

อิทธิพลของอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงแบบครีบนำร่องและวัตถุขวางการ  
ไหลต่อการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวลผงที่ 300 kW<sub>th</sub>

INFLUENCE OF VANE – TYPE SWIRL GENERATOR AND BLUFF BODY ON  
PULVERIZED BIOMASS COMBUSTION AT 300 kW<sub>th</sub>



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2563

KMITL-2020-EN-M-030-003

อิทธิพลของอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงแบบครีบนำร่องและวัตถุขวางการ  
ไหลต่อการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวลผงที่ 300 kW<sub>th</sub>

INFLUENCE OF VANE – TYPE SWIRL GENERATOR AND BLUFF BODY ON  
PULVERIZED BIOMASS COMBUSTION AT 300 kW<sub>th</sub>



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ.2563  
KMITL-2020-EN-M-030-003

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INFLUENCE OF VANE – TYPE SWIRL GENERATOR AND BLUFF BODY ON  
PULVERIZED BIOMASS COMBUSTION AT 300 kW<sub>th</sub>



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN MECHACAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2020

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KMITL-2020-EN-M-030-003



COPYRIGHT 2020

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	อิทธิพลของอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงแบบครึ่งนำร่อง และวัตถุขวางการไหลต่อการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวลผงที่ 300 kW <sub>th</sub>
นักศึกษา	นายฉัตรเฉลิม แก้วชมภู
รหัสประจำตัว	60601201
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2563
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ เกี่ยวข้องกับการศึกษาเชิงทดลองและการจำลองเชิงตัวเลข เพื่อศึกษาอิทธิพลของแผ่นบังคับทิศทางการไหลและระยะห่างของวัตถุขวางการไหลต่อการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผงที่ 300 กิโลวัตต์ความร้อน ที่ประกอบด้วย 3 ประเด็นหลัก ได้แก่ 1.การทดลองการเผาไหม้ด้วยปรับตั้งแผ่นบังคับทิศทางการไหลแบบตรง ที่มุม 100 องศา และ ชนิดใบโค้งที่มุม 70 และ 85 องศา 2.การจำลองตัวแปร ได้แก่ ค่าเอนทัลปีมาตรฐาน และ ค่า activation energy สำหรับการปลดปล่อยสารระเหย ร่วมกับสมการการไหลปั่นป่วน  $k-\epsilon$  3.การจำลองการเผาไหม้ด้วยปรับตั้งแผ่นบังคับทิศทางการไหลแบบตรง ที่มุม 100 องศา และ ชนิดใบโค้งที่มุม 70 และ 85 องศา

จากการทดลองพบว่า เมื่อติดตั้งวัตถุขวางการไหลที่ 10 มิลลิเมตร และทำการปรับตั้งแผ่นบังคับทิศทางการไหลแบบตรง ที่มุม 100 องศา และ ชนิดใบโค้งที่มุม 70 องศา พบว่าทั้งสองมุมไม่สามารถสร้างกระแสการไหลแบบหมุนควงที่แรงเพียงพอ จึงไม่สามารถกระจายอนุภาคเพื่อไปผสมอากาศทุติยภูมิมากพอที่จะทำให้เกิดการเผาไหม้ที่มีเสถียรภาพได้ โดยสังเกตเห็นลำของเชื้อเพลิงพุ่งเข้าสู่ห้องเผาไหม้หลัก และตรวจพบอนุภาคน้ำมันสูงที่สุดที่บริเวณทางออกของห้องเผาไหม้ช่วย ปริมาณคาร์บอนมอนนอกไซด์ที่วัดได้ 1,956 และ 553 ppm. ไนโตรเจนออกไซด์ 243 และ 295 ppm สำหรับกรณีใบตรงมุม 100 องศา และกรณีใบโค้งมุม 70 องศา ตามลำดับ ที่มาตรฐานออกซิเจนร้อยละ 7 ในเอเชีย เมื่อทำการปรับแผ่นบังคับทิศทางการไหลชนิดใบโค้งที่มุม 85° สามารถกระจายเชื้อเพลิงให้ผสมกับอากาศทุติยภูมิ ส่งผลให้บริเวณที่มีอนุภาคน้ำมันสูงกระจายตัวทั่วทั้งห้องเผาไหม้ช่วย โดยตรวจพบปริมาณคาร์บอนมอนนอกไซด์ 107.5 ppm ไนโตรเจนออกไซด์ 246 ppm โดยเปรียบเทียบที่มาตรฐานเดียวกัน ดังนั้นมุมมองที่กว้างกว่าไม่ได้ส่งผลต่อระดับความรุนแรงของการไหลหมุนควง แต่ขึ้นอยู่กับลักษณะของใบที่เอื้อต่อการไหลของอากาศ ในส่วนของการปรับระยะห่างของวัตถุขวางการไหลเป็น 20 มิลลิเมตรและแผ่นบังคับทิศทางการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไหล 85 องศา ส่งผลให้ขนาดพื้นที่ทางออกของหัวพ่นเชื้อเพลิงใหญ่ขึ้น ดังนั้นความเร็วของอากาศปฐมภูมิจึงมีค่าลดลงที่อัตราการเผาไหม้เดียวกัน ทำให้อุณหภูมิของบริเวณใกล้เคียงผนังสูงกว่าระยะของวัตถุขวางการไหลที่ 10 มิลลิเมตร จากกรณีที่ตั้งระยะวัตถุขวางการไหลที่ 20 มิลลิเมตร ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์และไนโตรเจนออกไซด์ ได้แก่ 139, 314 ppm ตามลำดับ

การจำลองพารามิเตอร์ที่สำคัญได้แก่ ค่าเอนทัลปีมาตรฐาน  $-2.9 \times 10^8 \text{ J/kgmol}$  และค่า activation energy สำหรับการปลดปล่อยสารระเหย  $1.36 \times 10^7 \text{ J/kgmol}$  ร่วมกับสมการการไหลปั่นป่วน  $k-\epsilon$  Realizable ให้ความผิดพลาดของผลลัพธ์ของการจำลองร้อยละ 19.38 เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลอง

ผลการจำลองการติดตั้งวัตถุขวางการไหลที่ระยะ 10 มิลลิเมตร ร่วมกับแผ่นบังค้ำทิศทางทางไหลแบบตรง 100 องศา ใบโค้ง 70 องศา และ 85 องศา ให้ตัวเลขการไหลหมุนควง 0.84 0.74 และ 1.48 ตามลำดับ ในขณะที่ความเข้มข้นของสปีชีส์ที่ได้จากการจำลองทั้ง 3 กรณี ปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ 113 91.85 และ 29.4 ppm ตามลำดับ และไนโตรเจนออกไซด์ 170.29 164.74 และ 197.43 ppm ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบที่มาตรฐานเดียวกัน จึงสามารถสรุปได้ว่าการไหลหมุนควงภายในห้องเผาไหม้ช่วยให้เกิดพื้นที่การไหลหมุนวนย้อนกลับที่ขนาดขึ้นอยู่กับขนาดความรุนแรงของการไหลหมุนควง สารระเหยและคาร์บอนมอนอกไซด์เกิดขึ้นสูงบริเวณพื้นที่การไหลหมุนวนย้อนกลับนี้ ส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนต่ำ อุณหภูมิบริเวณขอบการไหลหมุนวนจึงสูง ในส่วนของการจำลองเพิ่มระยะของวัตถุขวางการไหลเป็น 20 มิลลิเมตร ทำให้ลดโมเมนต์ของอากาศปฐมภูมิ อีกทั้งยังช่วยให้อนุภาคเคลื่อนที่ในห้องเผาไหม้นานขึ้น อุณหภูมิบริเวณใกล้เคียงผนังจึงสูงขึ้นตามมา อย่างไรก็ตามการผสมระหว่างอากาศกับสปีชีส์ที่เกิดขึ้นจากการปลดปล่อยสารระเหยบริเวณปลายห้องเผาไหม้ช่วยไม่ตีจึงพบคาร์บอนมอนอกไซด์ 55.1 ppm ไนโตรเจนออกไซด์ 235.21 ppm.

<b>Thesis</b>	Influence of Vane – Type Swirl Generator and Bluff Body On Pulverized Biomass Combustion at 300 kW <sub>th</sub>
<b>Student</b>	Mr. Chatchalerm Kaewchompoo
<b>Student ID.</b>	60601201
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Mechanical Engineering
<b>Year</b>	2020
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc.Prof.Dr.Jaruwat Charoensuk

## ABSTRACT

This thesis concern with, experimental investigation and simulation on influence of swirl generator and bluff body distance on pulverized biomass combustion at 300 kW<sub>th</sub>. This work consists of 3 topics which are 1. Combustion experiment with flat type swirler at 100 vane angle, curved type swirler at 70 and 85 vane angle 2. Parametric study of standard enthalpy and Activation energy of devolatilization with  $k-\epsilon$  turbulent model 3. Combustion simulation of 3 experiment cases.

From experiment, the result of flat plate swirler at 100° and curved vane swirler at 70° installed with 10 mm. of bluff body distance had failed to create sufficient centrifugal force in order to spread biomass particle to mix with secondary air. It was observed that the unburned pulverized jet penetrates though the pre-chamber and high temperature zone was detected near pre-chamber outlet. CO concentrations were 1,956 and 553 ppm. for flat vane swirler of 100-degree vane angle and curved vane swirler of 70 degree of vane angle respectively. As far as NO<sub>x</sub> concentrations was concerned the flat vane swirler with 100 degree gave NO emission at 243 whereas the curved vane at 70 degree gave NO emission at 295 ppm. (corrected at 7 %O<sub>2</sub>) However, curved vane swirler at 85° gave better spread of biomass particle to causing high temperature distribution in a pre-chamber. CO and NO<sub>x</sub> concentrations in this case were 107.5 and 246 ppm., respectively. The curved vane swirler of 85° with distance of bluff body 20 mm. decreased momentum of primary air resulting in an increase of

near wall temperature as compare with the case where the distance of a bluff body was set at 10 mm. With bluff body distance of 20 mm. The CO concentration of exhaust gas was 139 ppm and NO<sub>x</sub> 317 ppm

Parametric study gave the standard enthalpy  $-2.9 \times 10^8$  J/kgmol and Activation energy of devolatilization  $1.36 \times 10^7$  J/kgmol with  $k-\epsilon$  Realizable equation showed that the average error was 19.38 percent.

The simulation of the case with flat plat swirler at 100°, curved vane swirler at 70° and 85° yielded swirl numbers 0.84 0.74 and 1.48, respectively. Species concentrations of 3 cases showed CO emission at 113, 91.85 and 29.4 ppm. NO<sub>x</sub> 170.29, 164.74 and 197.43 ppm, respectively. This was a result from swirl flow intensity in combustion chamber. High volatile CO and low O<sub>2</sub> occurred in recirculation zone. This corresponded with high temperature zone in a combustion chamber. In case of bluff body distance, the distance of 20 mm. decreased a primary air momentum and increased particle residence time. It has resulted high temperature in circumference of recirculation zone. However, air and volatile were not well mixed as compared with the case where the bluff body were located at 10 mm. from burner tip. CO was 55.1 ppm. and NO<sub>x</sub> was 235.21 ppm.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ต้องขอขอบพระคุณ รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ให้ความรู้ คำแนะนำ ในการทำงานวิจัยครั้งนี้ ตลอดจนอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่ได้สนับสนุน เป็นห่วงและให้คำแนะนำในการศึกษาและการใช้ชีวิต จนทำให้ข้าพเจ้ามีความซาบซึ้งใจอย่างยิ่ง

ขอขอบคุณ น้องวิศวกรรมเครื่องกล ปี พ.ศ. 2560 และ 2561 ที่คอยช่วยเหลือ ข้าพเจ้าในการเก็บผลการทดลอง ที่ขาดไม่ได้ คือ คุณ กิตติภาส และ คุณ เกษมศิลป์ ที่คอยให้การช่วยเหลืออยู่เสมอ อีกทั้งยังขอขอบคุณกำลังใจจากแดนไกลมา ณ ที่นี้ด้วย

แต่อย่างไรก็ดีผู้ที่สำคัญที่สุดที่ต้องขอบพระคุณคือ ครอบครัวของข้าพเจ้า ไม่ว่าจะเป็น บิดา มารดา พี่ชาย และญาติ ที่คอยให้การสนับสนุน คำปรึกษาที่ดี ให้กำลังใจจนกระทั่งสามารถมาถึงจุดนี้ได้ ถ้าหากขาดบุคคลเหล่านี้ วิทยานิพนธ์เล่มนี้คงไม่อาจสำเร็จได้

ฉัตรเฉลิม แก้วชมภู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	V
สารบัญ.....	VI
สารบัญตาราง.....	XII
สารบัญรูป.....	XIII
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	XVIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.5 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์.....	5
2.1 ความสำคัญและศักยภาพของเชื้อเพลิงชีวมวล.....	5
2.2 หัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผง.....	5
2.3 อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควง.....	7
2.4 วัตถุประสงค์การไหล.....	10
2.5 การจำลองการเผาไหม้.....	12
2.5.1 แบบจำลองการเผาไหม้ถ่านชาร์.....	13
2.5.2 แบบจำลอง gas phase combustion.....	14
2.5.3 แบบจำลองการแผ่รังสี.....	15
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	16
3.1 เชื้อเพลิงแข็ง.....	16
3.2 เชื้อเพลิงชีวมวล.....	16
3.2.1 ศักยภาพของเชื้อเพลิงชีวมวล.....	17
3.3 การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง.....	17
3.3.1 สโตยชิโอเมตรี (Stoichiometry).....	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.2 อัตราส่วนสมมูล (equivalence ratio).....	19
3.4 เอนทัลปีมาตรฐานและเอนทัลปีก่อกำเนิด (Standardized enthalpy and Enthalpy of formation).....	20
3.5 เอนทัลปีของการเผาไหม้และค่าความร้อน (Enthalpy of combustion and Heating value).....	20
3.6 การปลดปล่อยมลพิษและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม.....	21
3.6.1 การก่อตัวของคาร์บอนมอนอกไซด์.....	22
3.6.2 การก่อตัวของไนโตรเจนออกไซด์.....	22
3.6.3 ฝุ่นและเขม่า.....	26
3.7 เทคโนโลยีการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง.....	27
3.7.1 เตาเผาแบบเบดเชื้อเพลิง.....	27
3.7.2 ระบบสโตกเกอร์ทางกล (Mechanical Stokers).....	28
3.7.2.1 ระบบสโตกเกอร์แบบตะแกรงเลื่อน (Travelling grate stoker).....	28
3.7.2.2 ระบบสโตกเกอร์แบบตะแกรงโซ่ (Chain grate stocker).....	29
3.7.2.3 ระบบสโตกเกอร์แบบกระจาย (Spreader stocker).....	29
3.7.2.4 สโตกเกอร์ที่มีการป้อนเชื้อเพลิงทางด้านล่าง (Underfeed stocker).....	29
3.7.3 ระบบเผาไหม้เชื้อเพลิงผง (Pulverized).....	29
3.7.4 ไซโคลน (Cyclone).....	30
3.7.5 ระบบฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized Bed).....	30
3.8 ชนิดของเปลวไฟ.....	30
3.9 เทคนิคการรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟ.....	31
3.9.1 วัตถุขวางการไหล (Bluff body).....	31
3.9.2 อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควง (Swirler).....	32
3.9.2.1 ตัวเลขการหมุนควง (Swirl number).....	33
บทที่ 4 ทฤษฎีสำหรับการจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง.....	35
4.1 สมการความต่อเนื่องและโมเมนตัม.....	35
4.2 แบบจำลองการไหลปั่นป่วน (Turbulent model).....	36

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.1 แบบจำลอง k- ชนิด มาตรฐาน.....	37
4.2.1.1 แบบจำลองความหนืดปั่นป่วน (Turbulent Viscosity) .....	38
4.2.2 แบบจำลอง k- ชนิด Re-Normalization Group (RNG).....	38
4.2.2.1 แบบจำลองประสิทธิภาพ( Effective Viscosity).....	39
4.2.3 แบบจำลอง k- ชนิด Realizable .....	39
4.2.3.1 Turbulence viscosity .....	40
4.3 แบบจำลองการแผ่รังสี (Radiation model) .....	41
4.3.1 แบบจำลองการแผ่รังสี Discrete Ordinates (DO).....	42
4.4 Discrete Phase Models .....	42
4.4.1 สมการการเคลื่อนที่ของอนุภาค(Equations of Motion for Particles).....	42
4.4.2การถ่ายเทความร้อน มวล และโมเมนตัม ระหว่างอนุภาคกับก๊าซร้อน.....	43
4.4.3 แบบจำลอง Discrete Random Walk.....	44
4.4.4 การแลกเปลี่ยนโมเมนตัม Momentum Exchange .....	44
4.4.5 การแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchange).....	45
4.4.6 การแลกเปลี่ยนมวล (Mass Exchange).....	45
4.5 แบบจำลองการถ่ายโอนสปีชีส์(Modeling Species Transport).....	46
4.5.1 Volumetric Reactions.....	46
4.5.1.1 The Generalized Finite-Rate Formulation for Reaction Modeling.....	46
4.5.1.1.1 Eddy-Dissipation Mode .....	46
4.5.1.1.2 การแพร่ของมวลในกระแสปั่นป่วน (Mass Diffusion in Turbulent Flows).....	47
4.5.1.1.3 กลไกการเกิดปฏิกิริยาเคมีแบบ 2 ชั้น .....	47
4.6 แบบจำลองสำหรับการเผาไหม้ (Combustion model).....	48
4.6.1 Law 1/Law 6: Inert Heating or Cooling model .....	48
4.6.2การปลดปล่อยสารระเหย (Devolatilization) .....	49
4.6.3 แบบจำลอง single kinetic rate .....	49
4.6.4 การถ่ายเทความร้อนสู่อนุภาคระหว่างการปลดปล่อยสารระเหย .....	50
4.6.5 การเผาไหม้บริเวณผิวSurface Combustion.....	50
4.6.5.1 แบบจำลอง Kinetic/Diffusion Surface Reaction Rate.....	51

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.7 Rosin ramler distribution.....	52
บทที่ 5 อุปกรณ์ ระบบสนับสนุนการทดลองและวิธีการทดลอง.....	53
5.1 อุปกรณ์และระบบสนับสนุนการทดลอง .....	53
5.1.1 อุปกรณ์ของระบบเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงและระบบสนับสนุนการทดลอง.....	53
5.1.1.1 หัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผง.....	54
5.1.1.2 ระบบเผาไหม้เชื้อเพลิง .....	55
5.1.1.3 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ .....	55
5.1.1.4 อุปกรณ์วัดองค์ประกอบของแก๊ส.....	56
5.1.2 ระบบป้อนอากาศ.....	56
5.1.3 ระบบควบคุมการทดลอง .....	57
5.1.4 ระบบบดและลำเลียงเชื้อเพลิง.....	58
5.1.5 ระบบบำบัดไอเสีย.....	59
5.2 การทดลองและวิธีการทดลอง .....	60
5.2.1 การทดลองหาขนาดอนุภาคด้วยวิธีการSieve Analysis.....	60
5.2.2 การทดลองหาอัตราการป้อนเชื้อเพลิงชีวมวล.....	60
5.2.3 การทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง .....	61
5.2.3.1 การอุ่นเตาด้วยLPG.....	61
5.2.3.2 การเริ่มทำการอุ่นเตาด้วยLPGและเชื้อเพลิงชีวมวล.....	61
5.2.3.3 การเริ่มทำเก็บผลการทดลอง.....	61
บทที่ 6 ผลการทดลอง.....	63
6.1 ผลการทดลองหาขนาดอนุภาคด้วยวิธีการSieve Analysis.....	63
6.2 ผลการทดลองหาอัตราการป้อนเชื้อเพลิงชีวมวล.....	64
6.3 การทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง.....	65
6.3.1 ผลการทดลองอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงร่วมกับการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง.....	66
6.3.1.1 อิทธิพลของอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงต่อการเคลื่อนที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้ของอนุภาค .....	66
6.3.1.2 อิทธิพลของอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงต่อการกระจายตัวของอนุภาคในห้องเผาไหม้ช่วย .....	67

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
6.3.1.3 อิทธิพลของอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงต่อ การปลดปล่อยมลพิษ .....	70
6.3.2 ผลการทดลองการปรับระยะของวัตถุขวางการไหลที่ระยะ 10 และ 20 มิลลิเมตรร่วมกับการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง.....	71
6.3.2.1 อิทธิพลของการปรับระยะของวัตถุขวางการไหล ที่ระยะ 10 และ 20 ต่อการกระจายตัวของอนุภาค .....	72
6.3.2.2 อิทธิพลของการปรับระยะของวัตถุขวางการไหลที่ ระยะ 10 และ 20 มิลลิเมตร ต่อการกระจายตัวของอนุภาคนหุมิ.....	73
6.3.2.3 อิทธิพลของการปรับระยะของวัตถุขวางการไหล ที่ระยะ 10 และ 20 มิลลิเมตร ต่อการปลดปล่อยมลพิษ .....	74
บทที่ 7 ผลการจำลอง.....	76
7.1 การหาจำนวนกริดที่เหมาะสมต่อการจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง .....	76
7.2 ผลการจำลองพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการเผาไหม้ .....	77
7.2.1 ผลการจำลองการลดค่าเอนทัลปีมาตรฐาน (Standard state enthalpy) ของสารระเหย .....	78
7.2.2 ผลการจำลองการไหลปั่นป่วน.....	80
7.2.3 การเพิ่มอัตราการปลดปล่อยสารระเหยโดยการลดค่า Activation energy.....	82
7.3 ผลการจำลองอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงต่อการเผาไหม้ .....	84
7.4 ผลการจำลองระยะของวัตถุขวางการไหลต่อการเผาไหม้ .....	98
บทที่ 8 สรุปผลการทดลองและการจำลอง.....	105
8.1 สรุปผลการทดลอง .....	105
8.1.1 การทดลองหาขนาดอนุภาคด้วยวิธีการSieve Analysis.....	105
8.1.2 การทดลองหาอัตราการป้อนเชื้อเพลิงชีวมวล .....	105
8.1.3 การทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง .....	105
8.2 สรุปผลการจำลอง .....	106
บทที่ 9 ข้อเสนอแนะ .....	108
เอกสารอ้างอิง .....	109
ภาคผนวก.....	113

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ก.งานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....	114
ภาคผนวก ข.แบบอุปกรณ์ทดสอบ.....	124
ประวัติผู้เขียน.....	131



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะของไบอูปรกรณ์สร้างการไหลหมุนควง.....	10
3.1 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะของถ่านหิน.....	16
6.1 แสดงการกระจายตัวของอนุภาคที่ผ่านตะแกรงขนาดต่าง ๆ .....	63
6.2 เงื่อนไขการทดลอง.....	65
7.1 เงื่อนไขขอบเขตสำหรับการจำลองพารามิเตอร์ .....	77
7.2 แสดงคุณสมบัติของเชื้อเพลิงและขนาดของเชื้อเพลิง .....	78
7.3 แสดงค่าเอนทัลปีมาตรฐานที่ใช้ในการจำลอง .....	79
7.4 ค่าความผิดพลาดของค่าตอบจากการจำลองโดยลดค่าเอนทัลปีมาตรฐาน .....	79
7.5 แสดงความคลาดเคลื่อนจากการจำลองสมการความปั่นป่วน .....	81
7.6 ค่าactivation energy สำหรับการทดลอง .....	82
7.7 แสดงอัตราการลดลงของค่าactivation energyและค่าร้อยละความผิดพลาด .....	83
7.8 แสดงเงื่อนไขขอบเขต สมการการไหลปั่นป่วนและพารามิเตอร์ในการจำลอง.....	84
7.9 ค่าตัวเลขการหมุนควง .....	85
7. 10 แสดงมวลของคาร์บอนเริ่มต้นและทางออก ร้อยละการสลายตัวของคาร์บอน เมื่อติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงชนิดใบตรง 100 องศา ใบโค้ง 70 และ 85 องศา ....	93
7. 11 แสดงมวลของคาร์บอนเริ่มต้นและทางออก ร้อยละการสลายตัวของคาร์บอน ที่ระยะห่างของวัตถุวางการไหล 10 และ 20 มิลลิเมตร.....	101

