

การศึกษาอิทธิพลของรูปร่างวัตถุขวางการไหลที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการเผา  
ไหม้เชื้อเพลิงผง

Effect of Bluff body shape on Pulverized Combustion  
Performance



ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2564

การศึกษาอิทธิพลของรูปทรงวัตถุขวางการไหลที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการเผา  
ไหม้เชื้อเพลิงผง

Effect of Bluff body shape on Pulverized Combustion  
Performance



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2564

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Effect of Bluff body shape on Pulverized Combustion  
Performance



Thiraput Isarangkul na Ayutthaya  
Thaninthorn Konthong  
Nontacha Petjan

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL 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 การศึกษาอิทธิพลของรูปทรงวัตถุขวางการไหลที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้เชื้อเพลิงผง

Effect of Bluff body shape on Pulverized Combustion Performance

ผู้จัดทำ

1. นายถิรพุทธิ อิศรางกูร ณ อยุธยา รหัสประจำตัว 61010392
2. นางสาวนรินทร์ธร ก้อนทอง รหัสประจำตัว 61010470
3. นายนนทชา เพชรจันทร์ รหัสประจำตัว 61010530

**ภรณ์เพ็ญ ลภวิศตกุล** อาจารย์ที่ปรึกษา

( ผศ.ดร.ภรณ์เพ็ญ ลภวิศตกุล )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาอิทธิพลของรูปทรงวัตถุขวางการไหลที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้เชื้อเพลิงผง

นายถิรพุทธิ อิศรางกูร ณ อยุธยา 61010392  
นางสาวธนินท์ธร ก้อนทอง 61010470  
นายนนทชา เพชรจันทร์ 61010530  
ผศ.ดร.ภรณ์เพ็ญ ลภีรัตนากุล อาจารย์ที่ปรึกษา  
ปีการศึกษา 2564

## บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาและเปรียบเทียบเสถียรภาพเปลวไฟในการเผาไหม้อันเนื่องมาจากตัวขวางการไหลต่าง ๆ ที่ได้รับการออกแบบโดยคนที่สัดส่วนการขวางการไหล ภายใต้การจำลองผลทางคณิตศาสตร์แบบสองมิติ โดยใช้เชื้อเพลิงไม้ยางพาราบดละเอียด ขอบเขตงานวิจัยนี้คือทำการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง 300 กิโลวัตต์ความร้อน ปรับปรุงและเปลี่ยนวัตถุขวางการไหลที่ระยะ 10 มิลลิเมตรจากหัวเผา ใช้อากาศส่วนเกิน 15 เปอร์เซ็นต์ โดยอากาศที่ป้อนเข้าห้องเผาไหม้แบ่งออกเป็นสามส่วนคือ 25:65:10 ในวิธีการทดลองมีการนำแบบจำลองวัตถุขวางการไหลรูปทรงต่าง ๆ มาเปรียบเทียบและวิเคราะห์ความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านวัตถุขวางการไหล สรุปผลและเลือกวัตถุขวางการไหลทรงกรวยเจาะรูซึ่งมีแนวโน้มทำให้เปลวไฟมีเสถียรภาพเทียบเท่ากับวัตถุขวางการไหลทรงกรวย อย่างไรก็ตามในแง่ของสมรรถนะการเผาไหม้ ผู้วิจัยเห็นว่าวัตถุขวางการไหลทรงกรวยเจาะรูน่าจะช่วยเพิ่มโอกาสการปะทะของเชื้อเพลิงและแก๊สร้อนที่หมุนเวียนกลับมาได้ดีกว่า จึงเลือกรูปทรงดังกล่าว เขียนแบบพร้อมส่งผลิตเพื่อนำไปใช้ในการทดลองการเผาไหม้ หลังจากได้ทำการทดลองพบว่าวัตถุขวางการไหลรูปทรงกรวยตันสร้างพื้นที่การไหลหมุนวนที่กว้างกว่าอีกกรณี ทำให้เกิดการหมุนวนก้ำซร้อนกลับมาให้สารระเหยที่เข้าห้องเผาไหม้ได้ดี โดยอุณหภูมิสูงเกิดตั้งแต่บริเวณพื้นที่การไหลหมุนวนที่มีสารระเหยเข้มข้นรวมไปถึงทั่วทั้งห้องเผาไหม้ช่วยและห้องเผาไหม้หลัก ในกรณีการเผาไหม้ที่มีวัตถุขวางการไหลรูปทรงกรวยเจาะรู เนื่องจากอากาศส่วนที่หนึ่งและเชื้อเพลิงผ่านรูตรงกลางวัตถุขวางการไหลและอีกส่วนออกบริเวณส่วนข้าง ทำให้โมเมนตัมของส่วนผสมที่จะนำอนุภาคเข้าสู่กระแสของอากาศส่วนที่สองและชนผนังเพื่อวนกลับสู่กลางห้องเผาไหม้ต่ำลง เกิดเป็นการไหลหมุนวนที่แคบ ซึ่งอุณหภูมิสูงเกิดเพียงบริเวณพื้นที่การไหลหมุนวนที่มีสารระเหยเข้มข้น บริเวณที่เป็นทางเข้าของอากาศส่วนที่สอง และบริเวณกึ่งกลางห้องเผาไหม้ช่วยรวมถึงความเข้มข้นของสารระเหยที่น้อยกว่าทำให้มีเสถียรภาพของเปลวไฟน้อยกว่าอีกกรณี

## EFFECT OF BLUFF BODY SHAPE ON PULVERIZED COMBUSTION PERFORMANCE

Thiraput	Isarangkul na Ayutthaya	61010392
Thaninthorn	Konthong	61010470
Nontacha	Petjan	61010530
Asst.Prof.Ponepen	Laphirattanakul	Advisor
Year 2564		

### ABSTRACT

The purpose of this research was to study and compare the combustion performance due to different bluff body geometry design with the same blockage ratio under two-dimensional simulation. The experiment and simulation were conducted with the pulverized burner at 300 kW thermal through put at the excess air of 15%. The total air was fed separately with the ratio of 25:65:10 of primary, secondary and tertiary air. The simulation of the chosen bluff body geometries were compared and analyzed with the cold flow condition. The results showed that the hole cone bluff body geometry gave the strong reverse flow so that could be implied to the flame stabilization capability. In aspect of combustion performance the researchers expected that the hole cone could increase the chances of collision of the incoming fuel to the reverse hot gas. Therefore, the solid cone and hole cone with the same blockage ratio were chosen to the further experiment and simulation to investigate the combustion performance. The results showed that, the cone shape bluff body created the larger recirculation zone than the other case. This led to the greater volatile concentration located after the bluff body. The high temperatures generated from the high volatile-concentrated area. Provided the continuous burning in pre-combustion chamber, leading to the happening the char burning process, indicated with the high temperature level, in the main chamber. In the case of combustion with hole cone bluff body, the high temperature occurred only in the high volatile release area.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยคำแนะนำ คำสั่งสอน ความกรุณา ให้คำปรึกษา ถวายทอดความรู้และประสบการณ์ต่าง ๆ จาก ผศ.ดร.ภรณ์เพ็ญ ลภีรัตนากุล ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ ทางคณะผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง รวมทั้งขอขอบพระคุณคณาจารย์ พี่ ๆ และเพื่อน ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาครั้งนี้ที่คอยให้ความรู้ คำแนะนำ ให้ความร่วมมือต่อการศึกษานี้เป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณทางสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่คอยสนับสนุนทุนเพื่อการศึกษา และบริษัท พรีเมี่ยม เอ็นเนอร์ยี คอร์ปอเรชั่น จำกัด ที่คอยสนับสนุนด้านเชื้อเพลิงเพื่อใช้ในการศึกษา



# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ .....	I
ABSTRACT .....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	XI
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 ความมุ่งหมาย และวัตถุประสงค์ของการศึกษา .....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย .....	2
1.5 ขั้นตอนการศึกษา.....	2
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับ .....	3
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทรรศน์ .....	4
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	7
3.1 เชื้อเพลิงแข็ง (Solid fuel).....	7
3.2 เชื้อเพลิงชีวมวล.....	8
3.2.1 องค์ประกอบชีวมวล.....	9
3.2.2 ศักยภาพด้านพลังงานของชีวมวล .....	10
3.2.3 สมบัติของชีวมวล.....	11
3.3 เชื้อเพลิงชีวมวลผงและถ่านหินผง.....	12
3.4 การเผาไหม้ .....	13
3.4.1 การสันดาปของเชื้อเพลิง .....	13
3.4.2 สตอยชิโอเมตรี (Stoichiometry).....	13
3.4.3 อัตราส่วนสมมูล (Equivalence ratio).....	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.4	เปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน (Excess Air).....	14
3.5	การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง.....	14
3.6	การปลดปล่อยมลพิษและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม.....	15
3.6.1	การก่อตัวของคาร์บอนมอนอกไซด์.....	15
3.6.2	การก่อตัวของไนโตรเจนออกไซด์.....	16
3.6.3	ฝุ่นและเขม่า.....	17
3.7	การรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟ.....	18
3.7.1	วัตถุขางการไหล (Bluff body).....	18
3.7.2	อุปกรณ์ช่วยสร้างการไหลหมุนควง (Swirler).....	20
3.8	เทคโนโลยีการเผาไหม้ (Combustion Technology).....	20
3.8.1	การเผาไหม้โดยตรง (Direct Combustion).....	21
3.8.2	การผลิตก๊าซชีวมวลโดยใช้อากาศ (Air Gasification).....	26
3.9	แบบจำลองการเผาไหม้.....	26
3.9.1	สมการความต่อเนื่องและโมเมนตัม.....	26
3.9.2	แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent model).....	28
3.9.3	แบบจำลองการแผ่รังสี (Radiation model).....	32
3.9.4	Discrete Phase Models.....	33
3.9.5	แบบจำลองการถ่ายโอนสปีชีส์ (Modeling Species Transport).....	34
บทที่ 4	อุปกรณ์และโมเดลการจำลองการเผาไหม้.....	36
4.1	อุปกรณ์การทดลอง.....	36
4.1.1	วัตถุขางการไหล.....	36
4.1.2	หัวเผา.....	37
4.1.3	ห้องเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล.....	37
4.1.4	ห้องเผาไหม้ช่วย.....	39
4.1.5	ระบบป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลผง.....	39
4.1.6	ระบบบำบัดไอเสีย.....	40
4.1.7	ระบบป้อนอากาศ.....	41
4.1.8	ระบบทางเดินแก๊ส LPG.....	43
4.1.9	อุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิ.....	44
4.1.10	อุปกรณ์ตรวจวัดแก๊สไอเสีย.....	46

4.1.11 ระบบควบคุมการทดลอง.....	47
4.2 วิธีการทดลอง.....	48
4.2.1 ออกแบบวัตถุขวางการไหล.....	48
4.2.2 คำนวณหาปริมาณของอากาศปฐมภูมิ อากาศทุติยภูมิ และอากาศตติยภูมิ .....	49
4.2.3 เตรียมเชื้อเพลิงชีวมวลผง.....	50
4.2.4 การจุดหัวเผา และการอุ่นหัวเผา.....	50
4.2.5 บันทึกผลการทดลอง.....	50
4.3 โมเดลจำลองการเผาไหม้.....	51
4.4 แบบจำลองและการทดลองหาจำนวนกริดที่เหมาะสม.....	51
4.4.1 โมเดลห้องเผาไหม้.....	51
4.4.2 การทดลองหาจำนวนกริดที่เหมาะสม.....	53
บทที่ 5 อภิปรายผลการจำลอง.....	54
5.1 ผลจำลองการไหล.....	54
5.1.1 การสอบเทียบผลการจำลอง.....	54
5.1.2 ผลการจำลองการไหลของอากาศ.....	54
5.2 การสอบเทียบผลการจำลอง.....	57
5.3 ผลการจำลองการเผาไหม้เปรียบเทียบกับกรณีวัตถุขวางการไหลรูปทรงกรวยตันและกรวย	
เจาะรู.....	59
5.3.1 การกระจายตัวอุณหภูมิ.....	60
5.3.2 ความเร็วในห้องเผาไหม้.....	61
5.3.3 สัดส่วนโดยมวลของสารระเหยเผาไหม้ได้.....	63
บทที่ 6 สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	65
6.1 บทสรุป.....	65
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	66
เอกสารอ้างอิง.....	68

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะของถ่านหิน.....	7
3.2 แสดงองค์ประกอบของชีวมวล .....	9
3.3 แสดงศักยภาพของพลังงานชีวมวลชนิดต่าง ๆ ภายในประเทศไทย ปี 2554.....	10
3.4 แสดงสมบัติของชีวมวลในประเทศไทย.....	11
4.1 แสดงคุณสมบัติของไม้ยางพาราผง.....	49
4.2 แสดงอัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิ ทุติยภูมิ และ ตติยภูมิสำหรับเชื้อเพลิงยางพารา.....	50
4.3 แสดงโมเดลการเผาไหม้ที่ใช้ในการทดลอง.....	51



# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างเปลวไฟในการเผาไหม้ขนาดเล็กกับรูปร่างวัตถุวางการไหลต่าง ๆ .....	4
รูปที่ 2.2 ผลลัพธ์ CFD ของข้อมูลการไหลสำหรับรูปร่างวัตถุการไหลต่าง ๆ .....	5
รูปที่ 2.3 อุณหภูมิผนังเฉลี่ยของการเผาไหม้ขนาดเล็ก .....	5
รูปที่ 2.4 ผลลัพธ์ CFD ของข้อมูลการไหลสำหรับรูปร่างวัตถุการไหลที่มีช่องว่างต่างกัน .....	6
รูปที่ 3.1 ถ่านหินอัดแท่ง .....	8
รูปที่ 3.2 เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด .....	8
รูปที่ 3.3 ถ่านหินผง .....	12
รูปที่ 3.4 ไม้ยางพาราผง .....	12
รูปที่ 3.5 แสดงองค์ประกอบเชื้อเพลิงแข็ง .....	15
รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง .....	15
รูปที่ 3.7 วัตถุวางการไหลรูปแบบต่าง ๆ .....	19
รูปที่ 3.8 แสดงพื้นที่เสถียรภาพเปลวไฟหลังวัตถุวางการไหล .....	19
รูปที่ 3.9 อุปกรณ์ช่วยสร้างการไหลหมุนควง .....	20
รูปที่ 3.10 ตัวอย่างหัวเผา .....	21
รูปที่ 3.11 ระบบ Fixed-bed combustion .....	22
รูปที่ 3.12 ระบบ Mechanical Stokers .....	22
รูปที่ 3.13 ระบบ Fluidized bed combustion .....	23
รูปที่ 3.14 ระบบ Pulverized combustion .....	24
รูปที่ 3.15 หัวเผาถ่านหินบดละเอียดชนิดไหลตรง .....	25
รูปที่ 3.16 หัวเผาถ่านหินบดละเอียดชนิดการไหลปั่นป่วน .....	25
รูปที่ 3.17 ระบบ Cyclone combustion .....	26
รูปที่ 3.18 Air Gasification .....	26
รูปที่ 4.1 วัตถุวางการไหลรูปทรงกรวยตัน .....	36
รูปที่ 4.2 วัตถุวางการไหลรูปทรงกรวยเจาะรู .....	36
รูปที่ 4.3 หัวเผาขนาด 1.5 เท้า .....	37
รูปที่ 4.4 ลักษณะห้องเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง .....	37

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.5 ลักษณะสกรูระบายไถ่้าหนัก .....	38
รูปที่ 4.6 ลักษณะถังพักไถ่้าหนัก.....	38
รูปที่ 4.7 ลักษณะห้องเผาไหม้ช่วย .....	39
รูปที่ 4.8 ลักษณะถังพักเชื้อเพลิง.....	39
รูปที่ 4.9 แสดงชุดสกรูลำเลียงเชื้อเพลิง.....	40
รูปที่ 4.10 ถังบำบัดไอเสีย (evaporative scrubber).....	40
รูปที่ 4.11 ท่อทางออกระบบบำบัดไอเสีย.....	41
รูปที่ 4.12 บ่อดกตะกอน และ cooling tower.....	41
รูปที่ 4.13 แสดงลักษณะของ FD Fan ที่ป้อนอากาศปฐมภูมิ.....	42
รูปที่ 4.14 แสดงลักษณะของ FD Fan ที่ป้อนอากาศทุติยภูมิ และตติยภูมิ.....	42
รูปที่ 4.15 แสดงลักษณะของ ID Fan.....	43
รูปที่ 4.16 แผงควบคุมแก๊ส LPG ก่อนเข้าหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผง.....	43
รูปที่ 4.17 ตำแหน่งในการบันทึกค่าอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ช่วย.....	44
รูปที่ 4.18 ตำแหน่งในการบันทึกค่าอุณหภูมิในห้องเผาไหม้หลัก .....	44
รูปที่ 4.19 ตำแหน่งในการบันทึกค่าอุณหภูมิบริเวณทางออกห้องเผาไหม้หลักและจุดตรวจวัด .....	45
รูปที่ 4.20 ตำแหน่งในการบันทึกค่าอุณหภูมิหลังจากบำบัดไอเสียแล้ว .....	45
รูปที่ 4.21 Thermocouple type K.....	46
รูปที่ 4.22 เครื่องวัดแก๊สไอเสีย Testo รุ่น 330 LL.....	46
รูปที่ 4.23 โปรแกรมควบคุมการเผาไหม้เชื้อเพลิง .....	47
รูปที่ 4.24 ชุดควบคุม PLC.....	47
รูปที่ 4.25 ขนาดของวัตถุวางการไหลรูปทรงกรวยเจาะรูที่ออกแบบในหน่วยเซนติเมตร .....	48
รูปที่ 4.26 ขนาดของวัตถุวางการไหลรูปทรงกรวยที่ออกแบบในหน่วยเซนติเมตร .....	48
รูปที่ 4.27 แสดง Geometry ห้องเผาไหม้ที่ใช้ Designmodeler Workbench Ansys.....	51
รูปที่ 4.28 แสดงขนาดของเครื่องเผาไหม้ในหน่วยเซนติเมตร .....	52
รูปที่ 4.29 แสดงขนาดของห้องเผาไหม้ช่วยในหน่วยเซนติเมตร.....	52
รูปที่ 4.30 แสดงขนาดของห้องเผาไหม้หลักในหน่วยเซนติเมตร (ต่อ).....	53

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.31 แสดงผล mesh independence .....	53
รูปที่ 5.1 การเปรียบเทียบผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์กับวิจัยตัวอย่าง ที่หัวเผาขนาด 1.5 เท่า ..	54
รูปที่ 5.2 แผนภาพสีความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านวัตถุขวางการไหลรูปทรงกรวย .....	54
รูปที่ 5.3 แผนภาพสีความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านวัตถุขวางการไหลรูปทรงกระบอก .....	55
รูปที่ 5.4 แผนภาพสีความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านวัตถุขวางการไหลรูปทรงกรวยเจาะรู.....	55
รูปที่ 5.5 แสดงผลการเปรียบเทียบความเร็วแนวแกนตามแนวการไหลผ่านวัตถุขวางการไหลรูปทรง ต่าง ๆ.....	55
รูปที่ 5.6 แสดงผลเปรียบเทียบความเร็วแนวแกนตามแกนแนวขวางการไหลที่ตำแหน่ง 0.05 เมตร	56
รูปที่ 5.7 แสดงผลเปรียบเทียบความเร็วของอากาศตามแนวรัศมีที่ตำแหน่ง 0.1 เมตร .....	56
รูปที่ 5.8 แสดงผลเปรียบเทียบความเร็วแนวแกนตามแกนแนวขวางการไหลที่ตำแหน่ง 0.5 เมตร ..	57
รูปที่ 5.9 ผลการทดลองการเผาไหม้ .....	58
รูปที่ 5.10 แสดงอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ ณ ตำแหน่งเดียวกันของผลจำลองและผลการทดลอง	58
รูปที่ 5.11 แสดงอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้จากการจำลองที่มีวัตถุการไหลรูปทรงกรวยตัน .....	60
รูปที่ 5.12 แสดงอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้จากการจำลองที่มีวัตถุการไหลรูปทรงกรวยเจาะรู .....	60
รูปที่ 5.13 กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่กึ่งกลางห้องเผาไหม้ที่มีวัตถุขวางการไหลเป็นรูปทรง กรวยตันและกรวยเจาะรู .....	61
รูปที่ 5.14 แสดงความเร็วของการไหลภายในห้องเผาไหม้จากการจำลองที่มีวัตถุขวางการไหลรูปทรง กรวยตัน .....	61
รูปที่ 5.15 แสดงความเร็วของการไหลภายในห้องเผาไหม้จากการจำลองที่มีวัตถุขวางการไหลรูปทรง กรวยเจาะรู.....	62
รูปที่ 5.16 แสดงความเข้มข้นสัดส่วนมวลของสารระเหยภายในห้องเผาไหม้จากการจำลองที่มีวัตถุ ขวางการไหลรูปทรงกรวยตัน.....	63
รูปที่ 5.17 แสดงความเข้มข้นสัดส่วนมวลของสารระเหยภายในห้องเผาไหม้จากการจำลองที่มีวัตถุ ขวางการไหลรูปทรงกรวยเจาะรู .....	63

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์

$D$	เส้นผ่านศูนย์กลางหัวเผา
$(A/F)$	ค่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง
$\Phi$	ค่าอัตราส่วนสมมูล (Equivalence ratio)
$E$	ค่าความร้อนจำเพาะ
$\rho$	ความหนาแน่น
$\vec{J}_j$	ฟลักซ์การแพร่ของสปีชีส์ $j$
$S_h$	ความร้อนจากปฏิกิริยาเคมี และแหล่งพลังงานอื่น ๆ
$h_j^0$	เอนทัลปีการก่อเกิดของสปีชีส์ $j$
$R_j$	อัตราการก่อเกิดโดยปริมาตรของสปีชีส์ $J$
$k_{eff}$	ค่าประสิทธิผลการนำความร้อนประสิทธิผลระหว่างเฟส
$G_k$	ค่าการก่อกำเนิดพลังงานจลน์ระหว่างความชันของความเร็วเฉลี่ย
$G_b$	ค่าการก่อกำเนิดพลังงานจลน์ระหว่างแรงลอยตัว
$Y_M$	ค่าของความผันผวนในการขยายตัวบนความปั่นป่วนแบบอัดตัวได้ต่ออัตราการกระจายตัวโดยรวม
$\sigma_k, \sigma_\epsilon$	ค่า Prandtl ของ $k$ และ $\epsilon$
$S_k, S_\epsilon$	ค่าเทอมของการก่อกำเนิด
$\tilde{\Omega}_{ij}$	ค่าการหมุนเฉลี่ยในมุมมองของ tensor ในกรอบอ้างอิงกับค่า $\omega_k$
$\bar{m}_p$	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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

$\dot{m}_{p,0}$	อัตราการไหลเชิงมวลเริ่มของอนุภาค
$R_I$	อัตราการเกิดผลิตภัณฑ์สุทธิ
$S_I$	อัตราการสร้าง
$J_I$	ฟลักซ์การแพร่ของสปีชีส์
$Y_p$	สัดส่วนมวลของผลิตภัณฑ์
$Y_R$	สัดส่วนมวลของสารตั้งต้น



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

โลกของเราปัจจุบันมีการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรมเป็นไปอย่างก้าวกระโดด ส่งผลให้มีความต้องการเชื้อเพลิงที่สูงขึ้น เช่น น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ ถ่านหิน ซึ่งจากการเกิดการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเหล่านี้ก่อให้เกิดสารมลพิษต่าง ๆ ซึ่งพบว่ามีปริมาณการระบายออกสู่บรรยากาศเพิ่มมากขึ้นทุกปีตามปริมาณการใช้เชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้น ภาวะอากาศที่มีสารมลพิษเจือปนอยู่ในปริมาณที่สูงกว่าระดับปกติเป็นเวลานานพอที่จะทำให้เกิดอันตรายแก่มนุษย์ สัตว์ พืช และทรัพยากรต่าง ๆ ด้วยเหตุผลนี้เองหลายประเทศทั่วโลก จึงเกิดการรณรงค์เพื่อแก้ไขปัญหามลพิษทางอากาศต่าง ๆ หนึ่งในแนวทางการแก้ปัญหาคือการหาแหล่งพลังงานใหม่เพื่อลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก เช่น การหันมาใช้พลังงานหมุนเวียนลม น้ำ ก๊าซชีวภาพ และพลังงานจากชีวมวล โดยเฉพาะชีวมวลเป็นเพียงสารอินทรีย์ ประกอบด้วยวัสดุที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ เช่น เมล็ด ไม้ หญ้าหรือแม้แต่มูลสัตว์ พืช เช่น อ้อย ข้าวโพด เนื่องจากสสารสามารถปลูกใหม่ได้ จึงสามารถนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทนได้ รวมถึงไม่ก่อให้เกิดสภาวะเรือนกระจกที่ส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อม ความเป็นอยู่ของสิ่งมีชีวิต เนื่องจากมีปริมาณกำมะถันต่ำกว่าเชื้อเพลิงประเภทอื่น ๆ อย่างไรก็ตามวัฏศุนย์จากพืชผลทางการเกษตรมีวงจรการผลิตตามฤดูกาลจึงอาจมีปริมาณไม่สม่ำเสมอขึ้นอยู่กับกลไกตลาดและพืชผลบางชนิดอาจเก็บไว้ไม่ได้นาน หากต้องการปริมาณที่สูงจะต้องใช้ชีวมวลเป็นจำนวนมาก สามารถหลีกเลี่ยงได้โดยการเผาไหม้เชื้อเพลิงร่วมระหว่างชีวมวลกับถ่านหินจะช่วยลดปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ในขณะที่ได้กำลังการผลิตไฟฟ้าเท่าเดิม และทำให้ระบบการเผาไหม้มีประสิทธิภาพสูงกว่าการเผาชีวมวลเพียงอย่างเดียว [1]

