วยให้กระบวนการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้หลักมีความเสถียรของเปลวไฟ โดยอากาศที่ไหลเข้าห้องเผาไหม้จะมี 3 ส่วนคือ อากาศปฐมภูมิ อากาศทุติยภูมิ และอากาศตติยภูมิ อากาศส่วนปฐมภูมินั้นจะถูกลำเลียงเข้ามาพร้อมกับเชื้อเพลิง อากาศทุติยภูมิเป็นอากาศหลักที่ใช้ในการเกิดการเผาไหม้ โดยก่อนจะเข้าห้องเผาไหม้ช่วยจะผ่านอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวนชนิดใบพัดตรงเพื่อทำให้เกิดการผสมกันระหว่างอากาศกับ

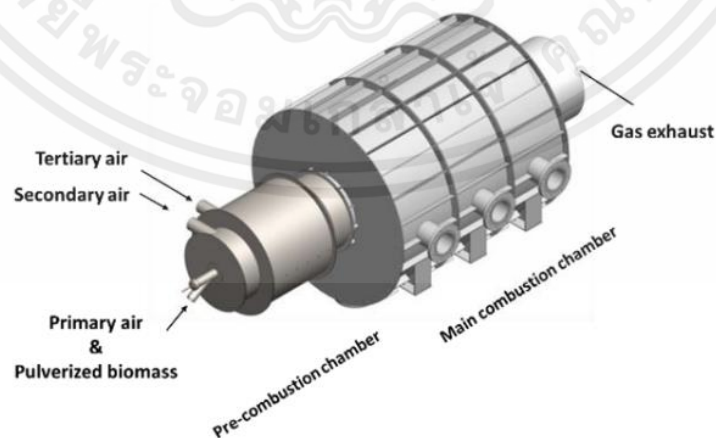
เชื้อเพลิง ช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวที่เชื้อเพลิงจะได้สัมผัสกับอากาศทำให้เผาไหม้ได้ดีขึ้น ส่วนอากาศตติยภูมิ เป็นอากาศที่จะเข้าไปในห้องเผาไหม้หลัก



รูปที่ 4.2 ห้องเผาไหม้ช่วย



รูปที่ 4.3 แสดงการไหลของอากาศในเครื่องเผาไหม้ช่วย



รูปที่ 4.4 เครื่องเผาไหม้หลัก และเครื่องเผาไหม้ช่วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.2 ระบบเผาไหม้เชื้อเพลิง

ห้องเผาไหม้หลักเป็นระบบที่รองรับการเผาไหม้ที่อยู่นอกเหนือหัวเผา ซึ่งในห้องเผาไหม้หลักจะมีความดันติดลบเพื่อให้การไหลของอากาศไหลออกสู่บรรยากาศ ในห้องเผาไหม้หลักจะติดตั้งเครื่องวัดอุณหภูมิ 2 ตำแหน่ง และจะมีช่องสังเกตเปลวไฟ 1 ช่อง ซึ่งการทำงานของห้องเผาไหม้หลักจะประกอบไปด้วย 3 ส่วนได้แก่ ห้องเผาไหม้ ชุดสกรูระบายไถ่หนัก และถังพักไถ่หนัก



รูปที่ 4.5 แสดงห้องเผาไหม้หลัก



รูปที่ 4.6 แสดงชุดสกรูระบายไถ่หนัก



รูปที่ 4.7 ถังพักเอ้าหนัก

#### 4.1.3 ระบบป้อนเชื้อเพลิง

ระบบป้อนเชื้อเพลิงจะประกอบด้วยถังพักเชื้อเพลิง (Hopper) ใช้สำหรับบรรจุสารองเชื้อเพลิงเพื่อเตรียมทำการส่งถ่ายเชื้อเพลิงไปสู่ห้องเผาไหม้โดยผ่านระบบสรุขนส่ง และยังติดตั้งเครื่องสั่นเพื่อช่วยในการขนส่งเชื้อเพลิงให้มีความต่อเนื่อง โดยความเร็วของการหมุนของสกรูสามารถปรับค่าความถี่ของการหมุนได้จากห้องควบคุม



รูปที่ 4.8 แสดงถังพักเชื้อเพลิง (Hopper)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 ระบบสกรูขนส่ง

#### 4.1.4 ระบบบำบัดไอเสีย

กระบวนการบำบัดไอเสียหลังจากที่เกิดการเผาไหม้เป็นกระบวนการที่สำคัญเพื่อที่จะบำบัดแก๊สไอเสียก่อนที่จะปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม เนื่องจากเป็นไอเสียที่มีอุณหภูมิสูงและยังมีอนุภาคขนาดเล็กของเชื้อเพลิงที่ยังหลงเหลือหลุดออกมา การลดอุณหภูมิและการดักจับของแข็งในไอเสียจะใช้ระบบบำบัดที่ประกอบด้วย หอบำบัดเปียก (Wet scrubber) โดยภายในได้ออกแบบให้คดเคี้ยวเพื่อเพิ่มระยะทางในการดักจับฝุ่น ภายในห้องบำบัดได้ติดตั้งม่านน้ำชนิดสเปรย์เพื่อลดอุณหภูมิ จากนั้นน้ำที่ผ่านการบำบัดจะส่งไปลดอุณหภูมิที่หอผึ่งเย็น (Cooling tower)



รูปที่ 4.10 แสดงหอบำบัดไอเสีย (Wet scrubber)

#### 4.1.5 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ

การทดลองทำการวัดด้วย Thermocouple Type-K โดยทำการวัดตามผนังห้องเผาไหม้ติดตั้งที่ห้องเผาไหม้ช่วย 5 ตำแหน่ง ที่ห้องเผาไหม้หลัก 2 ตำแหน่ง ที่ทางออกของแก๊สไอเสีย 1 ตำแหน่ง และที่บริเวณปล่องไอเสีย 1 ตำแหน่ง



รูปที่ 4.11 Thermocouple Type-K



รูปที่ 4.12 แสดงตำแหน่งการติดตั้ง Thermocouple Type-K ที่ห้องเผาไหม้ช่วย



รูป ก

รูป ข

รูป ค

รูป 4.13 แสดงตำแหน่งการติดตั้ง Thermocouple Type-K รูป ก.) ห้องเผาไหม้หลัก ข.) ทางออกห้องเผาไหม้หลัก ค.) หลังบำบัดก๊าซไอเสีย

ตำแหน่งของการติดตั้ง Thermocouple Type-K จะติดตั้งดังรูปที่แสดงโดยเรียงตั้งแต่ T1-T9 โดยตำแหน่งที่ 1-5 จะติดตั้งที่ห้องเผาไหม้ช่วยโดยมีระยะเมื่อเทียบกับที่ระยะตั้งแต่ปลาย blub body มีระยะดังนี้คือ 0.13 , 0.27 , 0.41 , 0.55 , 0.69 เมตร ตำแหน่งที่ 6-7 จะติดตั้งที่ห้องเผาไหม้หลัก ตำแหน่งที่ 8 ติดตั้งที่ทางออกของแก๊สไอเสีย และตำแหน่งที่ 9 ติดตั้งบริเวณปล่องไอเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.6 อุปกรณ์ตรวจวัดไอเสีย

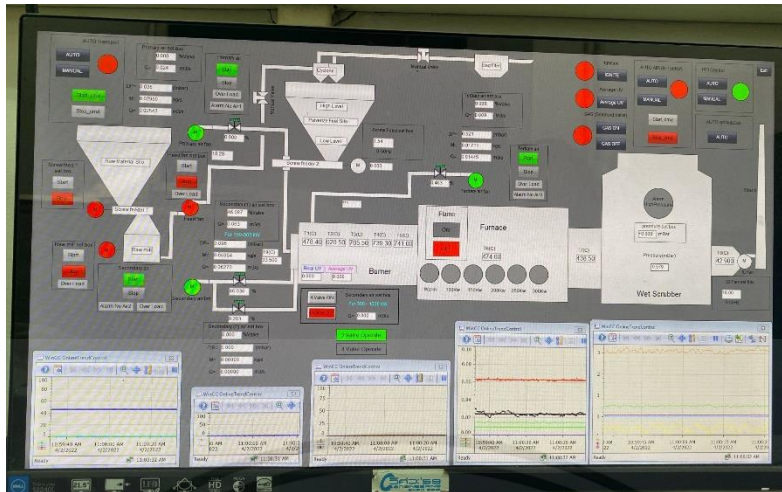
อุปกรณ์วัดไอเสียเป็นอุปกรณ์ที่ใช้วิเคราะห์ปัญหาการเผาไหม้ โดยการทดลองนี้ใช้ เครื่องวัด Testo 330-LL โดยอุปกรณ์นี้จะติดตั้งที่ตำแหน่งทางออกของแก๊สไอเสีย โดยจะตรวจวัดค่าความเข้มข้นของออกซิเจน (O<sub>2</sub>) ความเข้มข้นของคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) และความเข้มข้นของสารประกอบไนโตรเจน (NO<sub>x</sub>) โดยการใช้ปั๊มสุญญากาศดูดแก๊สไอเสียออกมาวัดภายนอกหลอดลดอุณหภูมิไอเสียดังที่แสดงในรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 เครื่องวัด Testo 330-LL

#### 4.1.7 ระบบควบคุมการทดลอง

การเผาไหม้เชื้อเพลิงจำเป็นต้องกำหนดค่าต่างๆเช่น อัตราการป้อนลม อัตราการป้อนเชื้อเพลิง ซึ่งต้องใช้ความแม่นยำในการทดลอง โดยการใช้คอมพิวเตอร์ในการควบคุม โดยการใช้ Programmable Logic Controller หรือ PLC ในการรับสัญญาณจากเครื่องมือวัด แล้วนำสัญญาณที่ได้แสดงขึ้นหน้าจอแสดงผล เก็บค่าสำหรับผลการทดลอง รวมไปถึงแจ้งเตือนเพื่อให้เกิดความปลอดภัย



รูปที่ 4.15 โปรแกรมควบคุมการเผาไหม้

#### 4.1.8 ระบบป้อนอากาศ

ระบบป้อนอากาศสำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่

1. อากาศส่วนที่ 1 (Primary air) อากาศส่วนนี้จะทำหน้าที่จุดติดไฟที่หัวเผา และทำหน้าที่ลำเลียงเชื้อเพลิงสู่ห้องเผาไหม้
2. อากาศส่วนที่ 2 (Secondary air) เป็นอากาศที่ใช้เป็นหลักในการเผาไหม้ที่ห้องเผาไหม้ช่วย โดยอากาศส่วนที่ 2 นี้จะเคลื่อนที่ผ่าน swirl ทำให้เกิดการไหลหมุนวน
3. อากาศส่วนที่ 3 (Tertiary air) เป็นอากาศที่ทำหน้าที่หล่อเย็นห้องเผาไหม้ช่วย โดยการควบคุมอากาศเหล่านี้จะถูกควบคุมด้วย โบลเวอร์ (Blower) ชนิดแรงเหวี่ยง สำหรับป้อนอากาศส่วนที่ 1 , 2 และ 3 โดยโบลเวอร์ตัวที่อยู่เหนือ wet scrubber จะควบคุมอากาศส่วนที่ 1 ส่วนตัวที่อยู่ใต้ wet scrubber จะควบคุมอากาศส่วนที่ 2 , 3 ในส่วนของการนำอากาศออกจะใช้โบลเวอร์ดูด (ID fan) สร้างให้มีความดันภายในต่ำตลอดเวลา เพื่อให้เกิดการไหลออกสู่บรรยากาศ



รูป 4.16ก.