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย .....	4
2.1 แสดงการไหลของอากาศในห้องเผาไหม้ช่วย .....	6
2.2 แสดงเปลวไฟที่เกิดจากการเผาไหม้อุณหภูมิผ่านตะแกรงขนาด 1.5, 1, 0.5 มิลลิเมตร .....	6
2.3 แสดงอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงและการเผาไหม้ภายใน .....	7
2.4 แสดงกรณีศึกษาการเผาไหม้ที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควง ร่วมกับวัตถุวางการไหลและใบพัด .....	7
2.5 แสดงอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงของ Erol Kilik ชนิดใบตรงและใบโค้ง .....	9
2.6 หัวเผาแบบทางเข้าอากาศตามแนวสัมผัส .....	10
2.7 แสดงลักษณะของวัตถุวางการไหลของ Minghou Xu .....	11
2.8 แสดงการศึกษาระยะของวัตถุวางการไหลของ Yiheng Tong .....	12
2.9 แสดงแบบจำลองการเผาไหม้ถ่านหิน .....	13
2.10. แบบจำลองการเผาไหม้ของแก๊สเนื้อเดียวกัน .....	15
3.1 แสดงการตีความของเอนทัลปีสมบูรณ์ การก่อเกิดความร้อนและความร้อนสัมผัส .....	20
3.2 Steady flow reactor ที่ใช้ในการอธิบายเอนทัลปีของการเผาไหม้ .....	21
3.3 แสดงการก่อตัวของ Fuel NOx .....	24
3.4 แสดงปฏิกิริยาการเกิด NO .....	25
3.5 แสดงการเกิดปฏิกิริยาของ NO ตามอุณหภูมิ .....	25
3.6 แสดงภาพสแลคที่สะสมในห้องเผาไหม้ .....	27
3.7 แสดงรูปแบบของเปลวไฟ .....	31
3.8 แสดงการไหลผ่านวัตถุวางการไหล .....	32
3.9 แสดงชนิดของอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควง .....	33
4.1 แสดงการแลกเปลี่ยนโมเมนตัม .....	44
5.1 แสดงอุปกรณ์ของระบบเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง .....	53
5.2 แสดงห้องเผาไหม้ช่วยและภาพตัดภายใน .....	54
5.3 แสดงลักษณะการไหลของอากาศภายในห้องเผาไหม้ช่วย .....	54
5.4 ห้องเผาไหม้หลัก .....	55
5.5 แสดง ก.วัตถุวางการไหล ข.อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงชนิดใบตรง ค.อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงชนิดใบโค้ง .....	55
5.6 เทอร์โมคัปเปิ้ล ชนิด K .....	56
5.7 Testo 330-2LL .....	56

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.8 แสดง ก. FD Fan ข.ID Fan.....	57
5.9 แสดง ก.คอนโทรลวาล์ว ข.แผ่นออริฟิส ค. Differential pressure sensor.....	57
5.10 แสดงอินเวอร์เตอร์.....	57
5.11 โปรแกรมควบคุมหัวเผา.....	58
5.12 ชุดควบPLC .....	58
5.13 ผังระบบลำเลียงเชื้อเพลิง.....	58
5.14 แสดง ก.ไซโลเก็บเชื้อเพลิงอัดเม็ด ข. เครื่องบดเชื้อเพลิง ค.ไซโลเก็บเชื้อเพลิงผง ง.ถุกรอง .....	59
5.15 แสดง ก.หอบำบัดเปียก ข.หอดึงเย็น.....	60
5.16 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิ .....	62
6.1 แสดงการกระจายตัวของขนาดอนุภาคเชื้อเพลิง .....	64
6.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ (Hz)กับอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิง (kg/s) .....	65
6.3 แสดงอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงชนิดใบตรงและใบโค้ง.....	66
6.4 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของเชื้อเพลิงที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้ ก) ใบตรง 100 องศา ข) ใบโค้ง 70 องศา ค) ใบโค้ง 85 องศา.....	67
6.5 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วย ชนิด ใบตรง 100 องศา .....	68
6.6 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วย ชนิด ใบโค้ง 70 องศา.....	68
6.7 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วย ชนิด ใบโค้ง 85 องศา.....	69
6.8 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนวรัศมี ก) $x/D$ ที่ 0.375 ข) $x/D$ ที่ 0.625 ค) $x/D$ ที่ 0.875 ง) $x/D$ ที่ 1.1255 จ) $x/D$ ที่ 1.375.....	69
6.9 กราฟแสดงปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์และไนโตรเจนออกไซด์ กรณีอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงชนิดใบตรง 100 องศา ใบโค้ง 70 และ 85 องศา .....	70
6.10 ระยะของวัตถุขวางการไหล .....	71
6.11 ลักษณะการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลที่ติดตั้งวัตถุขวางการไหล ที่ระยะ 10 มิลลิเมตร.....	72
6.12 ลักษณะการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลที่ติดตั้งวัตถุขวางการไหล ที่ระยะ 20 มิลลิเมตร.....	72
6. 13 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วย จากการติดตั้งวัตถุขวางการไหล ก) ระยะ 10 มิลลิเมตร ข) ระยะ 20 มิลลิเมตร .....	73

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.14 แสดงการกระจายตัวของอนุกรมตามแนวรัศมี ก) $x/D$ ที่ 0.375 ข) $x/D$ ที่ 0.625 ค) $x/D$ ที่ 0.875 ง) $x/D$ ที่ 1.1255 จ) $x/D$ ที่ 1.375 .....	74
6.15 กราฟแสดงปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์และไนโตรเจนออกไซด์ กรณีระยะวัดดูขวางการไหลที่ 10 และ 20 มิลลิเมตร .....	75
7.1 แสดงลักษณะกริด polyhedralและhexahedral.....	76
7.2 แสดงผลลัพธ์จำนวนกริดที่เหมาะสมในการจำลอง .....	77
7.3 แสดงผลลัพธ์ของการจำลองการลดค่าเอนทัลปีมาตรฐาน เมื่อเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง .....	80
7.4 แสดงผลลัพธ์ของการจำลองสมการการไหลปั่นป่วน เมื่อเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง .....	81
7.5 แสดงผลลัพธ์ของการจำลองการเพิ่มอัตราการปลดปล่อยสารระเหย เมื่อเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง .....	83
7.6 แสดงการวัดมุมของอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควง .....	85
7.7 แสดงลักษณะการไหลภายในห้องเผาไหม้ช่วย .....	86
7. 8 แสดงลักษณะของการไหลภายในห้องเผาไหม้ช่วยเมื่อติดตั้งอุปกรณ์สร้าง การไหลหมุนควงชนิดใบตรง มุม 100 องศา ก.ที่ระยะ $x/D$ 0.375 ข.ที่ระยะ $x/D$ 0.625 ค.ที่ระยะ $x/D$ 0.875 ง.ที่ระยะ $x/D$ 1.125 จ.ที่ระยะ $x/D$ 1.375.....	87
7. 9 แสดงลักษณะของการไหลภายในห้องเผาไหม้ช่วยเมื่อติดตั้งอุปกรณ์สร้าง การไหลหมุนควงชนิดใบโค้ง มุม 70 องศา ก.ที่ระยะ $x/D$ 0.375 ข.ที่ระยะ $x/D$ 0.625 ค.ที่ระยะ $x/D$ 0.875 ง.ที่ระยะ $x/D$ 1.125 จ.ที่ระยะ $x/D$ 1.375.....	88
7. 10 แสดงลักษณะของการไหลภายในห้องเผาไหม้ช่วยเมื่อติดตั้งอุปกรณ์สร้าง การไหลหมุนควงชนิดใบโค้ง มุม 85 องศา ก.ที่ระยะ $x/D$ 0.375 ข.ที่ระยะ $x/D$ 0.625 ค.ที่ระยะ $x/D$ 0.875 ง.ที่ระยะ $x/D$ 1.125 จ.ที่ระยะ $x/D$ 1.375.....	89
7.11 น้ำหนักของอนุภาคเคลื่อนที่ภายในห้องเผาไหม้ช่วยที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควง ก.ใบตรง 100 องศา ข. ใบโค้ง 70 องศา 8. ใบโค้ง 85 องศา.....	90
7.12 เวลาที่อนุภาคเคลื่อนที่ภายในห้องเผาไหม้ช่วยจากการติดตั้ง อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงชนิดใบตรง 100 องศา.....	91
7. 13 สัดส่วนเชิงมวลคาร์บอนที่หลงเหลือในอนุภาคขณะเคลื่อนที่ในห้องเผาไหม้ จากการติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงชนิดใบตรง 100 องศา.....	91

7. 14 เวลาที่อนุภาคเคลื่อนที่ภายในห้องเผาไหม้ช่วยจากการติดตั้ง อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงชนิดใบโค้ง 70 องศา.....	92
7. 15 สัดส่วนเชิงมวลคาร์บอนที่หลงเหลือในอนุภาคขณะเคลื่อนที่ในห้องเผาไหม้ จากการติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงชนิดใบโค้ง 70 องศา.....	92
7. 16 เวลาที่อนุภาคเคลื่อนที่ภายในห้องเผาไหม้ช่วยจากการติดตั้ง อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงชนิดใบโค้ง 85 องศา.....	93
7.17 สัดส่วนเชิงมวลคาร์บอนที่หลงเหลือในอนุภาคขณะเคลื่อนที่ในห้องเผาไหม้ จากการติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงชนิดใบโค้ง 85 องศา.....	93
7.18 แสดงอุณหภูมิจากการจำลอง ก. ชนิดใบตรง 100 องศา ข.ใบโค้ง 70 องศา ค.ใบโค้ง 85 องศา.....	94
7.19 สัดส่วนเชิงมวลสารระเหยในห้องเผาไหม้จากการติดตั้ง อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงชนิดใบตรง 100 องศา.....	95
7.20 สัดส่วนเชิงมวลสารระเหยในห้องเผาไหม้จากการติดตั้ง อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควง ชนิดใบโค้ง 70 องศา.....	95
7.21 สัดส่วนเชิงมวลสารระเหยในห้องเผาไหม้จากการติดตั้ง อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควง ชนิดใบโค้ง 85 องศา.....	95
7.22 สัดส่วนเชิงมวลคาร์บอนมอนอกไซด์ในห้องเผาไหม้จากการติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหล หมุนควงจากการจำลอง ก. ชนิดใบตรง 100 องศา ข.ใบโค้ง 70 องศา ค.ใบโค้ง 85 องศา.....	96
7.23 สัดส่วนเชิงมวลออกซิเจนในห้องเผาไหม้จากการติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควง จากการจำลอง ก. ชนิดใบตรง 100 องศา ข.ใบโค้ง 70 องศา ค.ใบโค้ง 85 องศา.....	96
7.24 สัดส่วนเชิงมวลไนโตรเจนออกไซด์ในห้องเผาไหม้จากการติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหล หมุนควงจากการจำลอง ก. ชนิดใบตรง 100 องศา ข.ใบโค้ง 70 องศา ค.ใบโค้ง 85 องศา.....	97
7.25 แสดงพื้นที่การไหลย้อนกลับภายในห้องเผาไหม้ช่วย.....	98
7.26 น้ำหนักของอนุภาคเคลื่อนที่ภายในห้องเผาไหม้ช่วยจากการ ปรับระยะวัตถุขวางการไหล ก.10 มิลลิเมตร ข. 20 มิลลิเมตร.....	99
7.27 เวลาที่อนุภาคเคลื่อนที่ภายในห้องเผาไหม้ช่วยจากการ ติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงชนิดใบโค้ง 85 องศา วัตถุขวางการไหลที่ระยะ 10 มิลลิเมตร.....	99
7.28 สัดส่วนเชิงมวลคาร์บอนที่หลงเหลือในอนุภาคขณะเคลื่อนที่ในห้องเผาไหม้ จากการติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงชนิดใบโค้ง 85 องศา ระยะของวัตถุขวางการไหล 10 มิลลิเมตร.....	100

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.29 เวลาที่อนุภาคเคลื่อนที่ภายในห้องเผาไหม้ช่วยจากการติดตั้ง อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงชนิดใบโค้ง 85 องศา วัตถุขวางการไหลที่ระยะ 20 มิลลิเมตร.....	100
7.30 สัดส่วนเชิงมวลคาร์บอนที่หลงเหลือในอนุภาคขณะเคลื่อนที่ในห้องเผาไหม้ จากการติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงชนิดใบโค้ง 85 องศา ระยะของวัตถุขวางการไหล 20 มิลลิเมตร.....	100
7.31 แสดงอุณหภูมิจากการจำลอง ก. ระยะของวัตถุขวางการไหล 10 มิลลิเมตร ข. ระยะของวัตถุขวางการไหล 20 มิลลิเมตร .....	101
7.32 สัดส่วนเชิงมวลสารระเหยในห้องเผาไหม้จากการติดตั้งวัตถุขวางการไหล ที่ระยะ 10 มิลลิเมตร .....	102
7.33 สัดส่วนเชิงมวลสารระเหยในห้องเผาไหม้จากการติดตั้งวัตถุขวางการไหล ที่ระยะ 20 มิลลิเมตร .....	102
7.34 สัดส่วนเชิงมวลออกซิเจนในห้องเผาไหม้จากการติดตั้งวัตถุขวางการไหล ก. ระยะ 10 มิลลิเมตร ข. ระยะ 20 มิลลิเมตร .....	102
7.35 สัดส่วนเชิงมวลคาร์บอนมอนอกไซด์ในห้องเผาไหม้จากการติดตั้งวัตถุขวางการไหล ก. ระยะ 10 มิลลิเมตร ข. ระยะ 20 มิลลิเมตร .....	103
7.36 สัดส่วนเชิงมวลไนโตรเจนออกไซด์ในห้องเผาไหม้จากการติดตั้งวัตถุขวางการไหล ก. ระยะ 10 มิลลิเมตร ข. ระยะ 20 มิลลิเมตร.....	103

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์

### Roman symbols

$A_p$	พื้นที่ผิวของอนุภาค (m <sup>2</sup> )
$c_p$	ค่าความจุความร้อนของอนุภาค (J/kg-K)
$C_D$	สัมประสิทธิ์แรงต้าน
$d_p$	เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (m)
$E$	ค่าความร้อนจำเพาะ (J/kg-K)
$F$	แรงการทำภายนอก (N)
$F_D$	แรงต้าน (N)
$F_x$	แรงที่เพิ่มขึ้นต่อมวลของอนุภาค (N)
$g_x$	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (m/s <sup>2</sup> )
$h$	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (W/m <sup>2</sup> -K)
$h_c$	ความร้อนจากการเผาไหม้ (J/kg)
$h_{fg}$	ค่าความร้อนแฝงของสารระเหย (J/kg)
$h_j^0$	เอนทัลปีการก่อเกิดของสปีชีส์ $j$ (J/kg)
$h_{pyrol}$	ค่าความร้อนของสารระเหย (J/kg)
$h_s$	เอนทัลปีสัมพัทธ์ (J/kg)
$k_{eff}$	ค่าประสิทธิภาพนำความร้อนประสิทธิผล
$\dot{m}_p$	อัตราไหลเชิงมวลของอนุภาค (kg/s)
$MW_{air}$	มวลโมเลกุลของอากาศ (kg/kmol)
$MW_{fuel}$	มวลโมเลกุลของเชื้อเพลิง (kg/kmol)
$R_j$	อัตราการก่อเกิดโดยปริมาตรของสปีชีส์ $j$
$Re$	ตัวเลขเรย์โนลด์สัมพัทธ์
$T_p$	อุณหภูมิของอนุภาค (K)
$u$	ความเร็วของไหล (m/s)
$u_p$	ความเร็วของอนุภาค (m/s)
$Y_d$	เศษส่วนมวลของอนุภาคที่เล็กกว่าขนาดของอนุภาคที่กำลังเปรียบเทียบ

## รายการสัญลักษณ์และคำย่อ(ต่อ)

### Greek symbols

$\Phi$	อัตราส่วนสมมูล
$\mu$	ความหนืด (NS/m <sup>2</sup> )
$\rho$	ความหนาแน่นของของไหล (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_p$	ความหนาแน่นของอนุภาค (kg/m <sup>3</sup> )
$\sigma$	ค่าคงที่ Stefan-Boltzmann (W/m <sup>2</sup> -K <sup>4</sup> )



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตั้งชื่ออ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

### บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของการสร้างห้วเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงชนิดมีห้องเผาไหม้ช่วย ที่ได้รับการสนับสนุนจากรัฐบาล ภายใต้นโยบายความมั่นคงทางด้านพลังงาน จากวิกฤติราคาเชื้อเพลิงเพื่อเป็นการเพิ่มการพึ่งพาตนเองทางพลังงานและตอบสนองความต้องการห้วเผาที่สามารถใช้งานได้กับเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีอยู่ในประเทศ วัตถุประสงค์และขอบเขตของการศึกษา สมมุติฐานของการศึกษา ขั้นตอนการศึกษาและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

โลกของเราเริ่มรู้จักการใช้งานถ่านหินมาตั้งแต่ปลายศตวรรษที่ 18 จากการค้นพบครั้งนี้เป็นการค้นพบครั้งประวัติศาสตร์ที่ทำให้เกิดการพัฒนาอุตสาหกรรมอย่างก้าวกระโดด หลายประเทศจึงหันมาใช้ถ่านหินเป็นพลังงานพื้นฐานในการพัฒนาประเทศ [1] ส่งผลให้เกิดวิกฤตด้านราคาของเชื้อเพลิงและปัญหาเปลี่ยนแปลงของภูมิอากาศทั่วโลกจึงเกิดการรณรงค์ในการลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก ด้วยการพัฒนาและปรับปรุงเทคโนโลยีการเผาไหม้ใหม่ รวมไปถึงหาแหล่งพลังงานใหม่เพื่อลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก เช่น การหันมาใช้พลังงานหมุนเวียนจากลม น้ำ ก๊าซชีวภาพ และพลังงานจากชีวมวล เป็นต้น

ในส่วนของประเทศไทยได้มีการส่งเสริมการสร้างพลังงานทดแทนจำพวกชีวมวล จากการจัดทำแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก โดยกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน(พ.พ.) กระทรวงพลังงาน ที่ได้กำหนดนโยบายการสนับสนุนพลังงานทดแทนที่มุ่งเน้นไปยังด้านความมั่นคงทางด้านพลังงาน ด้านเศรษฐกิจและด้านสิ่งแวดล้อม จากรายงานแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พบว่าปี 2554 มีการใช้งานพลังงานทางเลือกทั้งหมด ร้อยละ 9.6 และเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 11.91 ในปี 2556 โดยมีแหล่งพลังงานหลักมาจากเชื้อเพลิงชีวมวลจากอุตสาหกรรมเกษตรภายในประเทศ [2]

พลังงานชีวมวลเป็นพลังงานหมุนเวียนชนิดหนึ่งที่มีสมมุติฐานมาจากกฎทรงมวล กล่าวว่ามีเชื้อเพลิงชีวมวลผลิตจากชีวมวลผลิตภัณฑ์ที่ปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมจะถูกดูดซับด้วยการเจริญเติบโตของชีวมวลเองโดยชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงท้องถิ่นรูปแบบหนึ่งที่มีสำคัญนับตั้งแต่วิกฤตพลังงานเพื่อตอบสนองต่อความต้องการแทนเชื้อเพลิงฟอสซิล [3] การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งประกอบไปด้วยกระบวนการย่อยภายในเป็นจำนวนมาก ทำให้มีความต้องการห้องเผาไหม้มีความยาวเพื่อให้เชื้อเพลิงเผาไหม้สิ้นสุดใน

ขณะที่เคลื่อนที่อยู่ภายในห้องเผาไหม้ ส่งผลให้เกิดค่าใช้จ่ายที่สูงสำหรับการสร้างเตาจึงมีการคิดค้นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทคนิคในการช่วยให้เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์และทำให้อุณหภูมิเคลื่อนที่อยู่ภายในเตาได้นานขึ้นด้วยการติดตั้งตัวสร้างการไหลหมุนควงเข้ามาใช้รวมไปถึงวัตถุวางการไหล ในปี 2558 ห้องวิจัยวิศวกรรม การเผาไหม้ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ได้รับทุนวิจัยจากสำนักงาน คณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ(วช.)ในการออกแบบและพัฒนาหัวเผาชีวมวลผงชนิดมีห้องช่วยเผาไหม้ ขนาด 1 เมกะวัตต์ความร้อนและยังได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยได้รับจากสำนักงานกองทุนสนับสนุน การวิจัย(สกว.)ทำให้มีการพัฒนาหัวเผาชีวมวลผงชนิดมีห้องเผาไหม้ช่วยอย่างต่อเนื่องเพื่อให้ได้หัวเผาที่ สามารถนำไปใช้งานได้จริงในภาคอุตสาหกรรม ดังนั้นงานวิจัยชิ้นนี้จึงให้ความสำคัญกับการปรับปรุง ความสามารถในการใช้งานหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงด้วยการศึกษาตัวสร้างการไหลหมุนควงและ ตำแหน่งของวัตถุวางการไหลทรงกรวย เพื่อให้เกิดเสถียรภาพของเปลวไฟภายในห้องเผาไหม้ช่วย ลดการปลดปล่อยมลพิษสู่สิ่งแวดล้อมและยังสามารถนำไปใช้งานได้เงื่อนไขการใช้งานที่กว้างขึ้น

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์เล่มนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาและพัฒนา 2 ส่วนด้วยกัน ในส่วนแรก ประกอบด้วยวัตถุประสงค์ของอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงและในส่วนต่อมาเป็นวัตถุประสงค์ของ ตำแหน่งติดตั้งวัตถุวางการไหล ดังที่ได้แสดงต่อไปนี้

1.2.1 เพื่อศึกษาเปรียบเทียบการเผาไหม้ระหว่างการใช้งานอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควง ชนิดใบตรง ที่ 100 องศา และใบโค้ง ที่ 70 และ 85 องศา

1.2.2 เพื่อศึกษาเปรียบเทียบการเผาไหม้ของระยะห่างของตำแหน่งวัตถุวางการไหลที่ห่าง จากปากหัวพ่นเชื้อเพลิงชีวมวลผง 10 และ 20 มิลลิเมตร