การเผาไหม้ทางเคมีเป็นปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศ โดยการทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์นั้นปริมาณอากาศมากพอที่จะทำปฏิกิริยากับสารไฮดรคาร์บอนจนหมดอย่างสมบูรณ์ โดยจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำออกมาซึ่งจะทำให้ได้พลังงานความร้อนสูงสุด หากปริมาณอากาศไม่มีประสิทธิภาพมากพอในการทำปฏิกิริยา จะทำให้หลงเหลือคาร์บอนมอนอกไซด์ซึ่งเป็นก๊าซพิษที่อันตรายต่อร่างกายและสิ่งแวดล้อม [2] ในระบบการเผาไหม้มีอุปกรณ์ที่ช่วยรักษาเสถียรภาพการเผาไหม้ไว้หลายวิธี เช่น การใส่หัวเผา (Burner) การติดตั้งวัตถุขวางการไหล (Bluff Body) และการใช้อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควง (Swirler) วัตถุขวางการไหลนั้นถูกนำไปติดตั้งขวางการไหลทำให้หลังวัตถุขวางการไหลเกิดบริเวณความดันต่ำ อากาศบริเวณใกล้เคียง

จึงไหลไปหลังวัตถุขวางการไหลซึ่งอากาศที่ไหลจะมีทิศตรงกันข้ามกับทิศทางการไหลหลักเป็นการสร้างพื้นที่การไหลให้มีความเร็วต่ำหลังวัตถุขวางการไหลทำให้เกิดเปลวไฟ อีกทั้งยังช่วยสร้างการไหลหมุนวนของแก๊สร้อนกลับมาสู่เชื้อเพลิงที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้ที่เข้ามาใหม่ [3] งานวิจัยนี้จึงจัดทำเพื่อศึกษาอิทธิพลของรูปทรงวัตถุขวางการไหลที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้เชื้อเพลิงผง เพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้และลดการปลดปล่อยมลพิษสู่สิ่งแวดล้อม

## 1.2 ความมุ่งหมาย และวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. ออกแบบวัตถุขวางการไหลของการเผาไหม้โดยคงที่สัดส่วนการขวางการไหล (Blockage ratio)
2. สร้างแบบจำลองการไหลแบบไม่มีการเผาไหม้ผ่านวัตถุขวางการไหลแต่ละชนิดและวิเคราะห์เปรียบเทียบ
3. สร้างแบบจำลองการเผาไหม้โดยใช้วัตถุขวางการไหล 2 แบบที่เลือก เพื่อดูประสิทธิภาพการเผาไหม้
4. ทดลองการเผาไหม้โดยใช้วัตถุขวางการไหล 2 แบบที่เลือก เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเผาไหม้

## 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

1. วัตถุขวางการไหลที่ได้รับการออกแบบจะสามารถสร้างประสิทธิภาพในการเผาไหม้ได้ดี
2. อิทธิพลของรูปทรงวัตถุขวางการไหลก่อให้เกิดการไหลหมุนวนของก๊าซร้อนเข้าไปถ่ายเทความร้อนให้กับอากาศเพิ่มมากขึ้นทำให้เปลวไฟมีเสถียรภาพและเผาไหม้ได้ดีขึ้น

## 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1. การเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผงที่ 300 กิโลวัตต์ความร้อน ที่ทำการติดตั้งวัตถุขวางการไหล
2. การปรับปรุงและเปลี่ยนวัตถุขวางการไหลทำที่ระยะ 10 มิลลิเมตร จากหัวเผาขนาด 1.5 เท่า

## 1.5 ขั้นตอนการศึกษา

1. กำหนดหัวข้อ วัตถุประสงค์และขอบเขตของการศึกษา
2. สืบค้นและหาข้อมูลงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องการวัตถุขวางการไหลในห้องช่วยการเผา

ไหม้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ศึกษาทฤษฎีแบบจำลองการไหลปั่นป่วน
4. การออกแบบวัตถุขวางการไหล ซึ่งใช้การทดลองและการศึกษาผ่านโปรแกรมเป็นการศึกษาอ้างอิง
5. ดำเนินการทดลอง
6. วิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้รับและสรุปผลการทดลอง

### 1.6 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. สามารถปรับปรุงการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผงให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น
2. สามารถปรับปรุงการเผาไหม้ให้ดีขึ้นโดยที่เปลวไฟยังคงมีเสถียรภาพอยู่ในห้องเผาไหม้
3. สามารถนำโปรแกรมทางด้านพลศาสตร์ของไหลมาใช้คำนวณและจำลองผลการทดลองตามเงื่อนไขที่กำหนด
4. สามารถลดมลพิษที่ได้รับจากการเผาไหม้โดยยังคงประสิทธิภาพในการเผาไหม้

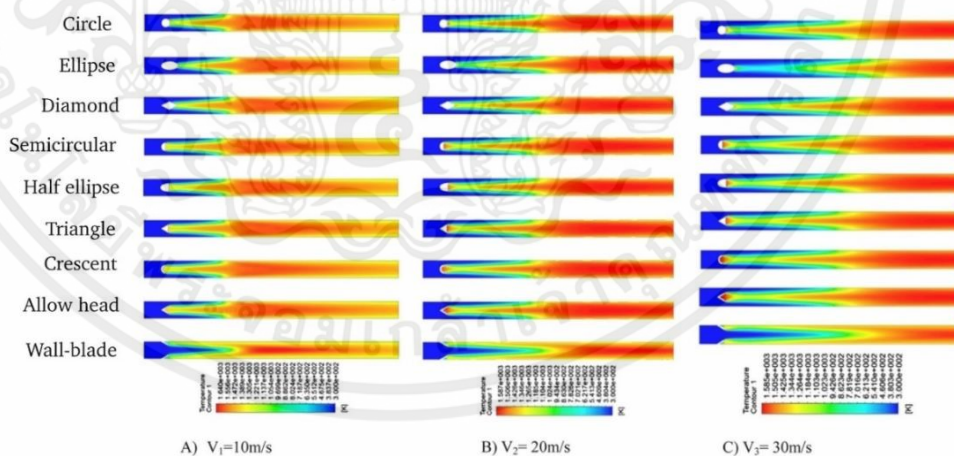


## บทที่ 2

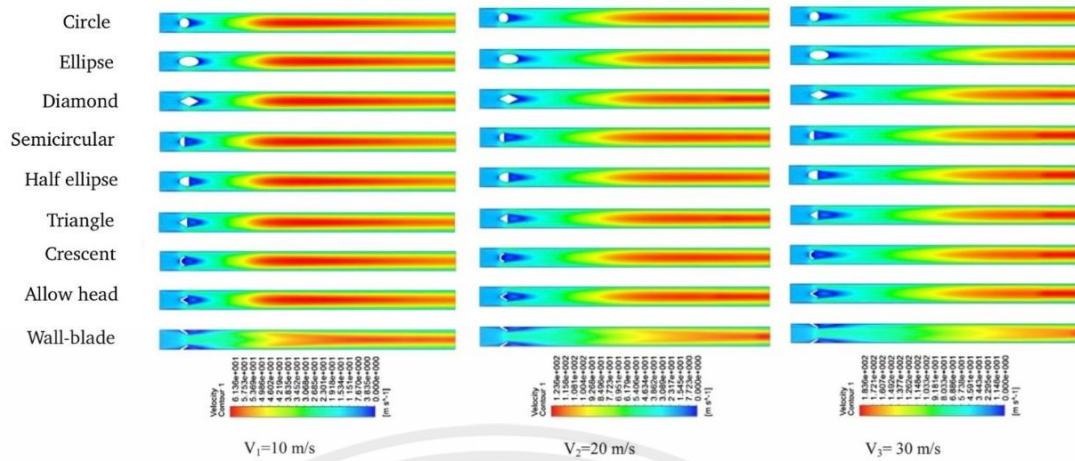
### วรรณกรรมปริทรรศน์

ในบทนี้จะกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องซึ่งจะเป็นงานวิจัยที่กล่าวถึงการคงเสถียรภาพของไฟในการเผาไหม้ โดยจะมีเงื่อนไขการทดลอง ขั้นตอนการทดลอง ผลการทดลอง เพื่อนำมาใช้เป็นแนวทางในการศึกษาสำหรับงานวิจัยนี้ ซึ่งจะมีรายละเอียดดังนี้

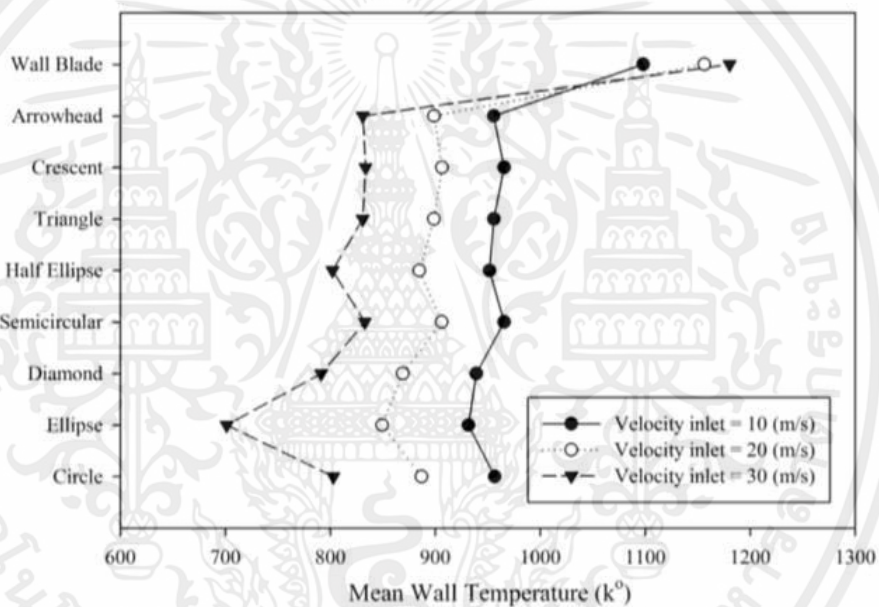
Ghobad Bagheri และคณะ [4] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลรูปร่างของวัตถุขวางการไหลต่อความเสถียรภาพของเปลวไฟในการเผาไหม้ขนาดเล็กแบบผสมระหว่างไฮโดรเจนและอากาศ ภายใต้การจำลองทางคณิตศาสตร์แบบ 2 มิติ โดยมีรูปร่างตัวขวางการไหลต่าง ๆ ได้แก่ วงกลม วงรี เพชร ครึ่งวงกลม ครึ่งวงรี สามเหลี่ยม เลี้ยวพระจันทร์ หัวลูกศร และใบมีดผนัง จากการศึกษาพบว่า ที่อัตราส่วนสมมูล 0.5 และที่ความเร็ว 10 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิเปลวไฟเกิดขึ้นสูงสุดเมื่อใช้ใบมีดผนัง และเมื่อเพิ่มความเร็วทางเข้าเป็น 20 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิเปลวไฟของการเผาไหม้จะเพิ่มขึ้นทุกกรณี และเมื่อเพิ่มความเร็วทางเข้าเป็น 30 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิเปลวไฟลดลงในทุกกรณีการศึกษาจากผลจำลองอุณหภูมิผนังเฉลี่ยของใบมีดผนังนั้นสูงที่สุด เปลวไฟของการเผาไหม้ขนาดเล็กที่มีตัวขวางการไหลเป็นใบมีดผนังมีความเสถียรภาพมากกว่ากรณีอื่น



รูปที่ 2.1 โครงสร้างเปลวไฟในการเผาไหม้ขนาดเล็กกับรูปร่างวัตถุขวางการไหลต่าง ๆ [4]



รูปที่ 2.2 ผลลัพธ์ CFD ของข้อมูลการไหลสำหรับรูปร่างวัตถุการไหลต่าง ๆ [4]



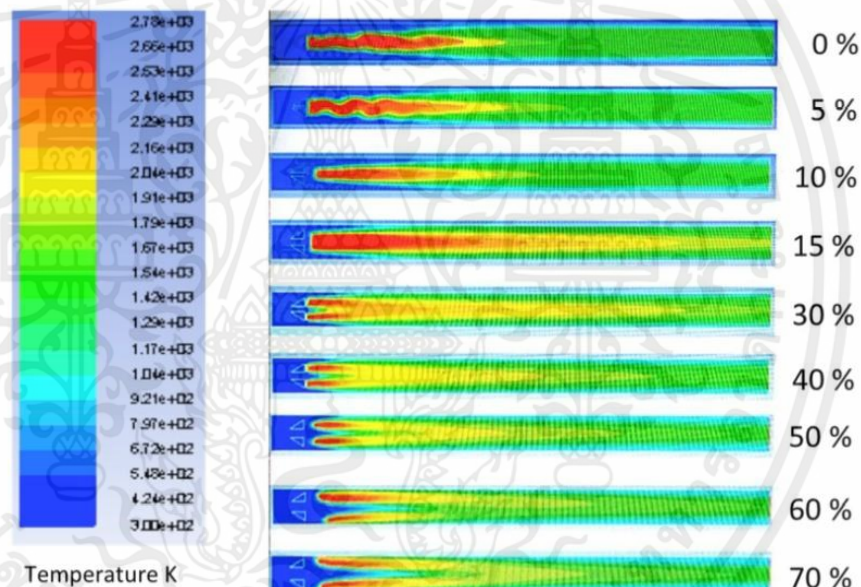
รูปที่ 2.3 อุณหภูมิผนังเฉลี่ยของการเผาไหม้ขนาดเล็ก [4]

S.M.S EL-FEKY and Antal PENNINGER [5] ได้ทำการศึกษาขีดจำกัดการติดไฟสำหรับเปลวไฟที่มีเสถียรภาพของวัตถุขวงการไหล ในการสำรวจเชิงทดลองเกี่ยวกับผลกระทบของความเร็วกระแสหลัก สัดส่วนขวงการไหล และรูปร่างวัตถุขวงการไหลต่อความสามารถในการติดไฟ การทดสอบเหล่านี้ใช้สัดส่วนขวงการไหล ที่แตกต่างกันคือ 0.25 และ 0.5 ใช้รูปร่างวัตถุขวงการไหลที่แตกต่างกัน ได้แก่ ทรงกรวย จานแบน ทรงกระบอก และทรงกลม กระแสความเร็วทางเข้าเปลี่ยนแปลงได้ถึง 15 เมตรต่อวินาที เชื้อเพลิงที่ใช้คือก๊าซธรรมชาติ ผลการวิจัยสรุปได้ว่าการเพิ่มความเร็วอากาศจะส่งผลกระทบต่อให้การติดไฟเป็นไปได้ยากขึ้น และการเพิ่มสัดส่วนขวงการไหล ในกรณีที่ว่าวัตถุขวงการไหลเป็นรูปร่างทรงกระบอก และทรงกลม ไฟจะมีความเสถียรภาพมากขึ้น แต่

ในทางตรงกันข้ามในกรณีที่วัตถุวางการไหลทรงกรวย และทรงแผ่นสี่เหลี่ยมบางไฟจะมีเสถียรภาพน้อยลง รวมทั้งวัตถุวางการไหลทุกรูปทรงทำให้เกิดขนาดพื้นที่โซนหมุนเวียนที่แตกต่างกัน

ฉัตรเฉลิม และคณะ [3] ได้ทำการศึกษาผลกระทบรูปร่างของชุดอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงโดยการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผลง สำหรับการทดลองนี้เป็นการเปรียบเทียบการเผาไหม้ที่ชุดสร้างการไหลหมุนควงชนิดใบตรงและใบโค้ง การทดลองพบว่าอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงชนิดใบโค้งจะสร้างความรุนแรงกว่าและมีอุณหภูมิที่สูงกว่าภายในห้องเผาไหม้

W. M. A. W. Shuib, Azam Che Idris [6] ศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของรูปร่างของวัตถุวางการไหลแบบกรวยโดยมีช่องว่างที่ตรงกลาง (Slit) ในห้องเผาไหม้ โดยจะเปรียบเทียบกันโดยการเพิ่มความกว้างของช่องว่างขึ้น การทดลองพบว่าการเพิ่มความกว้างของช่องว่าง (Slit) ขึ้นเรื่อย ๆ จะช่วยเพิ่มการไหลกลับของอากาศ



รูปที่ 2.4 ผลลัพธ์ CFD ของข้อมูลการไหลสำหรับรูปร่างวัตถุการไหลที่มีช่องว่างต่างกัน [6]

## บทที่ 3

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเชื้อเพลิงแข็ง ชีวมวล เทคโนโลยีการเผาไหม้ วัสดุขวางการไหล ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในระหว่างการเผาไหม้ซึ่งเป็นอิทธิพลของการนำวัสดุขวางการไหลมาประยุกต์ใช้กับการเผาไหม้

#### 3.1 เชื้อเพลิงแข็ง (Solid fuel) [3,9]

เชื้อเพลิงแข็ง คือ สิ่งที่อยู่ในสถานะของแข็งที่นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการสร้างความร้อนได้ โดยส่วนใหญ่เชื้อเพลิงแข็ง คือ เชื้อเพลิงประเภทถ่านหิน จะมีสีน้ำตาลอ่อนจนถึงสีดำ น้ำหนักเบา ติดไฟได้ ถ่านหินจะประกอบด้วยธาตุหลักๆ 4 ธาตุ คือ คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน และมีธาตุอื่นเพียงเล็กน้อย เช่น กำมะถัน เป็นต้น ยิ่งถ่านหินมีปริมาณคาร์บอนที่สูงเมื่อนำมาใช้งานก็จะให้ความร้อนที่สูงตามไปด้วย โดยส่วนใหญ่แล้วถ่านหินจะถูกเผาเพื่อการผลิตไฟฟ้าและความร้อน โดยสามารถแบ่งย่อยได้หลายชนิด

ตารางที่ 3.1 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะของถ่านหิน [3]

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

ถึงแม้เชื้อเพลิงแข็งจะมีราคาถูกและหาได้ง่ายแต่ก็ไม่ได้ได้รับความนิยมอย่างที่ควร เพราะในการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งจำเป็นต้องใช้ห้องเผาไหม้ขนาดใหญ่ จึงจำเป็นต้องบดเป็นผงก่อนเข้าในห้องเผาไหม้ เพื่อให้เกิดการผสมกันระหว่างเชื้อเพลิงและออกซิเจนอย่างทั่วถึง และเพื่อให้การเผาไหม้เร็วขึ้น



รูปที่ 3.1 ถ่านหินอัดแท่ง

### 3.2 เชื้อเพลิงชีวมวล [8]

ชีวมวล หมายถึง อินทรีย์สารทั่วไปจากธรรมชาติที่สะสมพลังงานเก็บไว้ในตัวและสามารถที่จะเอาพลังงานนั้นมาใช้ผลิตพลังงานความร้อนหรือพลังงานอื่น ๆ ได้ ในประเทศไทยเชื้อเพลิงชีวมวลส่วนใหญ่มีการนำมาใช้ในการสร้างความร้อนเป็นวัสดุเหลือใช้ในภาคอุตสาหกรรมเกษตร เช่น ชานอ้อย ใบอ้อย ยอดอ้อย กากมันสำปะหลัง ชังข้าวโพด แกลบ กาบมะพร้าว กะลามะพร้าว สำเหล้า ไม้ยางพารา เปลือกไม้ยูคาลิปตัส กะลาปาล์ม และยังมีเศษวัสดุจากอุตสาหกรรมเฟอร์นิเจอร์ เช่น ไม้เลื้อย ขยะมูลฝอย น้ำเสียจากโรงงาน รวมไปถึงมูลสัตว์ต่าง ๆ ซึ่งถือเป็นการลดต้นทุนการผลิตโดยเป็นการใช้งานวัสดุตั้งต้นของผลิตภัณฑ์ให้เกิดความคุ้มค่ามากที่สุด ข้อดีของชีวมวล คือ สามารถใช้วัตถุดิบได้หลากหลายและไม่หมดไป มีราคาถูกเมื่อเทียบกับถ่านหิน และเป็นการนำวัสดุมาใช้ให้เกิดประโยชน์มากที่สุด ข้อเสียของชีวมวล คือ การนำชีวมวลมาใช้งานจำเป็นต้องใช้เวลาในการปลูกพืชพลังงานและจำเป็นต้องใช้พื้นที่เยอะ อีกทั้งพลังงานชีวมวลไม่ใช่พลังงานสะอาดทั้งหมด บางส่วนยังก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และควันในการผลิต



รูปที่ 3.2 เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.1 องค์ประกอบชีวมวล [9]

สัดส่วนขององค์ประกอบหลักและองค์ประกอบรองของพืชจะเปลี่ยนไปขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ ประเภทของเนื้อเยื่อพืช อายุ และสภาวะการเจริญเติบโต ชีวมวลประกอบด้วยธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ คลอรีน

ตารางที่ 3.2 แสดงองค์ประกอบของชีวมวล [9]

ชีวมวล	วิเคราะห์โดยประมาณ (% น้ำหนักแบบสด)				วิเคราะห์โดยละเอียด (%น้ำหนัก ปลอดภัยและความชื้น)					
	ความชื้น	VM	FC	เถ้า	C	H	O	N	S	Cl
แกลบ (ไทย)	10.3	55.6	20.1	14.0	50.20	6.01	42.80	0.91	0.08	NA.
ทะลายปาล์ม เปล้า 1 (ไทย)	38.4	40.71	17.50	3.39	43.07	5.71	49.74	0.32	1.16	NA.
ทะลายปาล์ม เปล้า 2 (ไทย)	44.5	43.10	10.30	2.10	51.6	6.8	40.6	0.65	0.09	0.25
ใยผลปาล์ม (ไทย)	35.0	48.4	12.1	4.5	54.9	6.7	36.8	1.3	0.10	0.20
กะลาปาล์ม (ไทย)	10.4	62.7	21.9	5.0	56.8	6.0	35.7	0.20	0.06	1.2
เปลือกไม้ (สวีเดน)	50.0	NA.	NA.	1.70	51.88	6.10	41.71	0.31	NA.	NA.
กะลามะพร้าว (อินเดีย)	6.50	48.15	38.85	6.50	53.21	6.20	39.25	1.28	0.05	NA.
ฟางข้าว (เดนมาร์ก)	7.40	NA.	NA.	7.04	47.46	6.36	45.31	0.68	0.18	NA.
ฟางข้าว (อังกฤษ)	7.88	80.08	6.76	5.28	50.18	6.31	42.38	0.69	0.44	NA.
ใบและยอด อ้อย(อินเดีย)	4.00	55.98	38.27	1.75	49.87	5.99	44.13	NA.	NA.	NA.
ไม้ซี้บ (อินเดีย)	7	54.52	38.11	0.37	49.01	6.40	44.59	NA.	NA.	NA.