รูป 4.16ข.

รูปที่ 4.16 โบลเวอร์ที่ใช้ในการป้อนอากาศสู่ห้องเผาไหม้

รูป ก.) แสดงโบลเวอร์ตัวที่อยู่เหนือ wet scrubber รูป ข.) โบลเวอร์ตัวที่อยู่ใต้ wet scrubber

## 4.2 วิธีการทดลอง

### 4.2.1 ออกแบบหัวเผา 3 ขนาด

การออกแบบหัวเผาและ Bluff body โดยกำหนดค่า Blockage ratio ให้มีค่าเดียวกันทั้ง 3 ขนาดคือ 0.306 แสดงดังรูป 4.14 โดยมีขนาด 1X , 1.25X และ 1.5X ตามลำดับ



รูปที่ 4.17 ลักษณะของวัตถุขวางการไหล

### 4.2.2. คำนวนหาปริมาณอากาศของปฐมภูมิ อากาศทุติยภูมิ และอากาศตติยภูมิ

ในการทดลองผู้วิจัยต้องทราบถึงลักษณะ และคุณสมบัติของเชื้อเพลิงที่นำมาใช้ในการเผาไหม้ เพื่อนำมาวิเคราะห์สมการการเผาไหม้ และได้มาซึ่งค่าของอัตราส่วนระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ

#### 4.2.2.1 องค์ประกอบธาตุทางเคมีของเชื้อเพลิง

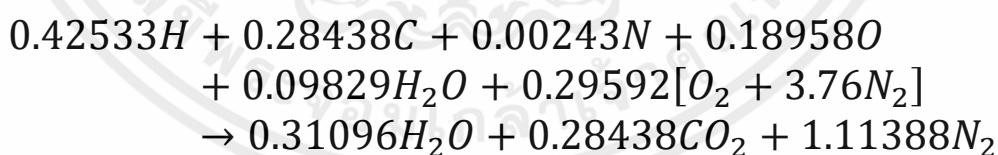
เชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้ในการทดลองคือยางพารา ซึ่งนำส่งตรวจองค์ประกอบของธาตุ ได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงส่วนประกอบของยางพารา

คุณสมบัติ	สภาพนำส่ง	สภาพน้ำหนักแห้ง
ความชื้น, %	20	-
เถ้า, %	1.944	2.43
ไฮโดรเจน, %	4.808	6.01
คาร์บอน, %	38.576	48.22
ไนโตรเจน, %	0.384	0.48
ออกซิเจน, %	34.288	42.86
ซัลเฟอร์, %	0	0
ค่าความร้อนสูง (HHV), กิโลแคลอรี/กก.	3552	4440
ค่าความร้อนต่ำ (LHV), กิโลแคลอรี/กก.	3280	4100

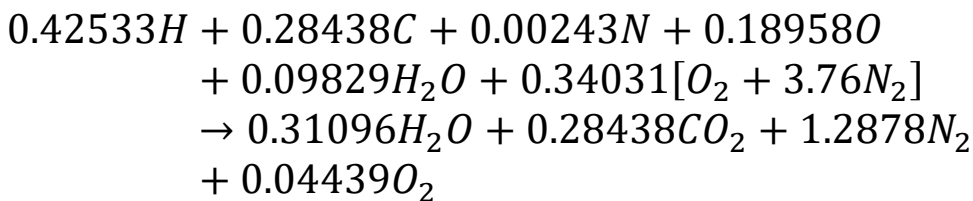
#### 4.2.2.2 สมการการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงยางพารา

จากตารางที่ 4.1 จะแสดงถึงส่วนประกอบธาตุทางเคมีของยางพารา ซึ่งนำมาศึกษากระบวนการเผาไหม้ที่สภาวะ Stoichiometry โดยคิดสภาพเชื้อเพลิงแบบ Dry basis จะสามารถเขียนสมการการเผาไหม้เชื้อเพลิงพร้อมดุลสมการทางเคมี ได้ดังนี้



จากการวิเคราะห์สมการการเผาไหม้ทำให้ได้ค่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง (AF ratio) สภาวะ Stoichiometry ประมาณ  $4.592 \text{ kg}_{\text{air}}/\text{kg}_{\text{fuel}}$

จากสมการการเผาไหม้ที่สภาวะ Stoichiometry เราทำการเพิ่มอากาศส่วนเกิน (Excess air) เข้าไป 15% จะสามารถเขียนสมการการเผาไหม้เชื้อเพลิงพร้อมดุลสมการทางเคมี ได้ดังนี้



จากการวิเคราะห์สมการการเผาไหม้ทำให้ได้ค่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง (AF ratio) สภาวะเพิ่มอากาศส่วนเกิน (Excess air) เข้าไป 15% ประมาณ 5.281 kg<sub>air</sub>/kg<sub>fuel</sub> ซึ่งจะนำค่า AF ratio ไปคำนวณต่อไป

ดังนั้นการคำนวณอัตราการไหลเชิงมวลอากาศสามารถคำนวณได้จากค่า AF ratio ที่สภาวะเพิ่มอากาศส่วนเกิน (Excess air) เข้าไป 15% นำมาหาอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ สร้างตารางการทำงานที่สภาวะการทำงานต่างๆ และแบ่งค่าอัตราการไหลเชิงมวลอากาศเป็น 3 ทาง โดยแบ่งสัดส่วนอากาศปฐมภูมิ, ทุติยภูมิ และ ตติยภูมิ เป็น 25, 65 และ 10 ตามลำดับ โดยกำหนดให้ค่าความหนาแน่นจำเพาะของอากาศคงที่ที่ค่า 1 บรรยากาศมีค่าเท่ากับ 1.2 kg/m<sup>3</sup> ดังนี้

ตารางที่ 4.2 แสดงอัตราการไหลของอากาศสามส่วนสำหรับเชื้อเพลิงยางพารา

สภาวะการทำงาน (kW)	อากาศปฐมภูมิ (m <sup>3</sup> /s)	อากาศทุติยภูมิ (m <sup>3</sup> /s)	อากาศตติยภูมิ (m <sup>3</sup> /s)
100	0.00802	0.02084	0.00321
200	0.01603	0.04168	0.00641
300	0.02405	0.06252	0.00962

#### 4.2.3 เตรียมเชื้อเพลิงชีวมวลผง

บรรจุเชื้อเพลิงชีวมวลใส่ในถังบรรจุเชื้อเพลิง โดยบรรจุให้เพียงพอต่อการเผาไหม้

#### 4.2.4 การอุ่นเตาด้วย LPG

1. เริ่มทำการอุ่นเตาด้วยการเปิดพักลมดูดที่ความถี่ 10 Hz
2. เปิดแก๊ส LPG ที่อัตราการป้อนกำลังความร้อน 100 kW
3. ปลอ่ยอากาศทุติยภูมิด้วยอัตราการไหลเชิงมวล 0.02 m<sup>3</sup>/s
4. ทำการจุดประกายไฟด้วยอุปกรณ์ spark แรงดันไฟฟ้า
5. ทำการอุ่นเตาเผาจนอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ช่วยถึง 400-500 องศาเซลเซียส
6. ทำการป้อนเชื้อเพลิงชีวมวล ปลอ่ยอากาศส่วนปฐมภูมิ และอากาศตติยภูมิเข้าห้องเผาไหม้ช่วย หากเปลวเพลิงเสถียรให้หยุดการปลอ่ย LPG

#### 4.2.5 บันทึกผลการทดลอง

หลังจากใช้เงื่อนไขการเผาไหม้ที่ 300 kW จะเริ่มทำการบันทึกผลการทดลอง โดยจะบันทึกค่าอุณหภูมิที่ห้องเผาไหม้ช่วย ( $T_1-T_5$ ) ค่าคาร์บอนไดออกไซด์ ค่าบอนมอนนอกไซด์ ค่าออกซิเจน และค่าสารประกอบไนโตรเจน ทำการบันทึกทุกๆ 10 นาที และหากเสร็จทำการเปลี่ยนขนาดหัวเผาและทำการทดลองแบบเดิม

#### 4.3 โมเดลการจำลองการเผาไหม้

แบบจำลองการเผาไหม้ที่คณะวิจัยได้ใช้ในการนำมาคำนวณ แสดงดังตาราง 4.1

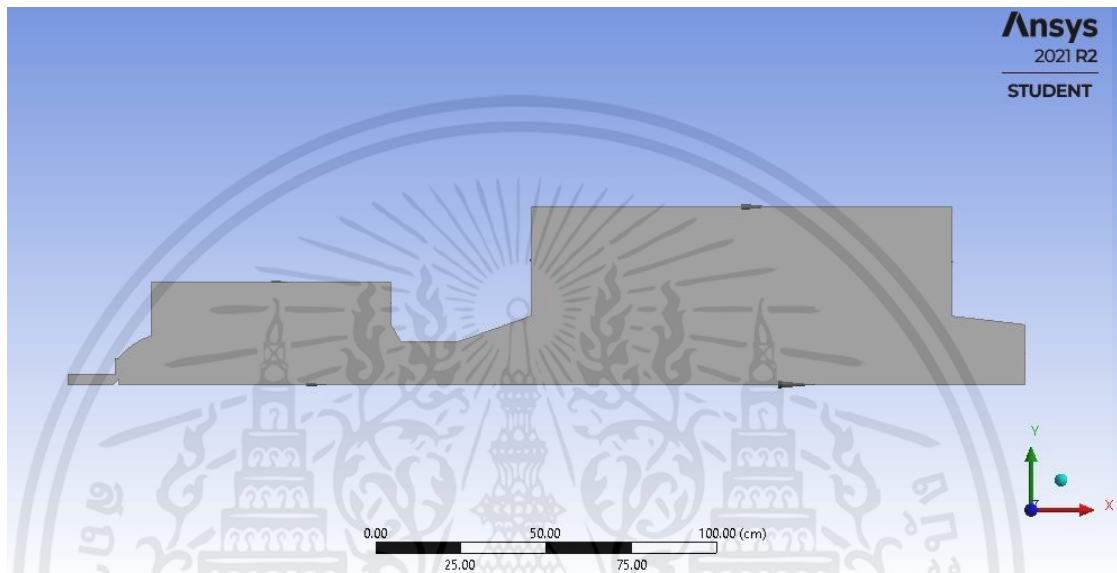
ตาราง 4.3 แสดงโมเดลที่คณะวิจัยได้ใช้ในการจำลองการเผาไหม้