## 1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

1. อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงชนิดใบโค้งจะสามารถสร้างความรุนแรงของการไหลหมุนควง ในห้องเผาไหม้ได้ดีกว่าตัวสร้างการไหลหมุนควงแบบใบตรง ส่งผลให้อุณหภูมิถูกเหวี่ยงให้ไป ผสมกับลมทุติยภูมิซึ่งสามารถลดการปลดปล่อยมลพิษลง
2. อิทธิพลของการไหลหมุนควงยังก่อเกิดการหมุนวนของก๊าซร้อนเข้าไปถ่ายเทความร้อนให้กับ อากาศที่กำลังเข้าสู่ห้องเผาไหม้ทำให้เกิดการกระจายตัวที่ดีของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้
3. ตำแหน่งของวัตถุวางการไหลที่ระยะ 10 และ 20 มิลลิเมตร ส่งผลต่อความเร็วบริเวณ ทางออกของหัวเผาที่เป็นลมปฐมภูมิที่ใช้ในการลำเลียงเชื้อเพลิง นั่นหมายความว่าเมื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เชื้อเพลิงมีความเร็วลดลงการเผาไหม้ส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นจะเกิดในห้องเผาไหม้ช่วย ส่งผลให้อุณหภูมิในห้องเผาไหม้ช่วยสูงขึ้นเนื่องจากการปลดปล่อยพลังงานในกระบวนการเผาไหม้

#### 1.4 ขอบเขตของการศึกษา

1. การเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผงที่ 300 กิโลวัตต์ความร้อน ที่ทำการติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงชนิดใบตรง 100 องศา ใบโค้ง 70 และ 85 องศา
2. การเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผงที่ 300 กิโลวัตต์ความร้อน ที่ทำการปรับเปลี่ยนวัตถุขวางการไหลที่ระยะ 10 และ 20 มิลลิเมตร
3. ทำการเก็บอุณหภูมิการเผาไหม้ 20 จุด และทำการวัดปริมาณของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ไนโตรเจนออกไซด์และออกซิเจนที่บริเวณทางออกของห้องเผาไหม้ทั้ง 3 กรณีศึกษา
4. จำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผงที่ 300 กิโลวัตต์ความร้อนและใช้เงื่อนไขขอบเขตใกล้เคียงกับการทดลอง เพื่อคาดการณ์ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้

#### 1.5 ขั้นตอนการศึกษา

1. กำหนดหัวข้อ วัตถุประสงค์และขอบเขตของการศึกษา
2. สืบค้นและหาข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับลักษณะของเชื้อเพลิงชีวมวล การเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล การเผาไหม้เชื้อเพลิงผง เทคนิคในการสร้างเสถียรภาพและลดการปลดปล่อยมลพิษ การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณและการเลือกใช้แบบจำลอง
3. ศึกษาทฤษฎีการเผาไหม้ หลักการทำงานของเตาเผาเชื้อเพลิงชีวมวล การทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลในห้องปฏิบัติการเผาไหม้ ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน หลักการคำนวณในการออกแบบส่วนต่าง ๆ เครื่องมีวัดและระบบจัดเก็บข้อมูล การเกิดเถ้าของเชื้อเพลิงชีวมวล การเลือกใช้อุปกรณ์ภายในระบบ ลักษณะการเกาะของเถ้าลอยบนพื้นผิวอุปกรณ์ การวิเคราะห์ตามมาตรฐาน
4. ออกแบบและสร้างตัวสร้างการไหลหมุนควงโดยการอ้างอิงจากขนาดของตำแหน่งติดตั้งและตัวสร้างการไหลหมุนควงชนิดใบตรงที่ได้มีใช้งานอยู่ก่อนหน้า เพื่อให้สอดคล้องกับเงื่อนไขของการทดลองและเหมาะสมกับพื้นที่ภายในห้องเผาไหม้
5. ทำการตรวจสอบและปรับปรุงเตาเผาเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดมีห้องเผาไหม้ช่วยและระบบควบคุมการเผาไหม้สำหรับการทดลองเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผงที่ 300 กิโลวัตต์ความร้อนเพื่อการทดลองเป็นไปได้อย่างราบรื่น และมีความปลอดภัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ดำเนินการทดลองภายใต้เงื่อนไขการทดลองในแต่ละกรณีศึกษา เพื่อทำการทดลองและเก็บผลการทดลอง
7. วิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุง พร้อมทั้งสรุปผลการพัฒนาระบบ

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถปรับปรุงการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผงดด้วยการลดการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ภายใต้เงื่อนไขการทดลองที่กำหนดไว้โดยที่เปลวไฟยังมีเสถียรภาพอยู่ภายในห้องเผาไหม้
2. สามารถนำโปรแกรมทางด้านพลศาสตร์ของไหลมาใช้ในการเชื่อมโยงและอธิบายผลที่ได้จากการทดลองตามเงื่อนไขที่กำหนด



รูปที่ 1. 1 แสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### วรรณกรรมปริทรรศน์

ในวรรณกรรมปริทรรศน์ชิ้นนี้ นำไปสู่การศึกษาการนำอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวนชนิดใบโค้ง รวมไปถึงระยะติดตั้งของการนำวัตถุวางการไหล เพื่อผลกระทบของการติดตั้งอุปกรณ์ต่อการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง โดยอาศัยหลักการทางอากาศพลศาสตร์ภายในห้องเผาไหม้

#### 2.1 ความสำคัญและศักยภาพของเชื้อเพลิงชีวมวล

การเผาไหม้คือปรากฏการณ์ที่สามารถเกิดขึ้นได้โดยธรรมชาติและมนุษย์สร้างขึ้น ปรากฏการณ์นี้เป็นปฏิกิริยาทางเคมีที่ให้พลังงานออกมาสู่สิ่งแวดล้อม มนุษย์เราจึงได้เรียนรู้และนำมาประยุกต์ใช้ในชีวิตประจำวันจนกระทั่งเป็นสิ่งสำคัญที่มนุษย์ขาดไม่ได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเชื้อเพลิงแข็งที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายตั้งแต่ช่วงปฏิวัติอุตสาหกรรมจนกระทั่งปัจจุบันสำหรับการพัฒนาประเทศ เชื้อเพลิงที่มีอยู่บนโลกของเรานั้น มีปริมาณจำกัดเนื่องจากต้องใช้เวลาในการแปลงสภาพให้เป็นถ่านหิน ด้วยเหตุนี้ความมั่นคงทางด้านพลังงานจึงเป็นหนึ่งในยุทธศาสตร์หลักในนโยบายทางด้านพลังงานของชาติ [4] ดังนั้นพลังงานทางเลือกไม่ว่าจะเป็น พลังงานลม พลังงานน้ำ ก๊าซชีวภาพ (ไบโอแก๊ส) พลังงานชีวมวล พลังงานไฮโดรเจน จึงได้รับการสนับสนุนจากภาครัฐในการพัฒนาพลังงานทางเลือกจากศักยภาพที่มีอยู่ภายในประเทศ

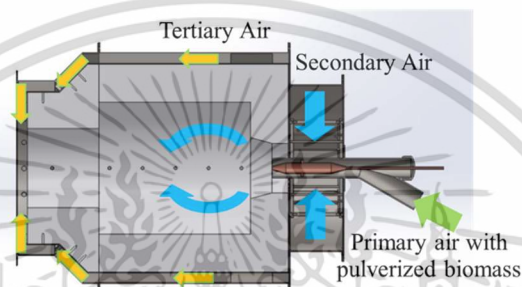
ศักยภาพของเชื้อเพลิงชีวมวลในประเทศไทย เกิดขึ้นจากของเสียทางการเกษตรเป็นส่วนใหญ่ โดยในปี พ.ศ.2560 พบว่ามีผลการผลิตของข้าว 7964 พันตัน ข้าวโพด 4,390 พันตัน มันสำปะหลัง 30,495 พันตัน อ้อย 92,989 พันตัน ปาล์มน้ำมัน 14,103 พันตัน โดยรวมแล้วสามารถแปลงเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลได้ถึง 59.5 ล้านตันหรือเปลี่ยนเป็นพลังงานได้ถึง 11,938 ktoe อีกทั้งยังมีแนวโน้มในการใช้งานเพิ่มขึ้นจากการสนับสนุนของรัฐบาล[5]

#### 2.2 หัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผง

หัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากสำนักงานวิจัยแห่งชาติ (วช.) และ โครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.) ภายใต้การดำเนินการของสำนักงานกองทุน

สนับสนุนการวิจัย (สกว.) ในการออกแบบและสร้างหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงสำหรับอุตสาหกรรม เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดเล็ก ห้องเผาไหม้ที่ได้ออกแบบนั้นมีลักษณะเป็นห้องเผาไหม้ขนาดเล็ก ในที่นี้เราจะเรียกว่าห้องเผาไหม้ช่วย เพื่อให้กระบวนการเผาไหม้ส่วนใหญ่เกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้รักษาเสถียรภาพของเปลวไฟ อากาศที่ป้อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้จะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ อากาศปฐมภูมิ อากาศทุติยภูมิ และอากาศตติยภูมิ อากาศส่วนปฐมภูมินั้นเป็นอากาศที่ใช้ลำเลียงเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ อากาศส่วนทุติยภูมิเป็นกระแสอากาศหลักที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้ โดยจะไหลผ่านอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวนชนิดไบตรงเพื่อสร้างการไหลหมุนวนสำหรับการผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง อากาศส่วนตติยภูมิ เป็นอากาศสำหรับหล่อเย็นห้องเผาไหม้ซึ่งจะเข้าสู่ห้องเผาไหม้บริเวณปลายหัวเผา



รูปที่ 2. 1 แสดงการไหลของอากาศในห้องเผาไหม้ช่วย

ในช่วงแรกของการพัฒนาได้ทำการศึกษาขนาดของอนุภาคที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง ด้วยการบดเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดผ่านตะแกรง 0.5, 1 และ 1.5 มิลลิเมตร พบว่าเชื้อเพลิงชีวมวลผงที่ผ่านตะแกรงเครื่องบดขนาด 0.5 มิลลิเมตร สามารถรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟไว้ภายในห้องเผาไหม้ช่วยได้

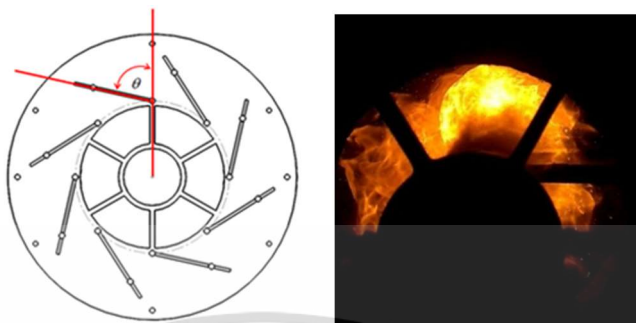


รูปที่ 2. 2 แสดงเปลวไฟที่เกิดจากการเผาไหม้ของอนุภาคที่ผ่านตะแกรงขนาด 1.5, 1, 0.5 มิลลิเมตร [6]

อีกทั้งยังศึกษาผลกระทบต่อกระบวนการเผาไหม้ของการปรับมุมอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวนชนิดไบตรง ที่มุมองศา 60 85 และ 100 องศา พบว่าที่มุม 100 องศา จากการเผาไหม้ของอนุภาคเชื้อเพลิงที่บดผ่านตะแกรงขนาด 0.5 มิลลิเมตร เชื้อเพลิงพุ่งเข้าสู่ห้องเผาไหม้โดยตรงโดยสังเกตได้จากกลุ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมอกดำ เมื่อทำการวัดองค์ประกอบของแก๊สร้อนพบว่าปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์อยู่ที่ 3,000 ppm [6,7]



รูปที่ 2. 3 แสดงอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงและการเผาไหม้ภายใน [6]

จากจุดเริ่มต้นของการออกแบบหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงทำให้เกิดการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยในปี พ.ศ.2558 มีการศึกษาต่อยอดในการปรับปรุงการเผาไหม้ ด้วยการนำใบปิดและวัตถุขวางการไหลมาประยุกต์ใช้ ในการทดลองจะแยกเป็น 4 กรณี ได้แก่ 1.กรณีไม่ติดตั้งใบปิดและวัตถุขวางการไหล 2.กรณีติดตั้งเฉพาะใบปิด 3.กรณีติดตั้งวัตถุขวางการไหล 3.กรณีติดตั้งทั้งใบปิดและวัตถุขวางการไหล จากผลการทดลองพบว่า ในกรณีติดตั้งเฉพาะวัตถุขวางการไหลให้ผลของอุณหภูมิที่สูงกว่ากรณีศึกษาอื่น ๆ องค์ประกอบของแก๊สร้อนพบว่าปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์อยู่ที่ 453 ppm ซึ่งเป็นกรณีที่ให้ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ต่ำที่สุด และในส่วนของไนโตรเจนออกไซด์ในกรณีนี้ให้ปริมาณของไนโตรเจนออกไซด์มากที่สุด โดยมีปริมาณไนโตรเจนออกไซด์อยู่ 279 ppm [8,9]



รูปที่ 2. 4 แสดงกรณีศึกษาการเผาไหม้ที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงร่วมกับวัตถุขวางการไหลและใบปิด [8]

### 2.3 อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควง

การไหลหมุนควงได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในการนำมาประยุกต์ใช้กับหัวเผาเชิงพาณิชย์ชนิดผสมก่อน(pre-mixed flame) ด้วยเหตุผลที่ว่า การสร้างการไหลหมุนควงทำให้การผสมกันระหว่างตัวออกซิไดซ์และเชื้อเพลิง อีกทั้งยังลดความยาวของเปลวไฟส่งผลต่อการออกแบบความเอกซาร์นี่เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยาวของห้องเผาไหม้ จากสิ่งที่กล่าวขี้นมานั้นเป็นผลมาจากการที่ของไหลเคลื่อนที่ผ่านอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควง (swirl generator) ทำให้เกิดการความเร็วในแนวรัศมีพร้อมกับความเร็วตามแนวแกน [10] เมื่อของไหลมีความเร็วในแนวรัศมีมากเพียงพอจะส่งผลให้ช่องการไหลแคบลงเนื่องจากความเร็วของของไหลที่ลดลง หากได้รับอิทธิจากการสร้างการไหลหมุนควงมากเพียงพอจะทำให้เกิดการหยุดนิ่งของความเร็วในแนวแกน จากนั้นจะพัฒนากลายเป็นพื้นที่การไหลหมุนวนภายใน (Recirculation zone) จากปรากฏการณ์สลายตัวของการไหลหมุนควง[11] ด้วยเหตุนี้การไหลหมุนควงจึงได้รับความนิยมในการศึกษาลักษณะการเผาไหม้จากการสร้างความปั่นป่วนของสนามการไหลในการผสมอากาศและเชื้อเพลิง อีกทั้งยังช่วยเพิ่มเวลาในการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายในห้องเผาไหม้

ในปัจจุบันงานวิจัยมากมายเกี่ยวกับการไหลหมุนควงจากการไหลอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงที่นำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งในห้องเผาไหม้ที่ได้อธิบายไว้ว่า เมื่อตัวออกซิไดซ์ไหลเคลื่อนที่ผ่านอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควง ส่งผลให้มีความเร็วตามแนวรัศมีเพิ่มขึ้นตามลักษณะการไหลหมุนควง หากการไหลหมุนควงมีความรุนแรงมาเพียงพอ (ความเร็วตามแนวรัศมีสูง) จะเกิดการไหลหมุนวนภายใน (internal recirculation) เนื่องจากปรากฏการณ์การสลายตัวของ การไหลหมุนควง (vortex breakdown) ที่นำแก๊สร้อนกลับมาแลกเปลี่ยนความร้อนให้กับอากาศที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้ ปรากฏการณ์นี้เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นมาจากความแตกต่างของความดันตามแนวแกน[12] เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่เข้าสู่พื้นที่การไหลหมุนควง อนุภาคขนาดเล็กจะมีความสามารถในการล่องลอยในกระแสการไหลหมุนควงได้ดี ส่วนอนุภาคขนาดใหญ่จะได้รับอิทธิพลของกระแสการไหลหมุนควงน้อยกว่าอนุภาคขนาดเล็กดังนั้นอนุภาคขนาดใหญ่จึงมีวิธีการเคลื่อนที่ตามแรงโน้มถ่วง

L.X. Zhou และคณะ[14] ได้ทำการจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงถ่านหินในรูปแบบที่มีอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควง จากนั้นทำการเปรียบเทียบความรุนแรงของการไหลหมุนควงโดยอาศัยตัวแปรที่มีชื่อว่า ตัวเลขหมุนควง (Swirl Number) ในการบ่งบอกถึงความรุนแรง พบว่าเมื่อมีตัวเลขการหมุนควงที่เพิ่มขึ้น พื้นที่การไหลย้อนกลับจะมีขนาดสั้นลงและขยับเข้าใกล้หัวเผา อย่างไรก็ตามความเข้มข้นของพลังงานจลน์แบบปั่นป่วน (Turbulent Kinetic Energy) จะเพิ่มขึ้น อีกทั้งยังพบบริเวณที่มีความเข้มข้นของอนุภาคสูงจะขยับเข้าใกล้หัวเผาและบริเวณใกล้ผนัง เมื่อทำการวัดอุณหภูมิพบว่าบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงขยับเข้าใกล้หัวเผาแต่อุณหภูมิเฉลี่ยทั่วห้องเผาไหม้ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ความกว้างของความปั่นป่วนลดลง โดยรวมแล้วการก่อกำเนิดของ ไนโตรเจนออกไซด์จึงลดลงตามมา

ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการสร้างการไหลหมุนควงได้ทำการศึกษาโดย Erol Kilik [15] ในการทดลองดังกล่าวได้พิจารณาอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ได้แก่ รูปทรงของใบ (ใบตรงและใบโค้ง) มุมทางออกของใบ aspect ratio และจำนวนใบ ต่อลักษณะของความดันสูญเสียและอัตราการไหลเชิงมวล ขนาดและลักษณะความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นหลังจากผ่านอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงชนิด Axial ด้วยการวัดค่าจากอุปกรณ์วัดความดันชนิดทรงกลม 5 รู และแอนนิโมมิเตอร์แบบเส้นลวดความร้อน (hot-wire anemometer) จากผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงการสร้างพื้นที่การไหลหมุนควงควรสร้างบริเวณช่วงต้นของห้องเผาไหม้ซึ่งเป็นหนึ่งในวิธีที่ดีที่สุดในการรักษาเสถียรภาพการเผาไหม้ อีกทั้งยังพบว่าประสิทธิภาพของอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงชนิดใบโค้งสูงกว่าอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงชนิดใบตรง เป็นผลมาจากการเกิดสภาวะร่วงหล่น (stall) ที่ยากกว่าและมีความดันสูญเสียที่ต่ำ มีการเกิดความปั่นป่วนข้างหลังใบซึ่งจะแสดงออกมาในรูปของความดันสูญเสียที่น้อยกว่า สามารถทำให้เกิดการเลี้ยงเบนของของไหลได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยแสดงออกมาในรูปของโมเมนต์ตามแนวแกนและค่าตัวเลขการไหลหมุนควง (swirl number) นำไปสู่พื้นที่การไหลหมุนวน (recirculation zone) และการไหลย้อนกลับ (revers flow) ที่ใหญ่กว่า ดังนั้นหากเราต้องการลดความดันสูญเสีย สร้างการไหลได้อย่างราบรื่นผ่านอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควง เพิ่มขนาดพื้นที่การไหลหมุนวนและความเร็วในการไหลย้อนกลับ ทำได้โดยการเพิ่มจำนวนและมุมมองคาของใบบังคับทิศทาง รวมไปถึงลด aspect ratio ของอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควง

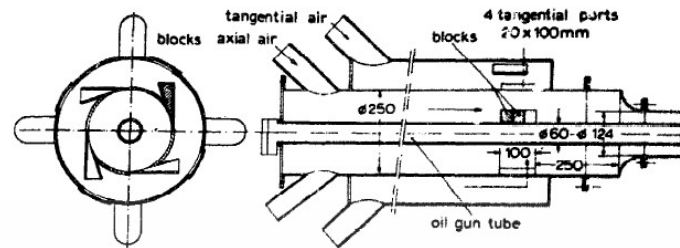


รูปที่ 2. 5 แสดงอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงของ Erol Kilik ชนิดใบตรงและใบโค้ง [15]

Syred และ Beer [16] กล่าวว่าหากนำอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงชนิดต่าง ๆ มาเปรียบเทียบกับระหว่างลักษณะของทางเข้าอากาศตามแนวสัมผัส (tangential inlet) กับอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงชนิดมีใบบังคับทิศทางการไหล พบว่า การไหลหมุนควงที่เกิดจากลักษณะทางเข้าตามแนวสัมผัสจะให้ขนาดของการไหลหมุนวนย้อนกลับที่เล็กกว่าการใช้งานอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงชนิดบังคับทิศทางการไหลของอากาศ นั้นหมายความว่า การไหลย้อนกลับย่อมมีขนาด

เล็กตามมา หากใช้สมมติฐานว่าความเร็วของการไหลย้อนกลับที่เกิดจากรการไหลหมุนควงทั้ง 2 ชนิด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั้นเท่ากัน จะพบว่าอัตราการไหลเชิงมวลของของแก๊สร้อนนั้นจะน้อยกว่า ดังนั้นการนำความร้อนกลับไปแลกเปลี่ยนกับอากาศเย็นที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้จึงน้อยกว่าเช่นกัน



รูปที่ 2. 6 หัวเผาแบบทางเข้าอากาศตามแนวสัมผัสสี่ซี่ [16]

อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงชนิดใช้ใบบังคับทิศทางการไหลสำหรับการเผาไหม้ในปัจจุบันนิยมออกแบบให้มีลักษณะที่เป็นใบตรง และโปรไฟล์ ( มีส่วนโค้ง ) โดยที่อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงชนิดใบตรง มีข้อได้เปรียบจากลักษณะของใบบังคับทิศทางการไหล ทำให้สามารถสร้างและทำการติดตั้งได้ง่าย แต่ด้วยลักษณะของใบที่เป็นใบตรงส่งผลให้มีประสิทธิภาพที่ต่ำกว่า เกิดการสูญเสียที่สูงเมื่อมีอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น ค่าตัวเลขการไหลหมุนควงที่วัดออกมาจึงต่ำกว่า ในส่วนของอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงที่มีลักษณะใบเป็นโปรไฟล์จะทำให้ผลิตได้ยากแต่ลักษณะของใบมีส่วนในการสนับสนุนการไหลหมุนควง ดังนั้นจึงเกิดการสูญเสียที่ต่ำ ผลลัพธ์ที่ได้คือประสิทธิภาพในการสร้างการไหลหมุนควงที่สูงขึ้น

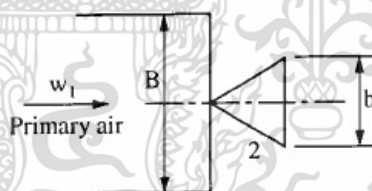
ตารางที่ 2. 1 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะของใบอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควง [16]

	ใบตรง	ใบโปรไฟล์
การสร้าง	ง่าย	ยาก
การสูญเสีย	สูง	ต่ำ
ประสิทธิภาพ	ต่ำ เมื่อมีตัวเลขการไหลหมุนควง > 0.8	สูง *ประสิทธิภาพ ≈ 70%