### 3.2.2 ศักยภาพด้านพลังงานของชีวมวล [9]

ชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานที่ใหญ่ที่สุดเป็นลำดับที่สามารถรองจากถ่านหินและน้ำมัน สำหรับประเทศไทยซึ่งเป็นประเทศเกษตรกรรมทำให้มีชีวมวลหลากหลายชนิดที่มีศักยภาพสำหรับนำไปผลิตไฟฟ้าและความร้อน

ตารางที่ 3.3 แสดงศักยภาพของพลังงานชีวมวลชนิดต่าง ๆ ภายในประเทศไทย ปี 25554 [9]

ชนิดชีวมวล	ศักยภาพพลังงาน (พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ)
ยอดและใบอ้อย	7760.81
กากอ้อย	5375.44
แกลบ	2485.42
ฟางข้าว	12541.68
ลำต้น ยอด ใบ	1558.84
ซังข้าวโพด	346.18
ลำต้นมันสำปะหลัง	978.41
เหง้ามันสำปะหลัง	960.37
ทางใบและก้านปาล์มน้ำมัน	837.74
ใบปาล์ม	900.16
กะลาปาล์มน้ำมัน	966.89
ทะลายมะพร้าว	851.59
กะลามะพร้าว	112.41
เปลือกและกาบมะพร้าว	231.60
ก้านใบมะพร้าว	216.97
ถั่วลิสง	4.62
ฝ้าย	2.28
ถั่วเหลือง	68.41
ข้าวฟ่าง	31.49
ไม้ยางพารา	1089.81
สับปะรด	568.81

### 3.2.3 สมบัติของชีวมวล [9]

ถือเป็นข้อมูลพื้นฐานในการนำชีวมวลที่ต้นมีมาแปลงเป็นพลังงาน เนื่องจากคุณสมบัติเหล่านี้จะเป็นตัวช่วยในการเลือกกระบวนการแปลงชีวมวลเป็นพลังงาน (Conversion process) และบ่งบอกความยากง่ายของการนำชีวมวลที่มีมาแปลงเป็นพลังงาน เพื่อเลือกกระบวนการแปลงชีวมวลเป็นพลังงานให้เหมาะสมที่สุด สมบัติของชีวมวล ได้แก่ ค่าความร้อนต่ำ ความชื้น ความหนาแน่นรวม เป็นต้น

ตารางที่ 3.4 แสดงสมบัติของชีวมวลในประเทศไทย [9]

พืช	ส่วนประกอบ	ค่าความร้อนต่ำ (kJ/kg)	ความชื้น (%)	ความหนาแน่น รวม(kg/m <sup>3</sup> )
ข้าว	ฟางข้าว	12330	10.00	125
	แกลบ	14204	8.20	150
อ้อยโรงงาน	ใบ	15479	9.20	100
	ชานอ้อย	7368	50.73	120
มันสำปะหลัง	เหง้ามัน	5494	59.40	250
	สำปะหลัง			
	ลำต้น	7560	48.40	NA
	ทางใบ	1760	78.40	NA
ข้าวโพดเลี้ยง	ชังข้าวโพด	16220	7.00	NA
สัตว์	ลำต้น	9830	41.7	NA
ปาล์มน้ำมัน	ทะลายปาล์ม	7240	58.60	380
	เส้นใยปาล์ม	11800	31.84	250
	กะลาปาล์ม	18267	12.00	400
	ลำต้นปาล์ม	7540	48.40	NA
ยางพารา	ไม้ยางพารา	8600	45.00	450
ยูคาลิปตัส	เปลือกไม้ยูคา	6745	50.00	NA
	ลิปตัส			
มะพร้าว	ขุยมะพร้าว	6272	NA	270

### 3.3 เชื้อเพลิงชีวมวลผงและถ่านหินผง

ก่อนที่จะใช้ถ่านหินบดละเอียด หม้อไอน้ำส่วนใหญ่จะใช้การเผาไหม้แบบตะกรับ จนกระทั่งในปี 1918 ได้มีการทดลองใช้ถ่านหินบดละเอียดกับโรงไฟฟ้า การทดลองเหล่านี้ช่วยในการพัฒนาการเผาไหม้ถ่านหินบดละเอียดเพื่อนำไฟใช้ในหม้อไอน้ำ ถ่านหินบดละเอียดและชีวมวลบดละเอียดมีวิธีการทำ คือ นำถ่านหินหรือชีวมวลไปบดผ่านลูกกลิ้ง ในขณะที่บดได้มีการเป่าอากาศร้อนเพื่อทำให้ถ่านหินแห้ง เสร็จแล้วก็นำไปใช้ต่อไป แนวคิดเกี่ยวกับการเผาไหม้ถ่านหินบดละเอียด เกิดจากความเชื่อที่ว่าหากถ่านหินถูกผ่านชั้นทำให้เป็นผงจนเกิดความละเอียดมากพอ ถ่านหินจะเผาไหม้ได้ง่ายและมีประสิทธิภาพใกล้เคียงก๊าซ โดยอัตราการป้อนถ่านหินบดละเอียดจะถูกควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์

เชื้อเพลิงถ่านหินบดละเอียดและชีวมวลบดละเอียดสามารถเพิ่มประสิทธิภาพหม้อไอน้ำได้ ช่วยลดเวลาในการเพิ่มอุณหภูมิของไอน้ำ ข้อเสีย คือ ความเป็นไปได้ของการระเบิดจะมีมากขึ้นเมื่อเผาไหม้ใกล้เคียงก๊าซ



รูปที่ 3.3 ถ่านหินผง

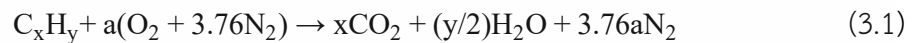


รูปที่ 3.4 ไม้ยางพาราผง

### 3.4 การเผาไหม้

#### 3.4.1 การสันดาปของเชื้อเพลิง [10]

การสันดาปหรือการเผาไหม้ทางเคมีคือปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วระหว่างออกซิเจนกับสารสันดาปของเชื้อเพลิง ได้แก่คาร์บอน ออกซิเจน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และกำมะถัน แต่เนื่องจากองค์ประกอบในเชื้อเพลิงชีวมวลมีปริมาณกำมะถันที่ต่ำจึงไม่นำมาพิจารณา



ปัจจัยที่สำคัญในการสันดาปของเชื้อเพลิงมี 4 ปัจจัยคือ 1. เวลาต้องนานให้เชื้อเพลิงสันดาปหมดโดยไม่ให้ถูกอากาศส่วนเกินนำออกก่อนถูกสันดาป 2. อุณหภูมิในการสันดาปต้องสูงมากพอที่สามารถจุดติดไฟ (ignition point) และเกิดการสันดาปอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเชื้อเพลิงแต่ละชนิดจะมีอุณหภูมิในการจุดไฟที่แตกต่างกัน 3. การผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศต้องอยู่ในลักษณะของการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) 4. การสัมผัสระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศหรือออกซิเจนได้อย่างทั่วถึง การบดเชื้อเพลิงให้มีขนาดเล็กลงเพิ่มผิวสัมผัสมากขึ้นทำให้เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ได้ดีและรวดเร็วขึ้น

#### 3.4.2 สตอยซิโอเมตรี (Stoichiometry) [11]

ในปี 1792 Jeremias Benjaim Richter ได้ให้คำนิยามสตอยซิโอเมตรีเป็นศาสตร์แห่งการวัดปริมาณหรืออัตราส่วนมวลขององค์ประกอบทางเคมี สตอยซิโอเมตรีคือส่วนหนึ่งของเคมีที่เกี่ยวข้องกับการใช้ความสัมพันธ์ระหว่างสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ในปฏิกิริยาเคมีเพื่อกำหนดข้อมูลเชิงปริมาณที่ต้องการ ปริมาณของอากาศที่มีปริมาณพอดีในการทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ถ้าหากมีปริมาณอากาศมากกว่าปริมาณสตอยซิโอเมตรี เราจะเรียกส่วนผสมนี้ว่าส่วนผสมเชื้อเพลิงบาง แต่เมื่อมีปริมาณอากาศน้อยกว่าปริมาณสตอยซิโอเมตรี เราจะเรียกส่วนผสมชนิดนี้ว่าส่วนผสมเชื้อเพลิงหนา สตอยซิโอเมตรีสามารถคำนวณได้ดังนี้

จากสมการ (3.1) จะได้  $a = x + y/4$

อัตราส่วนสตอยซิโอเมตรีสามารถหาได้จาก

$$(A/F)_{\text{stoic}} = (m_{\text{air}}/m_{\text{fuel}}) = \frac{4.76aMW_{\text{air}}}{MW_{\text{fuel}}} \quad (3.2)$$

### 3.4.3 อัตราส่วนสมมูล (Equivalence ratio)

เป็นอัตราส่วนที่มีการนำมาใช้แสดงถึงส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศที่สตอยซิโอเมตริก  
ว่าเป็นส่วนผสมเชื้อเพลิงหนา หรือส่วนผสมเชื้อเพลิงบาง

$$\Phi = \frac{(A/F)_{\text{stoich}}}{(A/F)_{\text{actual}}} \quad (3.3)$$

จากสมการจะเห็นได้ว่าเมื่ออัตราส่วนสมมูลมีค่ามากกว่าหนึ่ง แสดงว่าเป็นส่วนผสมเชื้อเพลิง  
บาง แต่เมื่อequivalence ratio มีค่าน้อยกว่าหนึ่ง แสดงว่าเป็นส่วนผสมเชื้อเพลิงหนา และเมื่อ  
อัตราส่วนสมมูลมีค่าเท่ากับหนึ่ง แสดงว่าเป็นส่วนผสมที่สตอยซิโอเมตริก

### 3.4.4 เปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน (Excess Air)

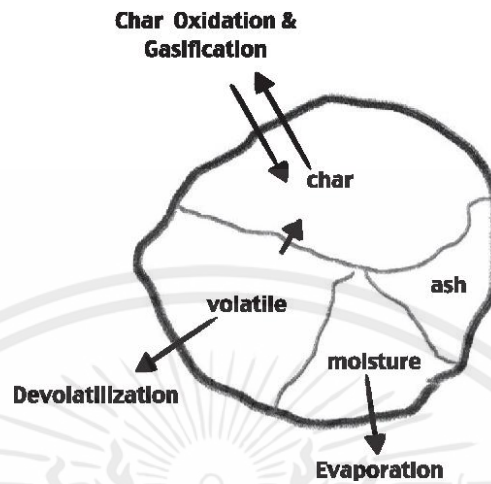
เปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน คือ ปริมาณที่บอกว่ามีปริมาณอากาศส่วนเกินกี่เปอร์เซ็นต์โดยคิด  
จากอากาศที่คิดได้จากทฤษฎีที่มีค่าเท่ากับ 100 ถ้าหากปริมาณอากาศที่ใช้มีมากกว่าปริมาณอากาศ  
ทฤษฎีจะเรียกว่า อัตราส่วนผสมบาง (Lean mixture) หากปริมาณอากาศที่ใช้มีน้อยกว่าปริมาณอากาศ  
ทฤษฎีจะเรียกว่า อัตราส่วนผสมหนา (Rich mixture)

$$\% \text{ excess air} = \frac{1 - \Phi}{\Phi} \times 100 \% \quad (3.4)$$

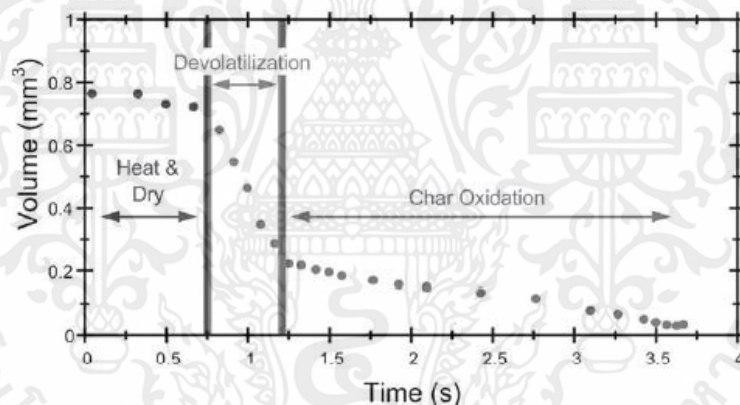
## 3.5 การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง [3]

ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งขนาดเล็กจะประกอบด้วย  
กระบวนการหลัก 3 กระบวนการ ได้แก่ การอบแห้ง (Evaporation) การปลดปล่อยสารระเหย  
(Devolatilization) และการเผาไหม้ถ่านชาร์ (Char Oxidation) ตามลำดับ โดยทันทีที่เชื้อเพลิงแข็ง  
อยู่ท่ามกลางกระแสความร้อน ความร้อนจะถ่ายเทโดยการพาและการแผ่รังสีไปยังผิวอนุภาคและ  
ถ่ายเทต่อไปโดยการนำความร้อนเข้าสู่ภายในอนุภาค ความชื้นจะระเหยตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนกระทั่ง  
ถึงจุดเดือดของน้ำที่ 100 องศาเซลเซียส และถูกขับออกมาจากอนุภาคอย่างรวดเร็วก่อนที่สารระเหย  
จะถูกปล่อยออกมา จนกระทั่งมีอุณหภูมิถึงจุดปลดปล่อยสารระเหย สารระเหยที่อยู่ภายในเชื้อเพลิง  
จะแทรกออกมาในสถานะแก๊สปกคลุมอนุภาคเชื้อเพลิงโดยมีลักษณะคล้ายหมอก หลังจากสารระเหย  
ถูกปลดปล่อยออกมาจะเข้าทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเกิดเป็นเปลวไฟของสารระเหยรอบผิวอนุภาค  
ความร้อนที่เกิดขึ้นก็จะถูกนำกลับไปใช้กับเชื้อเพลิงใหม่ที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้ หลังจากกระบวนการ  
อบแห้ง (Evaporation) และกระบวนการปลดปล่อยสารระเหย (Devolatilization) เสร็จสิ้น

ออกซิเจนในห้องเผาไหม้จึงสามารถแพร่เข้าไปในอนุภาคเชื้อเพลิงเกิดกระบวนการเผาไหม้ชาร์ (Char Oxidation) เมื่อกระบวนการนี้เสร็จสิ้นจะเหลือเชื้อเพลิงที่ไม่สามารถเผาไหม้ต่อได้เรียกว่าถ่าน



รูปที่ 3.5 แสดงองค์ประกอบเชื้อเพลิงแข็ง



รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง [12]

### 3.6 การปลดปล่อยมลพิษและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม [3,9]

#### 3.6.1 การก่อตัวของคาร์บอนมอนอกไซด์ [3,9]

คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เป็นสารที่มีพิษรุนแรงซึ่งเกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์โดยจะก่อตัวในขั้นแรกของปฏิกิริยาเผาไหม้ถ่านชาร์ และยังเกิดขึ้นระหว่างการปลดปล่อยสารระเหย ในการเผาไหม้ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ควรมีค่าในระดับส่วนล้าน (ppm) ค่าปกติของคาร์บอนมอนอกไซด์จะอยู่ในช่วง 20-50 ppm ความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ปลดปล่อยออกมาสามารถใช้เป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพการเผาไหม้ได้เป็นอย่างดี ปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งที่ทำให้เกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ คือ เวลาในการเผาไหม้น้อยเกินไป อุณหภูมิเผาไหม้ต่ำ อัตราการแพร่ออกซิเจน

ต่ำเนื่องจากการกีดขวางของแก้ว โดยปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์สามารถควบคุมได้จากอัตราส่วนสมมูล หรือปริมาณออกซิเจนในการเผาไหม้ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นพิษต่อร่างกาย เมื่อร่างกายได้รับจะทำให้ร่างกายรับออกซิเจนไม่เพียงพอ การตอบสนองจะช้าลง เมื่อรับในปริมาณมาก ๆ สามารถทำให้เสียชีวิตได้



### 3.6.2 การก่อตัวของไนโตรเจนออกไซด์ [3,9]

ออกไซด์ของไนโตรเจนเกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอน ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดหมอกโฟโตเคมี ซึ่งเกิดจาก  $\text{NO}_x$  และ HC มาทำปฏิกิริยากันในวันที่มีแสงแดดจนเกิดเป็น  $\text{O}_3$  โดยหมอกนี้จะส่งผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจ



จะเห็นได้ว่า NO เพียงโมเลกุลเดียว มีผลต่อการทำลาย  $\text{O}_3$  อย่างต่อเนื่องโดยปฏิกิริยารีดักชัน เพราะ  $\text{NO}_2$  ที่เกิดจะถูกรีดิวซ์ไปเป็น NO เพื่อไปทำปฏิกิริยากับ  $\text{O}_3$  ต่อ ซึ่งเกิดเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่อย่างต่อเนื่อง

1. การเกิด Prompt  $\text{NO}_x$  เกิดจากโมเลกุลของไนโตรเจนในอากาศทำปฏิกิริยากับไฮโดรคาร์บอนเมื่อมีการเผาไหม้ Prompt  $\text{NO}_x$  เป็นกลไกสำคัญที่ทำให้เกิด  $\text{NO}_x$  ในการเผาไหม้ถ่านหินบดละเอียดซึ่งมีอุณหภูมิการเผาไหม้ที่สูง



2. การเกิด Fuel  $\text{NO}_x$  เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่มีส่วนผสมของไนโตรเจน ไม่ว่าจะ เป็นเชื้อเพลิงฟอสซิลหรือเชื้อเพลิงชีวมวลล้วนมีองค์ประกอบของไนโตรเจนภายในเชื้อเพลิงแต่ในการเกิดไนโตรเจนออกไซด์จากเชื้อเพลิงจะมีปริมาณที่น้อยมาก ซึ่งเกิดจากการออกซิเดชันของไนโตรเจนในเชื้อเพลิง

3. การเกิด Thermal NO<sub>x</sub> เกิดจากไนโตรเจนในอากาศเมื่ออยู่ในที่อุณหภูมิสูงที่มากกว่า 1300 องศาเซลเซียส อย่างในห้องเผาไหม้ บางส่วนของไนโตรเจนอะตอมคู่ (N<sub>2</sub>) จะแตกตัวเป็นไนโตรเจนอะตอมเดี่ยว (N) ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับสารอื่นได้ง่ายกว่า ดังนั้น เมื่อเกิดอุณหภูมิสูงจะส่งผลให้มีการเกิดไนโตรเจนออกไซด์ที่สูงขึ้น Thermal NO<sub>x</sub> มีความสำคัญมากในการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งในระบบการเผาไหม้แบบแขวนลอย (การเผาไหม้เชื้อเพลิงผงบดละเอียด)



องค์ประกอบของไนโตรเจนในเชื้อเพลิงกับโครงสร้างอื่นที่ล้อมรอบซึ่งมีผลต่อปริมาณ NO<sub>x</sub> ที่เกิดขึ้นสามารถแสดงได้ด้วยอัตราส่วน N/C, N/H และ N/O ดังนั้น เชื้อเพลิงต่างชนิดกันจะเกิดสารย่อยตั้งต้นของการเกิด NO<sub>x</sub> (ได้แก่ HCN, NH<sub>3</sub> และ HNCO) ที่แตกต่างกัน

### 3.6.3 ฝุ่นและเขม่า [9,13]

ฝุ่นละอองเป็นของแข็งหรือของเหลวที่ถูกแบ่งอย่างประณีต ซึ่งอาจกระจายผ่านอากาศจากกระบวนการเผาไหม้ทางอุตสาหกรรม มีขนาดตั้งแต่ 0.002 จนถึงฝุ่นที่ขนาดใหญ่กว่า 500 ไมครอน ฝุ่นละอองก่อตัวเมื่อวัสดุเผาไหม้ ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลมักจะปลดปล่อยฝุ่นออกมาในปริมาณมาก ฝุ่นจากการเผาไหม้อาจแพร่กระจายได้ไกลในบรรยากาศ ฝุ่นที่ปล่อยออกมาจากการเผาไหม้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

1. อนุภาคฝุ่นที่เกิดจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ได้แก่ ทาร์ ถ่าน และเขม่าบางครั้งเรียกว่าเขม่าดำหรือคาร์บอนดำ เป็นผงละเอียดสีดำหรือน้ำตาลเป็นกลุ่มของอนุภาคคาร์บอนที่เป็นผลจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของไฮโดรคาร์บอน เนื่องจากเขม่ามีความเหนียวจึงมักเกาะติดกับท่อไอเสียและปล่องไฟที่เกิดการเผาไหม้ส่งผลให้ปล่องไฟอุดตันซึ่งไม่สามารถดึงควันได้อย่างมีประสิทธิภาพนี้สามารถนำไปสู่ไฟควันหรือการใช้เชื้อเพลิงอย่างไม่มีประสิทธิภาพ หากปล่อยให้เขม่าสะสมในปล่องไฟนานเกินไปอาจทำให้เกิดไฟไหม้ได้ เพลวไฟซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดของเขม่านั้นสามารถแบ่งได้เป็นสองชนิดหลักได้แก่ เพลวไฟแบบแพร่ (diffusion flame) และเพลวไฟแบบผสมก่อน (premixed flame) ทั้งนี้ เพลวไฟชนิดที่มักก่อให้เกิดเขม่าคือเพลวไฟแบบแพร่ เนื่องจากบางบริเวณในเพลวไฟนั้นไม่มีตัวออกซิไดซ์ (oxidizer) เพียงพอในการเผาไหม้เชื้อเพลิง ในแง่ของมลพิษ เขม่าเป็นศัพท์ทั่วไปสำหรับประเภทของมลพิษของอนุภาคที่เรียกว่า PM 2.5 ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาค 2.5 ไมโครเมตร หรือ

เล็กกว่า เขม่าประกอบด้วยสารเคมีหลายชนิดและองค์ประกอบที่แน่นอนของเขม่าขึ้นอยู่กับสิ่งที่ถูกเผา อนุภาคฝุ่นในกลุ่มนี้สามารถควบคุมได้ง่าย โดยการควบคุมเงื่อนไขการเผาไหม้ให้เหมาะสม

2. อนุภาคฝุ่นจากธาตุที่เป็นสารอินทรีย์ในถ่านเชื้อเพลิง เกิดจากกลไก 2 ประเภทที่แตกต่างกัน คือ อนุภาคขนาดใหญ่จะเกิดการหลอมตัวหรือการเกาะตัวรวมกันขององค์ประกอบในถ่านที่ไม่ระเหยระหว่างการเผาไหม้ ส่วนอนุภาคขนาดเล็กจะเกิดจากกระบวนการรวมตัวกันเป็นนิวเคลียส และกระบวนการควบแน่นของไอธาตุที่ระเหยจากถ่าน

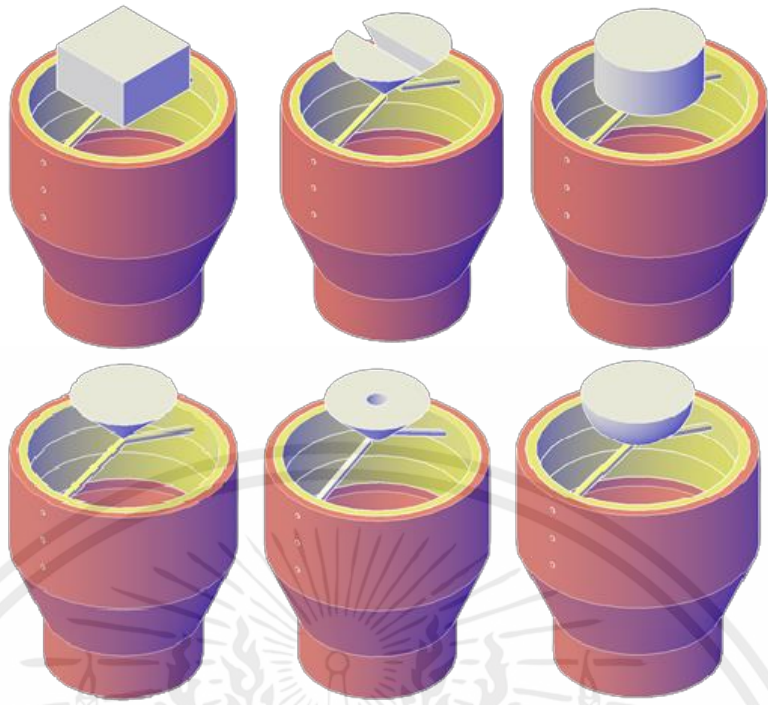
การหายใจเอาฝุ่นขนาด 10 ไมครอน หรือเล็กกว่า PM10 นับว่าเป็นอันตรายต่อระบบทางเดินหายใจและปอด

### 3.7 การรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟ

การรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟ คือ การทำให้เปลวไฟมีเสถียรภาพที่ปลายเพลิงของหัวเผา โดยเราจะใช้วิธีการต่างๆ เช่น การติดตั้งวัตถุขวางการไหล (bluff body) และการใช้อุปกรณ์ช่วยสร้างการไหลหมุนควง (swirler) เป็นต้น โดยวิธีการที่กล่าวมาทั้งหมดล้วนเป็นการทำให้เกิดการไหลย้อนกลับของอากาศ

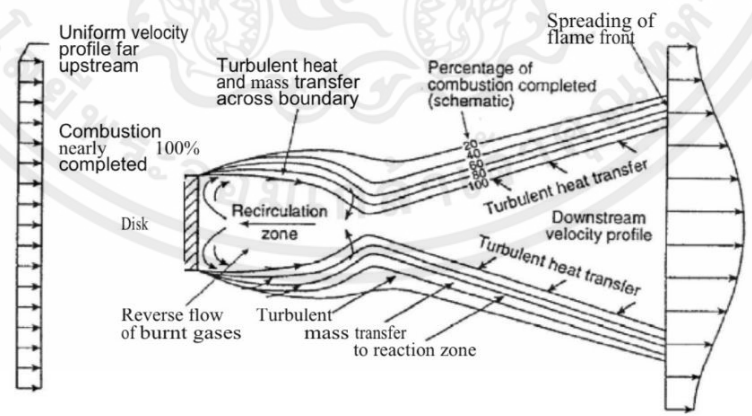
#### 3.7.1 วัตถุขวางการไหล (Bluff body) [3]