โมเดลการจำลองการเผาไหม้	
	แบบจำลอง
แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent model)	แบบจำลอง k- $\epsilon$ ชนิด มาตรฐาน
แบบจำลองการแผ่รังสี(Radiation model)	แบบจำลองการแผ่รังสี Discrete Ordinates (DO)
แบบจำลองโอนการถ่ายสำหรับการไหลแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน	Discrete Phase Models
แบบจำลองการถ่ายโอนสปีชีส์ (Modeling Species Transport)	Volumetric Reactions

## 4.4 การจำลองและการหากริดที่เหมาะสม

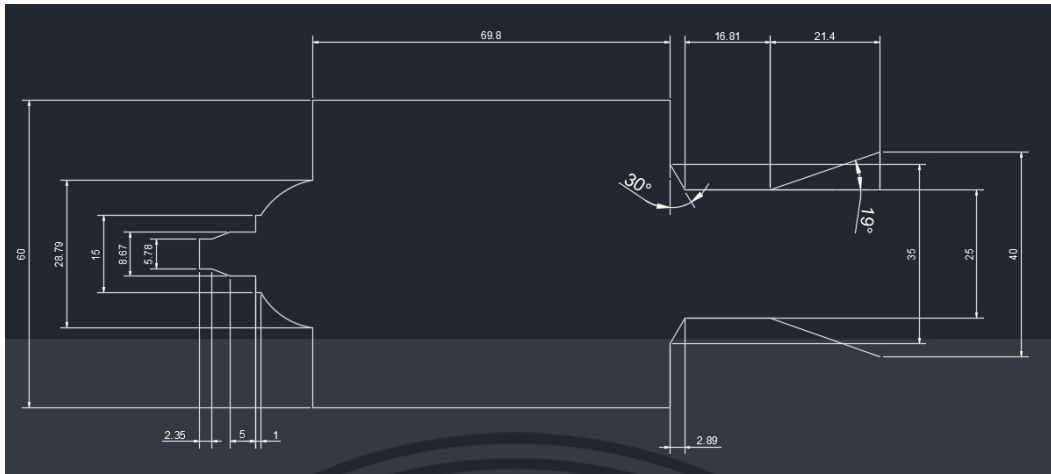
### 4.4.1 ขั้นตอนการทำโมเดลห้องเผาไหม้

1. วัดขนาดของห้องเผาไหม้จริง
2. ใช้ Designmodeler workbench Ansys สร้าง Geometry ของห้องเผาไหม้ โดยกำหนดรูปแบบการจำลองเป็น 2 มิติแบบแกนสมมาตร (Axisymmetric)

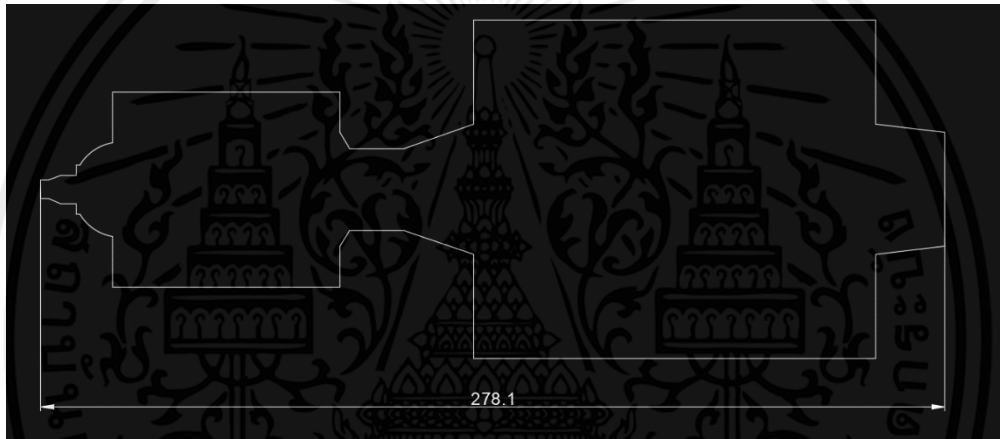


รูปที่ 4.18 แสดงตัวอย่างแบบจำลองห้องเผาไหม้ที่หัวเผาขนาด 1

3. ทำ Grid independent เพื่อหาค่า mesh ที่มีค่าเหมาะสมที่สุด
4. กำหนดเงื่อนไขที่จะใช้ในการจำลองการเผาไหม้ใน fluent ตามเงื่อนไขในตารางที่ 4.2 และโมเดลในตารางที่ 4.3
5. วิเคราะห์ผลที่ได้จากการทำ simulation



รูปที่ 4.19 แสดงระยะต่างๆในห้องเผาไหม้ช่วย



รูปที่ 4.20 แสดงความยาวของห้องเผาไหม้

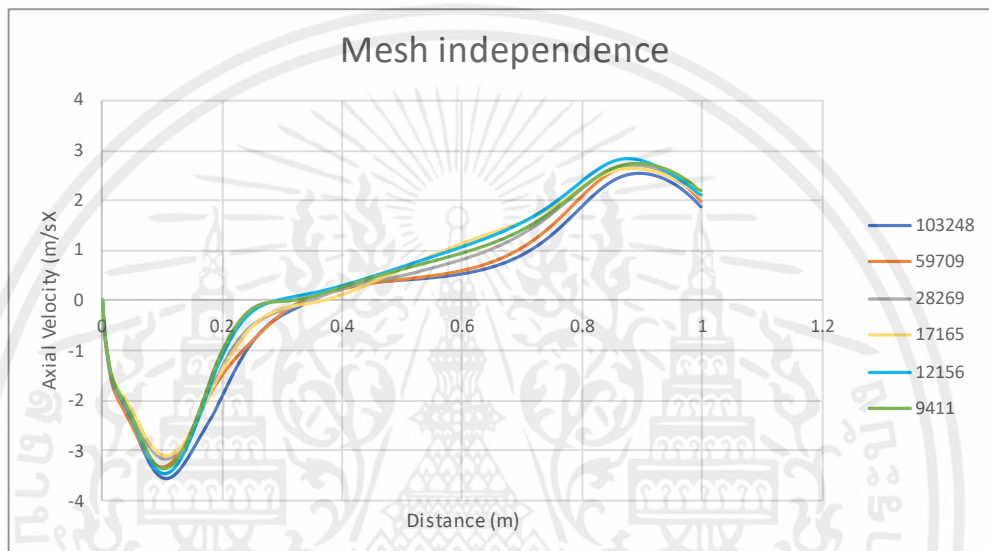


รูปที่ 4.21 แสดงระยะต่างๆของห้องเผาไหม้หลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4.2 Grid independent

ทำ Grid independent ที่จำนวน mesh 9411, 12156, 17165, 28269, 59709 และ 103248 นำผลที่ได้จากการคำนวณมาเทียบกัน ผู้จัดทำเลือกจำนวน Element ของหัวเผาขนาด 1.5 เท่าที่จำนวน 59709 โดยเลือกจากค่าที่เทียบเคียงกันแล้วมีลักษณะที่คล้ายกัน และประหยัดทรัพยากรในการคำนวณ สำหรับหัวเผาขนาด 1 และ 1.25 เท่าทำการ Calculation ที่จำนวน 59699 และ 59674 ตามลำดับ โดยใช้ Mesh ประเภท Quadrilateral มีขนาด 0.002 เมตร



รูปที่ 4.22 แสดง Mesh independence

## บทที่ 5

## อภิปรายผลการทดลอง

## 5.1 ผลการจำลองแบบไม่มีการเผาไหม้

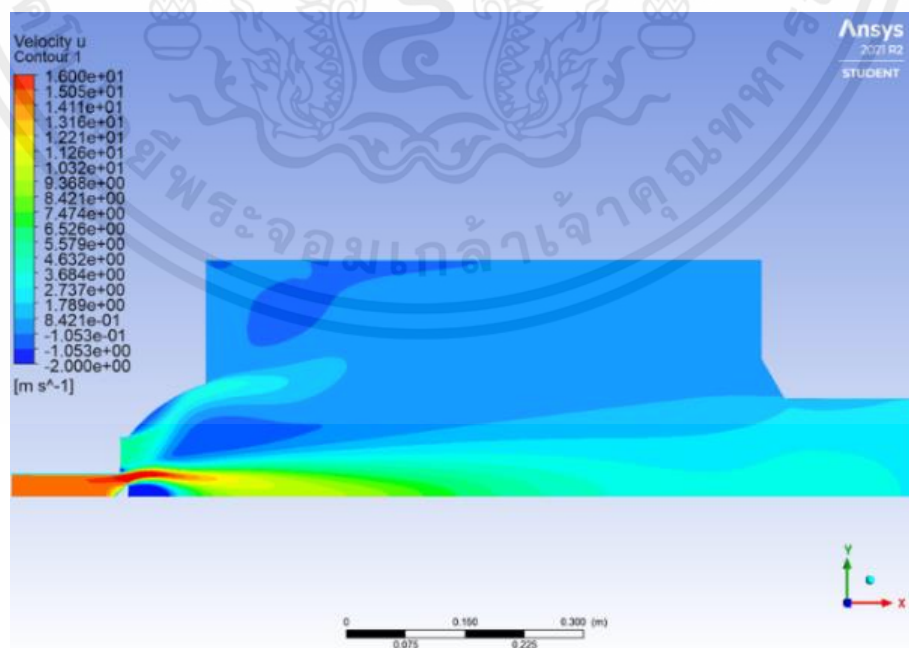
หัวข้อนี้คือการจำลองผลการไหลอากาศทางคณิตศาสตร์ของห้องเผาไหม้ที่ติดตั้งของห้องเผาไหม้ที่ติดตั้งหัวเผาขนาด 1, 1.25 และ 1.5 เท่า โดยความเร็วอากาศปฐมภูมิดังนี้