## 2.4 วัตถุประสงค์ของการไหล

การไหลผ่านวัตถุประสงค์ของการไหลมีการนำมาใช้งานกับงานทางวิศวกรรมอย่างหลากหลายไม่ว่าจะเป็น การออกแบบระบบระบายอากาศ โครงสร้างภายในเมือง ตึกอาคาร สะพาน อุตสาหกรรม นอกชายฝั่ง อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน และอื่น ๆ อีกมากมาย การศึกษาที่เกิดขึ้นด้วยส่วนใหญ่มักมีการพิจารณาลักษณะของจุดหยุดนิ่ง (Stagnation point) การแยกตัวของของไหลบริเวณวัตถุประสงค์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

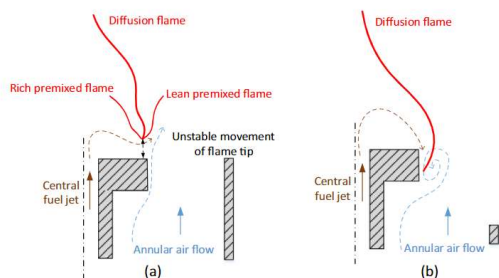
การไหล พื้นที่ของการไหลปั่นป่วน ตัวแปรเหล่านี้จะสร้างผลกระทบในทิศทางที่ดีและแยขึ้นอยู่กับ วัตถุประสงค์ของการศึกษาในเรื่องนั้น ๆ [17] แต่สำหรับการเผาไหม้นั้น การนำวัตถุขวงการไหลมา ประยุกต์ใช้มีวัตถุประสงค์เพื่อการสร้างเสถียรภาพของเปลวไฟจากการสร้างพื้นที่การไหลหมุนวน บริเวณด้านหลังของทิศทางการไหลที่เป็นพื้นที่ความเร็วต่ำอีกทั้งยังมีความปั่นป่วนเกิดขึ้น เมื่อเกิดการ เผาไหม้อากาศร้อนจะหมุนวนนำอากาศร้อนมาป้อนให้แก่อากาศใหม่ที่เข้ามาโดยนิยมใช้กับเปลวไฟ แบบแพร่ (diffusion flame) งานวิจัยมากมายเกี่ยวกับการนำวัตถุขวงการไหลมาใช้งานร่วมกับการ การเผาไหม้เชื้อเพลิงของเหลว เชื้อเพลิงก๊าซและเชื้อเพลิงแข็ง โดยเชื้อเพลิงของเหลวและเชื้อเพลิงก๊าซ [18] แต่สำหรับเชื้อเพลิงแข็งก็ได้มีการประยุกต์ใช้วัตถุขวงการไหลต่อพลศาสตร์และการเผาไหม้ของ ถ่านหิน โดยใช้ร่วมกับหัวเผาถ่านหินคุณภาพต่ำ(ถ่านหินที่มีเถ้าเป็นองค์ประกอบในปริมาณที่สูงกว่า ถ่านหินโดยทั่วไป) เนื่องจากถ่านหินชนิดนี้ยากต่อการติดไฟ วัตถุขวงการไหลยังมีข้อเสียจากการที่วัสดุ ไม่สามารถทนความร้อนสูงและการสึกหรอจากอนุภาคถ่านหินได้ อย่างไรก็ตามวัตถุขวงการไหลยังมื ความสามารถในการทำให้อุณหภูมิสูงที่บริเวณกลางห้องเผาไหม้ไหลเข้าสู่บริเวณหัวเผาจากการไหลหมุนวนด้านหลังวัตถุขวงการไหล ความร้อนและมวลของแก๊สร้อนเข้าไปผสมกับอากาศเย็นที่เข้าห้องเผา ไหม้ทำให้เกิดเสถียรภาพในการเผาไหม้ แต่การไหลหมุนวนที่ได้มีความยาวและความยาวและการไหล หมุนวนไม่เพียงพอต่อเผาไหม้ถ่านหินคุณภาพต่ำ [19]



รูปที่ 2. 7 แสดงลักษณะของวัตถุขวงการไหลของ Minghou Xu [19]

ต่อมาในปี2018ได้มีการศึกษาอิทธิพลของระยะห่างของวัตถุขวงการไหลกับปลายหัวเผา มีการศึกษาจากการเผาไหม้มีเทน( $\text{CH}_4$ ) พบว่าเมื่อทำการเพิ่มระยะห่างของวัตถุขวงการไหล อากาศที่ ไหลผ่านวัตถุขวงการไหลจะสูญเสียโมเมนตัมทำให้เกิดความปั่นป่วนบริเวณผิวด้านข้างของวัตถุขวง การไหล ส่งเสริมให้พื้นที่การไหลปั่นป่วนด้านหลังวัตถุขวงการไหลใหญ่ขึ้นรวมไปถึงพื้นที่การไหล ปั่นป่วนภายในเนื่องมาจากอิทธิพลการไหลของเชื้อเพลิงที่ขยายใหญ่ ทำให้เชื้อเพลิงไปผสมกับอากาศ บริเวณผนังด้านข้างของวัตถุขวงการไหล ช่วยให้การผสมกันระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงดีขึ้น [20]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



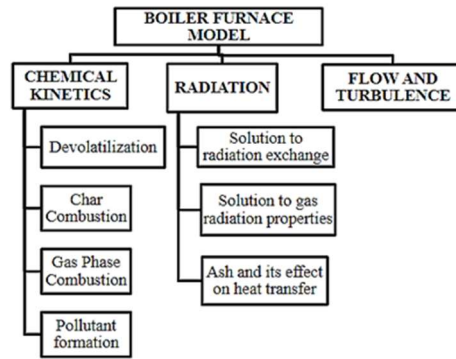
รูปที่ 2. 8 แสดงการศึกษาระยะของวัตถุขวางการไหลของ Yiheng Tong [20]

## 2.5 การจำลองการเผาไหม้

โรงจักรกำลังที่มีการผลิตความร้อนจากถ่านหินมีส่วนการผลิตไฟฟ้าอยู่ที่ร้อยละ 60 ของกำลังการผลิตจากเชื้อเพลิงและพลังงานทั้งหมดบนโลก ปัญหาของโรงจักรกำลังในปัจจุบันคือ ประสิทธิภาพในการเผาไหม้ การปลดปล่อยมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมหลังกระบวนการเผาไหม้ ดังนั้นการออกแบบโรงจักรกำลังให้มีประสิทธิภาพสูงสุดและปลดปล่อยมลพิษน้อยที่สุดจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง ผู้ออกแบบส่วนใหญ่ล้วนคำนึงถึง อุณหภูมิของแก๊สร้อนบริเวณปล่องไอเสีย ระดับของไนโตรเจนออกไซด์ ระดับของคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้ ทำให้เกิดความยุ่งยากในการออกแบบโรงจักรกำลัง อย่างไรก็ตามการออกแบบโรงจักรกำลังในปัจจุบันมีการใช้การจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเข้ามามีส่วนในการช่วยออกแบบและลดต้นทุนการวิจัยและพัฒนา

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเป็นแขนงหนึ่งของวิชา กลศาสตร์ของไหลที่มีการนำอัลกอริทึมและการวิเคราะห์เชิงตัวเลขเข้ามาประยุกต์ในการวิเคราะห์ และแก้ไขปัญหาด้วยการใช้การอนุรักษ์มวล (Conservation of mass) โมเมนตัม (momentum equation) พลังงาน(Energy equation) ในการประเมินการไหลร่วมกับพื้นฐานฟิสิกส์ที่อาศัย สมการความต่อเนื่อง สมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier–Stokes equations) สมการพลังงาน(Energy equation) สมการArrhenius สมการการไหลปั่นป่วน และสมการการไหลอื่นที่เกี่ยวข้องอีกมากมาย [21] ในการจำลองการเผาไหม้ในปัจจุบัน สามารถแยกแบบจำลองที่นำมาประยุกต์ใช้ได้ 3 ประเภท ได้แก่ 1. แบบจำลองจลนศาสตร์เคมี (Chemical Kinetics) หรือเรียกอีกชื่อว่า อัตราการเกิดปฏิกิริยา (rate of chemical reaction) 2. แบบจำลองการแผ่รังสี และ 3.แบบจำลองการไหลและความปั่นป่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2. 9 แสดงแบบจำลองการเผาไหม้ถ่านหิน [22]

แบบจำลองจลนศาสตร์เคมีประกอบไปด้วยแบบจำลองการปลดปล่อยสารระเหย แบบจำลองการเผาไหม้ถ่านชาร์ แบบจำลองการเผาไหม้แก๊สและการก่อตัวของมลพิษ ในการเผาไหม้กระบวนการแรกที่เกิดขึ้นคือกระบวนการปลดปล่อยสารระเหยที่มีกระบวนการภายในสองกระบวนการ ที่กระบวนการแรกคือการปลดปล่อยสารระเหยเบาและทาร์ เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ กระบวนการที่ 2 เป็นการปลดปล่อยสารระเหยจากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันซ้ำ (Re-polymerization) ที่อุณหภูมิสูง กลายเป็นโมเลกุลของคาร์บอน แบบจำลองของการปลดปล่อยสารระเหยสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ 1. แบบจำลอง Arrhenius 2. แบบจำลอง Phenomenological แบบจำลองอย่างแรกเป็นแบบจำลองทางเคมีอย่างง่ายและได้รับความนิยมมากกว่า โดยแบบจำลอง Arrhenius มีสมมติฐานว่าอัตราการให้ความร้อนแก่นุภาคมากกว่าปฏิกิริยาเคมีที่สลายพันธะทางเคมี [22]

### 2.5.1 แบบจำลองการเผาไหม้ถ่านชาร์[22]

การเผาไหม้ถ่านชาร์เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นซ้ำและใช้ส่วนใหญ่ของปรากฏการณ์การเผาไหม้ซึ่งเกิดหลังจากกระบวนการปลดปล่อยสารระเหย โดยทั่วไปสามารถแบ่งได้เป็น 3 ส่วน 1. ส่วนการเผาไหม้ที่มีอุณหภูมิต่ำ อัตราการทำปฏิกิริยาเคมีถูกควบคุมและขนาดของอนุภาคเล็กมาก 2. เกิดการเผาไหม้ที่มีอุณหภูมิต่ำปานกลาง การแพร่ของออกซิเจนไปยังผิวและเกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็ว 3. พื้นที่การเผาไหม้ชาร์ เป็นพื้นที่ที่มีอุณหภูมิสูงและอนุภาคขยายตัวสูง การเผาไหม้ถ่านชาร์ในปัจจุบันมีแบบจำลองที่ใช้งาน 3 แบบจำลอง 1. แบบจำลอง Global char combustion 2. แบบจำลอง Intrinsic 3. แบบจำลอง Advance char combustion การจำลองการเผาไหม้ส่วนใหญ่นิยมใช้ Global char combustion เนื่องจากเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อย่างง่ายและมีประสิทธิภาพ

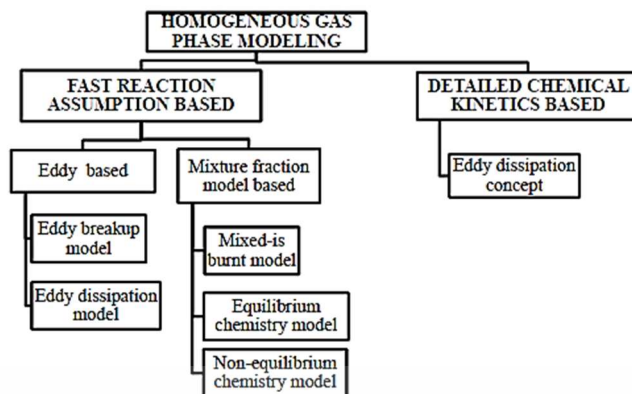
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ตามยังมีข้อจำกัดของแบบจำลองจากการไม่คำนึงถึงผลของความพรุนของอนุภาค การกระจายตัวของถ่านชาร์รวมไปถึงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นทั้งหมดของการเผาไหม้ชาร์

## 2.5.2 แบบจำลอง gas phase combustion [22]

แบบจำลอง gas phase combustion โดยลักษณะของแก๊สเสมือนเป็นเนื้อเดียวกันมีความสำคัญต่อการจำลองการเผาไหม้ การเผาไหม้เชื้อเพลิงผงส่วนใหญ่จะปรากฏในสิ่งแวดล้อมที่มีการไหลปั่นป่วนที่รุนแรง ดังนั้นการเผาไหม้และการผสมกันแบบปั่นป่วนจึงเป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญต่อการเผาไหม้ แบบจำลอง gas phase combustion มี 2 ชนิด คือ 1.แบบจำลอง Fast reaction assumption based 2.แบบจำลอง Detailed chemical kinetics based ทั้งนี้การเลือกใช้แบบจำลองขึ้นอยู่กับ 2 ปัจจัย 1. time scale of turbulent mixing 2. time scale of reaction chemistry ถ้าหาก time scale of reaction chemistry น้อยกว่า time scale of turbulent mixing เราสามารถใช้แบบจำลอง Fast reaction assumption based แบบจำลอง Eddy based เป็นหนึ่งในแบบจำลองที่ได้รับความนิยม โดยแบบจำลอง Eddy based ดั้งเดิมคือแบบจำลอง Eddy breakup ที่ได้รับการพัฒนาจาก Spalding ในปี 1971 พื้นฐานจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ตัวเลขเรย์โนลด์สูง แบบจำลองนี้มีสมมติฐานว่า อัตราการทำปฏิกิริยาเคมีถูกควบคุมโดยอัตราการสลายตัวการกระจายตัวความปั่นป่วนของเชื้อเพลิงที่ไม่เผาไหม้ อย่างไรก็ตามข้อเสียของแบบจำลองนี้คือการกระจายตัวของเชื้อเพลิงในของไหลเป็นแบบเนื้อเดียวกัน ดังนั้นแบบจำลองนี้จึงเหมาะสมสำหรับการเผาไหม้แบบผสมก่อน จึงไม่เหมาะสำหรับการจำลองถ่านหิน ต่อมา Magnussen and Hjertager ได้เสนอแบบจำลอง Eddy dissipation model ที่มีพื้นฐานจากการพิจารณาการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับความเข้มข้นเฉลี่ยของสปีชีส์ แทนความไม่แน่นอนในความเข้มข้นของสปีชีส์ในแบบจำลอง Eddy breakup ในแบบจำลองนี้ทำการคำนวณอัตราการทำปฏิกิริยาเคมีปั่นป่วนในความสัมพันธ์กับการกระจายตัวความปั่นป่วน/mixing time scale ปฏิกิริยาเคมี 3 ปฏิกิริยา ได้นำมาคำนวณแต่ละสปีชีส์ที่เรียกว่า อัตราการเกิดปฏิกิริยา Arrhenius อัตราเนื่องจากการกระจายตัวของความปั่นป่วนสารผลิตภัณฑ์ในพื้นที่หมุนวน อัตราเนื่องจากการกระจายตัวของปฏิกิริยาในพื้นที่หมุนวน อัตราการผลิตสปีชีส์สุทธิที่น้อยที่สุดถูกนำมาใช้ ในกรณีของแบบจำลอง fast chemistry assumption based อื่น ๆ แบบจำลอง Eddy dissipation มีข้อเสียในการใช้งานได้เฉพาะ ปฏิกิริยาเคมี 1 หรือ 2 ลำดับ เท่านั้นไม่สามารถใช้งานได้กับปฏิกิริยาหลาย ๆ ลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2. 10 แบบจำลองการเผาไหม้ของแก๊สเนื้อเดียวกัน [22]

### 2.5.3 แบบจำลองการแผ่รังสี[22]

ความแม่นยำของแบบจำลองการแผ่รังสีมีความสำคัญต่อการคาดการณ์ประสิทธิภาพทางความร้อน อุณหภูมิของแก๊สและการปลดปล่อยมลพิษ การแผ่รังสีสามารถเกิดขึ้นในหลายทางเช่น การแผ่รังสีของเปลวไฟ การแผ่รังสีของแก๊ส การสะท้อนของรังสีบริเวณผนัง การกระเจิงของรังสีระหว่างแก๊สและเถ้า มากไปกว่านั้นแก๊สยังมีลักษณะเป็น non gray gases และไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ดังนั้นการจำลองการแผ่รังสีจึงมีความซับซ้อน

แบบจำลองและสมมติฐานสามารถจำลองได้ 2 ชนิดได้แก่ 1. วิธีการแก้ปัญหาค่าการแลกเปลี่ยนรังสี 2.วิธีการแก้ปัญหาคณสมบัติการแผ่รังสี โดยที่แบบแรกจะทำได้ใช้วิธี flux method ที่จะทำการประเมินความเข้มของการแผ่รังสีในทิศทางโดยเฉพาะและแก้ปัญหาโดยใช้ finite difference และ zone methodจะให้ความแม่นยำมากกว่าแต่ใช้ทรัพยากรในการคำนวณมากกว่าเช่นกัน นอกจากนี้ยังมีแบบจำลอง Differential method และ แบบจำลอง ray-tracking ที่มีความแตกต่างของวิธีการคำนวณไม่ว่าจะเป็น moment method, flux method, P-1 method, discrete ordinates methodและอื่น ๆ สำหรับการเผาไหม้ในปัจจุบันนิยมใช้ P-1 method และdiscrete ordinates method แต่มีการค้นพบว่าการจำลองโดยใช้ P-1 method ให้ผลของค่าตอบพลักซ์ความร้อนที่มากเกินไปจริง อย่างไรก็ตามdiscrete ordinates methodใช้ทรัพยากรในการคำนวณมากกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเชื้อเพลิงแข็ง ชีวมวล การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควง วัตถุประสงค์ของการไหล ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในระหว่างการเผาไหม้ซึ่งเป็นผลมาจากอิทธิพลของการนำอุปกรณ์ต่าง ๆ มาประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงการเผาไหม้

#### 3.1 เชื้อเพลิงแข็ง ( solid fuel ) [23]

เชื้อเพลิงแข็งคือวัสดุในสถานะของแข็งที่สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการสร้างความร้อนที่ประกอบไปด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ และเถ้า ส่วนใหญ่เชื้อเพลิงแข็งที่มีการนำมาใช้งานคือเชื้อเพลิงจำพวกถ่านหิน ซึ่งสามารถแบ่งเป็นชนิดย่อย ๆ คือ แอนทราไซต์ บิทูมินัส ซับบิทูมินัส ลิกไนต์ และพีต รวมไปถึงการใช้งานชีวมวลซึ่งเป็นเชื้อเพลิงพลังงานทดแทนที่ได้รับความนิยมในปัจจุบัน

ตารางที่ 3. 1 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะของถ่านหิน [23]

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

#### 3.2 เชื้อเพลิงชีวมวล [24]

ชีวมวลหมายถึงวัสดุจากสิ่งมีชีวิตจำพวกมูลสัตว์หรือพืชทั้งทางตรงและทางอ้อม รวมไปถึงของเหลือใช้จากภาคอุตสาหกรรมต่าง ๆ ที่สามารถนำมาใช้ในการผลิตพลังงาน ในประเทศไทยเชื้อเพลิงชีวมวลส่วนใหญ่มีการนำมาใช้ในการสร้างความร้อนเพื่อนำไปใช้งานโดยส่วนใหญ่เป็นวัสดุเหลือใช้ในภาคอุตสาหกรรมการเกษตร เช่น อ้อย มันสำปะหลัง แกลบ กะลาปาล์ม เป็นต้น และยังมีเศษวัสดุจากอุตสาหกรรมเฟอร์นิเจอร์ เช่น ขี้เลื่อย การนำวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมต่าง ๆ มาใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานถือเป็นการลดต้นทุนในการผลิต สร้างทางเลือกสำหรับการใช้งานเชื้อเพลิงในการผลิตและใช้งานวัสดุตั้งต้นของผลิตภัณฑ์ให้เกิดความคุ้มค่ามากที่สุด

ข้อดีของชีวมวลที่ได้รับการกล่าวในเสวนาวิชาการส่วนใหญ่ล้วนกล่าวถึงการผลิตปริมาณคาร์บอนไดร็อกไซด์เท่ากับศูนย์ ทำให้ไม่มีปริมาณก๊าซเรือนกระจกเพิ่มเติมสู่สิ่งแวดล้อม เราสามารถขยายความได้โดยการใช้กฎทรงมวลมาช่วยอธิบาย โดยพืชดูดซับปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศเพื่อผลิตก๊าซออกซิเจนในระหว่างการเจริญเติบโต เมื่อนำมาใช้ในการสร้างความร้อนจะปล่อยก๊าซคาร์บอนไดร็อกไซด์ในปริมาณเท่ากัน แต่ข้อเสียของการนำชีวมวลมาใช้งานจำเป็นต้องใช้เวลาในการปลูกพืชพลังงานที่นานกว่าพืชจะโตและยังจำเป็นต้องใช้พื้นที่เป็นจำนวนมากเพื่อให้เพียงพอต่อการใช้งาน

### 1.2.1 ศักยภาพของเชื้อเพลิงชีวมวล[25]

ประเทศไทยเป็นประเทศผู้ผลิตและส่งออกผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรที่มีมูลค่าการส่งออกถึง 744,000 ล้านบาท จากการผลิตแป้ง ข้าวสาร การผลิตน้ำตาล การผลิตน้ำมันพืช การผลิตเอทานอล และการผลิตเฟอร์นิเจอร์ ของเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมเหล่านี้สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตพลังงานความร้อนเพื่อเป็นการลดต้นทุนการผลิต โดยเชื้อเพลิงเหล่านี้ประกอบไปด้วย มันสำปะหลังมีพื้นที่เพาะปลูกมันสำปะหลังที่มีพื้นที่ 8.6 ล้านไร่ ให้ผลผลิตมันสำปะหลัง 29 ล้านตันต่อปี เหนงาของมันสำปะหลังให้ค่าความร้อนอยู่ที่ประมาณ 1.47 - 5.49 MJ/kg อ้อยมีพื้นที่การเพาะปลูกอยู่ที่ 11 ล้านไร่ สร้างผลผลิต 11.21 ล้านตันต่อไร่ ใบอ้อยสามารถให้ความร้อนได้ถึง 7.37 - 15.48 MJ/kg ปาล์มน้ำมันมีการเพาะปลูกปาล์มในประเทศไทยมีทั้งหมด 5.8 ล้านไร่ ให้ผลผลิตปาล์มน้ำมันประมาณ 2.9 ล้านตันต่อไร่ กะลาปาล์มให้ค่าความร้อนประมาณ 1.76 - 16.9 MJ/kg แกลบมีพื้นที่เพาะปลูกจำนวน 59 ล้านไร่ ให้ผลผลิตข้าวเปลือกอยู่ที่ 24 ล้านตันต่อปี ในปริมาณนี้ทำให้ได้แกลบอยู่ที่ 4.8 ล้านตันต่อปี โดยแกลบสามารถให้ความร้อนได้ปริมาณ 13.52 MJ/kg ชี้อ้อยเป็นหนึ่งในของเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมแปรรูปไม้ที่พบว่ามีปริมาณอยู่ที่ 6.5 แสนตันต่อปี ปีกไม้ยางพารา 2.6 ล้านตันต่อปี ปลายไม้ยางพารา 2.6 ล้านตันต่อปี สามารถให้ค่าความร้อนประมาณ 6.57 MJ/kg

### 3.3 การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง[31]

การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งสำหรับเชื้อเพลิงแข็งชนิดผงมีสมมติฐานที่อนุภาคเชื้อเพลิงมีขนาดเล็กจนทำให้มีอุณหภูมิเท่ากันตลอดทั้งอนุภาคดังนั้นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการเผาไหม้จะ