วัตถุขวางการไหลเป็นอุปกรณ์ที่ใช้รักษาเสถียรภาพของเปลวไฟในการไหลด้วยความเร็วสูงในระบบขับเคลื่อนและระบบการเผาไหม้ทางอุตสาหกรรมที่หลากหลาย สามารถใช้สำหรับหัวเผาเสริมในหม้อไอน้ำอุตสาหกรรมและเครื่องผลิตไอน้ำแบบนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่ และยังใช้ในแรมเจ็ทและเทอร์โบเจ็ทหลังระบบหัวเผา นอกจากนี้วัตถุขวางการไหลยังใช้เพื่อศึกษาพื้นฐานของลักษณะเปลวไฟแบบปั่นป่วน รูปร่างทั่วไปของวัตถุขวางการไหลที่ใช้ เช่น ทรงกระบอก จานแบน กรวย เป็นต้น วัตถุขวางการไหลนั้นถูกนำไปติดตั้งขวางการไหลทำให้หลังวัตถุขวางการไหลเกิดความดันต่ำอากาศบริเวณใกล้เคียงจึงไหลไปหลังวัตถุขวางการไหลซึ่งอากาศที่ไหลเข้าจะมีทิศตรงกันข้ามกับทิศทางการไหลหลัก ซึ่งเป็นการสร้างพื้นที่การไหลให้มีความเร็วต่ำหลังวัตถุขวางการไหล ทำให้เกิดเปลวไฟบริเวณนั้นได้



รูปที่ 3.7 วัตถุขวางการไหลรูปแบบต่าง ๆ

แนวคิดความเข้าใจส่วนใหญ่เกี่ยวกับกระบวนการรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟจะอ้างอิงถึง การศึกษาเชิงริเริ่มที่ดำเนินการพบว่า เวกหลังวัตถุขวางการไหลสามารถแบ่งออกเป็นโซนหมุนเวียน ห่างจากสารตั้งต้นที่ไม่เผาไหม้ เขตผสมซึ่งมีลักษณะเป็นชั้นเฉือนแบบปั่นป่วนที่มีการไล่ระดับอุณหภูมิ ขนาดใหญ่และปฏิกิริยาเคมีอย่างเข้มงวดซึ่งถูกป้อนโดยกระบวนการผสมแบบปั่นป่วนด้วยก๊าซที่ติดไฟ ได้เย็นที่ไหลเข้ามา การออกแบบวัตถุขวางการไหลในการทดลองนี้จำเป็นจะต้องคงที่และใช้ค่า อัตราส่วนการขวางการไหล (Blockage ratio) ในการหาพื้นที่หน้าตัดของวัตถุขวางการไหล



รูปที่ 3.8 แสดงพื้นที่เสถียรภาพเปลวไฟหลังวัตถุขวางการไหล

### 3.7.1.1 อัตราส่วนการขวางการไหล (blockage ratio)

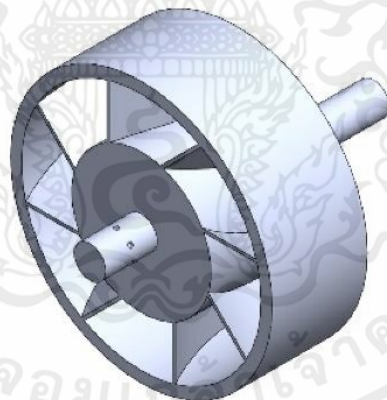
อัตราส่วนการขวางการไหล หมายถึง อัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดที่อากาศไหลผ่านซากหัวเผาต่อพื้นที่หน้าตัดของวัตถุขวางการไหล ถ้าค่าอัตราส่วนกันต่ำจะทำให้บริเวณที่เกิดกระแสไหลวนยาว ถ้าค่าอัตราส่วนกันต่ำจะทำให้บริเวณที่เกิดกระแสไหลวนยาว

$$\text{Blockage ratio} = \frac{\text{Surface area of bluff body}}{\frac{\pi D^2}{4}} \quad (3.12)$$

D = Diameter of burner

### 3.7.2 อุปกรณ์ช่วยสร้างการไหลหมุนควง (Swirler) [3]

อุปกรณ์ชนิดนี้ประกอบด้วยใบที่ทำมุมกับทิศทางการการไหล การไหลแบบหมุนควงเป็นเทคนิคการรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟ โดยจะช่วยในการควบคุมระยะของเปลวไฟและเร่งการผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศบริเวณใกล้หัวเผา การไหลหมุนควงทำให้เกิดการเคลื่อนที่แบบหมุนและการปั่นป่วนอิสระที่หัวเผา ในกรณีที่การไหลหมุนควงมีความรุนแรงจะก่อให้เกิดความดันในทิศทางตรงข้ามเกิดเป็นการไหลย้อนกลับในรูปของการไหลหมุนวนภายใน ซึ่งมีส่วนสำคัญต่อเสถียรภาพของเปลวไฟ



รูปที่ 3.9 อุปกรณ์ช่วยสร้างการไหลหมุนควง

## 3.8 เทคโนโลยีการเผาไหม้ (Combustion Technology) [14]

ในการนำชีวมวลมาแปรเปลี่ยนให้เป็นพลังงาน โดยทั่วไปมักใช้วิธีทางเคมีความร้อน (Thermo chemical) ซึ่งก็คือการเผาไหม้ สำหรับเทคโนโลยีการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลสามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภท คือ การเผาไหม้โดยตรง (Direct Combustion) และ การผลิตก๊าซชีวมวลโดยใช้อากาศ (Air Gasification)

### 3.8.1 การเผาไหม้โดยตรง (Direct Combustion) [14]

การเผาไหม้เป็นวิธีที่ใช้กันมากในการนำเชื้อเพลิงชีวมวลมาใช้ให้เกิดประโยชน์โดยการเผาด้วยหัวเผา โดยหัวเผาจะทำหน้าที่ให้อากาศเข้าผสมกับเชื้อเพลิงที่ถูกปล่อยจากถังเก็บเพื่อก่อให้เกิดการเผาไหม้ในปริมาณที่เหมาะสม หัวเผาที่ใช้ในอุตสาหกรรมมี 4 แบบ ดังนี้

1. หัวเผาแอร์เบลสท์ (Air-blast Burner) เป็นหัวพ่นไฟที่อากาศกับก๊าซผสมกันก่อนที่จะเข้าภายในเตา โดยพัดลมจะดึงอากาศที่มีความดันไม่สูงมากเข้ามา ข้อดีของหัวเผาชนิดนี้ คือ การควบคุมอัตราส่วนระหว่างก๊าซกับอากาศง่ายไม่ต้องใช้วาล์วเยอะ แต่การเผาไหม้ที่เกิดไม่สมบูรณ์เท่าที่ควร

2. หัวเผาแบบหัวฉีดผสม (Nozzle-mixing Burner) เป็นหัวเผาที่ไม่มีการผสมกันระหว่างอากาศและแก๊สภายในหัวเผา ซึ่งหมายความว่าผสมกันภายในเตา ข้อดีของหัวเผาชนิดนี้ อากาศที่ใช้ไม่จำเป็นต้องมีความดันที่สูงมาก และมีเปลวไฟที่คงที่

3. หัวเผาแบบรีคูเพอเรทีฟ (Recuperative burner) เป็นหัวเผาที่ดึงความร้อนจากการเผาไหม้มาอุ่นอากาศในตัวเองใหม่ก่อนการเผาไหม้ โดยจะใช้อากาศเผาไหม้ส่วนหนึ่งไปชักนำไอเสียร้อนให้ไหลผ่านตัวรีคัพเพอเรเตอร์เพื่อถ่ายเทความร้อนให้อากาศเผาไหม้ที่เหลือ ข้อดีของระบบนี้คือสามารถหมุนเวียนความร้อนได้เอง โครงสร้างไม่ยาก

4. หัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ (Regenerative burner) เป็นหัวเผาที่ดึงความร้อนจากไอเสียมาอุ่นอากาศก่อนการเผาไหม้เผาไหม้ โดยหัวเผาชนิดนี้จะประกอบด้วยหัวเผา 2 ชุด ติดคู่กันห่างกันพอสมควร เมื่อหัวเผาตัวแรกทำงานจะอุ่นอากาศและรีเจนเนอเรเตอร์ที่ติดตั้งอยู่ให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นและมีการฉีดเชื้อเพลิงเข้าไปเผาไหม้กับอากาศที่ถูกอุ่นให้ร้อน ในระหว่างนั้นรีเจนเนอเรเตอร์อีกตัวที่ติดตั้งอยู่ที่หัวเผาอีกตัวจะทำหน้าที่สะสมความร้อนจากก๊าซไอเสีย เพื่อนำความร้อนดังกล่าวไปอุ่นอากาศโดยสลับทิศทางการไหลของอากาศเผาไหม้และเชื้อเพลิง

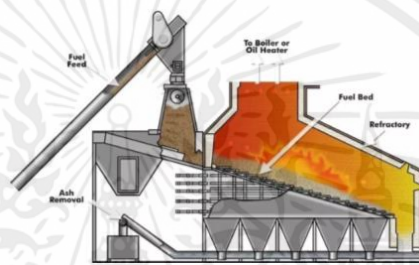


รูปที่ 3.10 ตัวอย่างหัวเผา

ความร้อนที่ได้จากการเผาสามารถนำไปใช้ในการผลิตไอน้ำที่มีอุณหภูมิและความดันสูง ไอน้ำจะถูกนำไปขับเคลื่อนไอน้ำเพื่อผลิตไฟฟ้าต่อไป ซึ่งส่วนประกอบสำคัญคือ เตาเผา ซึ่งทำหน้าที่ในการเปลี่ยนแปลงชีวมวลเป็นพลังงานความร้อน เตาเผาใหม่ในปัจจุบันมีหลายประเภท ดังนี้

### 3.8.1.1 ระบบฟิสิกซ์เบด (Fixed-bed Combustion)

ระบบฟิสิกซ์เบดเป็นเตาเผาแบบหนึ่งที่ยิยมใช้ในปัจจุบันเนื่องจากสามารถทำได้ง่ายสามารถใช้เชื้อเพลิงได้หลายชนิด ทำงานโดยการป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้โดยตะแกรงหรือสายพานและเกิดการเผาไหม้อย่างต่อเนื่องเสมือนชีวมวลหรือเบดนิ่ง

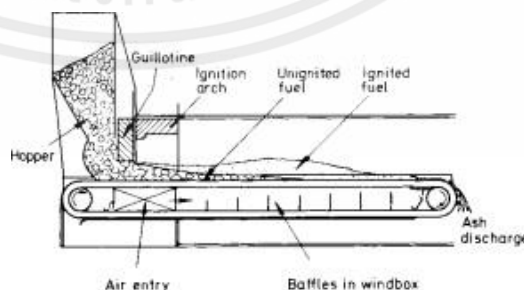


รูปที่ 3.11 ระบบ Fixed-bed combustion

### 3.8.1.2 ระบบสโตกเกอร์ทางกล (Mechanical Stokers)

ระบบนี้เป็นระบบแรกที่มีการป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่เตาโดยอาศัยเครื่องกล ระบบนี้สามารถออกแบบให้ใช้ได้กับเชื้อเพลิงแข็งหลายชนิดและราคาถูกแต่มีขีดจำกัดความสามารถในการผลิตไอน้ำร้อนในระดับที่ต่ำ ระบบนี้จะมีอยู่ 4 รูปแบบดังนี้

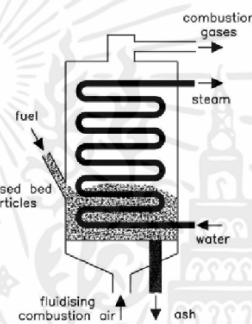
1. ระบบสโตกเกอร์แบบตะแกรงเคลื่อน (Traveling Grate Stoker)
2. ระบบสโตกเกอร์แบบกระจาย (Spaeder Fired Stoker)
3. ระบบสโตกเกอร์ที่มีการป้อนเชื้อเพลิงทางด้านล่าง (Underfeed Stoker)



รูปที่ 3.12 ระบบ Mechanical Stokers

### 3.8.1.3 ระบบฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized Bed)

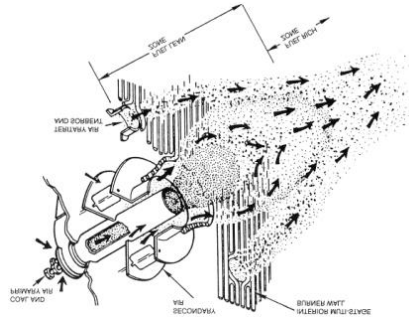
เป็นเตาเผาไหม้ชนิดหนึ่งที่ทำให้อากาศไหลผ่านชั้นเชื้อเพลิงและเมื่อความเร็วของอากาศเพิ่มขึ้นถึงค่าที่ทำให้เชื้อเพลิงลอยตัวจะมีลักษณะคล้ายของไหล ในตอนที่เตาเริ่มทำงานเบดจะได้รับความร้อนจากภายนอกจนอุณหภูมิถึงจุดติดไฟของเชื้อเพลิง หลังจากนั้นเชื้อเพลิงจะถูกป้อนเข้าไปอย่างสม่ำเสมอ การเผาไหม้ จะเกิดขึ้นทั่ว ๆ บริเวณเตาโดยปกติเบดคือสารเฉื่อย (Inert Material) เช่นทราย หรือ หินปูน (Limestone) หรือตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ซึ่งจะช่วยในด้านการถ่ายเทความร้อนและช่วยทำความสะอาด ข้อดีของระบบนี้ คือ เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ได้รวดเร็ว ไฟไม่ดับง่าย เกิดการเผาไหม้ทั่วเตาเป็นเหตุผลให้ภายในเตามีอุณหภูมิเท่ากัน



รูปที่ 3.13 ระบบ Fluidized bed combustion

### 3.8.1.4 ระบบเผาไหม้เชื้อเพลิงผง (Pulverized combustion)

ระบบเผาไหม้เชื้อเพลิงผงเป็นวิธีการเผาไหม้ถ่านหินที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในการผลิตไฟฟ้าจากถ่านหิน การเผาไหม้ของระบบนี้ต้องใช้ขนาดเชื้อเพลิงผงขนาดเล็กกว่า 1 มิลลิเมตร เพื่อที่จะสามารถลอยอยู่ในอากาศได้ อากาศส่วนแรกที่ถูกป้อนเข้าไปจะถูกอุ่นก่อนเพื่อช่วยในการอบแห้งเชื้อเพลิง ในขณะที่อากาศส่วนที่สองจะถูกป้อนเข้าไปเพื่อช่วยให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ข้อดีของระบบเผาไหม้ชนิดนี้ คือ ไม่จำเป็นต้องมีระบบแรงและให้ความร้อนในการเผาไหม้ได้สูงกว่า แต่ระบบนี้ควบคุมเข้าได้ยากจึงจำเป็นต้องมีระบบจัดการเข้าที่ดี



รูปที่ 3.14 ระบบ Pulverized combustion

การใช้ถ่านหินบดละเอียดให้มีประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับการทำงานของหัวเผาเป็นหลักโดยที่หัวเผานั้นต้องทำให้เกิดการผสมกันระหว่างถ่านหินบดละเอียดกับอากาศอย่างทั่วถึง อากาศที่นำถ่านหินบดละเอียดเข้าสู่หัวเผาเรียกว่า อากาศปฐมภูมิ (Primary air) อากาศที่เข้าบริเวณรอบๆหัวเผาเรียกว่า อากาศทุติยภูมิ (Secondary air) โดยอากาศนี้จะทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ขึ้น หัวเผาถ่านหินบดละเอียดต้องมีคุณสมบัติดังนี้

1. ต้องสามารถแบ่งอากาศออกเป็น 2 กระแสได้คือ อากาศปฐมภูมิ (Primary air) ที่นำถ่านหินบดละเอียดและอากาศทุติยภูมิ (Secondary air) ซึ่งช่วยในการจุดไฟ หัวเผาต้องสร้างกระแสการไหลปั่นป่วน (recirculation zone) เพื่อให้เชื้อเพลิงกับอากาศผสมกันได้ดีและต้องสามารถนำแก๊สร้อนรอบๆหัวเผากลับเข้ามาอุ่นอากาศและเชื้อเพลิงที่เข้ามาในภายหลัง

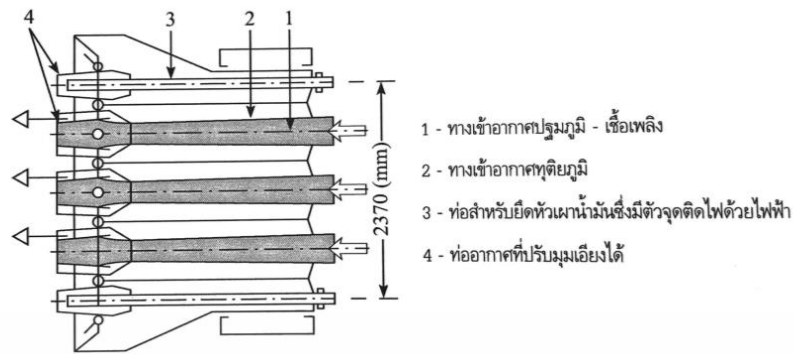
2. ต้องสามารถทำให้เปลวไฟมีเสถียรภาพและต้องสามารถควบคุมระยะทางการเคลื่อนที่และลักษณะของเปลวไฟ

3. ต้องสามารถป้องกันเปลวไฟย้อนกลับ (flash back) เข้าสู่หัวเผา ความเร็วของอากาศและเชื้อเพลิงที่ออกจากหัวเผาต้องเท่าความเร็วบริเวณด้านหน้าเปลวไฟ

4. ต้องสามารถควบคุมอัตราการไหลของอากาศทุติยภูมิ (Secondary air) ได้เพราะถ้าอากาศทุติยภูมิ (Secondary air) เข้าไปในห้องเผาไหม้มากเกินไป จะทำให้อากาศและเชื้อเพลิงจะเย็นตัวลงจนอุณหภูมิไม่ถึงจุดติดไฟ

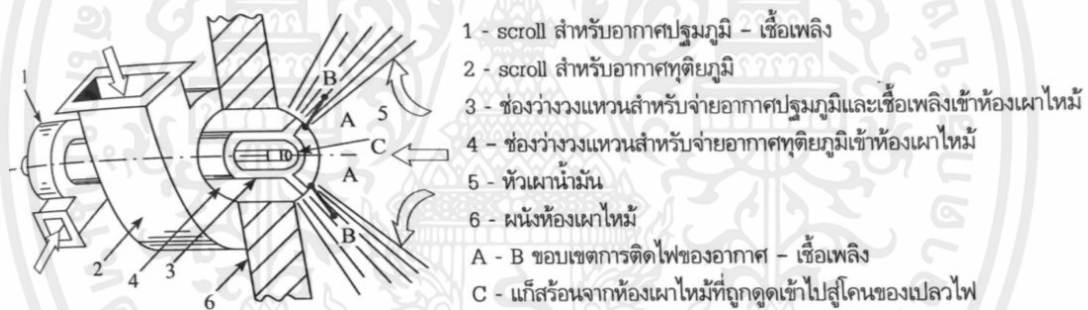
หัวเผาถ่านหินบดละเอียดสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทโดยแบ่งตามลักษณะการไหลของอากาศปฐมภูมิ (Primary air) และอากาศทุติยภูมิ (Secondary air) วิธีการผสมอากาศทั้ง 2 กระแสนี้ ดังนี้

1. หัวเผาชนิดการไหลตรง (straight-flow burner) อากาศปฐมภูมิที่นำเชื้อเพลิงมาและอากาศทุติยภูมิจะผสมกันภายนอกหัวเผาหลังจากที่เข้าสู่ภายในห้องเผาไหม้แล้ว ในหัวเผาชนิดนี้ อากาศปฐมภูมิและอากาศทุติยภูมิจะไหลขนานกันจนเข้าสู่ห้องเผาไหม้



รูปที่ 3.15 หัวเผาถ่านหินบดละเอียดชนิดไหลตรง

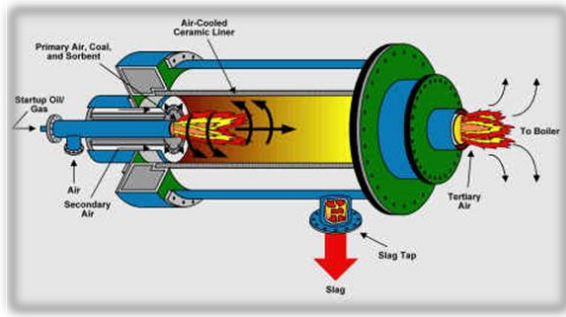
2. หัวเผาชนิดการไหลปั่นป่วน หรือ วอร์เทค (turbulent or vortex burner) อากาศปฐุมภูมิที่นำเชื้อเพลิงและอากาศทุติยภูมิจะผสมกันภายในหัวเผาก่อนที่จะเข้าสู่ห้องเผาไหม้ หัวเผาชนิดนี้เกิดจากการรับอากาศและเชื้อเพลิงเข้ามาสู่ท่อหัวฉีดในแนวสัมผัส รวมถึงอากาศทุติยภูมิก็ถูกนำเข้ามาในแนวเส้นสัมผัสกับช่องวงแหวนที่ล้อมรอบท่อหัวฉีดด้วยเช่นกัน



รูปที่ 3.16 หัวเผาถ่านหินบดละเอียดชนิดการไหลปั่นป่วน

### 3.8.1.5 ไซโคลน (Cyclone)

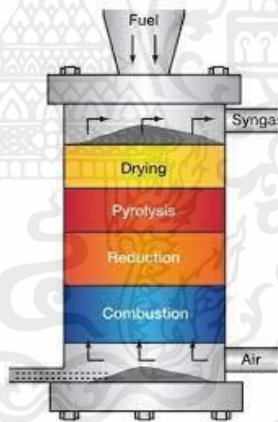
ระบบไซโคลนได้พัฒนาขึ้นเพื่อแก้ไขข้อบกพร่องของระบบเผาไหม้เชื้อเพลิงผง โดยสามารถใช้เชื้อเพลิงที่มีขนาดใหญ่กว่าไม่จำเป็นต้องนำไปบดละเอียด การเผาไหม้ระบบนี้ใช้หัวเผาแบบ horizontal water-cooled ขนาดเล็ก เชื้อเพลิงจะถูกป้อนเข้าเตาเผาโดยอาศัยแรงโน้มถ่วง อากาศที่เข้าสู่เตาจะอยู่ในแนวสัมผัสกับห้องเผาไหม้ทำให้เชื้อเพลิงเคลื่อนที่อย่างปั่นป่วนทำให้เกิดการเผาไหม้ทั่วถึงและสมบูรณ์มากขึ้น



รูปที่ 3.17 ระบบ Cyclone combustion

### 3.8.2 การผลิตก๊าซชีววมวลโดยใช้อากาศ (Air Gasification)

การผลิตก๊าซชีววมวลเป็นกระบวนการเปลี่ยนเชื้อเพลิงแข็งหรือชีววมวลให้เป็นแก๊สเชื้อเพลิง เรียกว่า แก๊สชีวภาพ (biogas) มีองค์ประกอบของแก๊สมีเทน ไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ มีหลักการทำงานแบบการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากชีววมวล (Gasifier) แบบอากาศไหลขึ้น (Updraft Gasifier) เป็นการเผาไหม้เชื้อเพลิงในที่ที่จำกัดปริมาณอากาศให้เกิดความร้อนบางส่วนแล้วไปเร่งปฏิกิริยาต่อเนื้ออื่น ๆ เพื่อเปลี่ยนเชื้อเพลิงแข็งให้เป็นแก๊สเชื้อเพลิง เทคโนโลยีการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง



รูปที่ 3.18 Air Gasification

## 3.9 แบบจำลองการเผาไหม้ [3]

### 3.9.1 สมการความต่อเนื่องและโมเมนตัม

สมการความต่อเนื่องและโมเมนตัม คือ หนึ่งในสมการในการคำนวณการจำลองการไหลโดยการแก้ไขสมการอนุรักษ์พลังงาน ซึ่งการไหลที่มีการแลกเปลี่ยนความร้อนจะนำสมการพลังงานเข้ามาใช้ในการคำนวณ และเมื่อการจำลองมีการผสมกันของสปีชีส์หรือมีการทำปฏิกิริยาจะใช้สมการอนุรักษ์สปีชีส์ และในกรณีที่มีการไหลแบบปั่นป่วนจะนำสมการโอนถ่ายมาคำนวณ

### สมการอนุรักษ์มวล

หรือ สมการความต่อเนื่อง สามารถเขียนได้โดย

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (3.13)$$

### สมการอนุรักษ์โมเมนตัม

สามารถอธิบายได้โดย

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{g} \quad (3.14)$$

### สมการพลังงาน (Energy Equation)

สมการพลังงานในการถ่ายโอนระหว่างเฟส สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + P)) = \nabla \cdot \left( k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\vec{\tau}_{eff} \bullet \vec{v}) \right) + S_h \quad (3.15)$$

และ

$$S_{h,rxn} = -\sum \frac{h_j^0}{M_j} R_j \quad (3.16)$$

กำหนดให้

$E$  คือ ค่าความร้อนจำเพาะ

$\rho$  คือ ความหนาแน่น

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

$S_h$  คือ ความร้อนจากปฏิกิริยาเคมี และแหล่งพลังงานอื่น ๆ

$h_j^0$  คือ เอนทัลปีการก่อเกิดของสปีชีส์  $j$

$R_j$  คือ อัตราการก่อเกิดโดยปริมาตรของสปีชีส์  $J$

$k_{eff}$  คือ ค่าประสิทธิผลการนำความร้อนประสิทธิผลระหว่างเฟส

### 3.9.2 แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent model)

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  $k-\varepsilon$  ,แบบจำลองแรงเค้นเรย์โนลด์ส (Reynolds Stress Model)