ความเร็วอากาศ	m/s
อากาศส่วนปฐมภูมิ	8.96

อากาศส่วนทุติยภูมิดังนี้

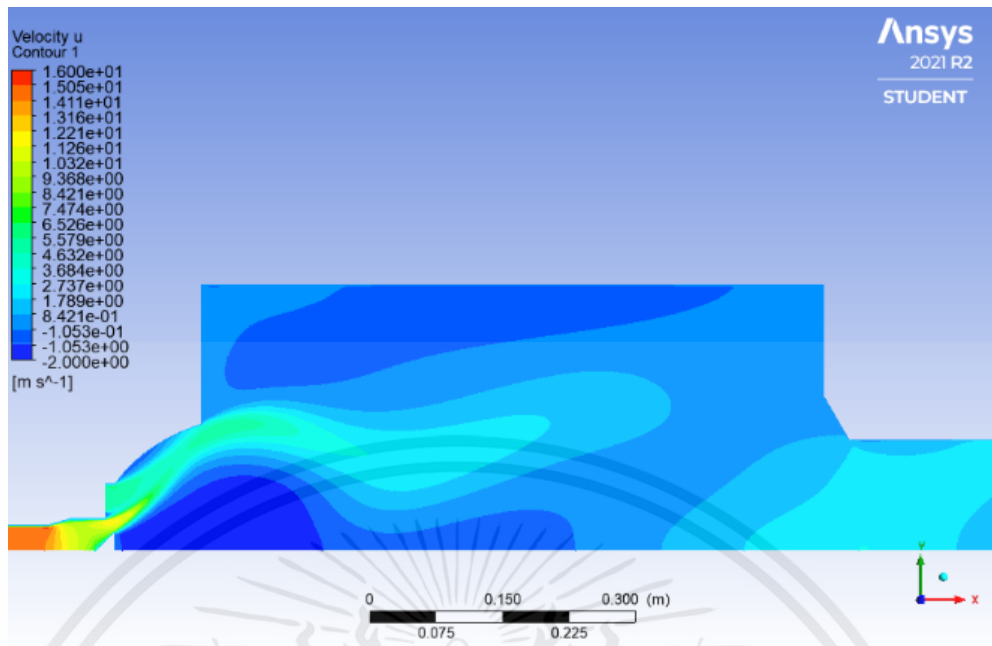
ความเร็วอากาศส่วนทุติย ภูมิของหัวเผาขนาด	m/s
1 เท่า	4.77
1.25 เท่า	5.39
1.5 เท่า	6.70

## 5.1.1 ลักษณะการกระจายความเร็วอากาศในห้องเผาไหม้ช่วย

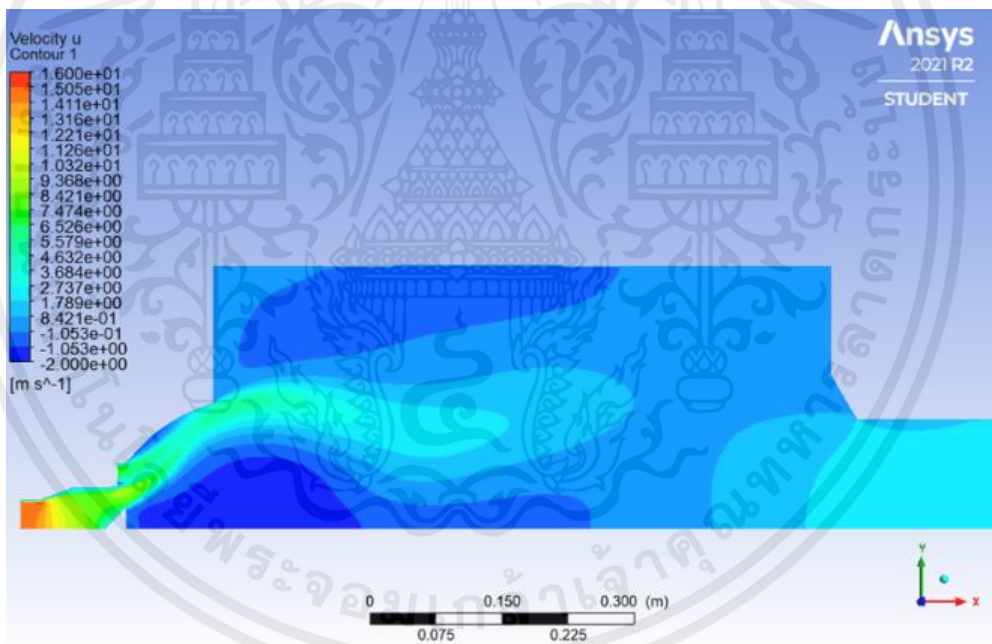


รูปที่ 5.1 แผนภาพสีความเร็วอากาศของหัวเผาขนาด 1 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2 แผนภาพสีความเร็วอากาศของหัวเผาขนาด 1.25 เท้า

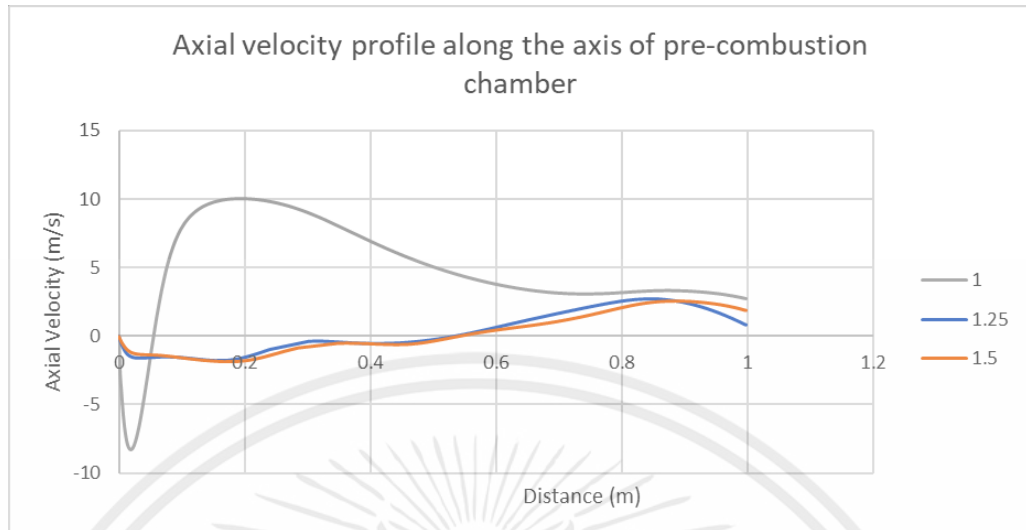


รูปที่ 5.3 แผนภาพสีความเร็วอากาศของหัวเผาขนาด 1.5 เท้า

จากรูปที่ 5.1, 5.2 และ 5.3 พบว่าความเร็วของอากาศกรณีของหัวเผาเท้า 1 เท้าจะมีขนาดมากที่สุด เทียบกับหัวเผา 1.25 และ 1.5 เท้าแล้ว จะเห็นได้ว่าความเร็วมีการค่อยๆ ลดลงที่บริเวณที่มีการเพิ่มสัดส่วนพื้นที่ทางออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

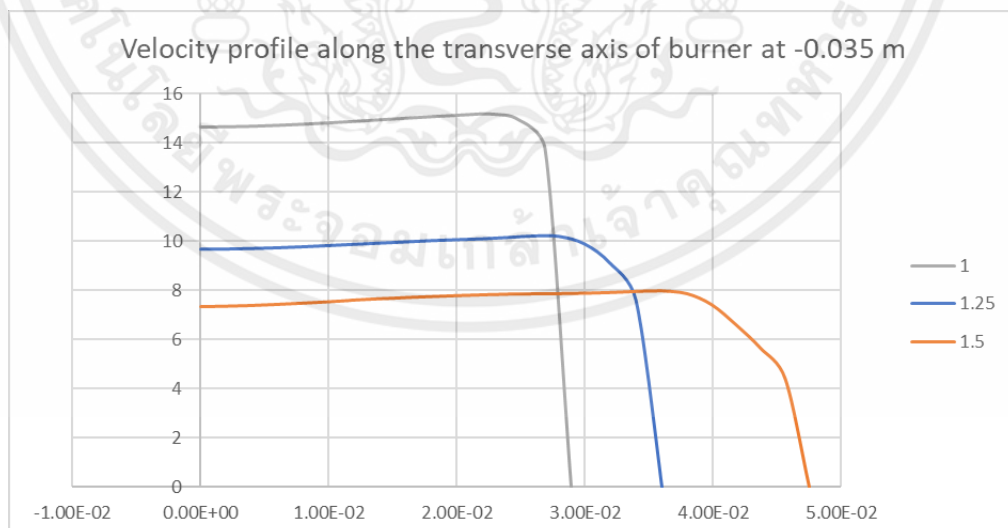
### 5.1.2 กราฟเปรียบเทียบความเร็วอากาศตามแนวแกนกลางของห้องเผาไหม้ช่วย



รูปที่ 5.4 กราฟเปรียบเทียบความเร็วอากาศตามแนวแกนกลางของห้องเผาไหม้ช่วยของหัวเผาทั้ง 3 ขนาด

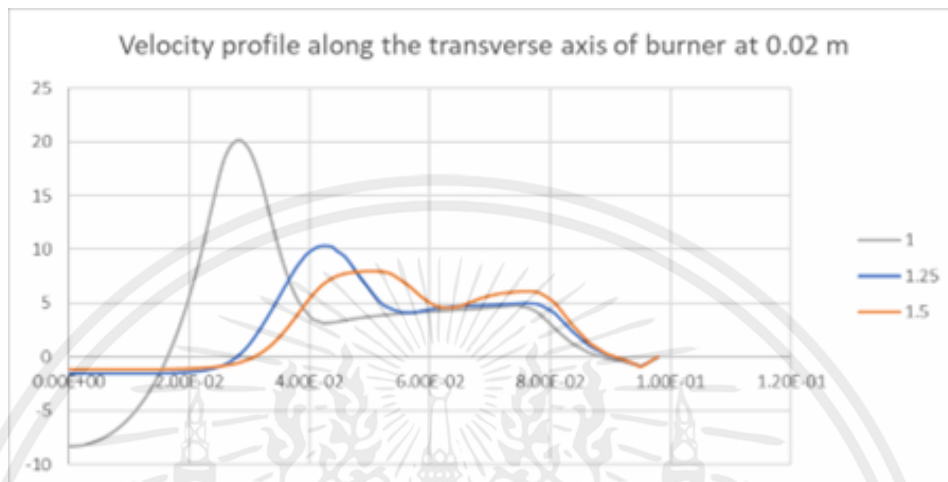
จากรูปที่ 5.4 พบว่าที่หัวเผาขนาด 1 เท้า เกิด Backward flow อย่างรุนแรงที่ระยะ 0 จนถึง 0.05 m แล้วขนาดเพิ่มขึ้นและมีทิศทางพุ่งออกจากห้องเผาไหม้ช่วยอย่างรวดเร็ว เมื่อเทียบกับหัวเผาขนาด 1.25 และ 1.5 เท้า เกิด Backward flow ที่มีความเร็วต่ำแต่กินบริเวณมากกว่า ตั้งแต่หลังวัตถุขวางการไหลจนถึงระยะ 0.5 เมตร แล้วความเร็วจึงกลับมาเป็นบวก