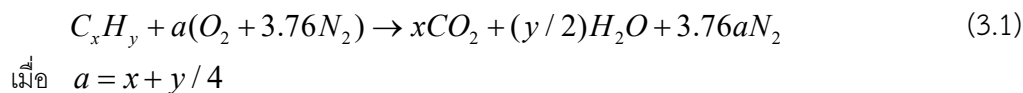
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดขึ้นตลอดทั้งอนุภาคเช่นเดียวกัน กระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งขนาดเล็กจะประกอบด้วย กระบวนการหลัก 3 กระบวนการ ได้แก่ การทำให้แห้ง การปลดปล่อยสารระเหยและกระบวนการเผาไหม้ถ่านชาร์ ตามลำดับ เชื้อเพลิงแข็งเริ่มเคลื่อนที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้จากระบบลำเลียงเชื้อเพลิงเพื่อสร้างความร้อน ในขณะที่เชื้อเพลิงเคลื่อนที่ อนุภาคเหล่านั้นได้รับความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ของอนุภาคก่อนหน้า การสะท้อนรังสีที่ผนังเตา รวมไปถึงการหมุนวนของแก๊สร้อนจากปรากฏการณ์ทางอากาศพลศาสตร์ ทำให้เชื้อเพลิงมีอุณหภูมิสูงขึ้นโดยน้ำภายในเชื้อเพลิงจะเกิดการระเหยตั้งแต่อุณหภูมิห้องและเพิ่มขึ้นต่อไปยังจนกระทั่งถึงจุดเดือดของน้ำ(100 องศาเซลเซียส)โดยน้ำหรือความชื้นที่อยู่ในเชื้อเพลิงจะแทรกออกมาจากเชื้อเพลิง กระบวนการที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า การทำให้แห้งหรือ drying จากนั้นเมื่อเวลาผ่านไป เชื้อเพลิงยังได้รับความร้อน จนกระทั่งมีอุณหภูมิถึงจุดปลดปล่อยสารระเหยที่ประมาณ 200-500 องศาเซลเซียส สารระเหยที่อยู่ภายในเชื้อเพลิงจะแทรกออกมาจากเชื้อเพลิงในสถานะแก๊สปรกคลุมรอบอนุภาคเชื้อเพลิง แก๊สที่ถูกปลดปล่อยออกมามีลักษณะคล้ายกับหมอกและทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในห้องเผาไหม้เกิดการติดไฟ ความร้อนที่ถูกสร้างจากกระบวนการนี้จะถูกส่งกลับไปยังอนุภาคที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้สำหรับกระบวนการทำให้แห้งและการปลดปล่อยสารระเหย สารระเหยที่อยู่ในอนุภาคเชื้อเพลิงมีค่าความร้อนต่ำ ดังนั้นกระบวนการเผาไหม้จึงเกิดความร้อนที่ไม่สูงมาก จากปรากฏการณ์ที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั้นเป็นปรากฏการณ์ที่ใช้ความร้อนจากการเผาไหม้ หลังจากทีกระบวนการปลดปล่อยสารระเหยและกระบวนการเผาไหม้สารระเหยเสร็จสิ้น ออกซิเจนในห้องเผาไหม้จึงสามารถแพร่เข้าไปสู่พื้นผิวของอนุภาคเชื้อเพลิงเกิดกระบวนการเผาไหม้ถ่านชาร์หรือChar combustion ระยะเวลาของกระบวนการนี้ขึ้นอยู่กับอัตราการแพร่ของออกซิเจนเข้าสู่เชื้อเพลิง เมื่อกระบวนการนี้เสร็จสิ้นจะเหลืออนุภาคของเชื้อเพลิงที่ไม่สามารถเผาไหม้ต่อไปได้ที่เรียกว่าเถ้าหรือAsh

### 3.3.1 สตอยชิโอเมตรี (Stoichiometry) [32]

สตอยชิโอเมตรี คือปริมาณของออกซิไดเซอร์ที่มีปริมาณเพียงพอในการทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงทำให้เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ ถ้าหากมีปริมาณออกซิไดเซอร์มากกว่าปริมาณสตอยชิโอเมตรี เราจะเรียกส่วนผสมชนิดนี้ว่าส่วนผสมเชื้อเพลิงบางหรือส่วนผสมบาง (fuel Lean or Lean) เมื่อมีปริมาณออกซิไดเซอร์น้อยกว่าปริมาณสตอยชิโอเมตรี เราจะเรียกส่วนผสมชนิดนี้ว่าส่วนผสมเชื้อเพลิงหนาหรือส่วนผสมหนา (fuel rich or rich) อัตราส่วนสตอยชิโอเมตรีของอากาศและเชื้อเพลิงสามารถเขียนได้ง่ายโดยการทำให้สมมูลอะตอมที่มีสมมติฐานว่าเชื้อเพลิงจะทำปฏิกิริยาเป็นผลิตภัณฑ์แบบ

อุดมคติ สำหรับเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนจะใช้  $C_xH_y$  ความสัมพันธ์แบบสตอยชิโอเมตรีจะได้ว่า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เมื่อสมมติให้อากาศมีออกซิเจนร้อยละ 21 ไนโตรเจนร้อยละ 79 โดยปริมาตร ทำให้อากาศมีออกซิเจน 1 โมล มีไนโตรเจน 3.76 โมล

อัตราส่วนสตอยชิโอเมตริกี้ระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงสามารถหาได้จาก

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

เมื่อ  $MW_{air}$  และ  $MW_{fuel}$  คือ มวลโมเลกุลของอากาศและเชื้อเพลิง

### 3.3.2 อัตราส่วนสมมูล (equivalence ratio) [32]

อัตราส่วนสมมูลเป็นอัตราส่วนที่มีการนำมาใช้โดยทั่วไปเพื่อแสดงถึงส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศที่เป็นสตอยชิโอเมตริก ส่วนผสมหนา หรือส่วนผสมบาง ที่ได้โดย

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

จากสมการที่ 3.3 จะพบว่าการผสมกันระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงเป็นการผสมชนิดหนา เมื่อมีอัตราส่วนสมมูลมีค่ามากกว่า 1 การผสมกันระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงเป็นการผสมชนิดบาง เมื่อมีอัตราส่วนสมมูลมีค่าน้อยกว่า 1 และเป็นส่วนผสมแบบสตอยชิโอเมตริก เมื่อมีอัตราส่วนสมมูลมีค่าเท่ากับ 1 นอกจากนี้ยังมีตัวแปรอื่น ๆ ที่ได้รับความนิยมได้แก่ เปอร์เซ็นต์อากาศสตอยชิโอเมตริก (percent stoichiometric air)

$$\% \text{ Stoichiometric air} = \frac{100\%}{\Phi} \quad (3.4)$$

และ เปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน (percent excess air)

$$\% \text{ excess air} = \frac{1-\Phi}{\Phi} \times 100\% \quad (3.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

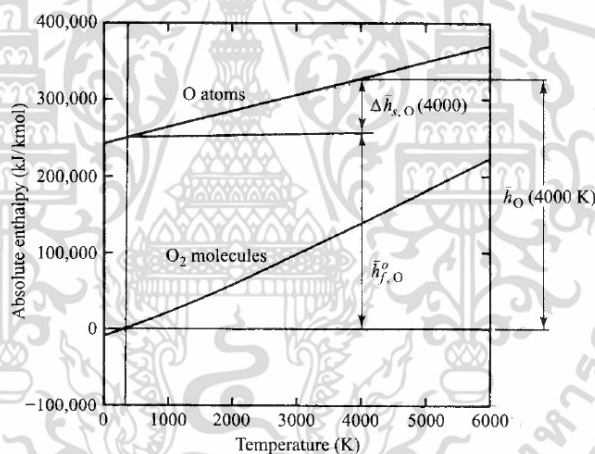
### 3.4 เอนทัลปีมาตรฐานและเอนทัลปีก่อกำเนิด (Standardized enthalpy and Enthalpy of formation) [32]

สมมติฐานของเอนทัลปีมาตรฐาน คือการรวมเอนทัลปีด้วยการคำนึงถึงพลังงานที่เกี่ยวข้องกับพันธะเคมี ในส่วนของเอนทัลปีก่อกำเนิด,  $h_f$  คือพลังงานที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิเท่านั้น sensible enthalpy change  $\Delta h_s$  สามารถเขียนได้โดย

$$\Delta \bar{h}_i(T) = \Delta \bar{h}_{f,i}^0(T_{ref}) + \Delta \bar{h}_{s,i}(T_{ref}) \quad (3.6)$$

$$\text{ที่ } \Delta \bar{h}_{s,i} \equiv \Delta \bar{h}_i(T) - \Delta \bar{h}_{f,i}^0(T_{ref})$$

สถานะอ้างอิงมาตรฐานเราจะอ้างอิงที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส หรือ 298.15 เคลวิน และความดันมาตรฐานที่ 1 atm หรือ 101,325 Pa



รูปที่ 3. 1 แสดงการตีความของเอนทัลปีสัมบูรณ์ การก่อเกิดความร้อนและความร้อนสัมผัส [32]

### 3.5 เอนทัลปีของการเผาไหม้และค่าความร้อน (Enthalpy of combustion and Heating value) [32]

การอธิบายในหัวข้อนี้เราจะยกรูปที่ 8 มาประกอบการอธิบายโดยของผสมสารตั้งต้นในรูปแบบสตอยชิโอเมตริกเข้าและมีผลิตภัณฑ์ออกที่เงื่อนไขสถานะมาตรฐาน(อุณหภูมิ 25 °C ที่ความดัน 1 atm) การเผาไหม้ที่เกิดขึ้นภายในเป็นการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์กลายเป็น CO<sub>2</sub> และน้ำ เมื่อมีผลิตภัณฑ์ที่ทางออก 25°C หมายความว่ามีความร้อนไหลถ่ายเทออกจากห้องเผาไหม้ ปริมาณความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ร้อนทั้งหมดมีความสัมพันธ์กับเอนทัลปีสัมบูรณ์ (absolute enthalpy) ของสารตั้งต้นและสารผลิตภัณฑ์ โดยการประยุกต์ใช้การไหลคงที่และกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิก

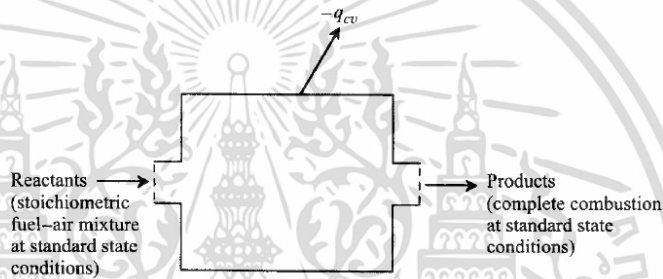
$$q_{cv} = h_o - h_i = h_{prod} - h_{Reac} \quad (3.7)$$

สามารถหาเอนทัลปีของการเกิดปฏิกิริยา หรือเอนทัลปีการเผาไหม้,  $\Delta h_R$  ได้จาก

$$\Delta h_R \equiv q_{cv} = h_{prod} - h_{reac} \quad (3.8)$$

และสามารถเขียนในเทอมของextensive properties ได้โดย

$$\Delta H_R = H_{prod} - H_{reac} \quad (3.9)$$

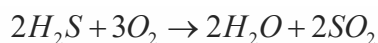
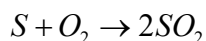
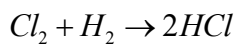
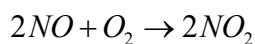
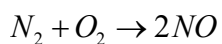
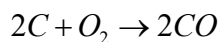
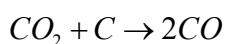
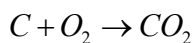


รูปที่ 3. 2 Steady flow reactor ที่ใช้ในการอธิบายเอนทัลปีของการเผาไหม้ [32]

ความร้อนของการเผาไหม้,  $\Delta h_c$  หรือค่าความร้อน (Heating value) คือปริมาณของเอนทัลปีของการทำปฏิกิริยาแต่มีเครื่องหมายตรงข้าม ค่าความร้อนสูง, HHV คือค่าความร้อนที่คำนวณโดยมีสมมติฐานน้ำทั้งหมดในผลิตภัณฑ์ควบแน่นกลายเป็นน้ำในสถานะของเหลวซึ่งเป็นสถานะการที่ปลดปล่อยพลังงานทั้งหมด ในส่วนของค่าความร้อนต่ำ, LHV ต่างจากค่าความร้อนสูงตรงที่ไม่มีน้ำควบแน่นในสารผลิตภัณฑ์

### 3.6 การปลดปล่อยมลพิษและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม [33]

เชื้อเพลิงส่วนใหญ่มีองค์ประกอบของคาร์บอน ไฮโดรเจน และมีปริมาณของ คลอไรด์ ซัลเฟอร์ ฟอสฟอรัส และไนโตรเจนเป็นส่วนน้อย สารส่วนน้อยเหล่านี้เป็นสารตั้งต้นจากองค์ประกอบของเชื้อเพลิงและออกซิไดซ์เซอร์เมื่อทำปฏิกิริยากันแล้วสามารถก่อให้เกิดมลภาวะจากสารผลิตภัณฑ์ ดังสมการเคมีที่ได้แสดงต่อไปนี้



ปฏิกิริยาเคมีส่วนใหญ่ที่ได้กล่าวมาก่อนหน้านั้นเป็นปฏิกิริยาที่ผันกลับได้และขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสปีชีส์ของสาร รวมไปถึงอุณหภูมิที่สถานะสมดุลนั้น ๆ นอกเหนือจากนี้ยังมีปฏิกิริยาเคมีอีกหลายปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเผาไหม้ตามเงื่อนไขการเผาไหม้นั้น ๆ ซึ่งได้แสดงออกมาในรูปของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (volatile organic compounds ,VOCs), ไดออกซิน (dioxins) และฟิวแรน (furans)

### 3.6.1 การก่อตัวของคาร์บอนมอนอกไซด์ [33]

คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เป็นสารประกอบที่มีพิษรุนแรงซึ่งเป็นผลมาจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ และเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้เนื่องจากความไม่สมบูรณ์แบบของการเผาไหม้ คาร์บอนมอนอกไซด์จะก่อตัวในขั้นตอนแรกของปฏิกิริยาเผาไหม้ถ่านชาร์ดังสมการ



และยังเกิดขึ้นในระหว่างการปลดปล่อยสารระเหย ผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากการทำปฏิกิริยาเสร็จสิ้นจะออกมาในรูปของ CO<sub>2</sub> (เมื่อมีการเผาไหม้สมบูรณ์) ในการเผาไหม้ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ควรจำกัดในระดับส่วนในล้านส่วน(ppm) ค่าปกติของปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์จะอยู่ในช่วง 20 - 50 ppm และสามารถสูงกว่านี้ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะหรือพฤติกรรมของการเผาไหม้ แต่ถ้ามีปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์มากกว่า 100 ppm นั้นหมายความว่ามีการผสมกันระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่ไม่ดีหรือมีปริมาณเชื้อเพลิงมากกว่าอากาศ

### 3.6.2 การก่อตัวของไนโตรเจนออกไซด์(NO<sub>x</sub>) [33]

ไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการเผาไหม้ได้มีการระบุว่าเป็นมลพิษจากการเกิดปรากฏการณ์ฝนกรด ไนตริกออกไซด์ (Nitric oxide) และไนโตรเจนออกไซด์ที่ก่อตัวในช่วงต้น จะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกซิไดร์กลายเป็นไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO<sub>2</sub>) จากการจับตัวกับออกซิเจนภายในห้องเผาไหม้หรือชั้นบรรยากาศ การก่อตัวของไนโตรเจนออกไซด์บริเวณเปลวไฟได้แสดงไว้ใน 3 รูปแบบการก่อตัวซึ่งได้แก่ thermal NO<sub>x</sub> , fuel NO<sub>x</sub> และ prompt NO<sub>x</sub>

- thermal NO<sub>x</sub> ก่อตัวจากไนโตรเจนและอากาศ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิการเผาไหม้
- fuel NO<sub>x</sub> ก่อตัวจากไนโตรเจนและเชื้อเพลิง ซึ่งเป็นฟังก์ชันขององค์ประกอบเชื้อเพลิง
- prompt NO<sub>x</sub> ก่อตัวจากไนโตรเจนและเชื้อเพลิง ซึ่งเป็นฟังก์ชันของสัดส่วนการผสม

thermal NO<sub>x</sub> เกิดจากการก่อตัวของไนโตรเจนกับออกซิเจนที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงทำให้มีพลังงานกระตุ้นที่สูงขึ้นสำหรับการเกิดปฏิกิริยา

### การก่อตัวของ thermal NO<sub>x</sub>

โดยทั่วไปการเกิดของ thermal NO<sub>x</sub> มีพื้นฐานมาจาก 2 สมการที่มีความเกี่ยวข้องกันจากปฏิกิริยา Zeldovich ดังสมการต่อไปนี้



ถ้าเราให้สมมติฐานว่าการทำปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยาลำดับที่ 1 และความเข้มข้นของไนโตรเจนคงที่ อัตราการเกิดปฏิกิริยาของ [NO] สามารถเขียนได้ในรูปสมการคือ

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2[O] \frac{k_{1f}[N_2] - (k_{1b}k_{2b}[NO]^2 / k_{2f}[O_2])}{1 + (k_{1b}[NO] / k_{2f}[O_2])} \quad (3.13)$$

ถ้า K<sub>p, NO</sub> คือ ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยา



ที่

$$(K_{p,NO})^2 = \frac{[NO]^2}{[N_2][O_2]} = \frac{k_{1f}k_{2f}}{k_{1b}k_{2b}} \quad (3.15)$$

นี่คือรูปแบบมาตรฐานของสมการการเกิดปฏิกิริยา Thermal NO<sub>x</sub> จากไนโตรเจนที่อยู่ในอากาศระหว่างการเผาไหม้ k<sub>1f</sub> ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความเข้มข้นของ [N<sub>2</sub>] และ [O] นำไปสู่เงื่อนไขสมดุลที่อุณหภูมิสูง อย่างไรก็ตามเปลวไฟจากการเผาไหม้ถ่านหินมีอุณหภูมิต่ำสำหรับสมมติฐานการสมดุลนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้ได้กับ  $[N_2]$  และใช้ไม่ได้กับพื้นที่ความเข้มข้นของออกซิเจนที่รุนแรง  $[O]$  จะประยุกต์ใช้กับสมการสมการความเข้มข้นปกติดังนี้



หาได้จาก

$$[O] = \frac{K_{p,O} [O_2]^{0.5}}{(RT)^{0.5}} \tag{3.17}$$

ดังนั้นจากสมการก่อนหน้านี้จะได้

$$\frac{\partial [NO]}{\partial t} = \frac{2k_{1f}K_{p,O} [O_2]^{0.5} [N_2] \left(1 - \frac{[NO]^2}{\{K_{p,NO}\}^2 [N_2][O_2]}\right)}{(RT)^{0.5} \left(1 + (k_{1b} [NO] / k_{2f} [O_2])\right)} \tag{3.18}$$

ในรายละเอียดของการวิเคราะห์เชิงลึก ที่เปลวไฟแบบแพร่ในบางส่วนของเปลวไฟจะเป็นการเผาไหม้แบบสตรอยชิโอเมติก สมการที่จะแสดงนี้มีความสำคัญอย่างมาก

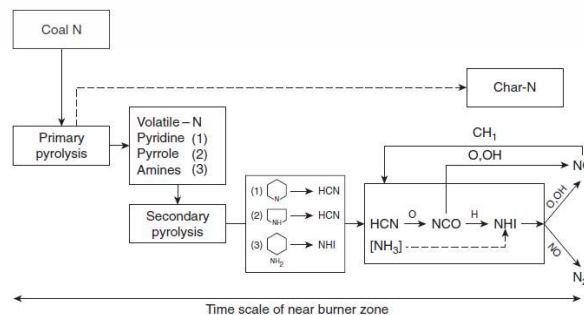


นำไปสู่การรวม  $[OH]$  ในสมการก่อนหน้า

$$\frac{\partial [NO]}{\partial t} = \frac{2k_{1f}K_{p,O} [O_2]^{0.5} [N_2] \left(1 - \frac{[NO]^2}{\{K_{p,NO}\}^2 [N_2][O_2]}\right)}{(RT)^{0.5} \left(1 + (k_{1b} [NO] / k_{2f} [O_2]) + k_{3f} [OH]\right)} \tag{3.20}$$

การก่อตัวของ Fuel  $NO_x$

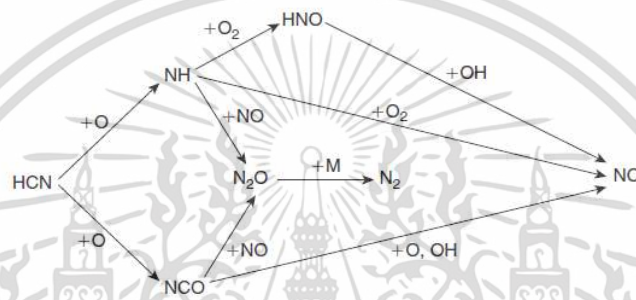
ในเชื้อเพลิงแข็งไม่ว่าจะเป็นเชื้อเพลิงฟอสซิลหรือเชื้อเพลิงชีวมวลล้วนมีองค์ประกอบของไนโตรเจนภายในเชื้อเพลิง พันธะของไนโตรเจนที่จับตัวกันภายในเชื้อเพลิงเป็นพันธะที่มีความซับซ้อน โดยมีความเชื่อว่าไนโตรเจนจะอยู่ในรูปของโครงสร้าง pyridine, pyrrole และ amine ดังรูป 9



รูปที่ 3. 3 แสดงการก่อตัวของ Fuel  $NO_x$  [33]

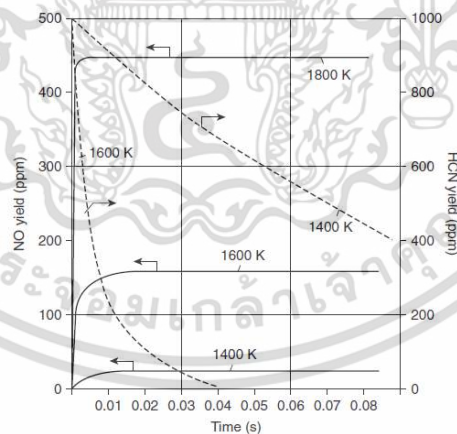
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกิจการเชิงงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญได้เห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเชื้อเพลิงเกิดการเผาไหม้จะได้รับความร้อนจนกระทั่งมีอุณหภูมิสูงและเกิดการปลดปล่อยสารระเหย รวมไปถึงเกิดสารผลิตภัณฑ์ในรูปของแข็งและแก๊ส ไนโตรเจนในสารผลิตภัณฑ์จะอยู่ในรูปของของแข็งร้อยละ 20 และในรูปของแก๊สร้อยละ 80 ซึ่งก็คือสารระเหยมวลเบาและทาร์ ในเชื้อเพลิงใด ๆ การกระจายตัวของไนโตรเจนระหว่างแก๊สและถ่านชาร์ขึ้นอยู่กับอัตราการรับความร้อน อุณหภูมิสูงสุด และเวลาที่อยู่ในพื้นที่อุณหภูมิสูง การก่อตัวของ  $\text{NO}_x$  ในรูปก่อนหน้านี้นั้น แก๊สไนโตรเจนที่เป็นสารผลิตภัณฑ์ของกระบวนการปลดปล่อยสารระเหยทั้งทางตรงและทางอ้อม จะแสดงอยู่ในรูปของ HCN เมื่อ HCN ทำปฏิกิริยากับออกไซด์ในอากาศจะได้ความสัมพันธ์ที่ทำให้เกิดเป็น NO ดังรูปที่ 10