#### 3.9.2.1 แบบจำลอง $k-\varepsilon$ ชนิด มาตรฐาน

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

Turbulence kinetic energy ,  $k$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (3.17)$$

Rate of dissipation  $\varepsilon$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (3.18)$$

กำหนดให้

$G_k$  = ค่าการก่อกำเนิดพลังงานจลน์ระหว่างความชันของความเร็วเฉลี่ย

$G_b$  = ค่าการก่อกำเนิดพลังงานจลน์ระหว่างแรงลอยตัว

$Y_M$  = ค่าของความผันผวนในการขยายตัวบนความปั่นป่วนแบบอัดตัวได้ต่ออัตราการ กระจายตัวโดยรวม

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

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

$S_k, S_\epsilon$  = ค่าเทอมของการก่อกำเนิด

### 3.9.2.1.1 แบบจำลองความหนืดปั่นป่วน (Turbulent Viscosity)

ค่าความหนืดปั่นป่วนได้ทำการรวมระหว่างเทอมของ  $k$  และ  $\epsilon$  ดังสมการ

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (3.19)$$

กำหนดให้

$$C_\mu = 0.09 \text{ (ค่าคงที่)}$$

จากข้อดีและข้อเสียของแบบจำลอง  $k-\epsilon$  จึงทำให้เกิดการพัฒนาารูปแบบของแบบจำลอง  $k-\epsilon$  เพิ่มเติม ได้แก่ Re-Normalization Group (RNG) และ Realizable

### 3.9.2.2 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

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( a_k \mu_{eff} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (3.20)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ a_\epsilon \mu_{eff} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - R_\epsilon + S_\epsilon \quad (3.21)$$

กำหนดให้

$G_k$  = ค่าการก่อกำเนิดพลังงานจลน์ระหว่างความชันของความเร็วเฉลี่ย

$G_b$  = ค่าการก่อกำเนิดพลังงานจลน์ระหว่างแรงลอยตัว

$Y_M$  = ค่าของความผันผวนในการขยายตัวบนความปั่นป่วนแบบอัดตัวได้ต่ออัตราการ กระจายตัว

โดยรวม

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

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

$S_k, S_\epsilon =$  ค่าเทอมของการก่อกำเนิด

### 3.9.2.2.1 แบบจำลองประสิทธิภาพ ( Effective Viscosity)

ขนาดของการกระจัดในทฤษฎี Re-Normalization Group ให้ผลลัพธ์ในรูปของสมการอนุพันธ์ สำหรับ ความหนืดปั่นป่วน

$$D\left(\frac{\rho^2 k}{\sqrt{\epsilon \mu}}\right) = 1.72 - \frac{\hat{\nu}}{\sqrt{\nu^3 - I + C_\nu}} d\hat{\nu} \quad (3.22)$$

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

ที่ค่าเรย์โนลด์สูง ค่าความหนืดปั่นป่วนสามารถหาได้จาก

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (3.23)$$

เมื่อ

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

$C_\mu =$  ค่าคงที่ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.09

เทอมของ  $R_\epsilon$  ในสมการ  $\epsilon$  แสดงถึงความแตกต่างระหว่างแบบจำลอง  $k-\epsilon$  standard และ แบบจำลอง  $k-\epsilon$  RNG ตามสมการนี้

$$R_\epsilon = \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta/\eta_0) \epsilon^2}{(1 + \beta \eta^3) k} \quad (3.24)$$

เมื่อ

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

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

Realizable เกิดขึ้นมาจากการพัฒนาแบบจำลอง  $k-\epsilon$  standard ซึ่งมีความแตกต่างจากสมการแบบจำลอง  $k-\epsilon$  แบบมาตรฐาน โดยการสร้างสมการความหนืดของ การปั่นป่วนใหม่และสมการ การถ่ายโอนรูปแบบใหม่สำหรับอัตราการกระจาย ( $\epsilon$ ) ที่ประยุกต์มาจากสมการ แม่นตรงของการถ่ายโอนความปั่นป่วนจากค่าเฉลี่ยความแปรปรวนยกกำลังสอง (mean-square vorticity fluctuation) และ ผลการจำลองจากสมการนี้สามารถคาดการณ์การกระจายแนวระนาบ

นอกจากนี้ยังให้เพิ่มประสิทธิภาพของการจำลอง การไหลหมุนวน ของเขตของความต่างในด้านความดันที่สูง การกระจายตัว และการไหลหมุนวน

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (3.25)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} C_b S_\varepsilon + S_\varepsilon \quad (3.26)$$

เมื่อ

$$C_1 = \max \left[ 0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right] \text{ และ } \eta = S \frac{k}{\varepsilon} \quad (3.27)$$

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,  $C_{3\varepsilon}$  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

### 3.9.2.3.1 Turbulence viscosity

รูปแบบของความหนืดในแบบจำลอง  $k-\varepsilon$  โดยปกติสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$M_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.28)$$

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

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_S \frac{kU^*}{\varepsilon}} \quad (3.29)$$

เมื่อ

$$U^* = \sqrt{S_{ij}S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij}\tilde{\Omega}_{ij}} \quad (3.30)$$

$$\tilde{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2\varepsilon_{ijk}\omega_k \quad (3.31)$$

$$\Omega_{ij} = \bar{\Omega}_{ij} - \varepsilon_{ijk}\omega_k \quad (3.32)$$

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

ค่า  $A_0, A_5$  เป็นค่าคงที่มีค่าเท่ากับ 4.04 และ  $\sqrt{6} \cos \theta$  ตามลำดับ

เมื่อ

$$\theta = \frac{1}{3} \cos^{-1}(\sqrt{6}W) \quad (3.33)$$

$$W = \frac{S_{ij}S_{jk}S_{ki}}{S^3} \quad (3.34)$$

$$S = \sqrt{S_{ij}S_{ij}} \quad (3.35)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (3.36)$$

### 3.9.3 แบบจำลองการแผ่รังสี (Radiation model)

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)

#### 3.9.3.1 แบบจำลองการแผ่รังสี Discrete Ordinates (DO)

ธรรมชาติของการแผ่รังสี ปริมาณความร้อนที่แผ่ออกมาสู่อนุภาคตัวรับ ความร้อนที่แผ่ออกมาจะขึ้นอยู่กับมุมที่แผ่ออกมาจากวัสดุ เมื่อรังสีแผ่ไปถึงอนุภาคตัวรับ ความร้อนที่ได้รับจะขึ้นอยู่กับเอกสารเป็นเอกสารที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา

กับมุมตกกระทบและการดูดซับรังสีและความถี่ ที่มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามรังสีรวมถึงระยะห่างระหว่างอนุภาคด้วย

การถ่ายเทความร้อนแบบแผ่รังสี เป็นการถ่ายเทความร้อนที่มีความยุ่งยาก จึงตั้งสมมติฐานว่าการแผ่รังสีมีทิศทางที่ชัดเจน และจำนวนครั้งในการจำลองจะขึ้นอยู่กับทิศทาง แบบจำลองการแผ่รังสี Discrete Ordinates (DO) เป็นแบบจำลองที่ได้รับความนิยม ใช้แก้สมการการถ่ายโอนรังสี Radiative Transfer Equation (RTE) สำหรับจำกัดจำนวนของมุมตันไม่ต่อเนื่อง ซึ่งเกี่ยวข้องกับเวกเตอร์ในระบบพิกัดคาทีเซียน โดยสมการที่ใช้ในการจำลองได้แก่

$$\nabla \cdot (\vec{r}, \vec{s}) \vec{s}) + (a + \sigma_s) I(\vec{r}, \vec{s}) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{s}, \vec{s}') \Phi(\vec{r}, \vec{s}') d\Phi' \quad (3.37)$$

### 3.9.4 Discrete Phase Models

สมการโอนถ่ายสำหรับการไหลแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (2 สถานะ) ในสถานะที่สอง เรามีสมมติฐานว่าอนุภาคเชื้อเพลิงกระจายทั่วในของไหลสถานะแรก การคำนวณวิถีของสมการสถานะที่ไม่ต่อเนื่องจะทำการคำนวณทั้งการถ่ายโอนความร้อน และถ่ายโอนในทั้งสองสถานะ โดยการใช้สมการ Lagrangian ที่คำนึงถึง แรงต้านทานพลศาสตร์ แรงเฉื่อยจากความไม่ต่อเนื่อง แรงโน้มถ่วง ผลกระทบจากการไหลปั่นป่วน ในส่วนของการเผาไหม้ อนุภาคเชื้อเพลิง จะมาคำนวณในส่วนของ การปลดปล่อยสารระเหย ข้อจำกัดของการคำนวณโดยใช้แบบจำลองคือการที่อนุภาคไหลในลักษณะบางเบา

#### 3.9.4.1 การแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchange)

การถ่ายโอนความร้อนระหว่างสถานะของแข็งและของไหลสามารถคำนวณพลังงานความร้อนโดยศึกษาผ่านปริมาตรควบคุมโดยใช้สมการนี้

$$Q = \left[ \frac{\bar{m}_p}{\bar{m}_{p,0}} C_p \Delta T_p + \frac{\Delta m_p}{m_{p,0}} (-h_{fg} + h_{pyrol}) + \int_{T_{ref}}^{T_p} c_{p,i} dT \right] \bar{m}_{p,0} \quad (3.38)$$

เมื่อ	$\bar{m}_p$	คือ ค่าเฉลี่ยของอนุภาคในปริมาตรควบคุม
	$m_{p,0}$	คือ มวลเริ่มต้นของอนุภาค
	$C_p$	คือ ค่าความจุความร้อนของอนุภาค
	$\Delta T_p$	คือ อุณหภูมิที่เปลี่ยนไปของอนุภาคในปริมาตรควบคุม
	$\Delta m_p$	คือ มวลที่เปลี่ยนไปของอนุภาคในปริมาตรควบคุม
	$m_{p,0}$	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 อัตราการไหลเชิงมวลเริ่มของอนุภาค

### 3.9.4.2 การแลกเปลี่ยนมวล (Mass Exchange)

การแลกเปลี่ยนมวลระหว่างของแข็งและแก๊ส สามารถคำนวณจากอนุภาคที่เคลื่อนที่ผ่าน ปริมาตรควบคุมเขียนได้โดยสมการนี้

$$M = \frac{\Delta m_p}{m_{p0}} \dot{m}_{p0} \quad (3.39)$$

### 3.9.5 แบบจำลองการถ่ายโอนสปีชีส์ (Modeling Species Transport)

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

#### 3.9.5.1 Volumetric Reactions

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

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = - \nabla \cdot \vec{J}_i + R_i + S_i \quad (3.40)$$

เมื่อ

$R_i$  คือ อัตราการเกิดผลิตภัณฑ์สุทธิ

$S_i$  คือ อัตราการสร้าง

$\vec{J}_i$  คือ แฟลักซ์การแพร่ของสปีชีส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

### 3.9.5.1.1 Eddy Dissipation Model

การเผาไหม้เชื้อเพลิงส่วนมากอยู่ภายใต้การควบคุมของความปั่นป่วน การเผาไหม้แบบผสม ก่อนที่สารตั้งต้นมีอุณหภูมิต่ำปฏิกิริยาเคมีเกิดจากความปั่นป่วนที่นำสารผลิตภัณฑ์ที่มีอุณหภูมิสูงมา ช่วยในการทำปฏิกิริยา ในส่วนการเผาไหม้แบบไม่ผสมก่อน เชื้อเพลิงและอากาศ 2 กระแสการไหลจะทำปฏิกิริยาเคมีด้วยการผสมในบริเวณการไหลปั่นป่วน อัตราการเกิดของผลิตภัณฑ์สุทธิของแต่ละสปีชีส์เนื่องจากปฏิกิริยาจะแสดงสมการ ดังนี้

$$R_{i,r} = v'_{i,r} M_{w,i} A \rho \frac{\epsilon}{k} \min\left(\frac{Y_R}{v'_{i,r} M_{w,i}}\right) \quad (3.41)$$

$$R_{i,r} = v'_{i,r} M_{w,i} A B \rho \frac{\epsilon}{k} \frac{\sum_p Y_p}{\sum_j v'_{j,r} M_{w,j}} \quad (3.42)$$

เมื่อ

$Y_p$  คือ สัดส่วนมวลของผลิตภัณฑ์

$Y_R$  คือ สัดส่วนมวลของสารตั้งต้น

$A, B$  คือ ค่าคงที่เท่ากับ 4 และ 5 ตามลำดับ

อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีจะถูกควบคุมโดย large-eddy mixing time scale  $\frac{\epsilon}{k}$  โดยที่ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นเมื่อมีความปั่นป่วนหรือ  $\frac{\epsilon}{k} > 0$  ซึ่งเป็นลักษณะของเปลวอย่างไม่มี การผสมกันแน่นอน



#### 4.1.2 หัวเผา

หัวเผาเป็นอุปกรณ์ที่ช่วยทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น และเป็นที่ติดตั้งวัตถุขวางการไหล



รูปที่ 4.3 หัวเผาขนาด 1.5 เท่า

#### 4.1.3 ห้องเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล

ประกอบด้วย 3 ส่วนประกอบหลัก ๆ คือ ห้องเผาไหม้ สกรูระบายเถ้าหนัก และถังพักเถ้าหนัก



รูปที่ 4.4 ลักษณะห้องเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล



รูปที่ 4.5 ลักษณะสกรูระบายน้ำเข้าหนัก



รูปที่ 4.6 ลักษณะถังพักน้ำเข้าหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.4 ห้องเผาไหม้ช่วย

เนื่องจากกระบวนการเผาไหม้นั้นใช้เวลานาน ห้องเผาไหม้ช่วยจะทำให้กระบวนการเผาไหม้ส่วนใหญ่เกิดขึ้นภายในตัวห้องนี้ก่อนจะเข้าสู่ห้องเผาไหม้ อีกทั้งยังช่วยรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟด้วย



รูปที่ 4.7 ลักษณะห้องเผาไหม้ช่วย

#### 4.1.5 ระบบป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลผง

ระบบป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลผงเป็นระบบที่ประกอบด้วยอุปกรณ์ย่อยหลาย ๆ ส่วน



รูปที่ 4.8 ลักษณะถังพักเชื้อเพลิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 แสดงชุดสกรูลำเลียงเชื้อเพลิง

#### 4.1.6 ระบบบำบัดไอเสีย

เป็นระบบที่สำคัญในการทดลองนี้ ระบบบำบัดไอเสียเป็นระบบที่จะบำบัดแก๊สไอเสียที่มีอุณหภูมิสูง และมีอนุภาคแข็งหลงเหลืออยู่ ดังนั้น จึงต้องลดอุณหภูมิและจับอนุภาคแข็งในไอเสียด้วยถังบำบัดไอเสีย และส่งไปลดอุณหภูมิที่ cooling tower ต่อไป



รูปที่ 4.10 ถังบำบัดไอเสีย (evaporative scrubber)



รูปที่ 4.11 ท่อทางออกระบบบำบัดไอเสีย



รูปที่ 4.12 บ่อตกตะกอน และ cooling tower

#### 4.1.7 ระบบป้อนอากาศ

ระบบป้อนอากาศแบ่งเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนนำอากาศเข้าและส่วนนำอากาศออก ส่วนนำอากาศเข้า คือ โบลเวอร์ (FD Fan) จะทำหน้าที่ป้อนอากาศปฐมภูมิ อากาศทุติยภูมิ และอากาศตติยภูมิ โดยจะควบคุมด้วยระบบ Programable Logic Controller ในส่วนการนำอากาศออกจะอาศัยโบลเวอร์ดูด (ID Fan) ในการทำงาน



รูปที่ 4.13 แสดงลักษณะของ FD Fan ที่ป้อนอากาศปฐมภูมิ



รูปที่ 4.14 แสดงลักษณะของ FD Fan ที่ป้อนอากาศทุติยภูมิ และตติยภูมิ



รูปที่ 4.15 แสดงลักษณะของ ID Fan

#### 4.1.8 ระบบทางเดินแก๊ส LPG

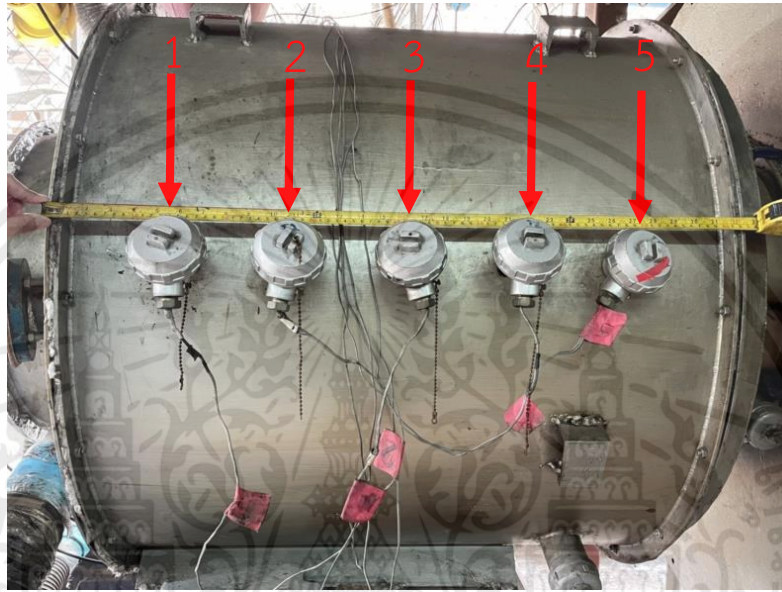
ทางเดินแก๊ส LPG ทำขึ้นเพื่อใช้ในการควบคุมการจุดระเบิดหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผง



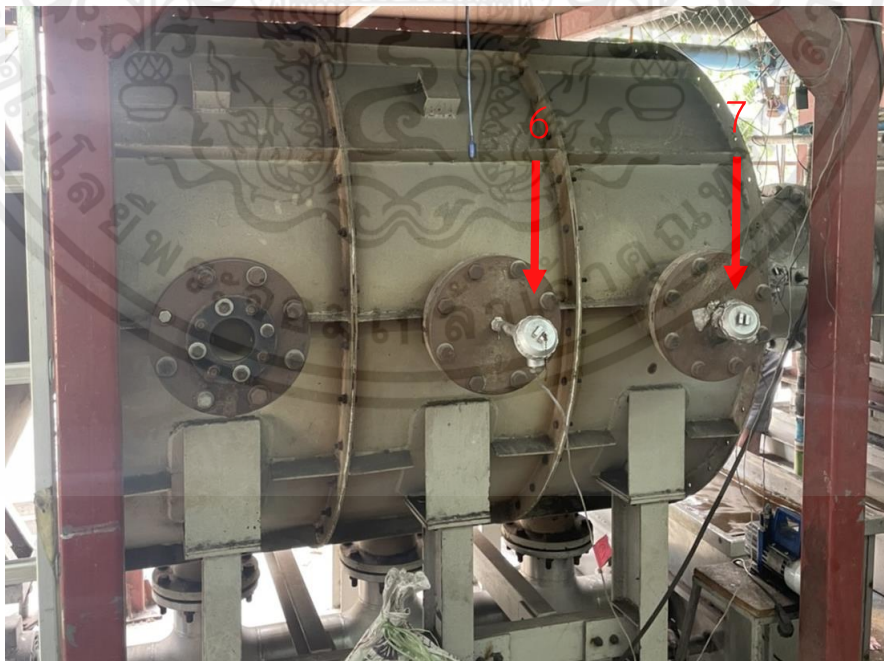
รูปที่ 4.16 แผงควบคุมแก๊ส LPG ก่อนเข้าหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผง

#### 4.1.9 อุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิ

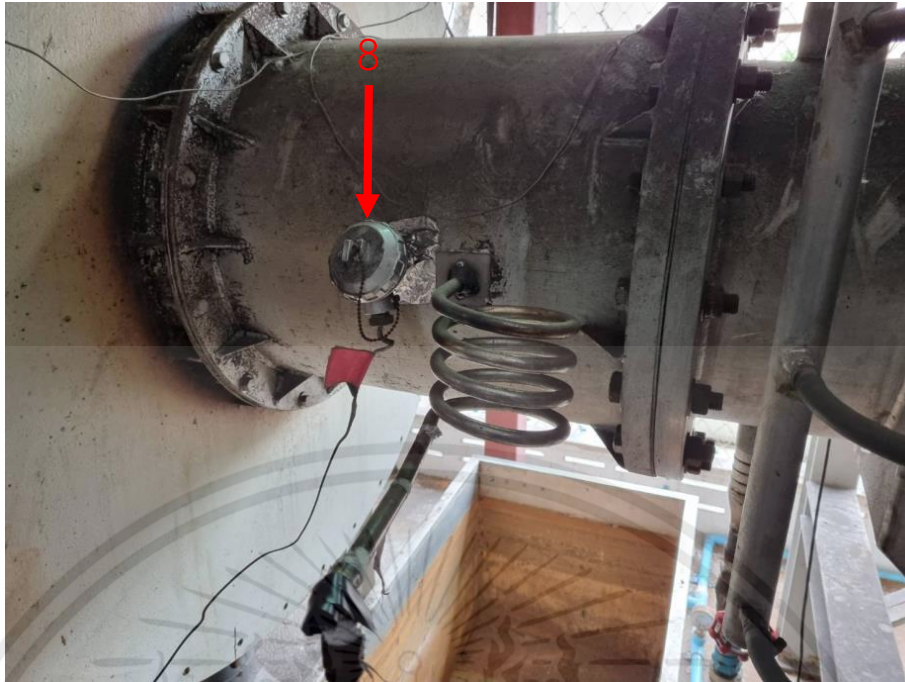
ในการบันทึกค่าอุณหภูมิจะเก็บอุณหภูมิ 9 ตำแหน่ง ซึ่งในการตรวจวัดทำโดยใช้ Thermocouple type K ในห้องเผาไหม้ช่วยจะเก็บอุณหภูมิ 5 ตำแหน่ง โดยจุดแรกมีระยะห่างจากฝาปิดห้องเผาไหม้ช่วย 14 เซนติเมตร และระยะห่างระหว่าง Thermocouple type K แต่ละตัวเท่ากับ 14 เซนติเมตร



รูปที่ 4.17 ตำแหน่งในการบันทึกค่าอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ช่วย



รูปที่ 4.18 ตำแหน่งในการบันทึกค่าอุณหภูมิในห้องเผาไหม้หลัก



รูปที่ 4.19 ตำแหน่งในการบันทึกค่าอุณหภูมิบริเวณทางออกห้องเผาไหม้หลักและจุดตรวจวัดองค์ประกอบก๊าซไอเสีย



รูปที่ 4.20 ตำแหน่งในการบันทึกค่าอุณหภูมิหลังจากบำบัดไอเสียแล้ว



รูปที่ 4.21 Thermocouple type K

#### 4.1.10 อุปกรณ์ตรวจวัดแก๊สไอเสีย

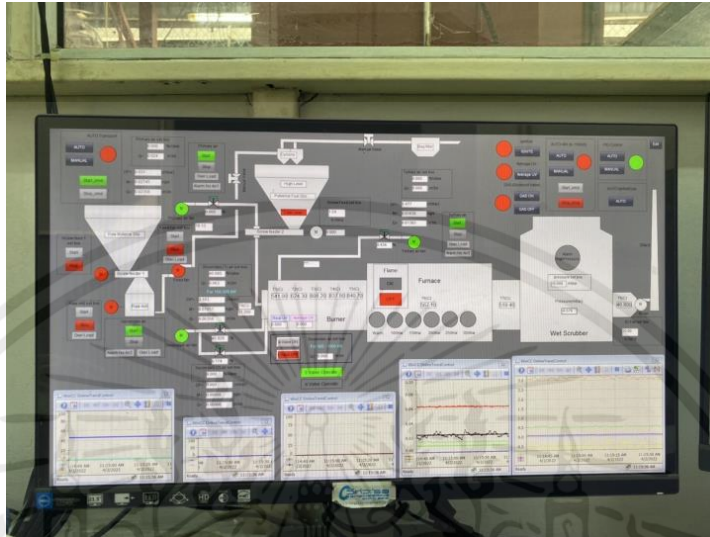
จะติดตั้งที่บริเวณช่องทางออกของแก๊สไอเสีย โดยจะวัดเปอร์เซ็นต์ออกซิเจนการเผาไหม้ สารประกอบไนโตรเจน และปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์