### 5.1.3 กราฟเปรียบเทียบความเร็วอากาศตามแนวรัศมีของห้องเผาไหม้ช่วย



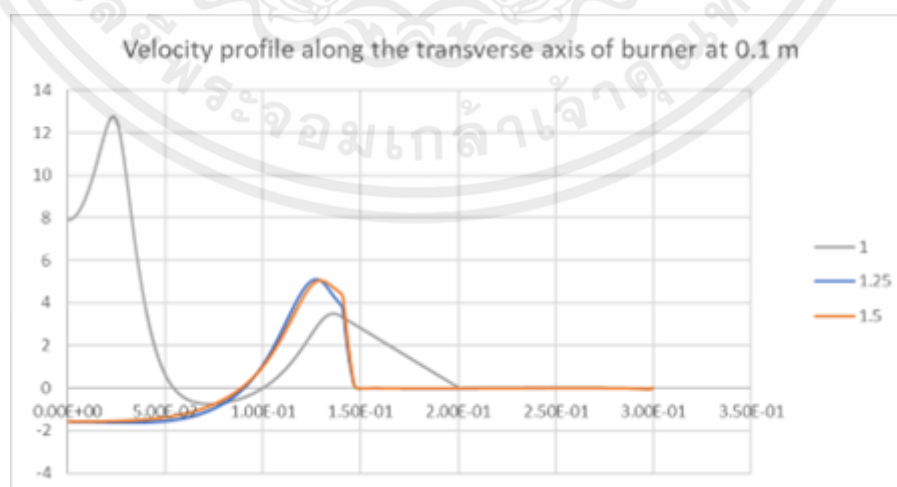
รูปที่ 5.5 กราฟเปรียบเทียบความเร็วอากาศตามแนวรัศมีระยะ -0.035 เมตร ของเผาไหม้ช่วยที่ติดตั้งหัวเผาทั้ง 3 ขนาด

จากกราฟพบว่าความเร็วก่อนถึงวัตถุขวางการไหลของหัวเผาทั้งสามขนาดมีความแตกต่างกัน โดยหัวเผาขนาด 1 เท้า จะมีความเร็วสม่ำเสมอมาเรื่อยๆ แล้วลดลงจนถึงศูนย์อย่างรวดเร็วที่บริเวณขอบ เทียบกับหัวเผา 1.25 และ 1.5 เท้าแล้ว ที่ความเร็วบริเวณที่มีการเพิ่มสัดส่วนพื้นที่ทางออกจะค่อยๆลดลงจนถึงศูนย์ โดยไม่มีหัวเผาใดที่มีความเร็วติดลบเกิดขึ้นเลย



รูปที่ 5.6 กราฟเปรียบเทียบความเร็วอากาศตามแนวรัศมีระยะ 0.02 เมตร ของเผาไหม้ช่วยที่ติดตั้งหัวเผาทั้ง 3 ขนาด

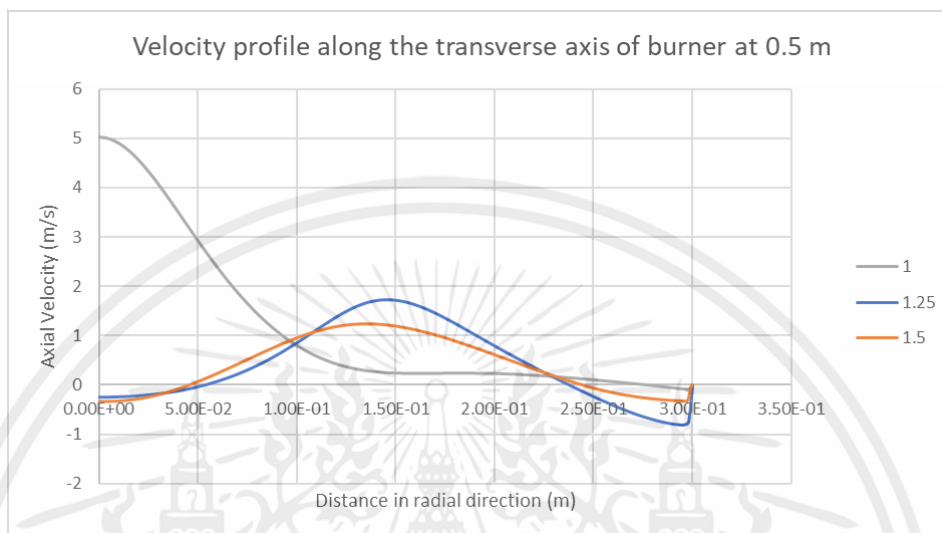
จากกราฟพบว่า Backward flow ของหัวเผาขนาด 1 เท้า มีความเร็วติดลบมากกว่าหัวเผา 2 ขนาด แต่กินบริเวณจนถึงระยะ 0.018 เมตร ตามแนวรัศมีแล้วจึงเปลี่ยนความเร็วเป็นบวก เมื่อเทียบกับหัวเผาขนาด 1.25 และ 1.5 เท้า จะมีรูปแบบความเร็วที่คล้ายกันคือมีความเร็วติดลบจนกระทั่งระยะ 0.03 เมตร ตามแนวรัศมี แล้วเปลี่ยนความเร็วเป็นบวกด้วยรูปแบบที่คล้ายกัน แต่หัวเผา 1.5 เท้า มีความเร็วที่สูงกว่าหัวเผา 1.25 เท้า



รูปที่ 5.7 กราฟเปรียบเทียบความเร็วอากาศตามแนวรัศมีระยะ 0.1 เมตร ของเผาไหม้ช่วยที่ติดตั้งหัวเผาทั้ง 3 ขนาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟพบว่าความเร็วของหัวเผา 1 เท่านั้นที่มีการปรับตัวของความเร็วเป็นบวก ซึ่งแตกต่างจากหัวเผาขนาด 1.25 และ 1.5 เท่า ที่เริ่มจาก Backward flow และค่อยๆกลับขึ้นมาจนความเร็วกลับมาเป็นบวกในช่วง 0.1 เมตร และในช่วง 0.15 เมตร เป็นต้นไปความเร็วจะคงที่ แต่หัวเผา 1 เท่านั้นความเร็วเริ่มคงที่ที่ระยะ 0.20 เมตร



รูปที่ 5.8 กราฟเปรียบเทียบความเร็วอากาศตามแนวรัศมีระยะ 0.5 เมตร ของเผาไหม้ช่วยที่ติดตั้งหัวเผาทั้ง 3 ขนาด

จากกราฟพบว่าความเร็วของหัวเผาขนาด 1 เท่านั้นเริ่มมาสูงมาก ซึ่งแตกต่างจากหัวเผาขนาด 1.25 และ 1.5 เท่า ที่เริ่มจาก Backward flow และค่อยๆกลับขึ้นมาจนความเร็วกลับมาเป็นบวกในช่วง 0.05 เมตร

จากการวิเคราะห์ผลการจำลองแบบไม่มีการเผาไหม้ การกระจายตัวของความเร็วอากาศที่ระยะ 0.02, 0.1 และ 0.5 ตามแนวรัศมี ประกอบกับแผนภาพสีของหัวเผาทั้ง 3 ขนาด พบว่าหัวเผาที่มีการเพิ่มสัดส่วนที่ทางออก (หัวเผาขนาด 1.25 และ 1.5 เท่า) เกิดความเร็วย้อนกลับ (Backward flow) ภายในห้องเผาไหม้กินบริเวณกว้าง เกิดเป็นการหมุนวนภายในห้องเผาไหม้ (Internal recirculation) โดยที่หัวเผาขนาด 1.5 เท่า ให้ขนาดการหมุนวนที่กว้างที่สุด เนื่องจากมีความเร็วบริเวณกึ่งกลางห้องเผาไหม้ที่ต่ำ ประกอบกับถูกอิทธิพลจากอากาศบริเวณขอบของห้องเผาไหม้ไปด้านหน้า เมื่อกกลางห้องเผาไหม้มีความเร็วต่ำกว่า จึงเกิดการม้วนตัวของอากาศกลับมาสู่บริเวณกลางห้องเผาไหม้อย่างรุนแรง ขณะที่หัวเผาขนาด 1 เท่า สร้างอากาศที่ไหลไปด้านหน้าอย่างรุนแรงจึงทำให้เกิดการหมุนวนในบริเวณแคบเฉพาะหลังวัตถุขวางการไหลเท่านั้น

อย่างไรก็ตามการพิจารณาแบบจำลองจัดทำขึ้นโดยใช้อากาศเป็นของไหลความหนาแน่นมีค่าสูง เมื่อเทียบกับแก๊สร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ดังนั้นหากนำหัวเผาไปประยุกต์ใช้ในการทดลองจริง