รูปที่ 3. 4 แสดงปฏิกิริยาการเกิด NO [33]

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นตามอุณหภูมิและเวลาสามารถแสดงได้ดังรูป



รูปที่ 3. 5 แสดงการเกิดปฏิกิริยาของ NO ตามอุณหภูมิ [33]

#### การก่อตัวของ Prompt $\text{NO}_x$

ที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงของเปลวไฟที่มีความเข้มข้นสูง NO จะพบจากการก่อตัวอย่างรวดเร็ว เมื่อพิจารณาจากกลไกการก่อตัวของ thermal  $\text{NO}_x$  ด้วยความแตกต่างนี้จึงเรียกว่ากลไกการก่อตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของ Prompt NO<sub>x</sub> การก่อตัวนี้จะเจาะจงไปยังไนโตรเจนของอากาศที่ทำปฏิกิริยากับไฮโดรคาร์บอน ดังสมการ



และ NO ที่เกิดขึ้นคือการก่อตัวของปฏิกิริยาออกซิเดชันของอะตอมไนโตรเจน



HCN และ CN จะทำปฏิกิริยากลายเป็น NO และ Prompt NO<sub>x</sub> จะเกิดขึ้นกับทุกรูปแบบการเผาไหม้

### 3.6.3 ฝุ่นและเขม่า[34]

มลภาวะจากการปลดปล่อยอนุภาคจากเถ้าจากการเผาไหม้ และเขม่า รวมไปถึงคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้จากการบวนการเผาไหม้เป็นมลพิษรูปแบบหนึ่ง สร้างผลกระทบต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อมในปัจจุบัน

#### การปลดปล่อยอนุภาค (Particulate emissions)

เขม่า เกิดในทุกรูปแบบการเผาไหม้โดยทั่วไปมักพบในการเผาไหม้แบบแพร่ ซึ่งเป็นการใช้งานในเตาเผาส่วนมากเนื่องจากมีช่วงการใช้งานที่กว้างมากกว่าการเผาไหม้แบบอื่น ๆ ด้วยเวลาในการก่อตัวในระดับมิลลิวินาทีทำให้มีเวลาเพียงพอในการที่ออกซิเจนจะทำปฏิกิริยาให้เกิดเป็นสารไฮโดรคาร์บอน จากนั้นจะควบแน่นและเปลี่ยนไปเป็นเขม่า

การเกิดเขม่าโดยทั่วไปสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ขึ้นต้น เกิดการก่อตัวของของแข็งหรือของเหลว
2. เกิดการชนกันระหว่างอนุภาคทำให้เกิดขนาดที่ใหญ่ขึ้น
3. การขยายตัวเกิดขึ้นเรื่อย ๆ ในขั้นตอนที่1และ2 จากไฮโดรคาร์บอนที่เกิดจากเปลวไฟ
4. การบวนการสร้างคาร์บอนทำให้อนุภาคที่กำลังขยายตัวเหล่านี้จับกับเป็นโมเลกุลที่ใหญ่ขึ้น
5. เกิดการขยายตัวของผิวโมเลกุล
6. เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### การก่อตัวและองค์ประกอบของเถ้าในเชื้อเพลิง [34]

เถ้าภายในเชื้อเพลิงเป็นของแข็งที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้ เราสามารถพบได้จากหลังกระบวนการเผาไหม้ถ่านชาร์เสร์จลีน เถ้าเหล่านี้คือแร่ธาตุดั้งเดิมรวมไปถึงแร่ธาตุภายในดินสำหรับเชื้อเพลิงชีวมวล เป็นสารประกอบจำพวกโลหะอัลคาไลต์(หมู่ 1, 2 ตามตารางธาตุ)รวมไปถึงสารจำพวก อลูมิเนียม เหล็ก ทองแดง พรอท ซิลิกา ไทเทเนียม ที่เป็นสารประกอบอินทรีย์ซับซ้อน เถ้าที่ปรากฏจะมีขนาดอยู่ในช่วง 0.02 ไมโครเมตร ถึง 90 ไมโครเมตร หากสารเหล่านี้ได้รับความร้อนอย่างต่อเนื่องและไม่หลุดออกจากห้องเผาไหม้จะเกิดการหลอมเหลวกลายเป็น slag และ Fouling เกาะตามผนังห้องเผาไหม้



รูปที่ 3. 6 แสดงภาพแอสลัคที่สะสมในห้องเผาไหม้ [35]

### 3.7 เทคโนโลยีการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง [35]

#### 3.7.1 เตาเผาแบบเบดเชื้อเพลิง (Fuel bed furnace)

เป็นรูปแบบหนึ่งของเตาเผาที่ทำการป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้โดยตะแกรงหรือสายพาน และมีเชื้อเพลิงปกคลุมอยู่ด้านบน สามารถแบบย่อยได้ 2 ชนิดคือ

- ระบบป้อนเชื้อเพลิงทางด้านบน (Overfeeding)
- ระบบป้อนเชื้อเพลิงทางด้านล่าง (Underfeeding)

สำหรับระบบป้อนเชื้อเพลิงทางด้านบน เชื้อเพลิงจะถูกป้อนเข้าสู่ด้านบน การเผาไหม้จะเกิดขึ้นในชั้นของการเผาไหม้ถ่าน ความร้อนที่เกิดขึ้นจะได้รับการพัดพาไปยังชั้นด้านบนเพื่อให้ความร้อนแก่

กระบวนการอื่น ๆ อุณหภูมิการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นจะอยู่ระหว่าง 1,000-1,300 องศาเซลเซียส ดังนั้นเรายังสามารถอธิบายชั้นต่าง ๆ ในกระบวนการเผาไหม้ได้ดังนี้

1. ชั้นของถ่านหินใหม่
2. ชั้นของถ่านหินที่ได้รับการระเหยน้ำ
3. ชั้นของถ่านหินที่เกิดการปลดปล่อยสารระเหย
4. ชั้นของถ่านหินขณะอยู่ในกระบวนการเผาไหม้ถ่าน
5. ชั้นของเถ้า

ระบบป้อนเชื้อเพลิงทางด้านล่าง เชื้อเพลิงจะถูกป้อนเข้าสู่ด้านล่างของห้องเผาไหม้ผ่านสกรูป้อนเชื้อเพลิง อากาศจะผ่านตามช่องของฐาน ชั้นของถ่านหินต่าง ๆ สามารถแสดงได้ดังนี้

1. ชั้นของเถ้า
2. ชั้นของถ่านหินขณะอยู่ในกระบวนการเผาไหม้ถ่าน
3. ชั้นของถ่านหินที่เกิดการปลดปล่อยสารระเหย
4. ชั้นของถ่านหินที่ได้รับการระเหยน้ำ
5. ชั้นของถ่านหินใหม่

### 3.7.2 ระบบสโตกเกอร์ทางกล (Mechanical Stokers)

เป็นรูปแบบหนึ่งของเตาเผา ที่ตะแกรงหยุดนิ่งหรือเคลื่อนที่ ทำให้อัตราการเผาไหม้สูงและมีประสิทธิภาพสูงกว่าแบบก่อนหน้านี้ สามารถแบ่งรูปแบบได้ดังนี้

1. ระบบสโตกเกอร์แบบตะแกรงเคลื่อน (Travelling grate stoker)
2. ระบบสโตกเกอร์แบบตะแกรงโซ่ (Chain grate stoker)
3. ระบบสโตกเกอร์แบบกระจาย (Spreader stoker)
4. สโตกเกอร์ที่มีการป้อนเชื้อเพลิงทางด้านล่าง (Underfeed stoker)

#### 3.7.2.1 ระบบสโตกเกอร์แบบตะแกรงเคลื่อน (Travelling grate stoker)

เป็นเตาเผาที่ป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้โดยใช้สายพานลำเลียง โดยสายพานทำมาจากเหล็กแผ่นหล่อต่อกันด้วยข้อต่อ ความหนาของชั้นถ่านหินสามารถปรับได้โดยประตูปรับระดับถ่านหิน อัตราการเผาไหม้สามารถปรับได้โดยความเร็วของสายพานและอัตราการป้อนอากาศ เถ้าที่เกิดขึ้นจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถูกปล่อยลงสู่กระเบกเก็บถ้า ถ่านหินที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้จะติดไฟจากความร้อนภายในห้องเผาไหม้ อากาศที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้จะได้รับการแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกจะเข้าทางด้านล่างของตะแกรง อีก ส่วนจะถูกป้อนเหนือตะแกรง

### 3.7.2.2 ระบบสโตกเกอร์แบบตะกรับโซ่ (Chain grate stoker)

มีลักษณะคล้ายกับ Travelling grate stoker แต่สายพานมีลักษณะคล้ายโซ่ ข้อจำกัดในการ ปลดปล่อยความร้อนอยู่ที่  $1,340 \text{ kW/m}^2$  ขนาดของถ่านหินอยู่ที่ 19 - 38 มิลลิเมตร เมื่อเกิดการเผาไหม้เชื้อเพลิงจะมีขนาดเล็กจนกระทั่งมีขนาดเล็กกว่า 6 มิลลิเมตร จะล่องไปได้เตาทำไหม้เกิน คาร์บอนที่ยังไม่เผาไหม้ ดังนั้นจะสามารถพบคาร์บอนตกค้างในถ่านประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์

### 3.7.2.3 ระบบสโตกเกอร์แบบกระจาย (Spreader stoker)

ถ่านหินจากไซโลจะถูกป้อนผ่านอุปกรณ์ป้อนชนิดหมุน ให้กระจายทั่วตะแกรงและเกิดการเผาไหม้ในชั้นด้านบน โดยมีอากาศส่วนแรกป้อนจากด้านล่างของตะแกรง อากาศส่วนที่สองจะสร้างความปั่นป่วนและป้อนเหนือตะแกรง ถ่านจะถูกกระจายผ่านกลไกของตะแกรงให้ร่วงลงสู่ด้านล่างห้องเผาไหม้ เตาเผาชนิดนี้สามารถใช้งานร่วมกับ ถ่านหิน ไม้ และขยะ ขนาดของเชื้อเพลิงที่ใหญ่ที่สุดอยู่ที่ 102 มิลลิเมตร สามารถใช้งานได้ 155MW ความร้อนถ่านหิน

### 3.7.2.4 สโตกเกอร์ที่มีการป้อนเชื้อเพลิงทางด้านล่าง (Underfeed stocker)

เป็นเตาเผาชนิดป้อนทางข้างล่างโดยอาศัยกลไกในการผลักดัน สามารถใช้ได้กับเชื้อเพลิงหลายชนิดเช่น ถ่านหิน ไม้สับ ไม้อัดแท่ง เป็นต้น แต่เตาเผาชนิดนี้มีความสามารถในการผลิตไอน้ำได้ต่ำ

### 3.7.3 ระบบเผาไหม้เชื้อเพลิงผง (Pulverized)

เตาเผาเชื้อเพลิงผงเป็นเตาที่มีการเผาไหม้ในขณะที่เชื้อเพลิงยังเป็นสารแขวนลอย ทำให้เชื้อเพลิงที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้มีขนาดเล็กกว่า 1 มิลลิเมตร เพื่อที่จะได้ลอยอยู่กับอากาศได้ โดยอากาศมักจะถูกแบ่งเป็น 2 ส่วน ในส่วนแรกจะเป็นอากาศที่ใช้ในการลำเลียงเชื้อเพลิง ส่วนถัดมาจะเป็นส่วนที่ทำให้เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ขึ้น ถ้าจากการเผาไหม้จะลอยออกมารวมกับแก๊สร้อนจากการเผาไหม้

### 3.7.4 ไซโคลน (Cyclone)

เป็นเตาเผาที่ได้รับการปรับปรุงมาจากเตาเผาแบบ Pulverized สามารถนำมาใช้ได้กับเชื้อเพลิงที่มีขนาดใหญ่กว่า เนื่องจากอากาศที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้มีความปั่นป่วน ผลที่ตามมาคือการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ โดยมีอุณหภูมิห้องเผาไหม้อยู่ที่ประมาณ 1,500 องศาเซลเซียส แก๊สที่ออกมาจากแก๊สร้อนจะประกอบด้วยเถ้าลอยและแอสลค

### 3.7.5 ระบบฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized Bed)

เป็นระบบเตาเผาแบบให้อากาศไหลผ่านชั้นของเชื้อเพลิง โดยอากาศที่ป้อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้จะสร้างแรงยกให้กับเชื้อเพลิง การเผาไหม้จะทำการเผาพร้อมกับเบดซึ่งเป็นสารจำพวก ททราย หรือ หินปูน การเผาไหม้ที่เกิดขึ้นจะอาศัยการถ่ายเทความร้อนของเบดมายังเชื้อเพลิง

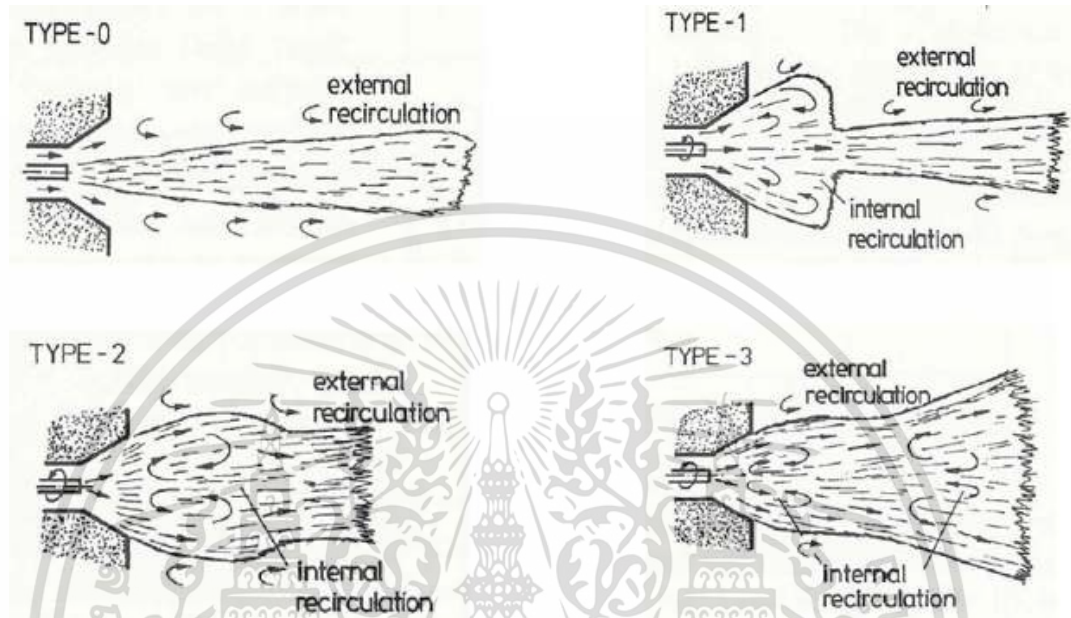
## 3.8 ชนิดของเปลวไฟ [36]

ลักษณะของเปลวไฟจากการศึกษาทางด้านการเผาไหม้ของมูลนิธิวิจัยเปลวไฟนานาชาติ ( The International Flame Research Foundation ,IFRF ) ได้ระบุถึงลักษณะของเปลวไฟที่ออกจากหัวเผาที่เราสามารถพบได้โดยทั่วไปไว้ 4 ประเภท ได้แก่

- ชนิดที่ 0 เปลวไฟพุ่งเป็นลำเจ็ท มีการหมุนควงที่ต่ำ ความแตกต่างของความดันตามแนวแกนไม่เพียงพอในการสร้างพื้นที่การไหลย้อนกลับภายใน อาศัยการหมุนวนภายนอกเนื่องจากความเร็วของลำเจ็ท
- ชนิดที่ 1 เป็นการผสมระหว่างเปลวไฟชนิดที่ 0 และ 2 ใช้หลักการของตัวออกซิไดซ์เซอร์ที่หยุดนิ่ง ( พื้นที่การไหลหมุนวน ) โดยทั่วไปการไหลหมุนควงที่ใช้ในการเผาไหม้จะรุนแรง
- ชนิดที่ 2 เปลวไฟที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้มีลักษณะของเปลวที่สั้น และมีความเข้มข้นที่สูงบริเวณหัวเผา สิ่งที่เกิดขึ้นนี้เป็นผลมาจากความเร็วในการไหลหมุนควงที่สูงของตัวออกซิไดซ์ นำไปสู่การเกิดขึ้นของพื้นที่การไหลหมุนควงภายใน ทำให้การปลดปล่อยสารระเหยของเชื้อเพลิงแข็งเกิดขึ้นบริเวณนี้ อีกทั้งยังส่งผลให้เกิดการจุดติดไฟบริเวณหัวเผา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ชนิดที่ 3 เป็นลักษณะเปลวไฟมีความเข้มข้นสูงและเกิดขึ้นอย่างที่ไม่ปกติ โดยที่เปลวไฟจากการเผาไหม้ไม่มีลักษณะเป็นลำเจ็ท การไหลหมุนควงของตัวออกซิไดซ์เซอร์มีความรุนแรง เกิดพื้นที่การไหลหมุนวนภายในชั้น 2 ส่วน ที่บริเวณใกล้หัวเผา

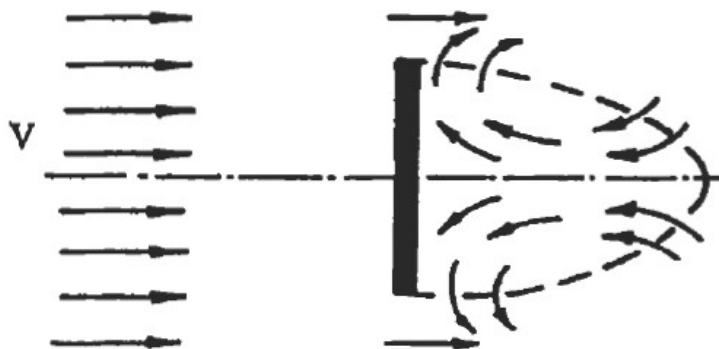


รูปที่ 3. 7 แสดงรูปแบบของเปลวไฟ [36]

### 3.9 เทคนิคการรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟ

#### 3.9.1 วัตถุขวางการไหล (Bluff body)[37]

วัตถุขวางการไหลคืออุปกรณ์พื้นฐานสำหรับการรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟ ซึ่งถือเป็นหนึ่งในเทคนิคที่ได้รับความนิยมในการนำไปใช้กับหัวเผาอุตสาหกรรม เนื่องจากวัตถุขวางการไหลจะถูกนำไปติดตั้งขวางทางการไหลทำให้เกิดบริเวณความดันสถิตต่ำด้านหลังวัตถุ อากาศจากพื้นที่ใกล้เคียงจะไหลเข้าสู่พื้นที่นี้แต่ทิศทางตรงข้ามกับทิศทางการไหลหลักที่เราเรียกว่าการไหลย้อนกลับปรากฏการณ์นี้ถือเป็นการสร้างพื้นที่การไหลให้มีความเร็วต่ำบริเวณด้านหลังของวัตถุทำให้เปลวไฟสามารถติดบริเวณนี้ได้ รวมไปถึงการนำความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้มาแลกเปลี่ยนให้กับอากาศและเชื้อเพลิงเย็นที่เข้าสู่ของเผาไหม้



รูปที่ 3. 8 แสดงการไหลผ่านวัตถุขวางการไหล [37]

### 3.9.2 อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควง (Swirler)

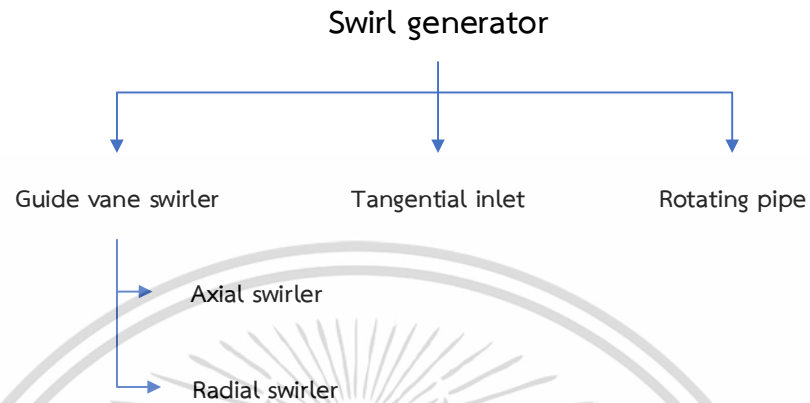
การไหลแบบหมุนควงเป็นเทคนิคในการรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟในกระบวนการเผาไหม้ เป็นหนึ่งในเทคนิคที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในการควบคุมระยะของเปลวไฟและยังช่วยเร่งการผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงให้ผสมกันบริเวณใกล้หัวเผา Beer and Chigier [38] ได้อธิบายว่าพลศาสตร์ของการไหลหมุนควงเกิดจากการเคลื่อนที่แบบหมุนและปรากฏการณ์ปั่นป่วนอิสระที่ผ่านหัวเผา จะประกอบด้วยความเร็วสัมผัสในแนวรัศมีและความเร็วในแนวแกน นอกจากนี้การไหลหมุนควงจะสร้างความชันของความดันตามแนวรัศมีและความชันของความดันตามแนวแกนที่สูงต่อสนามการไหล ในกรณีที่การหมุนควงมีความรุนแรงจะก่อให้เกิดความดันในทิศทางตรงข้ามทำให้เกิดเป็นการไหลย้อนกลับในรูปของการไหลหมุนวนภายใน (internal recirculation.) ที่มีส่วนสำคัญต่อเสถียรภาพของเปลวไฟและความเข้มข้นของการเผาไหม้ การสร้างอากาศหมุนควงสามารถทำได้โดย 3 วิธีด้วยกัน

1. ทางเข้าแบบสัมผัสตามแนวรัศมี
2. อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงชนิดมีใบควบคุมทิศทางการไหล
3. การหมุนโดยตรง(ท่อหมุน)

การสร้างอากาศหมุนควงแบบแรกมีการใช้งานอย่างแพร่หลายสำหรับการให้ลำเจ็ทที่มีความสม่ำเสมอ เปลี่ยนแปลงอัตราการไหลได้ง่ายแต่อย่างไรก็ตามยังขาดประสิทธิภาพในการสร้างการไหลหมุนควงที่มีความเข้มข้นสูงและต้องการความดันที่สูงสำหรับการใช้งานระบบนี้ จึงเป็นเหตุให้อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงชนิดมีใบควบคุมทิศทางการไหลได้รับความนิยมในการใช้งานร่วมกับหัวเผาเชิงพาณิชย์ อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงชนิดมีใบควบคุมทิศทางการไหลมักจะได้รับการติดตั้งขวางทิศ

ทางการไหลตามแนวแกน อุปกรณ์ชนิดนี้ประกอบด้วยใบที่ทำมุมกับทิศทางการไหลทำให้ของไหลที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผ่านเกิดการหมุนควง เทคนิคนี้มีการใช้งานกับเตาเผา เครื่องยนต์กังหันก๊าซ วิธีการสุดท้ายเป็นการอาศัยแรงต้านความเสียดทานของความหนืดของอากาศสามารถสร้างได้เฉพาะการหมุนควงอย่างเบาเท่านั้น