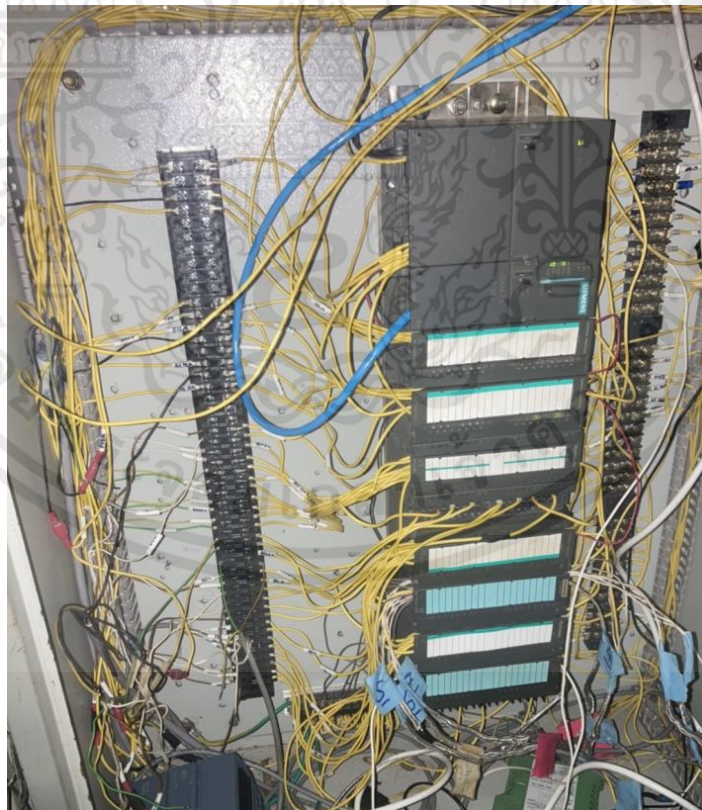
รูปที่ 4.22 เครื่องวัดแก๊สไอเสีย Testo รุ่น 330 LL

#### 4.1.11 ระบบควบคุมการทดลอง

การเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผงให้ตรงตาเงื่อนไขต้องอาศัยชุดควบคุม Programmable Logic Controller หรือ PLC ในการรับสัญญาณจากเครื่องมือวัด



รูปที่ 4.23 โปรแกรมควบคุมการเผาไหม้เชื้อเพลิง

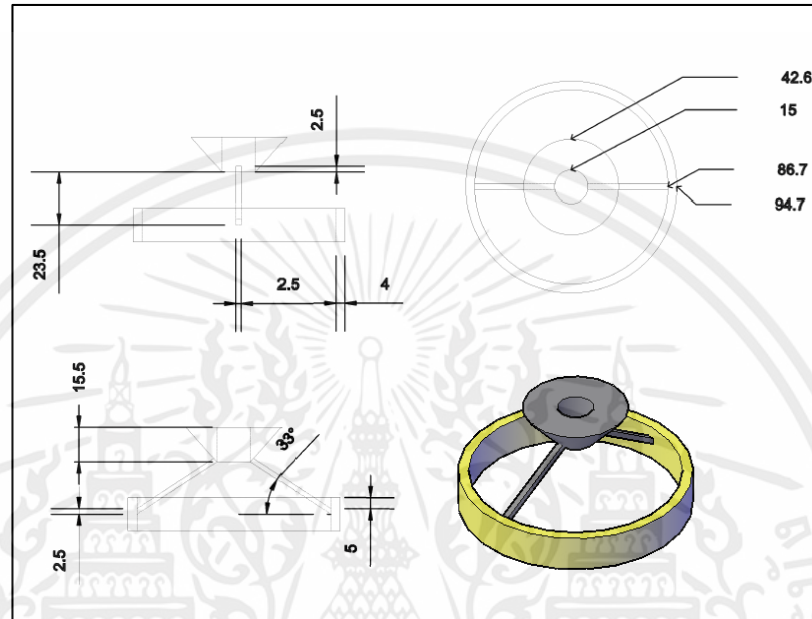


รูปที่ 4.24 ชุดควบคุม PLC

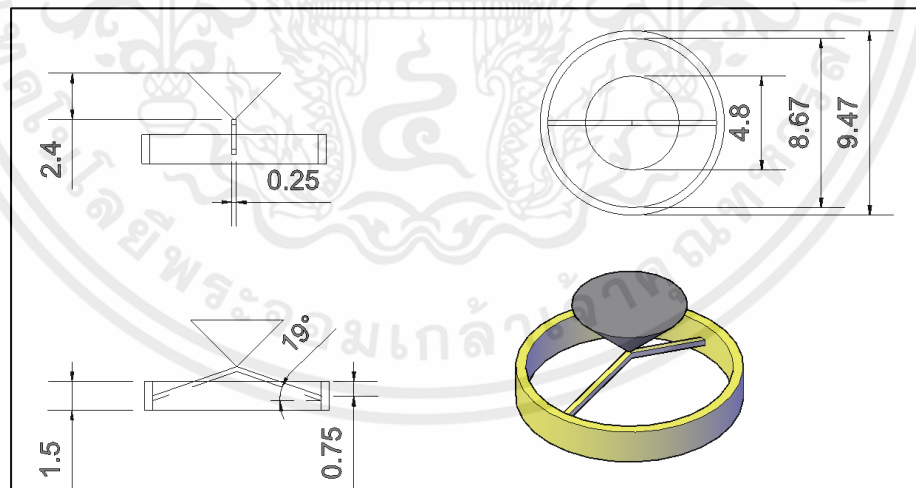
## 4.2 วิธีการทดลอง

### 4.2.1 ออกแบบวัตถุขวางการไหล

วัตถุขวางการไหลที่ออกแบบมีรูปทรงกรวยตันและรูปทรงกรวยเจาะรูโดยให้มี blockage ratio เท่ากัน คือ 0.306 ด้วยโปรแกรม AutoCAD



รูปที่ 4.25 ขนาดของวัตถุขวางการไหลรูปทรงกรวยเจาะรูที่ออกแบบในหน่วยเซนติเมตร



รูปที่ 4.26 ขนาดของวัตถุขวางการไหลรูปทรงกรวยที่ออกแบบในหน่วยเซนติเมตร

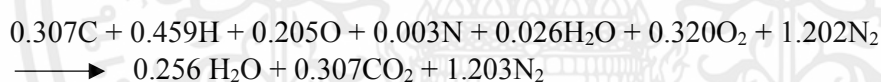
#### 4.2.2 คำนวณหาปริมาณของอากาศปฐมภูมิ อากาศทุติยภูมิ และอากาศตติยภูมิ

ในการทดลองนี้ได้ใช้เชื้อเพลิงไม้ยางพาราบดละเอียดเป็นเชื้อเพลิง โดยมีคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน ความชื้นเป็นองค์ประกอบ

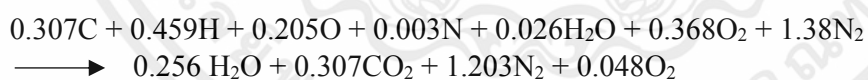
ตารางที่ 4.1 แสดงคุณสมบัติของไม้ยางพาราผง

คุณสมบัติ	สภาพน้ำหนักแห้ง	สภาพน้ำสูง
คาร์บอน,%	48.22	38.576
ไฮโดรเจน,%	6.01	4.808
ออกซิเจน,%	42.86	34.288
ไนโตรเจน,%	0.48	0.384
ซัลเฟอร์,%	0	0
ความชื้น,%	-	20
เถ้า,%	2.43	1.944
สารระเหย,%	81.410	65.128
ถ่านคงตัว,%	16.170	12.936

เมื่อนำไปเขียนสมการการเผาไหม้ทางเคมีแล้วจะได้



ซึ่งมี AF ratio = 5.407 kg<sub>air</sub>/kg<sub>fuel</sub> ซึ่งในการทดลองเราจะทดลองที่สภาวะ excess air 15 % ทำให้สมการการเผาไหม้ทางเคมีเป็นดังนี้



ซึ่งมี AF ratio = 6.218 kg<sub>air</sub>/kg<sub>fuel</sub> นำไปคำนวณหาปริมาณอากาศรวมจะได้ 0.096 m<sup>3</sup>/s ที่ความหนาแน่นของอากาศเท่ากับ 1.2 kg/ m<sup>3</sup> และอัตราส่วนของอากาศปฐมภูมิ ทุติยภูมิ และ ตติยภูมิ คือ 25, 65 และ 10 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 แสดงอัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิ ทุติยภูมิ และ ตติยภูมิสำหรับเชื้อเพลิงยางพารา

สภาวะการทำงาน (kW)	อากาศปฐมภูมิ (m <sup>3</sup> /s)	อากาศทุติยภูมิ (m <sup>3</sup> /s)	อากาศตติยภูมิ (m <sup>3</sup> /s)	อัตราการป้อนเชื้อเพลิง (Hz)	เปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน (%)
300	0.024508	0.063721	0.00962	1.54	15

นำค่าอัตราการไหลของอากาศแต่ละส่วนไปใช้ในโปรแกรม Workbench Ansys และการทดลอง

#### 4.2.3 เตรียมเชื้อเพลิงชีวมวลผง

- นำชีวมวลผงบรรจุในถังพักเชื้อเพลิง

#### 4.2.4 การจุดหัวเผา และการอุ่นหัวเผา

- เปิดวาล์วอากาศทุติยภูมิ ด้วยอัตราการไหลเชิงมวลเท่ากับ 0.02 m<sup>3</sup>/s
- เปิดวาล์วแก๊ส ปรับการไหลของแก๊สที่แผงควบคุมระบบจ่ายแก๊ส LPG โดยปรับอัตราการไหลที่ประมาณ 1-1.5 L/min
- ทำการจุดประกายไฟด้วยอุปกรณ์ขยายแรงดันไฟฟ้า
- ทำการเผาไหม้อย่างต่อเนื่องเพื่อให้อุณหภูมิในห้องเผาไหม้ช่วยประมาณ 400-500 องศาเซลเซียส จากนั้นทำการป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลผง อากาศปฐมภูมิ และอากาศตติยภูมิเข้าห้องเผาไหม้ช่วย ทำการเผาไหม้อย่างต่อเนื่องจนอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ช่วยอยู่ที่ 800 องศาเซลเซียส จึงหยุดปล่อยแก๊ส LPG และยังเผาไหม้อย่างต่อเนื่อง

#### 4.2.5 บันทึกผลการทดลอง

ทำการบันทึกค่าอุณหภูมิและค่าเปอร์เซ็นต์ออกซิเจนหลังการเผาไหม้ ค่าคาร์บอนมอนออกไซด์ และค่าสารประกอบไนโตรเจนที่ได้จากการเผาไหม้ ณ เวลาต่าง ๆ และทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนรูปทรงวัตถุวางการไหล

### 4.3 โมเดลจำลองการเผาไหม้

ตารางที่ 4.3 แสดงโมเดลการเผาไหม้ที่ใช้ในการทดลอง

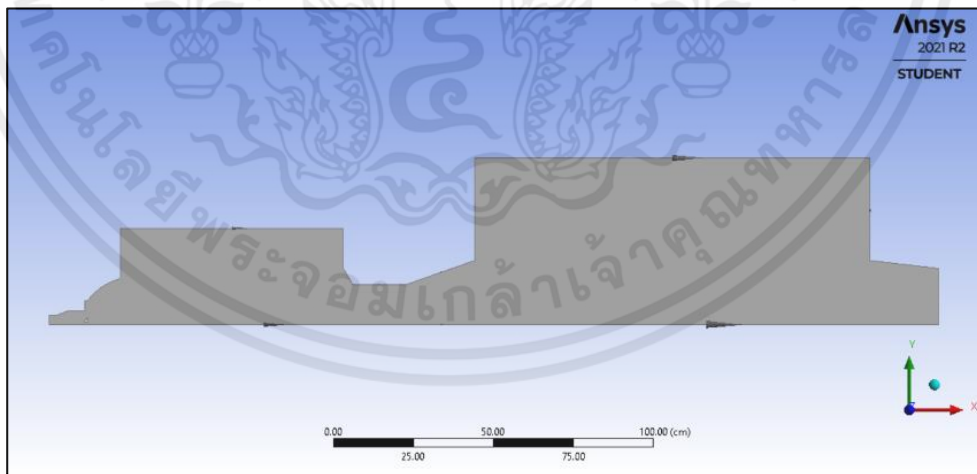
แบบจำลองการเผาไหม้	โมเดลการเผาไหม้ที่ใช้
แบบจำลองการไหลปั่นป่วน (Turbulent model)	แบบจำลอง $k-\epsilon$ ชนิดแบบมาตรฐาน
แบบจำลองการแผ่รังสี (Radiation model)	แบบจำลองการแผ่รังสี Discrete Ordinates (DO)
The Generalized Finite-Rate Formulation for Reaction Modeling	Eddy-Dissipation Model
แบบจำลองการถ่ายโอนสปีชีส์ (Modeling Species Transport)	Volumetric Reactions

### 4.4 แบบจำลองและการทดลองหาจำนวนกริดที่เหมาะสม

#### 4.4.1 โมเดลห้องเผาไหม้

วิธีทำ

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



รูปที่ 4.27 แสดง Geometry ห้องเผาไหม้ที่ใช้ Designmodeler Workbench Ansys ในการสร้าง

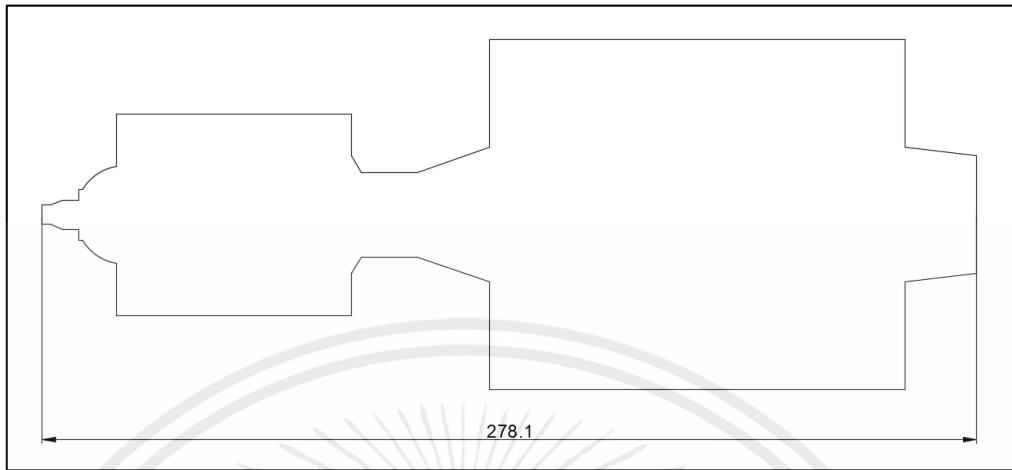
2. ทำ Mesh independence เพื่อหาค่า mesh ที่เหมาะสมที่สุด

3. ตั้งค่าขอบเขตการจำลองและพารามิเตอร์ของการเผาไหม้ใน fluent ตามเงื่อนไขในตาราง

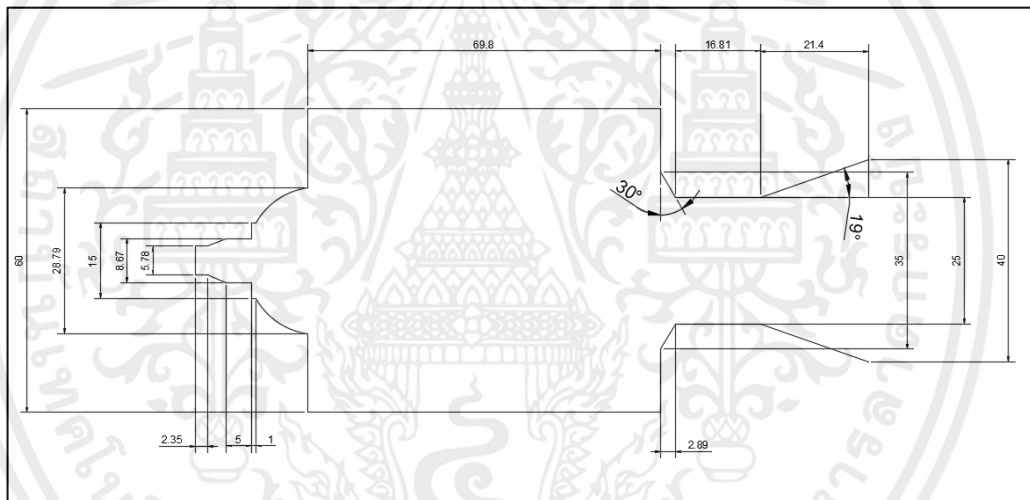
ที่ 4.2 และโมเดลในตารางที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

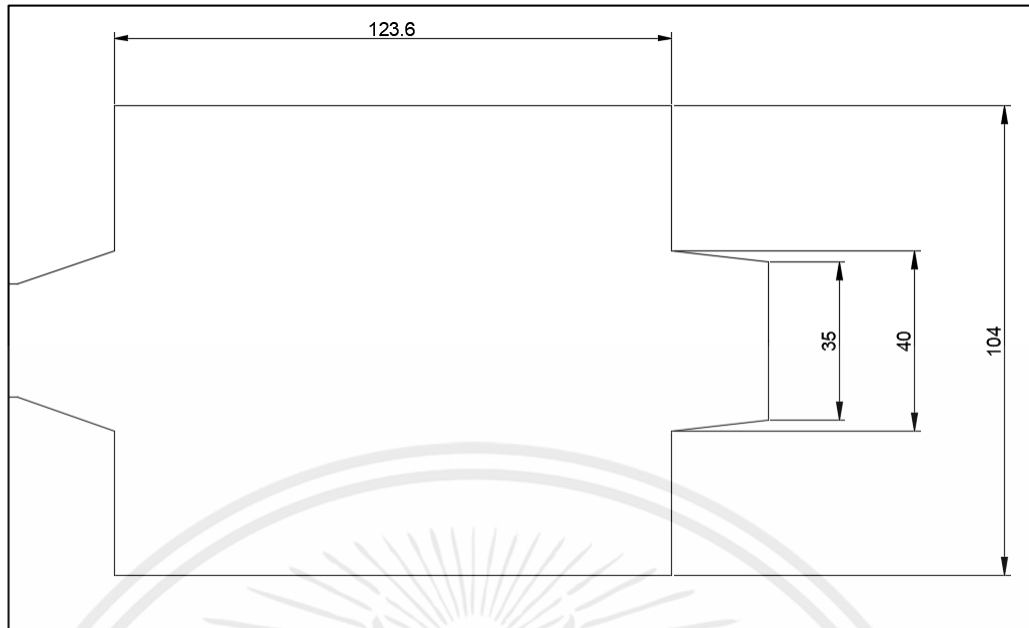
4. นำผลลัพธ์ที่จากการ simulation มาวิเคราะห์ผล



รูปที่ 4.28 แสดงขนาดของเครื่องเผาไหม้ในหน่วยเซนติเมตร



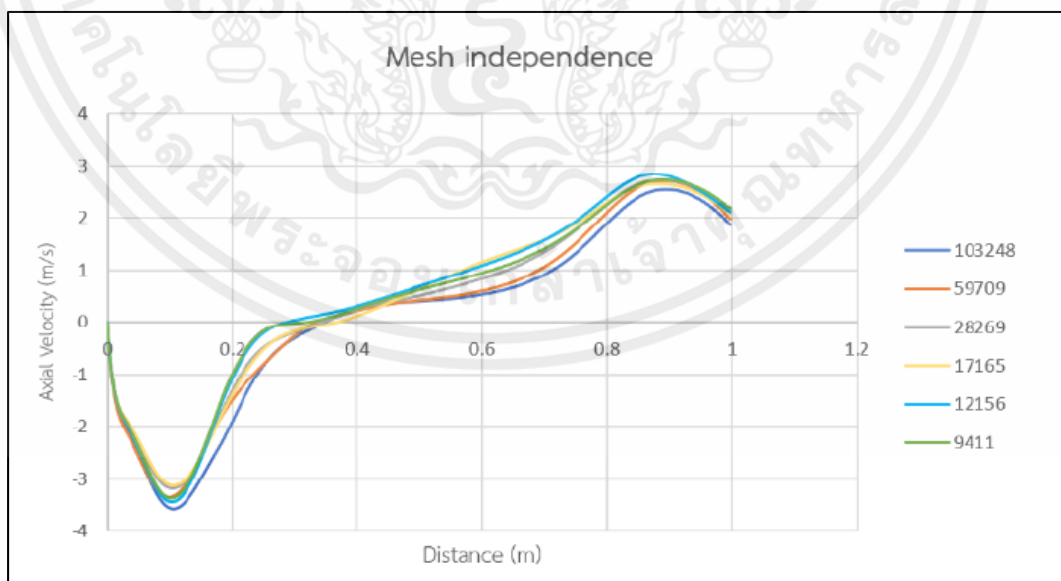
รูปที่ 4.29 แสดงขนาดของห้องเผาไหม้ช่วยในหน่วยเซนติเมตร



รูปที่ 4.30 แสดงขนาดของห้องเผาไหม้หลักในหน่วยเซนติเมตร (ต่อ)

#### 4.4.2 การทดลองหาจำนวนกริดที่เหมาะสม

ทำการทดลองหาจำนวน mesh ประเภท Quadrilateral ที่ขนาด 0.002 เมตร ที่ประหยัดทรัพยากรในการคำนวณที่สุด จึงได้ทำ Grid Independence ที่จำนวน mesh เท่ากับ 9411, 12156, 17165, 28269, 59709 และ 103248 จากผลข้างต้นสรุปได้ว่า จำนวน mesh ที่ให้ผลการจำลองคงที่ และมีค่าน้อยที่สุด คือ 59709 cell



รูปที่ 4.31 แสดงผล mesh independence

## บทที่ 5

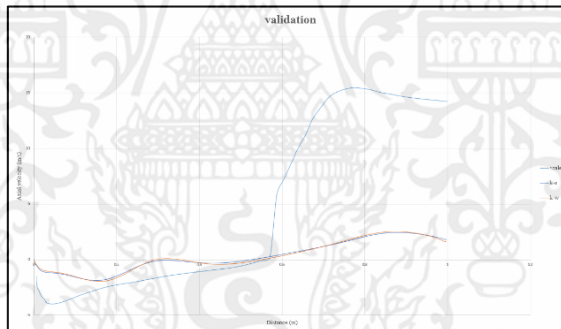
# อภิปรายผลการจำลอง

### 5.1 ผลจำลองการไหล

ตั้งเงื่อนไขการจำลองผลทางคอมพิวเตอร์ เพื่อสังเกตรูปแบบการไหลของอากาศ โดยใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) แบบ  $k-\epsilon$  โดยมีอัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิ 0.0462 kg/s และอัตราการไหลของอากาศหตุยภูมิ 0.075 m/s คำนวณเป็นความเร็วของอากาศปฐมภูมิและความเร็วของอากาศหตุยภูมิได้ 8.96 m/s และ 6.7 m/s ตามลำดับ กำหนดความเร็วการไหลหมุนควง (Swirl velocity) 6.8 m/s และให้ทุกสมการลู่เข้าที่  $10^{-4}$

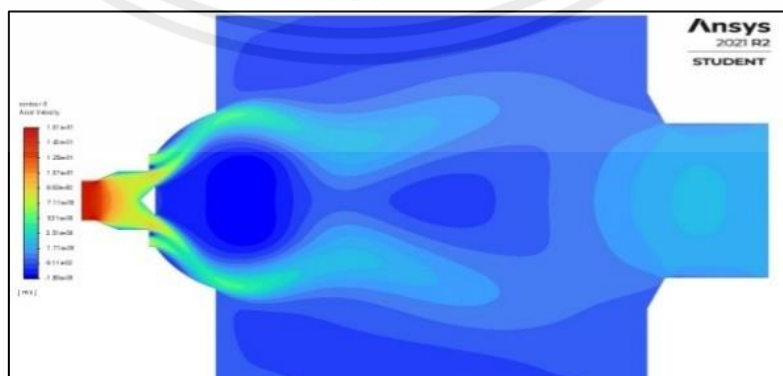
#### 5.1.1 การสอบเทียบผลการจำลอง

ทำการตรวจสอบ (validation) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (Simulation) กับวิจัยของฉัตรเฉลิมและคณะ เพื่อนำมาวิเคราะห์แนวโน้มความถูกต้อง

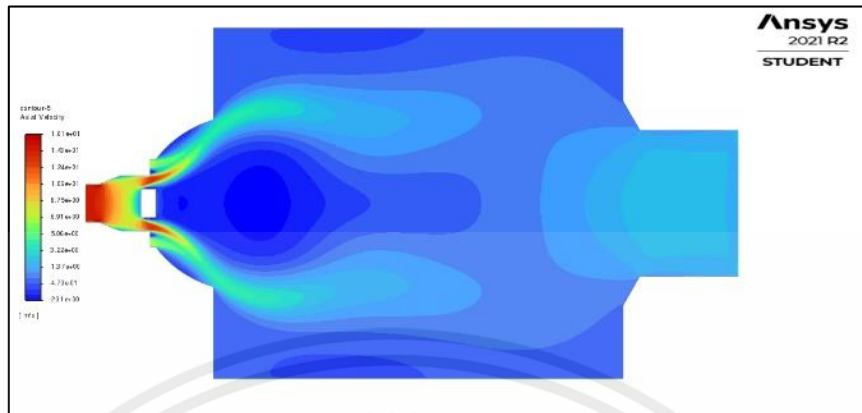


รูปที่ 5.1 การเปรียบเทียบผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์กับวิจัยตัวอย่าง ที่หัวเผาขนาด 1.5 เท่า