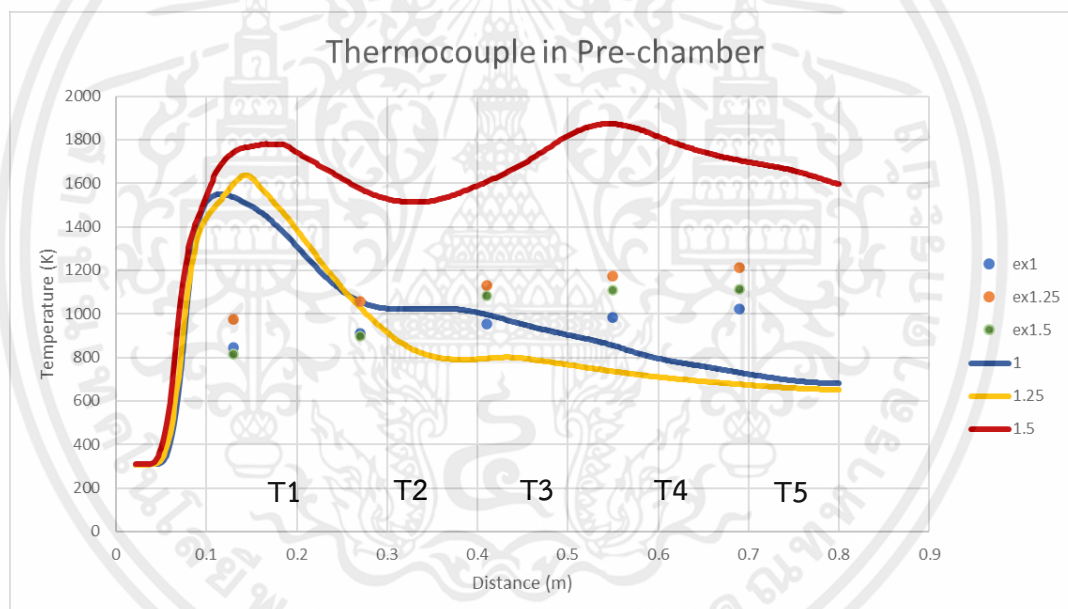
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คาดว่าจะทำให้เกิดกระแสหมุนวนที่รุนแรงกว่าแบบจำลอง และหัวเผาขนาด 1.5 เท่าจะให้สมรรถนะการเผาไหม้ที่ดีที่สุด เนื่องจากช่วยสร้างการหมุนวนภายในบริเวณกว้างทำให้แก๊สร้อนไหลเข้าปะทะกับเชื้อเพลิงที่เข้ามาใหม่และเกิดการเผาไหม้อย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้เพื่อประเมินผลการทดลองการเผาไหม้จริงจึงทำการสั่งผลิตหัวเผาขนาด 1.25 เท่า แล้วจึงอภิปรายเปรียบเทียบผลในหัวข้อถัดไป

## 5.2 ผลการทดลองและจำลองของการเผาไหม้

หัวข้อนี้เป็นการเปรียบเทียบผลการทดลองและจากการจำลองการเผาไหม้อย่างพาราที่สภาวะ 300 กิโลวัตต์ ความชื้น 20% ใช้อากาศส่วนเกิน 15 เปอร์เซ็นต์ อากาศที่ป้อนเข้าห้องเผาไหม้แบ่งออกเป็นสามส่วนคือ 25:65:10 ของห้องเผาไหม้ที่ติดตั้งหัวเผาขนาด 1, 1.25 และ 1.5 เท่า โดยมีหัวข้อดังนี้

### 5.2.1 การเปรียบเทียบอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ช่วย



รูปที่ 5.9 แสดงอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ ณ ตำแหน่งเดียวกันของผลการจำลองและผลการทดลองของหัวเผาทั้ง 3 ขนาด

จากรูป 5.9 เมื่อพิจารณาผลการทดลอง (แสดงผลแบบจุด) พบว่าผลการทดลองของหัวเผาที่ขนาด 1, 1.25 และ 1.5 เท่า ในกรณีของการทดลองในส่วนของกรณีหัวเผาขนาด 1 และ 1.25 เท่า นั้นมีแนวโน้มที่คล้ายกันต่างกันเพียงระดับของอุณหภูมิโดย หัวเผาขนาด 1.25 เท่า จะสูงกว่าหัวเผาขนาด 1 เท่า ขณะที่หัวเผาขนาด 1.5 เท่า มีอุณหภูมิในช่วงต้นใกล้เคียงกับหัวเผาขนาด 1 เท่า แล้วปรับตัวสูงขึ้นที่ตำแหน่ง T3

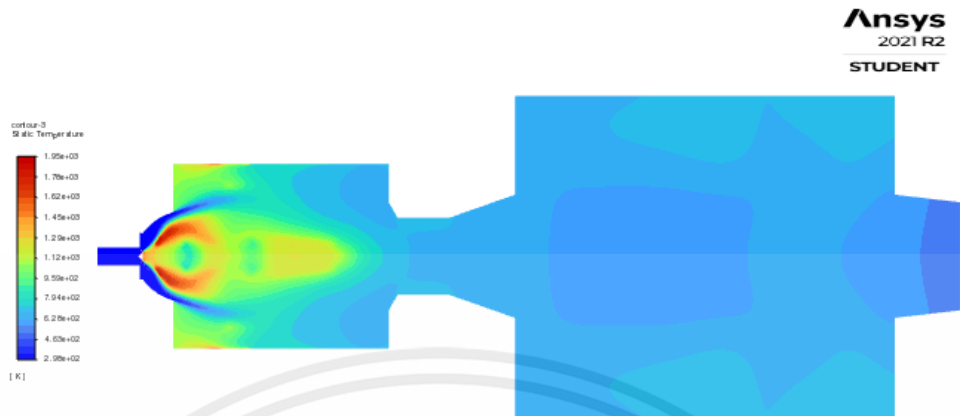
ในกรณีของผลการจำลองในช่วงประมาณ 0 – 0.1 เมตร อุณหภูมิมีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในทุกขนาดของหัวเผา ในส่วนของกรณีหัวเผาขนาด 1 เท้า นั้นอุณหภูมิขึ้นไปสูงสุดที่ประมาณ 1550 K ช่วง 0.12 เมตรและค่อยๆลดลงมาเรื่อยๆ ในขณะที่ขนาดของหัวเผา 1.25 เท้า ค่าของอุณหภูมิขึ้นไปสูงสุดที่ประมาณ 1650 K ช่วง 0.15 เมตรและค่อยๆลดลงมาเรื่อยๆ และสุดท้ายหัวเผาขนาด 1.5 เท้า ผลการจำลองนั้นบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงกว่าบริเวณอื่นมีอยู่ 2 ตำแหน่งคือตำแหน่งที่ 0.18 เมตร และ 0.55 เมตร

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดลอง พบประเด็นความแตกต่างดังนี้

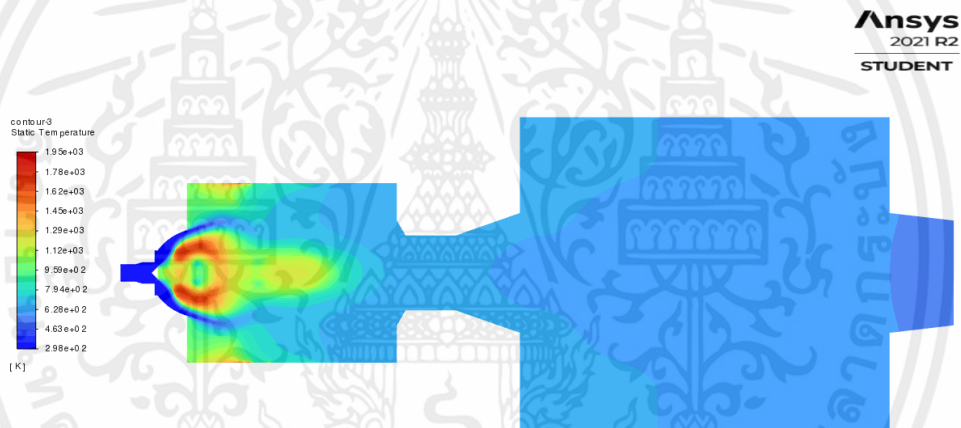
การกระจายตัวของอุณหภูมิกรณีการจำลองเกิดเป็นยอดที่มีอุณหภูมิสูง ขณะที่การทดลองมีลักษณะเรียบ เนื่องจากในการทดลองมีแท่งเทอร์โมคัปเปิลวางการไหลและสร้างความปั่นป่วน จึงทำให้รูปแบบการไหลในท้องเผาไหม้ช่วยถูกรบกวน ทำให้การกระจายตัวอุณหภูมิแตกต่างกัน

ระดับอุณหภูมิของหัวเผาขนาด 1.5 เท้า จากการจำลองมีค่าสูงสุด แต่ในผลการทดลองกลับมีค่าต่ำกว่ากรณีหัวเผา 1.25 เท้า ทั้งนี้คาดว่าเป็นผลมาจากเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลองกรณีของหัวเผาขนาด 1.5 เท้า นั้นมีความชื้นสูงเพราะเป็นเชื้อเพลิงที่เก็บมานานข้ามปี สังเกตจากการที่เชื้อเพลิงจับตัวกันเป็นก้อน และมีหยดน้ำเกาะบริเวณด้านในของกระจกมองไฟเมื่อเริ่มปล่อยเชื้อเพลิงไประยะหนึ่ง ในขณะที่กรณีอื่นๆ ไม่เกิดเหตุการณ์ดังกล่าว จึงมีสมมติฐานว่าการทดลองกรณีของหัวเผาขนาด 1.5 เท้า มีปัจจัยเรื่องความชื้นมาแทรกแซง โดยคาดว่าหากควบคุมความชื้นเชื้อเพลิงให้เท่ากันได้ผลการทดลองของหัวเผาขนาด 1.5 เท้า จะให้การกระจายตัวอุณหภูมิที่สูงกว่ากรณีอื่น อย่างไรก็ตามจากการเปรียบเทียบผลการทดลองและผลการจำลองข้างต้น สามารถนำมาอภิปรายผลในเชิงเปรียบเทียบได้เนื่องจากกรณีของหัวเผาขนาด 1 และ 1.25 เท้า มีระดับอุณหภูมิใกล้เคียงกัน จึงยึดผลการจำลองเพื่อใช้ในการอภิปรายในหัวข้อถัดไป

## 5.2.2 การกระจายตัวของอุณหภูมิ



รูปที่ 5.10 แสดงอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ที่ติดตั้งหัวเผาขนาด 1 เท้า

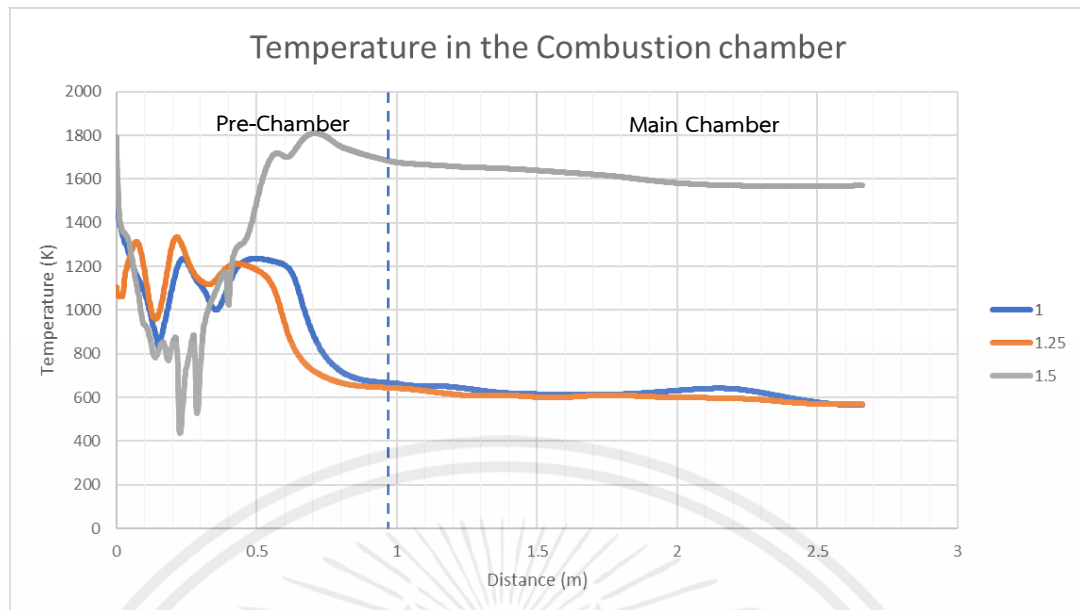


รูปที่ 5.11 แสดงอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ที่ติดตั้งหัวเผาขนาด 1.25 เท้า