รูปที่ 3. 9 แสดงชนิดของอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควง

### 3.9.2.1 ตัวเลขการหมุนควง (Swirl number) [38]

Swirl number หรือตัวเลขการหมุนควง คือตัวแปรที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในการแสดงความรุนแรงหรือความเข้มข้นของการไหลหมุนควงในพื้นที่ปิดและการกระจายของการไหลด้วยการหา ฟลักซ์ของโมเมนตัมเชิงมุมและฟลักซ์โมเมนตัมเชิงเส้น ดังสมการ

$$S' = \frac{G_\phi}{G_x r_o} \quad (3.25)$$

เมื่อ  $G_\phi$  คือ ฟลักซ์ตามแนวแกนของโมเมนตัมเชิงมุม

$$G_\phi = 2\pi \int_0^\infty \rho U_x U_\theta r^2 dr \quad (3.26)$$

$G_x$  คือ ฟลักซ์ของโมเมนตัมเชิงเส้น

$$G_x = 2\pi \int_0^\infty \rho U_x^2 r dr + 2\pi \int_0^\infty p r dr \quad (3.27)$$

$r_o$  คือ รัศมีทางออกของswirler

$U_x$  คือความเร็วตามแนวแกนตามแนวรัศมี

$U_\theta$  คือความเร็วตามแนวสัมผัสตามแนวรัศมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการด้านบนของตัวเลขหารหมุน พจน์ของความดัน ที่ถูกกล่าวถึงเป็นความดันสถิตย ณ์ ตำแหน่งใด ๆ ซึ่งเป็นการยากที่จะสามารถวัดค่าที่แท้จริงได้ ในทางปฏิบัติโดยทั่วไป จะทำการละ เว้นพจน์ของความดันไว้ ดังนั้น

$$G_x = 2\pi \int_0^{\infty} \rho U_x^2 r dr \quad (3.28)$$

ตัวเลขการไหลหมุนควงสามารถวัดจากรูปทรงของความเร็วและรูปทรงของความดันสถิตย ์ ซึ่ง การวัดค่าเหล่านี้ต้องใช้ความรอบคอบในการทำการทดลองและจำเป็นต้องใช้เครื่องมือที่มีความ แม่นยำ ทำให้เป็นปัญหาสำหรับการศึกษาในเรื่องของตัวเลขการไหลหมุนควง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ทฤษฎีสำหรับการจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง

ในบทนี้จะขอกล่าวถึงทฤษฎีว่าด้วยการจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผงที่ประกอบไปด้วยสมการจำนวนมากเช่น สมการความต่อเนื่อง สมการการไหลปั่นป่วน สมการการแผ่รังสี สมการการกระจายตัวของอนุภาค สมการความไม่ต่อเนื่อง เป็นต้น เพื่อให้ได้มาซึ่งผลการจำลองที่มีความแม่นยำ

#### 4.1 สมการความต่อเนื่องและโมเมนตัม [39]

สมการความต่อเนื่องและโมเมนตัม คือหนึ่งในสมการหลักในการจำลองการไหลโดยการแก้ไขสมการอนุพันธ์มวลและสมการอนุพันธ์พลังงาน โดยการไหลที่มีการแลกเปลี่ยนความร้อน จะมีการนำสมการพลังงานมาใช้ เมื่อการจำลองมีการผสมกันของสปีชีส์หรือมีการทำปฏิกิริยาจะใช้สมการอนุพันธ์สปีชีส์ และสมการโอนถ่ายจะนำมาคำนวณเมื่อมีการไหลแบบปั่นป่วน

##### สมการอนุพันธ์มวล

สมการอนุพันธ์มวลหรือสมการความต่อเนื่อง สามารถเขียนได้โดย

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (4.1)$$

สมการที่ 4.1 คือรูปสมการอนุพันธ์มวลที่มีความแม่นยำในการคำนวณการไหลอัดตัวได้และการไหลอัดตัวไม่ได้  $S_m$  คอมวลที่ใส่เข้าในช่วงความต่อเนื่องจากช่วงที่ไม่ต่อเนื่อง

##### สมการอนุพันธ์โมเมนตัม

สมการอนุพันธ์โมเมนตัมในการอ้างอิงแบบเฉื่อย(ไม่มีความเร่ง) สามารถอธิบายได้โดยสมการ

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (4.2)$$

โดยที่  $p$  คือ ความดันสถิตย์

$\vec{\tau}$  คือ เทนเซอร์ความเค้น

$\rho \vec{g}$  คือ แรงโน้มถ่วงเนื่องจากน้ำหนัก

$\vec{F}$  คือ แรงกระทำภายนอกเนื่องจากน้ำหนัก ได้จากเทอมของแบบจำลองที่ใช้ร่วม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทนเซอร์ความเค้น  $\bar{\tau}$  สามารถหาได้จากสมการ

$$\bar{\tau} = \mu \left[ \left( \nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T \right) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right] \quad (4.3)$$

เมื่อ

$\mu$  คือ ความหนืด

$I$  คือ เมตริกเอกลักษณ์

สมการพลังงาน (energy equation)

สมการพลังงานในการถ่ายโอนระหว่างเฟส สามารถหาได้จากสมการ

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v} (\rho E + P)) = \nabla \cdot \left( k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\bar{\tau}_{eff} \cdot \vec{v}) \right) + S_h \quad (4.4)$$

และ

$$S_{h,rxn} = - \sum \frac{h_j^0}{M_j} R_j \quad (4.5)$$

เมื่อ

$E$  คือ ค่าความร้อนจำเพาะ

$\rho$  คือ ความหนาแน่น

$k_{eff}$  คือ ค่าประสิทธิภาพนำความร้อนประสิทธิผลระหว่างเฟส

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

$S_h$  คือ ความร้อนจากปฏิกิริยาเคมี และแหล่งพลังงานอื่นๆ

$h_j^0$  คือ เอนทัลปีการก่อเกิดของสปีชีส์  $j$

$R_j$  คือ อัตราการก่อเกิดโดยปริมาตรของสปีชีส์  $j$

## 4.2 แบบจำลองการไหลปั่นป่วน(Turbulent model) [39]

สมการนาเวียร์-สโตกส์ เป็นสมการทางคณิตศาสตร์ที่สามารถอธิบายปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ของของไหลได้อย่างกว้างขวาง จึงมีการนำสมการมาประยุกต์ใช้สำหรับการจำลองการไหลแบบปั่นป่วนเพื่ออธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นด้วยวิธีการจำลองนาเวียร์-สโตกส์ เฉลี่ย (Reynolds-averaged Navier–Stokes ,RANS) การจำลองการหมุนวนขนาดใหญ่ (Large-eddy simulation ,LES) และการจำลองทางคณิตศาสตร์โดยตรง (Direct numerical simulation ,DNS) ความแม่นยำ

ที่ได้จากการจำลองนั้นต้องแลกมาด้วยความสามารถของอุปกรณ์คำนวณและเวลาที่ใช้ในการคำนวณ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ยาวนาน เราจึงพบเห็นการนำวิธีการจำลองนาเวียร์-สโตกส์ เฉลี่ย มาใช้งานในการจำลองอย่างบ่อยครั้งเนื่องจากความแม่นยำที่สามารถยอมรับได้และเวลาที่ใช้ในการจำลองที่รวดเร็วกว่าวิธีการจำลองอื่น ๆ

วิธีการจำลองนาเวียร์-สโตกส์ เฉลี่ย มีการพัฒนามาอย่างยาวนาน ตั้งแต่ต้นศตวรรษที่ 19 สำหรับการจำลองการไหลในการพัฒนาอุตสาหกรรมอากาศยาน ต่อมามีการนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับการจำลองพลศาสตร์ของไหล รูปแบบของสมการการไหลปั่นป่วนที่พบในโดยทั่วไปได้แก่ แบบจำลอง  $k-\omega$  , แบบจำลอง  $k-\varepsilon$  ,แบบจำลองแรงเค้นเรย์โนลด์ส(*Reynolds Stress Model*) ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะอธิบายเพียงแค่แบบจำลอง  $k-\varepsilon$

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

ได้มีการพัฒนาโดยLaunder and Spalding (ในปัจจุบันใช้ชื่อแบบจำลอง  $k-\varepsilon$  standard) ที่ประกอบไปด้วย 2 สมการถ่ายโอน คือ turbulence kinetic energy,  $k$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (4.6)$$

rate of dissipation  $\varepsilon$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (4.7)$$

โดยที่

$G_k$  = ค่าการก่อกำเนิดพลังงานจลน์ระหว่างความชันของความเร็วเฉลี่ย

$G_b$  = ค่าการก่อกำเนิดพลังงานจลน์ระหว่างแรงลอยตัว

$Y_M$  = ค่าการมีสนับสนุนของความผันผวนในการขยายตัวบนความปั่นป่วนแบบอัดตัวได้ต่ออัตราการกระจายตัวโดยรวม

$C_{1\varepsilon}$  ,  $C_{2\varepsilon}$  ,  $C_{3\varepsilon}$  = ค่าคงที่ค่าเท่ากับ 1.44 และ 1.92 ตามลำดับ ในส่วนของ  $C_{3\varepsilon}$  ไม่ได้ระบุไว้

$\sigma_k$  และ  $\sigma_\varepsilon$  = ค่าตัวเลข Prandtl ของ  $k$  และ  $\varepsilon$  ที่มีค่าเท่ากับ 1.0 และ 1.3 ตามลำดับ

$S_k$  และ  $S_\varepsilon$  = ค่าเทอมของการก่อกำเนิด

### 4.2.1.1 แบบจำลองความหนืดปั่นป่วน (Turbulent Viscosity)

ค่าความหนืดปั่นป่วนได้ทำการรวมระหว่างเทอมของ  $k$  และ  $\varepsilon$  ดังสมการ

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4.8)$$

เมื่อ

$C_\mu$  = ค่าคงที่เท่ากับ 0.09

จากจุดแข็งและจุดอ่อนของแบบจำลองแบบจำลอง k- $\varepsilon$  จึงทำให้มีการพัฒนาแบบจำลองของแบบจำลอง k- $\varepsilon$  เพิ่มเติมได้แก่ Re-Normalization Group (RNG) และ Realizable

### 4.2.2 แบบจำลอง k- $\varepsilon$ ชนิด Re-Normalization Group (RNG)

Re-Normalization Group (RNG) เกิดขึ้นมาจากการพัฒนาแบบจำลอง k- standard ของ Yakhot และคณะ ได้ใช้กระบวนการทางคณิตศาสตร์ในสร้างสมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes) ในรูปแบบอย่างง่าย สำหรับอธิบายผลกระทบจากการเคลื่อนที่ขนาดเล็กซึ่งต่างจากรูปแบบก่อน ที่ความหนืดของการหมุนวนถูกประมาณจากความหนืดของการหมุนวนขนาดใหญ่และคำนวณการแพร่ของความปั่นป่วน ขณะที่ความเป็นจริงการแพร่ของความปั่นป่วนเกิดขึ้นที่ทุกระดับของการหมุนวน RNG มีการใช้งานสำหรับจำลองการไหลหมุนวนและแสดงผลลัพธ์ที่ดีขึ้นสำหรับการจำลองการไหลหมุนวน

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \alpha_k \mu_{eff} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (4.9)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \quad (4.10)$$

โดยที่

$G_k$  = ค่าการก่อกำเนิดพลังงานจลน์ระหว่างความผันของความเร็วเฉลี่ย

$G_b$  = ค่าการก่อกำเนิดพลังงานจลน์ระหว่างแรงลอยตัว

$Y_M$  = ค่าการมีสนับสนุนของความผันผวนในการขยายตัวบนความปั่นป่วนแบบอัดตัวได้อัตราการกระจายตัวโดยรวม

$C_{1\varepsilon}$ ,  $C_{2\varepsilon}$ ,  $C_{3\varepsilon}$  = ค่าคงที่ค่าเท่ากับ 1.42 และ 1.68 ตามลำดับ ในส่วนของ  $C_{3\varepsilon}$  ไม่ได้ระบุไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\alpha_k$  และ  $\alpha_\varepsilon$  = ค่าประสิทธิภาพผกผันของตัวเลข Prandtl ของ  $k$  และ  $\varepsilon$  ที่มีค่าเท่ากับ 1.0 และ 1.3 ตามลำดับ

$S_k$  และ  $S_\varepsilon$  = ค่าเทอมของการก่อกำเนิด

#### 4.2.2.1 แบบจำลองประสิทธิภาพ( Effective Viscosity)

ขนาดของการขจัดในทฤษฎี RNG ให้ผลลัพธ์ในรูปของสมการอนุพันธ์ สำหรับ ความหนืดปั่นป่วน

$$d\left(\frac{\rho^2 k}{\sqrt{\varepsilon \mu}}\right) = 1.72 \frac{\hat{\nu}}{\sqrt{\hat{\nu}^3 - 1 + C_V}} d\hat{\nu} \quad (4.11)$$

เมื่อ  $\hat{\nu} = \frac{\mu_{eff}}{\mu}$  และ  $C_V \approx 100$

ที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์สูง ค่าความหนืดปั่นป่วนสามารถหาได้จาก

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4.12)$$

$C_\mu$  = ค่าคงที่เท่ากับ 0.0845 ที่มีค่าใกล้เคียงกับ แบบจำลอง k- $\varepsilon$  standard  $C_\mu$  = ค่าคงที่เท่ากับ 0.09 เทอมของ  $R_\varepsilon$  ในสมการ  $\varepsilon$  แสดงถึงความแตกต่างระหว่างแบบจำลอง k- $\varepsilon$  standard และแบบจำลอง k- $\varepsilon$  RNG ดังสมการ

$$R_\varepsilon = \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta / \eta_0) \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^3} \frac{1}{k} \quad (4.13)$$

เมื่อ

$$\eta = Sk / \varepsilon, \quad \eta_0 = 4.38, \quad \beta = 0.012$$

#### 4.2.3 แบบจำลอง k- $\varepsilon$ ชนิด Realizable

Realizable เกิดขึ้นมาจากการพัฒนาแบบจำลอง k- standard ของ T.-H. Shih และ คณะ โดยมีความแตกต่างจากสมการแบบจำลอง k- $\varepsilon$  แบบมาตรฐาน ด้วยการสร้างสมการความหนืดของการปั่นป่วนใหม่และสมการการถ่ายโอนรูปแบบใหม่สำหรับอัตราการกระจาย ( $\varepsilon$ ) ที่แก้มาจากสมการแม่นยำตรงของการถ่ายโอนความปั่นป่วนจากค่าเฉลี่ยของความแปรปรวนกำลังสอง (mean-square vorticity fluctuation) คำว่า realizable หมายความว่าแบบจำลองที่สอดคล้องกับข้อจำกัดทางคณิตศาสตร์เกี่ยวกับความเครียดของเรย์โนลด์, กระแสการไหล ผลการจำลองจากสมการนี้สามารถเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คาดการณ์การแพร่กระจายแนวระนาบและลำเจ็ท นอกจากนี้ยังให้เพิ่มประสิทธิภาพของการจำลอง การไหลหมุนวน ของเขตของความต่างด้านความดันที่สูง การกระจายตัว และการไหลหมุนวน

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (4.14)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{v\varepsilon}} \\ &+ C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} C_b S_\varepsilon + S_\varepsilon \end{aligned} \quad (4.15)$$

เมื่อ

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

โดยที่

$G_k$  = ค่าการก่อกำเนิดพลังงานจลน์ระหว่างความชันของความเร็วเฉลี่ย

$G_b$  = ค่าการก่อกำเนิดพลังงานจลน์ระหว่างแรงลอยตัว

$Y_M$  = ค่าการมีสนับสนุนของความผันผวนในการขยายตัวบนความปั่นป่วนแบบอัดตัวได้อัตราการกระจายตัวโดยรวม

$C_{1\varepsilon}$ ,  $C_2$ ,  $C_{3\varepsilon}$  = ค่าคงที่ค่าเท่ากับ 1.44 และ 1.9 ตามลำดับ ในส่วนของ  $C_{3\varepsilon}$  ไม่ได้ระบุไว้

$\alpha_k$  และ  $\alpha_\varepsilon$  = ค่าประสิทธิภาพผกผันของตัวเลข Prandtl ของ  $k$  และ  $\varepsilon$  ที่มีค่าเท่ากับ 1.0 และ 1.2 ตามลำดับ

$S_k$  และ  $S_\varepsilon$  = ค่าเทอมของการก่อกำเนิด

### 4.2.3.1 Turbulence viscosity

รูปแบบของความหนืดในแบบจำลอง k- $\varepsilon$  โดยทั่วไปสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4.15)$$

จากการพัฒนาแบบจำลองเพื่อความแม่นยำที่มากขึ้นจึงเกิดความแตกต่างในส่วนของค่า  $C_\mu$  ที่ไม่ใช่ค่าคงที่เหมือนแบบจำลองที่ได้กล่าวมาก่อนหน้านี้ โดยค่า  $C_\mu$  สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$C_{\mu} = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{kU^*}{\varepsilon}} \quad (4.16)$$

เมื่อ

$$U^* = \sqrt{S_{ij}S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij}\tilde{\Omega}_{ij}} \quad (4.17)$$

และ

$$\tilde{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2\varepsilon_{ijk}\omega_k \quad (4.18)$$

$$\Omega_{ij} = \overline{\Omega_{ij}} - \varepsilon_{ijk}\omega_k \quad (4.19)$$

โดยค่า  $\tilde{\Omega}_{ij}$  คือค่าการหมุนเฉลี่ยในมุมมองของ tensor ในกรอบอ้างอิงกับค่าความเร็วเชิงมุม  $\omega_k$

ค่า  $A_0$ ,  $A_s$  คือค่าคงที่ ซึ่ง  $A_0 = 4.04$  และ  $A_s = \sqrt{6} \cos \phi$

เมื่อ

$$\phi = \frac{1}{3} \cos^{-1}(\sqrt{6}W) \quad (4.20)$$

$$W = \frac{S_{ij}S_{jk}S_{ki}}{\tilde{S}} \quad (4.21)$$

$$\tilde{S} = \sqrt{S_{ij}S_{ij}} \quad (4.22)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (4.23)$$

### 4.3 แบบจำลองการแผ่รังสี (Radiation model) [39]

แบบจำลองการแผ่รังสีที่ได้รับความนิยมมีจำนวน 5 แบบ สำหรับการจำลอง ได้แก่

- Discrete Transfer Radiation Model (DTRM)
- P-1 Radiation Model
- Rosseland Radiation Model
- Surface-to-Surface (S2S) Radiation Model
- Discrete Ordinates (DO) Radiation Model

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะนำเสนอเพียงแบบจำลองการแผ่รังสี Discrete Ordinates (DO)

### 4.3.1 แบบจำลองการแผ่รังสี Discrete Ordinates (DO)

ธรรมชาติของการแผ่รังสีปริมาณความร้อนที่อนุภาคแผ่ออกมาสู่อนุภาคตัวรับ ความร้อนที่แผ่ออกมานั้นจะขึ้นอยู่กับมุมที่แผ่ออกมาจากวัสดุ ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีและความถี่ เมื่อรังสีแผ่ไปถึงอนุภาคตัวรับ ความร้อนที่ได้รับจะขึ้นอยู่กับมุมตกกระทบและการดูดซับรังสี ที่มีค่าเปลี่ยนไปตามรังสีรวมไปถึงระยะห่างระหว่างอนุภาค

การถ่ายเทความร้อนแบบแผ่รังสี เป็นการถ่ายเทความร้อนที่มีความยุ่งยาก จึงมีสมมติฐานว่าการแผ่รังสีมีทิศทางที่ชัดเจน และจำนวนครั้งในการจำลองจะขึ้นอยู่กับทิศทาง โดยหนึ่งในแบบจำลองการแผ่รังสีที่ได้รับความนิยมคือ แบบจำลองการแผ่รังสี Discrete Ordinates (DO) จะแก้สมการการถ่ายโอนรังสี radiative transfer equation (RTE) สำหรับจำนวนจำกัดของมุมต้นไม่ต่อเนื่อง ซึ่งเกี่ยวข้องกับเวกเตอร์ในระบบพิกัดคาทีเซียน โดยสมการที่ใช้ในการจำลองได้แก่

$$\nabla \cdot (I(\vec{r}, \vec{s}) \vec{s}) + (a + \sigma_s) I(\vec{r}, \vec{s}) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s}, \vec{s}') d\Phi' \quad (4.24)$$

### 4.4 Discrete Phase Models [39]

สมการโอนถ่ายสำหรับการไหลแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (2 สถานะ) ในสถานะที่สอง เรามีสมมติฐานว่าอนุภาคเชื้อเพลิงกระจายทั่วในของไหลสถานะแรก การคำนวณวิถีของสมการสถานะที่ไม่ต่อเนื่องจะทำการคำนวณทั้งการถ่ายโอนความร้อน และการถ่ายโอนมวลในทั้งสองสถานะ โดยการใช้สมการ Lagrangian ที่คำนึงถึง แรงต้านทานพลศาสตร์ แรงเฉื่อยจากความไม่ต่อเนื่อง แรงโน้มถ่วง ผลกระทบจากการไหลปั่นป่วน ในส่วนของการเผาไหม้ อนุภาคเชื้อเพลิง จะคำนวณในส่วนของ การปลดปล่อยสารระเหย การเผาไหม้ถ่านชาร์ ข้อจำกัดของการคำนวณโดยในแบบจำลองคือการที่อนุภาคไหลในลักษณะเบาบาง

#### 4.4.1 สมการการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Equations of Motion for Particles)

สมดุลแรงของอนุภาค (Equations of Motion for Particles)

การคาดการณ์วิถีของอนุภาคในการไหลที่ไม่ต่อเนื่องจากการทำสมดุลแรงของอนุภาคของกรอบอ้างอิง Lagrangian สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x \quad (4.25)$$

เมื่อ  $u$  คือความเร็วของไหล

$u_p$  คือ ความเร็วของอนุภาค

$\rho_p$  คือ ความหนาแน่นของอนุภาค

$\rho$  คือความหนาแน่นของของไหล

$F_x$  คือ เทอมของแรงที่เพิ่มขึ้นต่อมวลของอนุภาค

$g_x$  คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

$F_D(u - u_p)$  คือ แรงต้านต่อหน่วยมวลอนุภาค

และสามารถหาแรงต้านได้จาก

$$F_D = \frac{18\mu C_D \text{Re}}{\rho_p d_p^2} \frac{1}{24} \quad (4.26)$$

$\mu$  คือความหนืดโมเลกุลของของไหล

$d_p$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค

Re คือ ตัวเลขเรย์โนลด์สัมพัทธ์;  $\text{Re} \equiv \frac{\rho d_p |u_p - u|}{\mu}$

แรงอื่น ๆ ที่กระทำต่ออนุภาค

$$F_x = \frac{1}{2} \frac{\rho}{\rho_p} \frac{d}{dt} (u - u_p) \quad (4.27)$$

เมื่อ  $\rho > \rho_p$  แรงที่เพิ่มแก่อนุภาคจะสูงขึ้นระหว่างความชันของสนามความดันของของไหล

$$F_x = \frac{\rho}{\rho_p} u_p \frac{\partial u}{\partial x} \quad (4.28)$$

#### 4.4.2 การถ่ายเทความร้อน มวล และโมเมนตัม ระหว่างอนุภาคกับก๊าซร้อน

การคำนวณการถ่ายโอนความร้อน มวล โมเมนตัม และการสูญเสียต่าง ๆ ของการแสการเคลื่อนที่ของการไหล ที่การไหลแบบต่อเนื่องสร้างผลกระทบต่อการไหลแบบไม่ต่อเนื่อง สามารถเชื่อมต่อได้โดยการทำ two-way coupling โดยใช้การคำนวณที่สลับกัน และจะหยุดคำนวณก็ต่อเมื่อไม่มีความแตกต่างกันระหว่างทั้ง 2 กระแสการไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.4.3 แบบจำลอง Discrete Random Walk