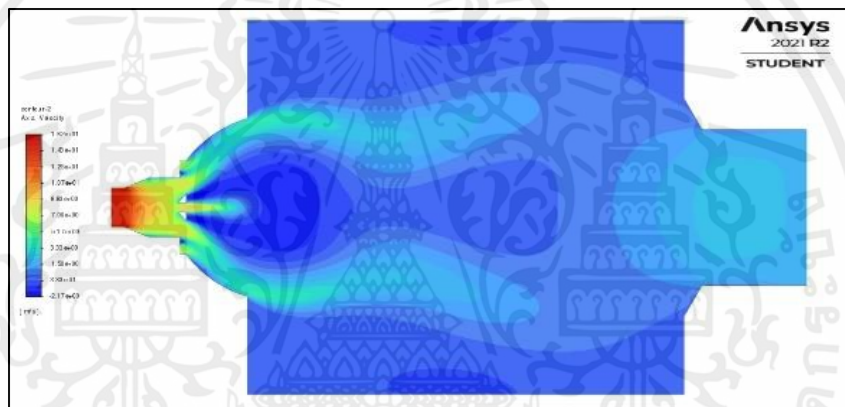
#### 5.1.2 ผลการจำลองการไหลของอากาศ



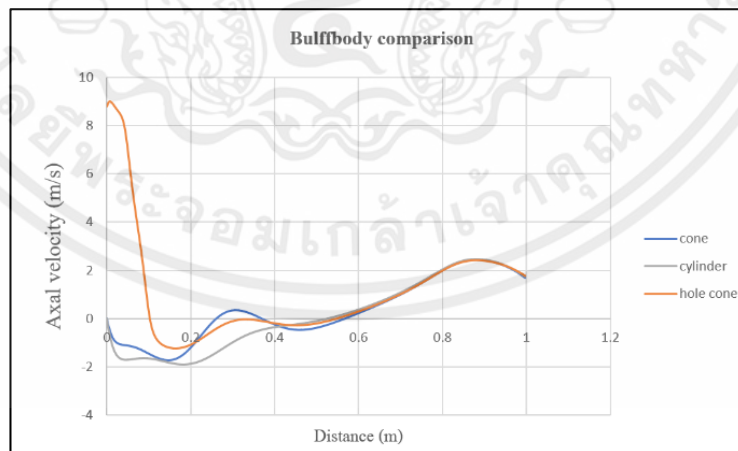
รูปที่ 5.2 แผนภาพสีความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านวัตถุขวางการไหลรูปทรงกรวย



รูปที่ 5.3 แผนภาพสีความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านวัตถุขวงการไหลรูปทรงกระบอก

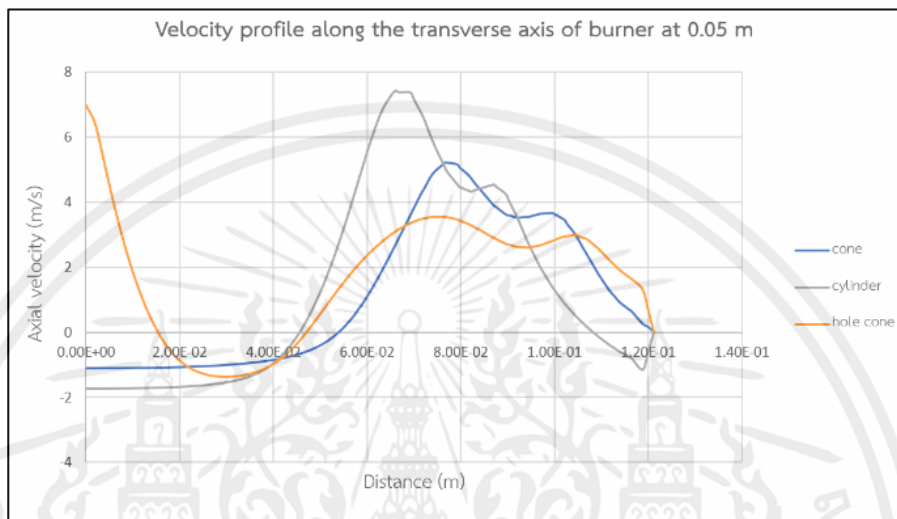


รูปที่ 5.4 แผนภาพสีความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านวัตถุขวงการไหลรูปทรงกรวยเจาะรู



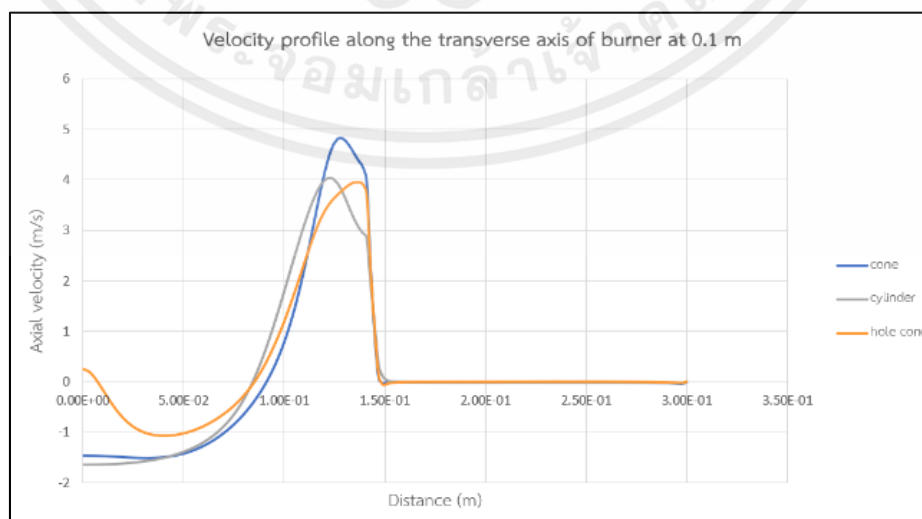
รูปที่ 5.5 แสดงผลการเปรียบเทียบความเร็วแนวแกนตามแนวการไหลผ่านวัตถุขวงการไหลรูปทรงต่าง ๆ

จากกราฟสังเกตได้ว่า ทรงกรวยและทรงกระบอกมีการไหลย้อนกลับค่อนข้างเร็ว ทรงกระบอกมีการไหลย้อนกลับตั้งแต่ตำแหน่งหลังวัตถุขวางการไหลจนถึงตำแหน่งที่ 0.5 m ในขณะที่ทรงกรวยจะมีทิศทางการไหลเป็นบวก ณ ตำแหน่ง 0.26 m จนถึง 0.36 m แล้วมีการไหลย้อนกลับอีกครั้งไปจนถึง 0.56 m เทียบกับทรงกรวยเจาะรูที่มีความเร็วการไหลทิศทางบวกสูงก่อนจะค่อย ๆ ลดลงจนกระทั่งเกิดความการไหลย้อนกลับซ้ำที่ระยะ 0.1 m จนถึง 0.55 m หลังจากนั้นจึงมีทิศทางการไหลเป็นบวก



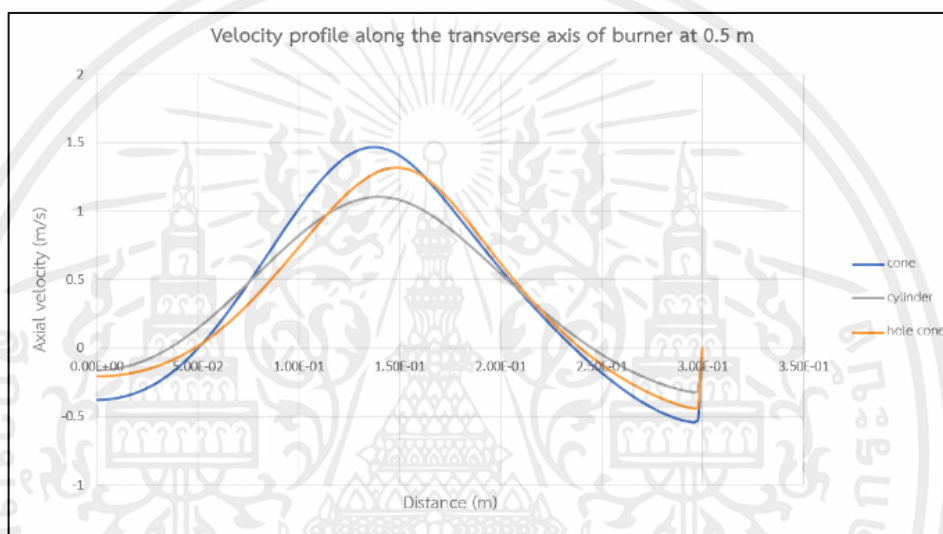
รูปที่ 5.6 แสดงผลเปรียบเทียบความเร็วแนวแกนตามแกนแนวขวางการไหลที่ตำแหน่ง 0.05 m

จากกราฟที่ตำแหน่งหลังวัตถุขวางการไหลจะสังเกตได้ว่า กรณีทรงกระบอกมีความเร็วการไหลย้อนกลับสูงที่สุดในทุกกรณี จนถึงตำแหน่งที่ 0.045 m ทรงกระบอกมีทิศทางการไหลเป็นบวก ในขณะที่ทรงกรวยมีการไหลย้อนกลับจนถึงตำแหน่ง 0.05 m เทียบกับทรงกรวยเจาะรูที่เริ่มต้นด้วยการไหลที่มีทิศทางบวก จนถึงตำแหน่งที่ 0.016 m จึงเกิดการไหลย้อนกลับ จนกระทั่งตำแหน่งที่ 0.046 m การไหลจึงมีทิศทางเป็นบวก



รูปที่ 5.7 แสดงผลเปรียบเทียบความเร็วของอากาศตามแนวรัศมีที่ตำแหน่ง 0.1 m

จากกราฟจะสังเกตเห็นได้ว่า ทรงกระบอกและทรงกรวยมีความเร็วการไหลย้อนกลับที่ใกล้เคียงกัน จนถึงตำแหน่งที่ 0.08 m และ 0.09 m ทรงกระบอกและทรงกรวยมีทิศทางการไหลเป็นบวกตามลำดับ จากนั้นทรงกรวยมีการไหลย้อนกลับอีกครั้งที่ตำแหน่ง 0.16 m เป็นต้นไปจนถึงระยะผนังของห้องเผาไหม้ช่วย ในขณะที่ทรงกระบอกมีการไหลย้อนกลับอีกครั้งที่ตำแหน่ง 0.156 m เป็นต้นไปจนถึงระยะผนังของห้องเผาไหม้ช่วยเทียบกับทรงกรวยเจาะรูที่เริ่มต้นด้วยการไหลที่มีทิศทางบวกจนถึงตำแหน่งที่ 0.008 m จึงเกิดการไหลย้อนกลับ จนกระทั่งตำแหน่งที่ 0.085 m จึงมีการไหลทิศทางเป็นบวก จากนั้นมีการไหลย้อนกลับอีกครั้งที่ตำแหน่ง 0.15 m เป็นต้นไปจนถึงระยะผนังของห้องเผาไหม้ช่วย



รูปที่ 5.8 แสดงผลเปรียบเทียบความเร็วแนวแกนตามแกนแนวขวางการไหลที่ตำแหน่ง 0.5 m

จากกราฟจะสังเกตเห็นได้ว่า ทรงกรวย ทรงกระบอก และทรงกรวยเจาะรู มีความเร็วการไหลย้อนกลับ โดยความเร็วติดลบมากไปน้อยคือทรงกรวย ทรงกรวยเจาะรู และทรงกระบอก ตามลำดับ ทรงกรวยและทรงกรวยเจาะรูเกิดการไหลย้อนกลับตั้งแต่ตำแหน่งเริ่มต้นจนถึงตำแหน่งที่ 0.05 m และเกิดอีกครั้งที่ตำแหน่ง 0.24 m จนถึงผนังของห้องเผาไหม้ช่วย ในขณะที่ทรงกระบอกเกิดการไหลย้อนกลับตั้งแต่ตำแหน่งเริ่มต้นจนถึงตำแหน่งที่ 0.036 m และเกิดการไหลย้อนกลับอีกครั้งที่ตำแหน่ง 0.245 m จนถึงผนังของห้องเผาไหม้ช่วย

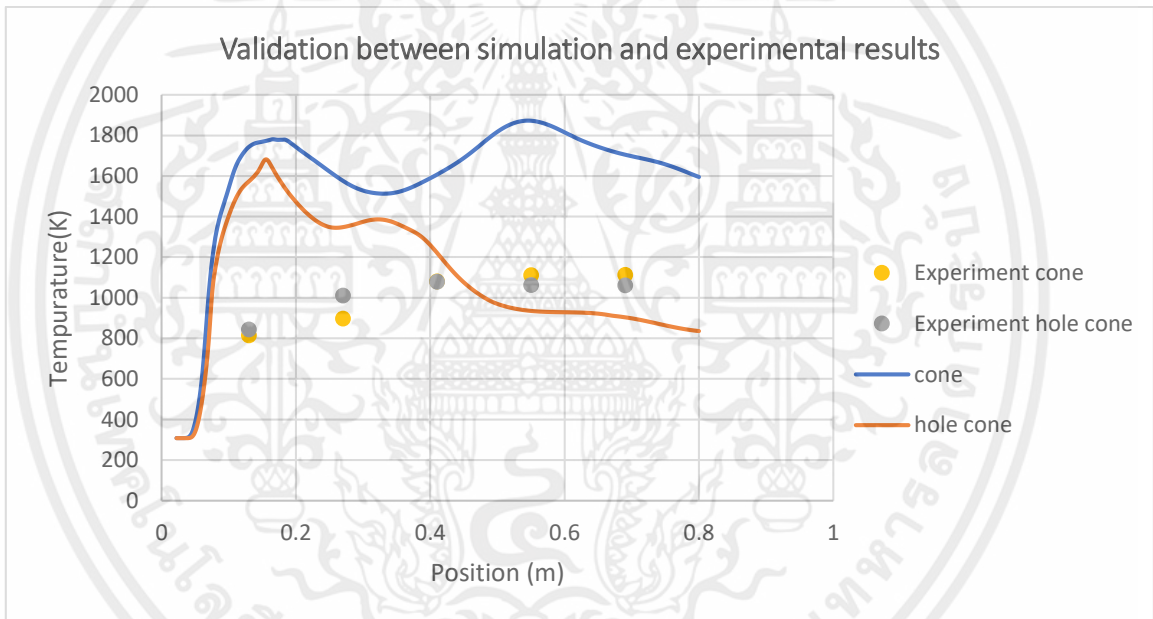
## 5.2 การสอบเทียบผลการจำลอง

ในหัวข้อนี้เป็นการสอบเทียบผลการจำลองและการทดลองการเผาไหม้กรณีมีวัตถุขวางการไหลรูปทรงกรวยตันและรูปทรงกรวยเจาะรู โดยมีเชื้อเพลิงชีวมวลเป็นยางพาราที่ความชื้น 20 เปอร์เซ็นต์ โดยมีเงื่อนไขการเผาไหม้ที่ 300 กิโลวัตต์ความร้อน อากาศส่วนเกิน 15 เปอร์เซ็นต์ อัตรา

การไหลอากาศส่วนที่หนึ่ง  $0.024 \text{ m}^3/\text{s}$  อัตราการไหลอากาศส่วนที่สอง  $0.06252 \text{ m}^3/\text{s}$  และอัตราการไหลอากาศส่วนที่สาม  $0.009618 \text{ m}^3/\text{s}$  อัตราการป้อนเชื้อเพลิง  $1.54 \text{ Hz}$

hole cone 30/03/22				Temperature (°C)								
time	% O2	CO (ppm)	Nox (ppm)	T9	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
11.16	13.3	3981	150	34.7	523.5	640.6	731	739.3	755.5	516.4	486	49.1
11.31	13.4	1752	176	34.7	570.4	737.7	805.4	790.5	787.7	575.8	532.8	51.9
cone 2/3/2022				Temperature (°C)								
time	% O2	CO (ppm)	Nox (ppm)	T9	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
11:00	15	5301	99	33.5	478.4	620.5	765.5	739.3	741	474.6	438.5	42.9
11:10	14.7	2753	113	31.2	529	625.9	803.6	803.1	804.2	557.8	500.3	45.7
11.15	13.5	2757	114	31.2	541	624.3	808.2	837.8	840.7	567.1	510.4	46.8

รูปที่ 5.9 ผลการทดลองการเผาไหม้



รูปที่ 5.10 แสดงอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ ณ ตำแหน่งเดียวกันของผลจำลองและผลการทดลอง

จากการเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองและการทดลองการเผาไหม้อย่างพารา พบว่า

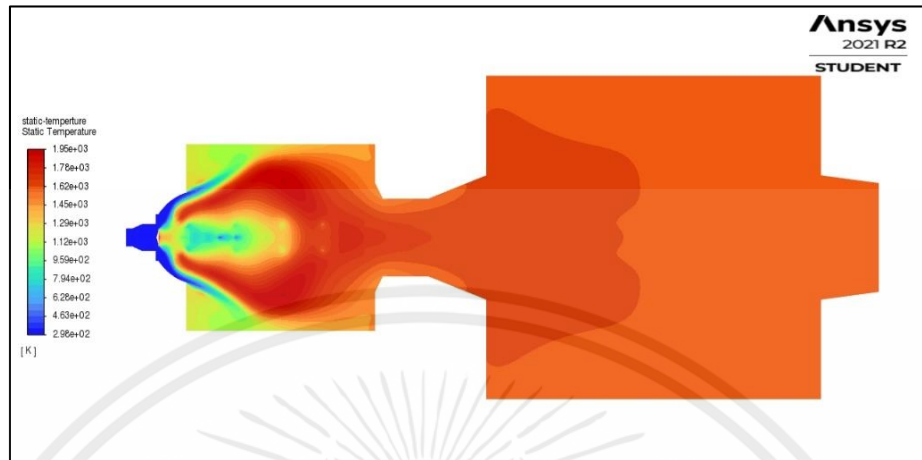
- ผลการจำลองทั้ง 2 กรณี มีอุณหภูมิสูงกว่าบริเวณอื่น 2 ตำแหน่ง (0.18 และ 0.55 เมตร) ในขณะที่ผลการทดลองพบการกระจายตัวค่อนข้างสม่ำเสมอ เนื่องจากการทดลองมีแท่งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิอยู่ในห้องเผาไหม้ไปขวางการไหลเชื้อเพลิงทำให้กราฟมีลักษณะแตกต่างจากผลจำลอง

- ในกรณีของการเผาไหม้ที่มีวัตตขวางการไหลเป็นรูปทรงกรวยตัน ยังสังเกตได้ว่ามีความต่างกันของอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ช่วยค่อนข้างมาก ในส่วนของการทดลองเชื้อเพลิงมีความชื้นสูง สังเกตจากขณะทดลองเชื้อเพลิงจับตัวกันเป็นก้อน และเกิดหยดน้ำเกาะบริเวณด้านในของกระจกทนไฟ ทำให้ความร้อนอาจจะไปไม่ถึงกระบวนการปลดปล่อยสารระเหย เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์
  - ในกรณีการเผาไหม้ที่มีวัตตขวางการไหลเป็นรูปทรงกรวยเจาะรูสังเกตได้ว่าผลการจำลองมีการกระจายตัวของอุณหภูมิสูงในช่วงส่วนต้นของห้องเผาไหม้ช่วย ณ ตำแหน่ง 0.18 เมตร จากนั้นอุณหภูมิลดลงเรื่อย ๆ ในขณะที่ผลการทดลองมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ช่วงต้นห้องเผาไหม้ช่วยจนถึงตำแหน่ง 0.25 เมตร มีการกระจายตัวของอุณหภูมิก่อนข้างสม่ำเสมอ เนื่องจากอุปกรณ์วัดอุณหภูมิขวางการไหล แต่เมื่อพ้นระยะ 0.25 เมตร ไป พบว่าผลการจำลองและการทดลองมีระดับอุณหภูมิเท่า ๆ กัน
- อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้มีแนวโน้มในทิศทางเดียวกัน ผู้วิจัยจึงใช้เงื่อนไขจำลองนี้ มาศึกษาในเชิงเปรียบเทียบในหัวข้อ 5.3

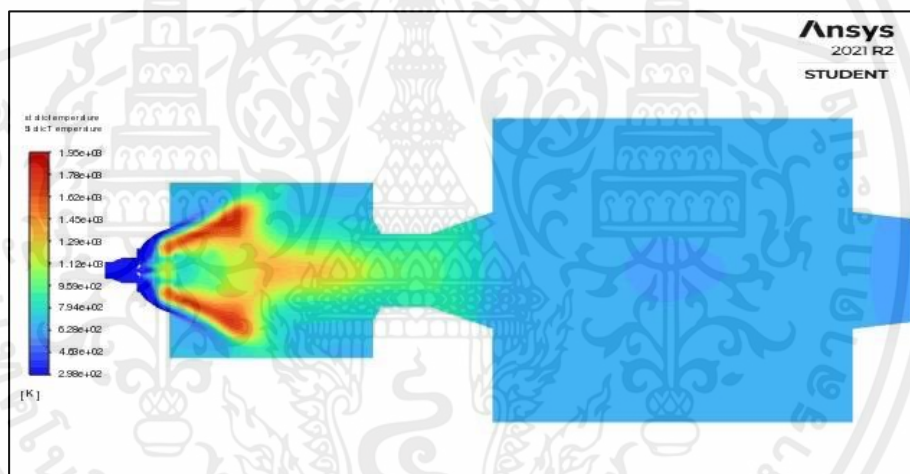
### 5.3 ผลการจำลองการเผาไหม้เปรียบเทียบกรณีวัตตขวางการไหลรูปทรงกรวยตันและกรวยเจาะรู

หัวข้อนี้เป็นการเปรียบเทียบผลจำลองการเผาไหม้ระหว่างตัวขวางการไหลรูปทรงกรวยตันและรูปทรงกรวยเจาะรู โดยมีเงื่อนไขการจำลองการไหลแบบ k-standard ค่าเอนทัลปีมาตรฐาน  $-2.807 \times 10^8$  J/kgmol ของเชื้อเพลิง และพลังงานกระตุ้นสำหรับการปลดปล่อยสารระเหยแบบ Single Kinetic Rate  $2.7 \times 10^7$  J/kgmol ค่าความร้อนเชื้อเพลิงสูงสุด (High Heating Value) 3,552 Kcal/kg ความเร็วอากาศส่วนที่หนึ่ง 8.96 m/s ความเร็วอากาศส่วนที่สอง 6.7 m/s

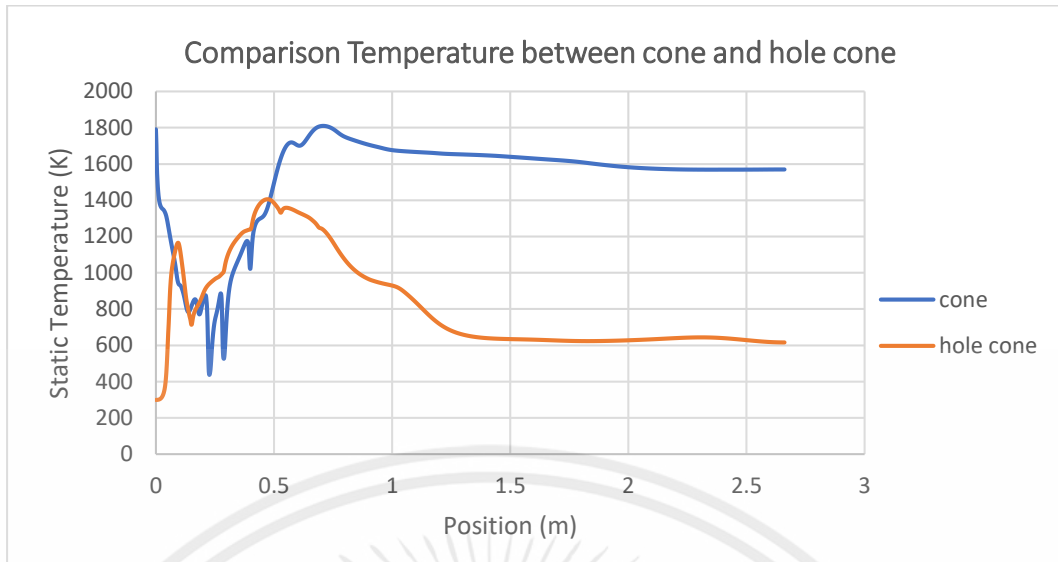
### 5.3.1 การกระจายตัวอุณหภูมิ



รูปที่ 5.11 แสดงอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้จากการจำลองที่มีวัตถุการไหลรูปทรงกรวยตัน