รูปที่ 5.12 แสดงอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ที่ติดตั้งหัวเผาขนาด 1.5 เท้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

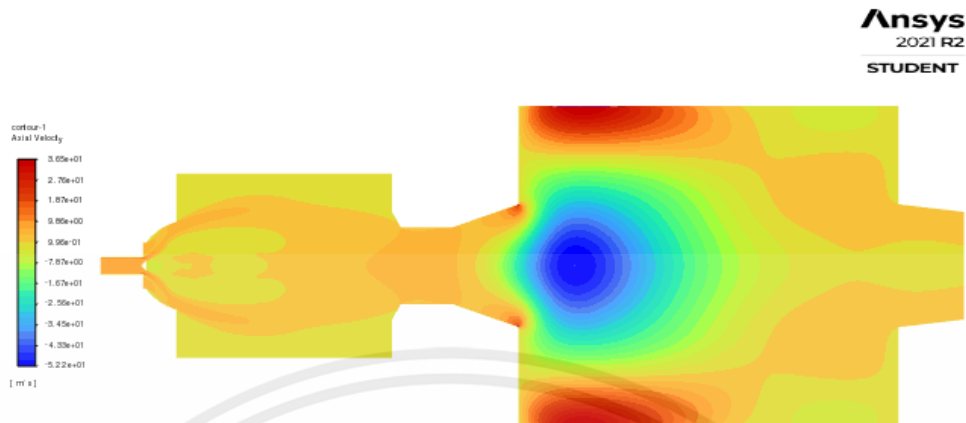


รูปที่ 5.13 แสดงอุณหภูมิที่แกนกลางภายในห้องเผาไหม้ของผลการจำลอง

จากผลการจำลองที่แสดงอุณหภูมิห้องเผาไหม้ช่วยและห้องเผาไหม้หลักจากการเผาไหม้ของพารา โดยการศึกษาจะนำเสนอผลการจำลอง ซึ่งอุณหภูมิที่เกิดขึ้นนั้นเกิดจากการทำปฏิกิริยาการเผาไหม้ระหว่างเชื้อเพลิงของพารากับอากาศ ทำให้ผลการจำลองการกระจายของอุณหภูมิต่างกันตามตำแหน่งที่มีการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง ดังรูปที่ 5.12 เป็นห้องเผาไหม้ที่ติดตั้งหัวเผาขนาด 1.5 เทา มีการกระจายความร้อนที่สูงและเป็นวงกว้างทั่วทั้งห้องเผาไหม้ช่วยและห้องเผาไหม้หลัก ขณะที่รูป 5.10 และ 5.11 แสดงอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ที่ติดตั้งหัวเผาขนาด 1 และ 1.25 เทา มีความร้อนที่ต่ำกว่า และพื้นที่การกระจายความร้อนในห้องเผาไหม้หลักที่น้อยกว่า

รูปที่ 5.13 แสดงกราฟอุณหภูมิที่แกนกลางภายในห้องเผาไหม้ พบว่าในช่วง 0 ถึง 0.4 m ห้องเผาไหม้ที่ติดตั้งหัวเผาขนาด 1.25 เทา มีอุณหภูมิสูงสุด รองลงมาคือห้องเผาไหม้ที่ติดตั้งหัวเผาขนาด 1 และ 1.5 ตามลำดับ แต่เมื่อเข้าสู่ช่วงตั้งแต่ 0.4 m เป็นต้นไป อุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งกรณีห้องเผาไหม้ที่ติดตั้งหัวเผาขนาด 1.5 เทา มีอุณหภูมิสูงสุด รองลงมาคือห้องเผาไหม้ที่ติดตั้งหัวเผาขนาด 1 และ 1.25 ตามลำดับ

### 5.2.3 ความเร็วในห้องเผาไหม้



รูปที่ 5.14 แสดงความเร็วการไหลภายในห้องเผาไหม้ที่ติดตั้งหัวเผาขนาด 1 เซนติเมตร

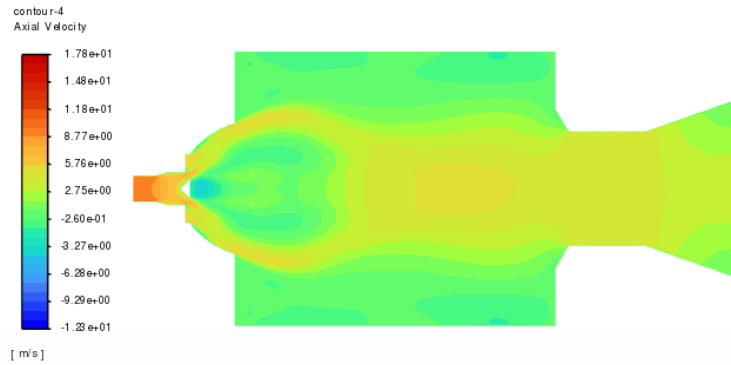


รูปที่ 5.15 แสดงความเร็วการไหลภายในห้องเผาไหม้ที่ติดตั้งหัวเผาขนาด 1.25 เซนติเมตร

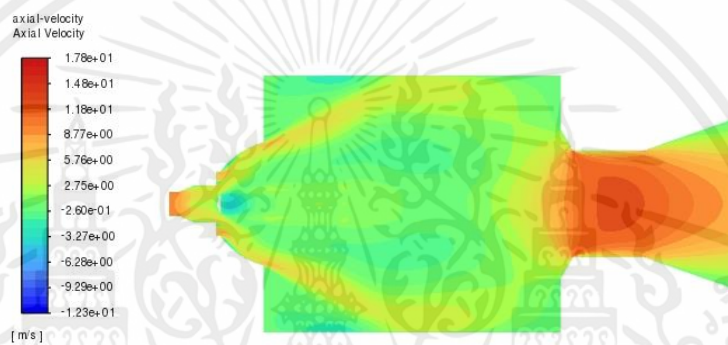


รูปที่ 5.16 แสดงความเร็วการไหลภายในห้องเผาไหม้ที่ติดตั้งหัวเผาขนาด 1.5 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.17 แสดงความเร็วการไหลภายในห้องเผาไหม้ช่วยที่ติดตั้งหัวเผาขนาด 1.25 เทา



รูปที่ 5.18 แสดงความเร็วการไหลภายในห้องเผาไหม้ช่วยที่ติดตั้งหัวเผาขนาด 1.5 เทา

จากภาพคอนทัวร์ที่แสดงความเร็วการไหลของก๊าซไอเสีย เมื่อนำรูปที่ 5.14, 5.15 และ 5.16 ซึ่งปรับเป็นช่วงความเร็วเดียวกันเทียบกัน จะเห็นได้ว่าห้องเผาไหม้ที่ติดตั้งหัวเผาขนาด 1 เทา จะมีความเร็วพุ่งไปข้างหน้าแบบไม่กระจายมากในห้องเผาไหม้ช่วย เกิดความเร็วหมุนวนอย่างรุนแรงที่กึ่งกลางส่วนเข้าห้องเผาไหม้หลัก ขณะที่ห้องเผาไหม้ที่ติดตั้งหัวเผาขนาด 1.25 เทา จะเห็นเป็นความเร็วไม่แรงมากพุ่งไปข้างหน้า และที่ห้องเผาไหม้ที่ติดตั้งหัวเผาขนาด 1.5 เทา จะเห็นว่าความเร็วมีการกระจายถึงไปผนังภายในห้องเผาไหม้ช่วย แล้วพุ่งไปข้างหน้าในห้องเผาไหม้หลัก

จากภาพคอนทัวร์ที่แสดงความเร็วการไหลของเปลวไฟในห้องเผาไหม้ช่วย ในรูปที่ 5.17 และ 5.18 ห้องเผาไหม้ที่ติดตั้งหัวเผาขนาด 1.25 เทา จะเห็นได้ว่า เกิดการไหลหมุนวนขนาดเล็กในช่วงหลังวัตถุขวางการไหล และความเร็วเกิดการโค้งเข้าหาแกนกลางของห้องเผาไหม้บริเวณตรงกลางห้องเผาไหม้ช่วย ขณะที่ห้องเผาไหม้ที่ติดตั้งหัวเผาขนาด 1.5 เทา จะเห็นได้ว่า เกิดการไหลหมุนวนขนาดใหญ่กว่าหัวเผา 1.25 เทา ในช่วงหลังวัตถุขวางการไหล และมีความเร็วการไหลที่รุนแรงในช่วงต่อของห้องเผาไหม้ช่วยและห้องเผาไหม้หลัก เป็นสาเหตุให้อุณหภูมิที่กึ่งกลางห้องเผาไหม้ กรณีของ 1.25 เทา สูงกว่ากรณีของ 1.5 เทา ในช่วงต้น แสดงดังรูปที่ 5.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2.4 สัดส่วนโดยมวลของสารระเหยเผาไหม้ได้



รูปที่ 5.19 แสดงความเข้มข้นสัดส่วนมวลของสารระเหยในห้องเผาไหม้ที่ติดตั้งหัวเผาขนาด 1 เท๋า



รูปที่ 5.20 แสดงความเข้มข้นสัดส่วนมวลของสารระเหยในห้องเผาไหม้ที่ติดตั้งหัวเผาขนาด 1.25 เท๋า



รูปที่ 5.21 แสดงความเข้มข้นสัดส่วนมวลของสารระเหยในห้องเผาไหม้ที่ติดตั้งหัวเผาขนาด 1.5 เท๋า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพคอนทัวร์ที่แสดงความเข้มข้นสัดส่วนมวลของสารระเหยภายในห้องเผาไหม้ จะเห็นได้ว่าที่ห้องเผาไหม้ที่ติดตั้งหัวเผา 1.5 เทานั้นมีความเข้มข้นมากที่สุด รองลงมาคือห้องเผาไหม้ที่ติดตั้งหัวเผา 1.25 และ 1 เท่าตามลำดับ หากความเข้มข้นของสารระเหยมีปริมาณที่มากพอจะทำให้จุดเปลวไฟติดได้ หากมีปริมาณความเข้มข้นของสารระเขยน้อยก็มีความเสี่ยงที่จะทำให้เปลวไฟดับ