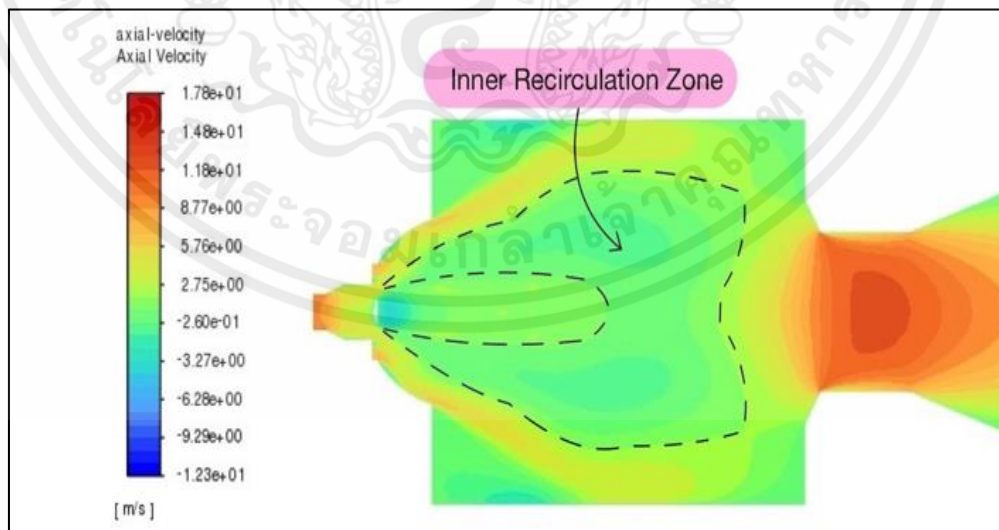
รูปที่ 5.12 แสดงอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้จากการจำลองที่มีวัตถุการไหลรูปทรงกรวยเจาะรู



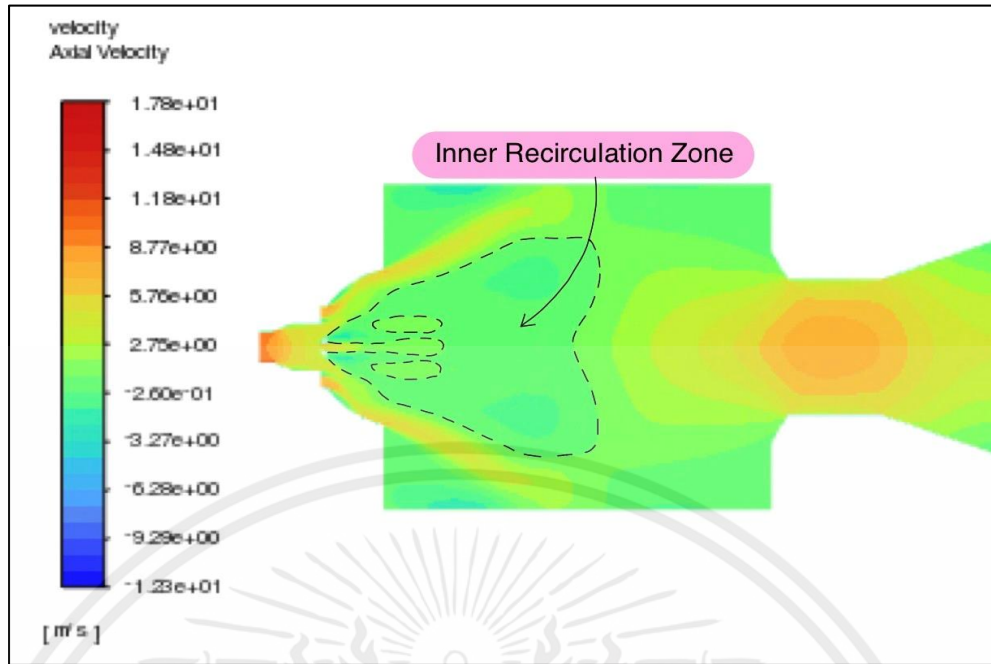
รูปที่ 5.13 กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่กึ่งกลางห้องเผาไหม้ที่มีตัวขวางการไหลเป็นรูปทรงกรวยตันและรูปทรงกรวยเจาะรู

จากอุณหภูมิที่แสดงไว้ในรูปที่ 5.3 และ 5.4 สังเกตได้ว่าของห้องเผาไหม้ที่มีวัตถุขวางการไหลเป็นรูปทรงกรวยตันมีการกระจายความร้อนสูงเป็นวงกว้างและทั่วทั้งห้องเผาไหม้ช่วยและห้องเผาหลัก ในขณะที่ห้องเผาไหม้ที่มีวัตถุขวางการไหลเป็นรูปทรงกรวยเจาะรูมีการกระจายความร้อนที่ต่ำกว่าและพื้นที่การกระจายความร้อนน้อยกว่า ขณะที่รูปที่ 5.5 แสดงอุณหภูมิบริเวณแกนกลางห้องเผาไหม้พบว่ากรณีวัตถุขวางการไหลรูปทรงกรวยเจาะรูมีอุณหภูมิสูงกว่า

### 5.3.2 ความเร็วในห้องเผาไหม้



รูปที่ 5.14 แสดงความเร็วของการไหลภายในห้องเผาไหม้จากการจำลองที่มีวัตถุการไหลรูปทรงกรวยตัน

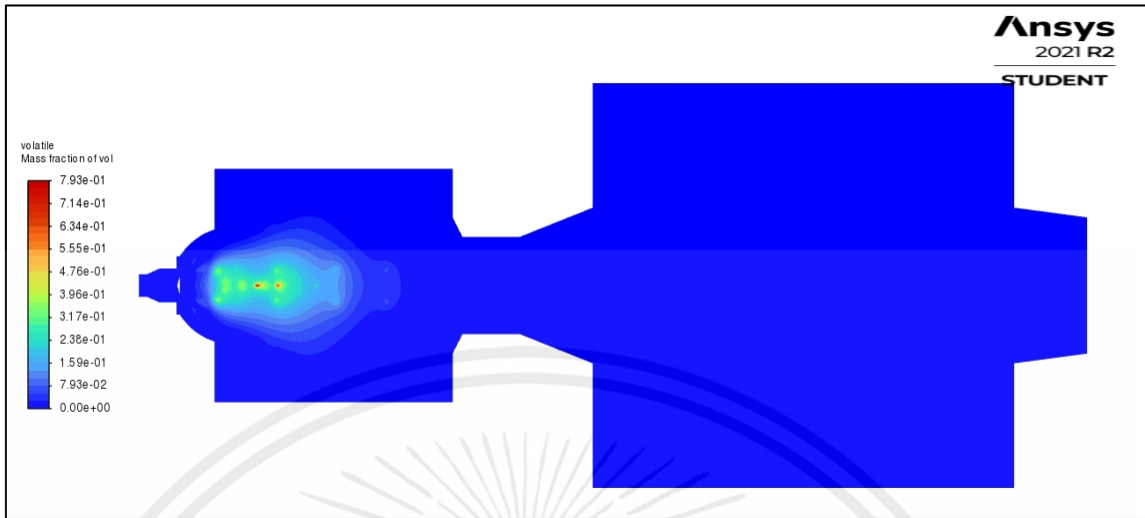


รูปที่ 5.15 แสดงความเร็วของการไหลภายในห้องเผาไหม้จากการจำลองที่มีวัตถุการไหลรูปทรงกรวยเจาะรู

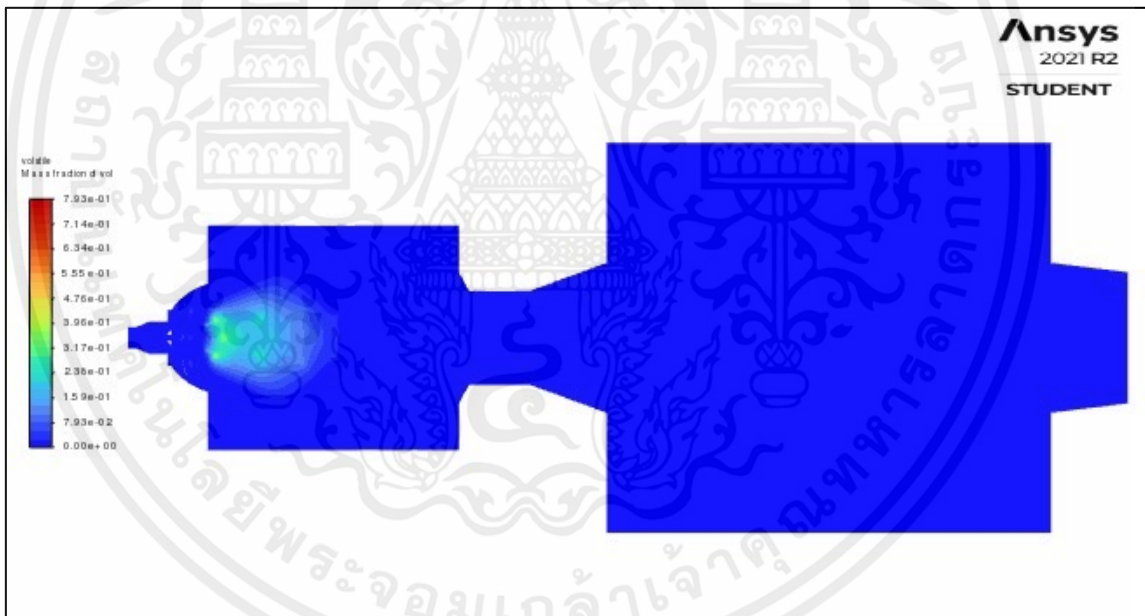
จากภาพคอนทัวร์ที่แสดงความเร็วของเปลวไฟในการเผาไหม้ สังเกตได้ว่าบริเวณหลังวัตถุขวางการไหลของทั้ง 2 กรณี มีค่าความเร็วไหลย้อนกลับที่พอ ๆ กัน แต่ในกรณีของวัตถุขวางการไหลทรงกรวยตันจะมีบริเวณพื้นที่การไหลหมุนวนยาวและกว้างกว่ากรณีของวัตถุขวางการไหลทรงกรวยเจาะรู ซึ่งพื้นที่ที่เกิดจากการขวางการไหลอนุภาคของวัตถุขวางการไหลทำให้เกิดการไหลหมุนวนขึ้นมา การไหลหมุนวนนี้เป็นการนำความร้อนจากการเผาไหม้มาแลกเปลี่ยนความร้อนให้กับอนุภาคที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้เพื่อคงเสถียรภาพของเปลวไฟและเร่งการปลดปล่อยสารระเหย

ความเร็วก๊าซไอเสียในกรณีทรงกรวยเจาะรูสอดคล้องกับอุณหภูมิบริเวณแกนกลางห้องเผาไหม้ในรูปที่ 5.5 โดยเนื่องจากอากาศส่วนที่หนึ่งและเชื้อเพลิงถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน เข้าสู่ห้องเผาไหม้ผ่านรูตรงกลางวัตถุขวางการไหลและอีกส่วนออกบริเวณส่วนข้าง ทำให้โมเมนต์ของส่วนผสมที่จะนำอนุภาคเข้าสู่กระแสน้ำของอากาศส่วนที่สองและชนผนังเพื่อวนกลับสู่กลางห้องเผาไหม้ต่ำลงเกิดเป็นการไหลหมุนวนที่แคบ ก๊าซร้อนบางส่วนย้อนกลับมาบริเวณกลางห้องเผาไหม้เร็วกว่ากรณีวัตถุขวางการไหลรูปทรงกรวยตันจึงทำให้อุณหภูมิบริเวณกลางห้องเผาไหม้ช่วยในกรณีทรงกระบอกเจาะรูสูงกว่าดังแสดงในรูปที่ 5.5 แต่อย่างไรก็ตาม ยังคงให้การกระจายอุณหภูมิที่แย่กว่าในบริเวณกว้าง

### 5.3.3 สัดส่วนโดยมวลของสารระเหยเผาไหม้ได้



รูปที่ 5.16 แสดงความเข้มข้นสัดส่วนมวลของสารระเหยภายในห้องเผาไหม้จากการจำลองที่มีวัตตูลูกกลมรูปทรงกรวยตัน



รูปที่ 5.17 แสดงความเข้มข้นสัดส่วนมวลของสารระเหยภายในห้องเผาไหม้จากการจำลองที่มีวัตตูลูกกลมรูปทรงกรวยเจาะรู

จากภาพคอนทัวร์ที่แสดง สันเกตว่าความเข้มข้นสัดส่วนเชิงมวลของสารระเหยในห้องเผาไหม้ที่มีวัตตูลูกกลมรูปทรงกรวยตันนั้นมีความเข้มข้นมากกว่ากรณีการเผาไหม้ที่มีวัตตูลูกกลมรูปทรงกรวยเจาะรู ซึ่งความเข้มข้นของสารระเหยต้องมีปริมาณมากพอที่จะติดไฟได้ หากมีปริมาณความเข้มข้นน้อยก็มีความเสี่ยงที่จะทำให้เปลวไฟดับ

จากการวิเคราะห์การกระจายตัวอุณหภูมิ ความเร็ว และสัดส่วนโดยมวลของสารระเหย สรุปได้ว่าวัตถุขวางการไหลรูปทรงกรวยตันส่งผลให้การเผาไหม้มีประสิทธิภาพได้ดีกว่าวัตถุขวางการไหลรูปทรงกรวยเจาะรู เนื่องจากการสร้างพื้นที่การไหลหมุนวนที่กว้างทำให้เกิดการหมุนวนแลกเปลี่ยนความร้อนภายในห้องเผาไหม้และอนุภาคที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้ เพิ่มความปั่นป่วนการไหลของอากาศ และเชื้อเพลิงที่มีปริมาณความเข้มข้นมากพอให้ส่วนผสมเป็นเนื้อเดียวกันเกิดปฏิกิริยาเคมีการเผาไหม้ เชื้อเพลิงจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศและปลดปล่อยความร้อนออกมา ซึ่งปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงมากพอทำให้เปลวไฟติดอย่างต่อเนื่อง จากที่กล่าวมาข้างต้นเป็นปัจจัยที่ทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์และรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟได้ดี



## บทที่ 6

# สรุปผลและข้อเสนอแนะ

### 6.1 บทสรุป

การศึกษาอิทธิพลของรูปทรงวัตถุขวางการไหลที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้เชื้อเพลิงผง ได้ทำการจำลองการไหลของอากาศผ่านวัตถุขวางการไหล 3 รูปทรง ได้แก่ ทรงกรวยตัน ทรงกระบอก และทรงกรวยเจาะรู เพื่อศึกษาพื้นที่การไหลหมุนวนและความเร็วของอากาศที่คาดว่าจะทำให้เปลวไฟเสถียรภาพมากที่สุด จากนั้นได้ทำการจำลองและทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงยางพาราผง โดยมีวัตถุขวางการไหล 2 รูปทรง ได้แก่ รูปทรงกรวยตัน และรูปทรงกรวยเจาะรู เพื่อศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ พื้นที่การไหลหมุนวน (recirculation zone) และความเข้มข้นของสัดส่วนเชิงมวลของสารระเหย (mass fraction of volatile) ที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้

จากการจำลองการไหลของอากาศโดยตั้งเงื่อนไขการจำลองผลทางคอมพิวเตอร์ เพื่อสังเกตรูปแบบการไหลของอากาศ โดยใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) แบบ  $k-\epsilon$  โดยมีอัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิ 0.0462 kg/s และอัตราการไหลของอากาศทุติยภูมิ 0.075 m/s คำนวณเป็นความเร็วของอากาศปฐมภูมิและความเร็วของอากาศทุติยภูมิได้ 8.96 m/s และ 6.7 m/s ตามลำดับ กำหนดความเร็วการไหลหมุนวน (Swirl velocity) 6.8 m/s และให้ทุกสมการลู่เข้าที่  $10^{-4}$  พบว่า พื้นที่การไหลหมุนเวียนของวัตถุขวางการไหลทุกกรณีมีขนาดใกล้เคียงกัน แต่รูปทรงกรวยเจาะรูมีแนวโน้มทำให้เปลวไฟมีเสถียรภาพมั่นคงมากกว่ารูปทรงอื่น ๆ เนื่องจากความเร็วในช่วงเริ่มต้นที่ตำแหน่งหลังวัตถุขวางการไหลมีค่าสูงมากเพราะเปลวไฟจากหัวเผาที่ผ่านเข้ามาในรูเจาะอาจช่วยทำให้สารระเหยทำปฏิกิริยากับก๊าซออกซิเจนได้ดีและอุณหภูมิในห้องเผาไหม้สูงขึ้น อีกทั้งความเร็วไหลย้อนกลับที่มีค่าค่อนข้างต่ำส่งผลให้ไม่เกิดการกระทบอย่างรุนแรงกับวัตถุขวางการไหลทำให้ไม่สึกหรออย่างรวดเร็วเกินไป จากเหตุผลที่กล่าวมาทั้งหมดจึงตัดสินใจเลือกวัตถุขวางการไหลรูปทรงกรวยเจาะรูและทรงกรวยเพื่อเปรียบเทียบในการทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงผง

จากการจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงยางพารา ความชื้น 20 เปอร์เซ็นต์ ทำการตรวจสอบเรื่องอิทธิพลของจำนวนกริด (Mesh Independence) เลือกอิทธิเมนต์ขนาด 0.002 เมตร จำลองการไหลแบบ k-standard ค่าเอนทัลปีมาตรฐาน  $-2.807 \times 10^8$  J/kgmol ของเชื้อเพลิง และพลังงานกระตุ้นสำหรับการปลดปล่อยสารระเหยแบบ Single Kinetic Rate  $2.7 \times 10^7$  J/kgmol ค่าความร้อนเชื้อเพลิงสูงสุด (High Heating Value) 3,552 Kcal/kg อากาศส่วนเกิน 15 เปอร์เซ็นต์ ความเร็วอากาศส่วนที่หนึ่ง 8.96 m/s ความเร็วอากาศส่วนที่สอง 6.7 m/s เงื่อนไขการทดลองการเผาไหม้ ความร้อน 300 กิโลวัตต์ความร้อน อัตราการไหลอากาศส่วนที่หนึ่ง  $0.024 \text{ m}^3/\text{s}$  อัตราการไหล

อากาศส่วนที่สอง  $0.06252 \text{ m}^3/\text{s}$  อัตราการไหลอากาศส่วนที่หนึ่ง  $0.009618 \text{ m}^3/\text{s}$  อัตราการป้อน  
เชื้อเพลิง  $1.54 \text{ Hz}$

จากการสอบเทียบการจำลองการเผาไหม้และผลการทดลอง พบว่าผลการจำลองของกรณี  
วัตถุขวงการไหลรูปทรงกรวยตัน มีการกระจายตัวอุณหภูมิที่สูงกว่าผลการทดลอง และในการทดลอง  
เชื้อเพลิงมีความชื้นสูง สังเกตได้จากขณะทดลองเชื้อเพลิงจับตัวกันเป็นก้อน และเกิดหยดน้ำเกาะ  
บริเวณด้านในของกระจกทนไฟ ทำให้ความร้อนอาจจะไปไม่ถึงกระบวนการปลดปล่อยสารระเหย ใน  
กรณีวัตถุขวงการไหลรูปทรงกรวยเจาะรู จากผลการจำลองสังเกตได้ว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิ  
สูงในช่วงต้นของห้องเผาไหม้ช่วย จากนั้นอุณหภูมิลดลงเรื่อย ๆ ในขณะที่ผลการทดลองมีการกระจาย  
ตัวของอุณหภูมิสูงในช่วงต้นของห้องเผาไหม้ช่วย จากนั้นมีการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ค่อนข้าง  
สม่ำเสมอ เนื่องมาจากอุปกรณ์วัดอุณหภูมิขวงการไหล เมื่อพื้นระยะ  $0.25$  เมตร ไป พบว่าผลการ  
จำลองและการทดลองมีระดับอุณหภูมิที่เท่า ๆ กัน อย่างไรก็ตามแนวโน้มการเพิ่มอุณหภูมิตามความ  
ยาวของห้องเผาไหม้ช่วยเหมือนกัน จึงใช้เงื่อนไขข้างต้นในการศึกษาเชิงเปรียบเทียบ

จากการเปรียบเทียบผลการจำลองของทั้ง 2 กรณี พบว่าการเผาไหม้ที่มีวัตถุขวงการไหล  
รูปทรงกรวยตันสร้างพื้นที่การไหลหมุนวนที่กว้างกว่าอีกกรณี ทำให้เกิดการหมุนวนก๊าซร้อนกลับมา  
ถ่ายเทความร้อนให้กับสารระเหยที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้ได้ดี เกิดปฏิกิริยาเคมีการเผาไหม้ระหว่างสาร  
ระเหยและออกซิเจนในอากาศปลดปล่อยความร้อนออกมา โดยอุณหภูมิสูงเกิดตั้งแต่บริเวณพื้นที่การ  
ไหลหมุนวนที่มีสารระเหยเข้มข้นรวมไปถึงทั่วทั้งห้องเผาไหม้ช่วยและห้องเผาไหม้หลัก ในขณะที่กรณี  
การเผาไหม้ที่มีวัตถุขวงการไหลรูปทรงกรวยเจาะรู แม้ว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิที่กึ่งกลางเตา  
บริเวณหลังวัตถุขวงการไหลจะมากกว่ากรณีของรูปทรงกรวยตัน เนื่องจากอากาศส่วนที่หนึ่งและ  
เชื้อเพลิงถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน เข้าสู่ห้องเผาไหม้ผ่านรูตรงกลางวัตถุขวงการไหลและอีกส่วนออก  
บริเวณส่วนข้าง ทำให้โมเมนต์ของส่วนผสมที่จะนำอนุภาคเข้าสู่กระแสของอากาศส่วนที่สองและชน  
ผนังเพื่อวนกลับสู่กลางห้องเผาไหม้ต่ำลง เกิดเป็นการไหลหมุนวนที่แคบ ก๊าซร้อนบางส่วนย้อนกลับมา  
บริเวณกลางห้องเผาไหม้เร็วกว่ากรณีของวัตถุขวงการไหลรูปทรงกรวยตัน ซึ่งอุณหภูมิสูงเกิดเพียง  
บริเวณพื้นที่การไหลหมุนวนที่มีสารระเหยเข้มข้น บริเวณที่เป็นทางเข้าของอากาศส่วนที่สอง และ  
บริเวณกึ่งกลางห้องเผาไหม้ช่วย แต่พื้นที่การไหลหมุนวนที่แคบและสั้น รวมถึงความเข้มข้นของสาร  
ระเหยที่น้อยกว่าทำให้มีเสถียรภาพของเปลวไฟน้อยกว่าอีกกรณี

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

จากการทดลองการเผาไหม้พบว่าการไหลของเชื้อเพลิงเพื่อเข้าสู่ห้องเผาไหม้ไม่เสถียร ทำให้  
เปลวไฟติดอย่างไม่มีเสถียรภาพและไม่ต่อเนื่อง รวมถึงการสังเกตเปลวไฟผ่านกระจกข้างเตาทำได้ยาก

สาเหตุมาจากไอความชื้นที่เกาะตัวบนกระจก เนื่องจากเชื้อเพลิงชีวมวลมีความชื้นสูงทำให้จับตัวกันเป็นก้อน มีอนุภาคขนาดใหญ่ เมื่อเข้าสู่ห้องเผาไหม้เชื้อเพลิงจึงตกลงสู่พื้นในขณะที่อากาศลอยอยู่ด้านบนทำให้การคลุกเคล้ากันระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศเป็นไปได้ยาก เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ดังนั้นจึงควรมีที่จัดเก็บเชื้อเพลิง เพื่อป้องกันปัญหาเชื้อเพลิงมีความชื้นมากเกินไป



## เอกสารอ้างอิง

- [1] การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแม่เมาะ, ประเทศไทย (2561). Co-firing เมื่อชีวมวลสามารถเป็นพลังงานแก่โรงไฟฟ้าถ่านหิน, แหล่งที่มา <http://maemoh.egat.com>
- [2] สำนักงานปลัดกระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สป.อว.), ประเทศไทย (2563). ทำความรู้จักการสันดาป, แหล่งที่มา <https://www.stkc.go.th>
- [3] ฉัตรเฉลิม และคณะ (2563). การศึกษาเชิงทดลองและจำลองอิทธิพลของอุปกรณ์ช่วยสร้างการไหลหมุนควง, คณะวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, หน้า 11-12.
- [4] Ghobad Bagheri, Seyed Ehsan Hosseini and Mazlan Abdul Wahid, Faculty of Mechanical Engineering, Universiti Teknologi Malaysia (2014). Effects of bluff body shape on the flame stability in premixed micro-combustion of hydrogen-air mixture , Apply Thermal Engineering 67 (2014) 266-272.
- [5] S.M.S EL-FEKY and Antal PENNINGER, Heat Engine Department Technical University of Budapest, Hungary (1994). A Study of Flammability Lean Limit for A Bluff Body Stabilized Flame 1994. pp 1-12.
- [6] W. M. A. W. Shuib, Azam Che Idris, Mohd Rasdan Saad, Mohd Faizal Hasan, Mohd Rosdzimin Abdun Rahman, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering Universiti Pertahanan Nasional Malaysia, Malaysia (2018). Study on The Effect of Bluff Body with Slit in the Micro-channel Combustor, Advanced research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences 52, Issue 2 (2018) 215-222.
- [7] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, ประเทศไทย. การสันดาป (Combustion Technology), แหล่งที่มา <https://www.dede.go.th>
- [8] Anne Marie Helmenstine, Ph.D (2019). Stoichiometry Definition in Chemistry, URL:<https://www.thoughtco.com>
- [9] บริษัท เอ็นเนอร์ยี่ วิชั่น จำกัด, ประเทศไทย (2562). พลังงานชีวมวล, แหล่งที่มา <http://www.energyvision.co.th>
- [10] Rahat Inayat Ali, Chemical Engineering at Mehran University of Engineering and Technology, Jamshoro (2016). Flame Stability, Mar 2016.