จากการวิเคราะห์ผลที่ได้ทั้งจากการทดลองและการจำลองของอุณหภูมิจนในห้องเผาไหม้ช่วย, การกระจายตัวอุณหภูมิ, ความเร็ว และสัดส่วนโดยมวลของสารระเหยในห้องเผาไหม้ สามารถสรุปได้ว่า หัวเผาขนาด 1.5 เท่า ส่งผลให้การเผาไหม้มีประสิทธิภาพที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับหัวเผาขนาด 1 และ 1.25 เท่า เนื่องจากหัวเผาขนาด 1.5 เท่า มีการขยายขนาดหัวเผาส่งผลให้พื้นที่ทางออกของอากาศ ส่วนที่ 2 ลดลง ความเร็วสูงขึ้น เกิดกระแสลมที่มีความเร็วสูงพุ่งปะทะผนังห้องเผาไหม้ และไหลวนเข้าสู่แกนกลางของห้องเผาไหม้รุนแรง เกิดเป็นการไหลหมุนวน (recirculation zone) ในบริเวณกว้าง ทำให้มีการแลกเปลี่ยนระหว่างเชื้อเพลิงกับออกซิเจนในอากาศ เกิดเป็นปฏิกิริยาเคมีการเผาไหม้ เปลวไฟติดอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเป็นปัจจัยที่ทำให้รักษาเสถียรภาพของเปลวไฟและการเผาไหม้สมบูรณ์ ขณะที่หัวเผาขนาด 1 และ 1.25 มีผลการทดลองและผลจำลองที่ใกล้เคียงกัน

## บทที่ 6

# สรุปผลและข้อเสนอแนะ

### 6.1 บทสรุป

การศึกษ้อัตราส่วนขนาดทางออกต่อทางเข้าของช่องทางอากาศการไหลส่วนที่หนึ่งต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้ ได้ทำการทดลองและจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงยางพาราผงที่ความร้อน 300 กิโลวัตต์ความร้อน ความชื้น 20 เปอร์เซ็นต์ ใช้อากาศส่วนเกิน 15 เปอร์เซ็นต์ อากาศที่ป้อนเข้าห้องเผาไหม้แบ่งออกเป็นสามส่วนคือ 25:65:10 โดยทำการติดตั้งหัวเผา 3 ขนาดที่ต่างกัน ได้แก่ หัวเผาขนาด 1, 1.25 และ 1.5 เท่า ที่ทางเข้าของลมปฐมภูมิและเชื้อเพลิง เพื่อศึกษาอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ช่วย, การกระจายตัวอุณหภูมิ, พื้นที่การไหลหมุนวน (Recirculation zone) และความเข้มข้นของสัดส่วนเชิงมวลของสารระเหย (Mass fraction of volatile) ที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้

จากการจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงยางพารา ความชื้น 20 เปอร์เซ็นต์ ทำการตรวจสอบเรื่องอิทธิพลของจำนวนกริด (Mesh Independence) เลือกอิทธิพลขนาด 0.002 เมตร จำลองการไหลแบบ k-standard ค่าเอนทัลปีมาตรฐาน  $-2.807 \times 10^8$  J/kgmol ของเชื้อเพลิง และพลังงานกระตุ้นสำหรับการปลดปล่อยสารระเหย Single Kinetic Rate  $2.7 \times 10^7$  J/kgmol

จากการพิจารณาอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ช่วยจากผลการทดลองและการจำลองเทียบกันของหัวเผาทั้ง 3 ขนาด พบว่า การกระจายตัวในกรณีการจำลองเกิดเป็นยอดที่มีอุณหภูมิสูง ขณะที่การทดลองมีลักษณะเรียบ เนื่องจากในการทดลองมีแท่งเทอร์โมคัปเปิลขวางการไหลและสร้างความปั่นป่วน จึงทำให้รูปแบบการไหลในห้องเผาไหม้ช่วยถูกรบกวน ทำให้การกระจายตัวอุณหภูมิแตกต่างกัน และยังพบว่าผลการทดลองของหัวเผาขนาด 1.5 มีค่าที่ต่ำกว่าผลการทดลองของ 1.25 เท่า ซึ่งสวนทางกับผลที่ได้จากการจำลอง เนื่องจากเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้นั้น มีความชื้นสูง มีการจับตัวเป็นก้อน ส่งผลให้การปล่อยเชื้อเพลิงเข้ามาในห้องเผาไหม้ไม่ต่อเนื่อง จึงยึดผลการจำลองในการวิเคราะห์ถัดไป

ในส่วนของการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลการจำลองทั้ง 3 กรณี พบว่าการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ที่ทำการติดตั้งหัวเผาขนาด 1.5 เท่า ซึ่งเป็นการขยายขนาดทางออกของเชื้อเพลิงกับอากาศส่วนปฐมภูมิส่งผลให้พื้นที่ทางออกของอากาศส่วนทุติยภูมิลดลง มีความเร็วที่สูงขึ้น ทำให้อากาศมีการกระจายได้ถึงผนังห้องเผาไหม้ ทั้งยังสร้างเป็นพื้นที่การไหลหมุนวนที่กว้างกว่า เกิดการหมุนวนเชื้อเพลิงกลับมาถ่ายเทความร้อนและแลกเปลี่ยนออกซิเจนในอากาศที่มากกว่า ส่วนหัวเผา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาด 1.25 เท่าแม้จะเป็นการขยายขนาดทางออกเหมือนกัน แต่ด้วยขนาดที่ไม่ขยายทางออกของเชื้อเพลิงและอากาศส่วนปฐมภูมิที่มากพอ รวมถึงการบดบังอากาศส่วนทุติยภูมิที่น้อยจนไม่เกิดผลกระทบต่อการไหล ทำให้ได้ผลการจำลองที่ใกล้เคียงกับหัวเผาขนาด 1 เท่า

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

6.2.1 ควรมีที่สำหรับเก็บเชื้อเพลิงที่ได้ทำการบดละเอียดแล้วเพื่อป้องกันไม่ให้เชื้อเพลิงเกิดความชื้นและจับตัวกันเป็นก้อน

6.2.2 ควรปรับระยะพิทช์ของสกรูพิดให้ถี่มากขึ้น เพื่อให้เชื้อเพลิงไหลได้อย่างต่อเนื่องที่อัตราการไหลต่ำ ๆ เนื่องจากปัจจุบันระยะพิทช์ค่อนข้างกว้าง จึงจำเป็นต้องใช้รอบการป้อนต่ำมาก จนบางครั้งมอเตอร์ไม่สามารถหมุนได้

6.2.3 ควรปรับเปลี่ยนขนาดเทอร์โมคัปเปิลให้มีขนาดที่เหมาะสมกับห้องเผาไหม้ช่วย เพื่อลดการขวางการไหลและความปั่นป่วนภายในห้องเผาไหม้ช่วย และยังส่งผลให้การกระจายตัวของอุณหภูมินั้นเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการจำลองมากขึ้นอีกด้วย

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Chatchalerm Kaewchompoo Effect of Stepped-up Burner Tip on Combustion Performance for Biomass Under Pre-Chamber Configuratio
- [2] ชินภัทร ชูการ. การพัฒนาหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลในหม้อน้ำอุตสาหกรรม.วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2558
- [3] พีรพัฒน์ เทพลิบ.การพัฒนาาระบบควบคุมการไหลของอากาศและเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง สำหรับหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวล. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2560
- [4] นรเศรษฐ์ พิกุลเงิน.ผลกระทบของสัดส่วนการป้อนอากาศต่อสมรรถนะของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดฝุ่น.วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2560
- [5] คณิศร ทรแสงธรรม.การศึกษาผลกระทบของเชื้อเพลิงผสมระหว่างถ่านหินกับกะลาปาล์มในการเผาไหม้แบบเชื้อเพลิงผงสำหรับหม้อไอน้ำในภาคอุตสาหกรรม. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2563
- [6] รังสินันท์ ณ รังสี การปรับปรุงสมรรถนะหัวพ่นเชื้อเพลิงผงโดยการเพิ่มพื้นที่ช่องการไหลของอากาศปฐมภูมิ.วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2563
- [7] สำนักกองโรคจากการประกอบอาชีพและสิ่งแวดล้อม.  
<http://envocc.ddc.moph.go.th/contents/view/70>
- [8] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน(พพ.). กระทรวงพลังงาน.2552.ศักยภาพชีวมวลในประเทศไทย[online].available:[http://biomass.dede.go.th/biomass\\_web/index.html](http://biomass.dede.go.th/biomass_web/index.html)
- [9] กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม Department of Environmental Quality Promotion (DEQP). กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม Ministry of Natural Resources and Environment. <https://datacenter.deqp.go.th>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [10] ทฤษฎีและเทคโนโลยีการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งและชีวมวล Theory and Technology of Solid Fuels and Biomass Combustion . ฐานิตย์ เมธิยานนท์
- [11] Shan Xue et al. "Experimental investigation on NOx emission and carbon burnout from a radially biased pulverized coal whirl burner." **Fuel Processing Technology** 90. 2009. pp.1142-1147
- [12] ธิติพัทธ์ ลิ้มกุล. "การทดลองคณิตศาสตร์สำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงผง." วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2556.
- [13] ข้อมูลไม้ยางพารา  
<http://rubber.oie.go.th/box/Article/46745/%E0%B8%9A%E0%B8%97%E0%B8%97%E0%B8%B5%E0%B9%88%2011%20%E0%B9%84%E0%B8%A1%E0%B9%89%E0%B8%A2%E0%B8%B2%E0%B8%87%2018.8.59.pdf>
- [14] J.M. Beer and N.A. Chigire 1972 Combustion aerodynamics (London:Applied Science Publishers Ltd)
- [15] Stephen R. Turns 2000 An Introduction to Combustion(McGraw-Hill)
- [16] Peter Mullingger 2008 Industrial and Process Furnaces Principles,Design and Operation(Amsterdam: ELSEVIER)
- [17] Piotr walanski., Stanislaw Wojcicik, "Stabilization Of Coal Dust-Air Mixture By Bluff Body" , Symposium (International) On Combustion , Vol15 , 1975. Pp1298-1302