แบบจำลอง Discrete Random Walk (DRW) หรือ eddy lifetime เป็นการเชื่อมโยงของอนุภาคในกระแสน้ำแบบปั่นป่วน ด้วยการอาศัยลักษณะของ ความเร็วของการกระจายแบบสุ่ม ในแกนความเร็วต่าง ๆ และ time scale ของการเคลื่อนอนุภาค ค่าความเร็วแกว่งในแกนต่าง ๆ มีสมมติฐานมาจากความน่าจะเป็นในการกระจายตัวของ Gaussian

$$u' = \zeta \sqrt{u'^2}$$

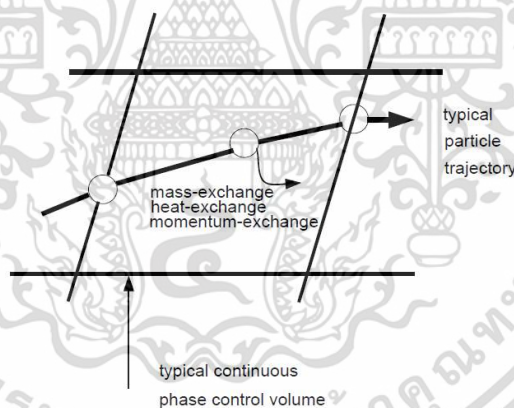
$\zeta$  คือ จำนวนของการกระจายตัวแบบสุ่ม

ค่าของความเร็วคือค่าเฉลี่ยรากที่สองของความเร็วที่มีการแกว่ง องค์ประกอบของความเร็วสามารถประมาณได้โดย

$$\sqrt{u'^2} = \sqrt{v'^2} = \sqrt{w'^2} = \sqrt{2k/3}$$

### 4.4.4 การแลกเปลี่ยนโมเมนตัม Momentum Exchange

การแลกเปลี่ยนโมเมนตัมระหว่างสถานะของแข็งกับก๊าซจะทำการคำนวณโดยตรวจสอบโมเมนตัมที่ผ่านปริมาตรควบคุม จากสมการ



รูปที่ 4. 1 แสดงการแลกเปลี่ยนโมเมนตัม [40]

$$F_x = \sum \left( \frac{18\mu C_D \text{Re}}{\rho_p d_p^2 24} (u_p - u) + F_{\text{other}} \right) \dot{m}_p \Delta t \quad (4.29)$$

เมื่อ

$\mu$  คือ ความหนืดของของไหล

$\rho_p$  คือ ความหนาแน่นของอนุภาค

$d_p^2$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค

Re คือ ตัวเลขเรย์โนลด์สัมพัทธ์

$u$  คือ ความเร็วของของไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- $u_p$  คือ ความเร็วของอนุภาค  
 $C_D$  คือ สัมประสิทธิ์แรงต้าน  
 $\dot{m}_p$  คือ อัตราไหลเชิงมวลของอนุภาค  
 $\Delta t$  คือ time step  
 $F_{other}$  คือ แรงกระทำอื่นๆ

#### 4.4.5 การแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchange)

การถ่ายโอนความร้อนระหว่างสถานะของแข็งและของไหลจะทำการคำนวณพลังงานความร้อนที่ผ่านปริมาตรควบคุม ดังสมการ

$$Q = \left[ \frac{\bar{m}_p}{m_{p,0}} c_p \Delta T_p + \frac{\Delta m_p}{m_{p,0}} \left( -h_{fg} + h_{pyrol} + \int_{T_{ref}}^{T_p} c_{p,i} dT \right) \right] \dot{m}_{p,0} \quad (4.30)$$

- 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 ค่าความร้อนแฝงของสารระเหย  
 $h_{pyrol}$  คือ ค่าความร้อนของสารระเหย  
 $T_p$  คือ อุณหภูมิของอนุภาคที่บริเวณทางออกของปริมาตรควบคุม  
 $T_{ref}$  คือ อุณหภูมิอ้างอิงบริเวณทางเข้า  
 $c_{p,i}$  คือ ค่าความจุความร้อนของสารระเหย  
 $\dot{m}_{p,0}$  คือ อัตราการไหลเชิงมวลเริ่มต้นของอนุภาค

#### 4.4.6 การแลกเปลี่ยนมวล (Mass Exchange)

การแลกเปลี่ยนมวลระหว่างของแข็งและแก๊ส จะคำนวณจากอนุภาคที่โคจรผ่านปริมาตรควบคุมเขียนได้ดังนี้

$$M = \frac{\Delta m_p}{m_{p,0}} \dot{m}_{p,0} \quad (4.31)$$

การแลกเปลี่ยนมวลจะปรากฏที่พจน์ของการก่อกำเนิดในสมการความต่อเนื่องของการไหลและสปีชีส์จากการกำหนดเงื่อนไขของการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.5 แบบจำลองการถ่ายโอนสปีชีส์ (Modeling Species Transport) [39]

แบบจำลองนี้คือแบบจำลองที่สามารถคาดการณ์การผสมหรือการถ่ายโอนทางเคมีโดยการนำสมการอนุรักษ์มาใช้ในการคำนวณที่อธิบายด้วยการพา การแพร่และแหล่งปฏิกิริยาของแต่ละสปีชีส์ อีกทั้งยังสามารถนำมาใช้กับการจำลองปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นใน bulk phase (volumetric reactions) หรือ บนพื้นผิวอนุภาค

### 4.5.1 Volumetric Reactions

การจำลองปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นใน Volumetric Reactions จะทำการจำลองสัดส่วนมวล ( $Y_i$ ) ของแต่ละสปีชีส์ ด้วยวิธีการแก้ไขสมการการพาและการแพร่ของสปีชีส์ใด ๆ ดังที่แสดงในสมการอนุรักษ์ดังต่อไปนี้

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + R_i + S_i \quad (4.32)$$

เมื่อ

$R_i$  คือ อัตราการเกิดสารผลิตภัณฑ์สุทธิ

$S_i$  คือ อัตราการสร้าง

$\vec{J}_i$  คือ ฟลักซ์การแพร่ของสปีชีส์

#### 4.5.1.1 The Generalized Finite-Rate Formulation for Reaction Modeling

อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ปรากฏอยู่ใน source terms ของสมการก่อนหน้านี้ มีแบบจำลองอยู่ 3 ชนิด ได้แก่ 1. Laminar finite-rate model 2. Eddy-dissipation model และ Eddy-dissipation-concept (EDC) model ในที่นี้จะขอกกล่าวเพียง Eddy-dissipation model

##### 4.5.1.1.1 Eddy-Dissipation Model

การเผาไหม้เชื้อเพลิงส่วนมากอยู่ภายใต้การควบคุมของความปั่นป่วน ไม่ว่าจะเป็นการเผาไหม้แบบผสมก่อนหรือแบบไม่ผสมก่อนก็ตาม การเผาไหม้แบบผสมก่อนที่สารตั้งต้นมีอุณหภูมิต่ำ ปฏิกิริยาเคมีเกิดจากความปั่นป่วนที่นำสารผลิตภัณฑ์ที่มีอุณหภูมิสูงมาช่วยในการทำปฏิกิริยา ในส่วนของการเผาไหม้แบบไม่ผสมก่อน เชื้อเพลิงและอากาศทั้ง 2 กระแสการไหลจะทำปฏิกิริยาเคมีด้วยการผสมกันในบริเวณการไหลปั่นป่วน ในกรณีนี้การเผาไหม้ถูกควบคุมโดยอัตราการผสม อัตรา chemical kinetic จึงไม่ส่งผลต่อการเผาไหม้ ในการจำลอง Eddy-Dissipation Model อัตราการเกิดของผลิตภัณฑ์สุทธิของแต่ละสปีชีส์เนื่องจากปฏิกิริยาจะแสดงโดยสมการ

$$R_{i,r} = v'_{i,r} M_{w,i} A \rho \frac{\varepsilon}{k} \min \left( \frac{Y_R}{v'_{R,r} M_{w,R}} \right) \quad (4.34)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_{i,r} = v'_{i,r} M_{w,i} AB \rho \frac{\sum_p Y_p}{k \sum_j v''_{j,r} M_{w,j}} \quad (4.35)$$

เมื่อ

$Y_p$  คือ สัดส่วนมวลของผลิตภัณฑ์

$Y_R$  คือ สัดส่วนมวลของสารตั้งต้น

$A$  คือ ค่าคงที่เท่ากับ 4

$B$  คือ ค่าคงที่เท่ากับ 5

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

#### 4.5.1.1.2 การแพร่ของมวลในกระแสปั่นป่วน (Mass Diffusion in Turbulent Flows)

การแพร่ของมวลในกระแสปั่นป่วน สามารถคำนวณได้ด้วย

$$\vec{j}_i = - \left( \rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sc_i} \right) \nabla Y_i \quad (4.36)$$

$Sc_i$  คือ ตัวเลข turbulent Schmidt number

การถ่ายโอนสปีชีส์ในสมการพลังงาน

การผสมกันของสปีชีส์ในมุมมองของสมการพลังงาน คือการถ่ายโอนของเอนทัลปีจากการแพร่ของสปีชีส์สามารถเขียนในรูปสมการได้ด้วย

$$\nabla \cdot \left[ \sum_{i=1}^n h_i \vec{j}_i \right] \quad (4.37)$$

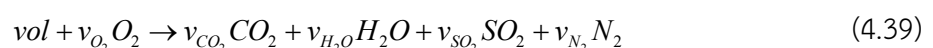
และการแพร่ที่ส่งผลถึงสนามของเอนทัลปี สามารถพิจารณาได้จาก Lewis number

$$Le_i = \frac{k}{\rho c_p D_{i,m}} \quad (4.38)$$

#### 4.5.1.1.3 กลไกการเกิดปฏิกิริยาเคมีแบบ 2 ชั้น

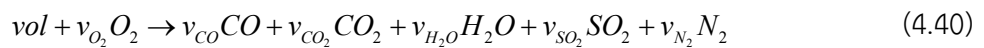
การจำลองปฏิกิริยาของสารระเหยกับตัวออกซิไดซ์ที่เกิดขึ้นในความเป็นจริงมีปฏิกิริยามากมายจึงมีแนวคิดในการจำลองปฏิกิริยาอย่างง่ายเพื่อลดเวลาในการคำนวณ จึงเป็นแบบจำลองแบบ 2 ชั้น ได้แก่

ชั้นที่ 1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นที่ 2



## 4.6 แบบจำลองสำหรับการเผาไหม้ (Combustion model) [33]

### 4.6.1 Law 1/Law 6: Inert Heating or Cooling model

Law 1/Law 6: Inert Heating or Cooling จะนำมาใช้ในการคำนวณเมื่ออุณหภูมิของอนุภาคต่ำกว่าอุณหภูมิจะระเหย โดยที่อุณหภูมิจุดระเหยนี้เป็นอุณหภูมิเฉพาะของแต่ละอนุภาค และหลังจากปริมาณสารระเหยที่ได้ปลดปล่อยออกมา (ปริมาณสัดส่วนสารระเหย,  $f_{v,o}$ ) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$T_p < T_{vap} \quad (4.42)$$

$$m_p \leq (1 - f_{v,o}) m_{p,0} \quad (4.43)$$

โดยที่

$T_p$  คือ อุณหภูมิของอนุภาค

$m_{p,0}$  คือ มวลของอนุภาคขณะเริ่มต้น

$m_p$  คือ มวลของอนุภาค ณ ขณะนั้น

กฎข้อนี้ได้นำมาใช้กับอนุภาคจนกระทั่งอนุภาคมีอุณหภูมิเข้าใกล้อุณหภูมิจุดระเหย สมมติฐานของกฎข้อนี้มาจากการทำสมดุลทางความร้อนที่เกี่ยวข้องกับอนุภาค  $T_p(t)$  การถ่ายเทความร้อนด้วยการพาความร้อน การดูดซับและการแผ่รังสีที่พื้นผิวของอนุภาค ดังสมการ

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = h A_p (T_\infty - T_p) + \varepsilon_p A_p \sigma (\theta_r^4 - T_p^4) \quad (4.44)$$

เมื่อ

$m_p$  คือ มวลของอนุภาค (kg)

$c_p$  คือ ค่าความจุความร้อนของอนุภาค (J/kg-K)

$A_p$  คือ พื้นที่ผิวของอนุภาค ( $m^2$ )

$T_\infty$  คือ อุณหภูมิบริเวณพื้นที่การไหลแบบเนื้อเดียวกัน (K)

$h$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $W/m^2-K$ )

$\varepsilon_p$  คือ ค่าการแผ่รังสีของอนุภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\sigma$  คือ ค่าคงที่ Stefan-Boltzmann ( $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{-K}^4$ )

$\theta_R$  คือ อุณหภูมิของการแผ่รังสี  $\left(\frac{G}{4\sigma}\right)^{1/4}$

$G$  รังสีที่ตกกระทบบ incident radiation ( $\text{W/m}^2$ )

$$G = \int_{\Omega=4\pi} I d\Omega$$

$I$  คือ ค่าความเข้มข้นของการแผ่รังสี

$\Omega$  คือ มุมตัน solid angle

#### 4.6.2 การปลดปล่อยสารระเหย (Devolatilization)

กฎการปลดปล่อยสารระเหยมีการนำมาใช้เมื่ออนุภาคเชื้อเพลิงแข็งได้รับอุณหภูมิจนกระทั่งอนุภาคนั้นมีอุณหภูมิถึงจุดปลดปล่อยสารระเหย ( $T_{vap}$ ) และอนุภาคนี้ยังคงมีมวลของอนุภาค ( $m_p$ ) มากกว่ามวลที่ปลดปล่อยสารระเหยหมดแล้ว กระบวนการนี้จะเกิดขึ้นเมื่อ  $T_p > T_{vap}$  และ  $T_p > T_{bp}$  และ  $m_p > (1 - f_{v,o})(1 - f_{w,o})m_{p,o}$  โดยที่  $f_{w,o}$  คือ สัดส่วนมวล (mass fraction) การระเหยหรือการเดือดของวัสดุในกรณีที่เป็นการเผาไหม้เกิดขึ้นแบบมีความชื้นอยู่ภายในอนุภาค การจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งโดยทั่วไปมีแบบจำลองเกี่ยวกับการปล่อยปล่อยสารระเหยอยู่ 4 แบบ ได้แก่ 1. แบบจำลอง constant rate 2. แบบจำลอง single kinetic rate 3. แบบจำลอง two competing rates 4. แบบจำลอง chemical percolation devolatilization (CPD) ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะขออธิบายเพียง แบบจำลอง single kinetic rate เท่านั้น

#### 4.6.3 แบบจำลอง single kinetic rate

แบบจำลอง single kinetic rate มีสมมติฐานมาจากอัตราการปลดปล่อยสารระเหยขั้นที่ 1 ที่ขึ้นอยู่กับปริมาณของสารระเหยทั้งหมดภายในอนุภาค ดังสมการ

$$-\frac{dm_p}{dt} = k \left[ m_p - (1 - f_{v,o})(1 - f_{w,o})m_{p,o} \right] \quad (4.45)$$

โดยที่

$m_p$  คือ มวลของอนุภาค (kg)

$f_{v,o}$  คือ สัดส่วนมวลของสารระเหยขณะเริ่มต้นของอนุภาค ได้จากการทำการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบโดยประมาณ (proximate analysis)

$f_{w,o}$  คือ สัดส่วนมวลของการระเหยหรือการเดือดของอนุภาค

$m_{p,o}$  คือ มวลของอนุภาคขณะเริ่มต้น (kg)

$k$  คือ kinetic rate ( $\text{s}^{-1}$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนของ  $k$  (kinetic rate) เป็นค่าที่ได้จากสมการ Arrhenius โดยใช้ pre-exponential factor และ activation energy

$$k = A_1 e^{-(E/RT)} \quad (4.46)$$

เมื่อนำมาแทนในสมการที่ 4.45 ซึ่งมีสมมติฐานว่าอุณหภูมิแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยระหว่างเวลาต่าง ๆ จะได้ว่า

$$m_p(t + \Delta t) = (1 - f_{v,o})(1 - f_{w,o})m_{p,o} + [m_p(t) - (1 - f_{v,o})(1 - f_{w,o})m_{p,o}]e^{-(E/RT)} \quad (4.47)$$

#### 4.6.4 การถ่ายเทความร้อนสู่อนุภาคระหว่างการปลดปล่อยสารระเหย

การถ่ายเทความร้อนสู่อนุภาคระหว่างการปลดปล่อยสารระเหย ประกอบไปด้วย การพาความร้อน การแผ่รังสี และการนำความร้อนมาใช้ในการระเหยสารระเหยภายในเชื้อเพลิง ดังสมการ

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = hA_p (T_\infty - T_p) + \frac{dm_p}{dt} h_{fg} + \epsilon_p A_p \sigma (\theta_R^4 - T_p^4) \quad (4.48)$$

#### 4.6.5 การเผาไหม้บริเวณผิว (Surface Combustion)

หลังจากกระบวนการปลดปล่อยสารระเหยเสร็จสิ้น จะเกิดการทำปฏิกิริยาบริเวณพื้นผิวด้วยการใช้ปริมาณเชื้อเพลิง บางแหล่งที่มาใช้คำว่าสัดส่วนมวลของสารติดไฟ  $f_{comb}$  ของอนุภาคซึ่งหมายถึงปริมาณคาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบของเชื้อเพลิง โดยกฎสำหรับการเผาไหม้บริเวณพื้นผิวหลังการปลดปล่อยสารระเหย

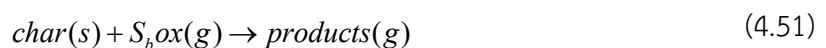
$$m_p < (1 - f_{v,o})(1 - f_{w,o})m_{p,o} \quad (4.49)$$

จนกระทั่งเริ่มมีการนำปริมาณสารติดไฟมาใช้

$$m_p > [(1 - f_{v,o})(1 - f_{w,o}) - f_{comb}]m_{p,o} \quad (4.50)$$

เมื่อกระบวนการเผาไหม้ของอนุภาคเสร็จสิ้นจะเหลือเพียงแค่น้ำ ซึ่งจะกลับเข้าสู่กระบวนการรับความร้อนอีกครั้ง

การเผาไหม้บนพื้นผิวในบางครั้งอาจมีการทำปฏิกิริยาหลายปฏิกิริยาบนหนึ่งพื้นผิวจึงเกิดเป็นแบบจำลอง multiple surface reactions ที่การทำปฏิกิริยาควบคุมโดยความต้องการทางสโตยชิโอเมตริก  $S_b$  คือปฏิกิริยา surface burnout



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$S_p$  เทอมของมวลสารออกซิแดนซ์ต่อมวลของชาร์ ออกซิแดนซ์และสปีชีส์ของสารผลิตภัณฑ์

ในโปรแกรมจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผงมีแบบจำลอง heterogeneous surface reaction rate models สำหรับการเผาไหม้อนุภาค 4 รูปแบบด้วยกันได้แก่

- the diffusion-limited rate model
- the kinetics/diffusion-limited rate model
- the intrinsic model
- the multiple surface reactions model

ณ ที่นี้จะขอกกล่าวเพียงแค่แบบจำลอง Kinetic/Diffusion Surface Reaction Rate

#### 4.6.5.1 แบบจำลอง Kinetic/Diffusion Surface Reaction Rate

แบบจำลอง Kinetic/Diffusion Surface Reaction Rate มีสมมติฐานว่าการทำปฏิกิริยาบริเวณพื้นผิว สามารถประมาณได้โดย อัตรา Kinetic หรือ Diffusion ที่ได้รับการพัฒนาจาก Baum and Street [13] and Field [65] โดยมี

สัมประสิทธิ์การแพร่(diffusion rate coefficient)

$$D_0 = C_1 \frac{[(T_p + T_\infty) / 2]^{0.75}}{d_p} \quad (4.52)$$

Kinetic rate

$$R = C_2 e^{-(E/RT_p)} \quad (4.53)$$

มีการถ่วงน้ำหนักให้อัตราการเผาไหม้ถ่านชาร์โดย

$$\frac{dm_p}{dt} = -\pi d_p^2 p_{ox} \frac{D_0 R}{D_0 + R} \quad (4.54)$$

โดยที่

$p_{ox}$  คือ ค่าความดันของออกซิแดนซ์ ณ ตำแหน่งใด ๆ

$R$  คือ ค่าการรวมของปฏิกิริยาบนพื้นผิวภายในของถ่านชาร์และการแพร่สู่ช่องว่างภายในถ่านชาร์ จากสมการก่อนหน้าสามารถเขียนใหม่ในรูปของ สัดส่วนมวลของออกซิแดนซ์,  $Y_{ox}$

$$\frac{dm_p}{dt} = -\pi d_p^2 \frac{\rho R T Y_{ox}}{M_{w,ox}} \frac{D_0 R}{D_0 + R} \quad (4.55)$$

โดยสมการนี้มีสมมติฐานให้ขนาดของอนุภาคคงที่แต่ความหนาแน่นลดลง

การถ่ายโอนความร้อนและมวลระหว่างการเผาไหม้ถ่านชาร์จะทำสมดุลความร้อนระหว่างการทำปฏิกิริยาบนพื้นผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = hA_p (T_\infty - T_p) + f_h \frac{dm_p}{dt} H_{\text{reac}} + \varepsilon_p A_p \sigma (\theta_R^4 - T_p^4) \quad (4.56)$$

โดยที่

$H_{\text{reac}}$  คือ ความร้อนที่ปลดปล่อยระหว่างการทำปฏิกิริยาบนพื้นผิว

#### 4.7 Rosin ramler distribution

วิธีการกระจายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโรซินแรมเลอร์ เป็นวิธีการนำเสนอการกระจายตัวของขนาดอนุภาค เป็นวิธีการที่ถูกพบโดยFréchet นักวิทยาศาสตร์ชาวสวิสเซอร์แลนด์ ในปี 1955 Waloddi Weibull ที่ได้ใช้ทฤษฎีความน่าจะเป็นและสถิติเข้ามาช่วยในการอธิบายสมการของ Fréchet ในปี 1933 Rosin และ Ramler ได้นำมาใช้ในการอธิบายการกระจายตัวของขนาดอนุภาค ซึ่งแบ่งช่วงขนาดของอนุภาคออกเป็นช่วงขนาดที่ไม่ต่อเนื่องด้วยการใช้ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคที่นำมาใช้ในการคำนวณร่วมกับ mass fraction ของอนุภาคที่เล็กกว่าขนาดของอนุภาคที่กำลังเปรียบเทียบ โดย

$$Y_d = e^{-(d/\bar{d})^n} \quad (4.33)$$

เมื่อ

$Y_d$  = mass fraction ของอนุภาคที่เล็กกว่าขนาดของอนุภาคที่กำลังเปรียบเทียบ

$d$  = ขนาดของอนุภาคที่กำลังพิจารณา

$\bar{d}$  = ขนาดของอนุภาคโดยเฉลี่ย

$n$  = Spread Parameter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

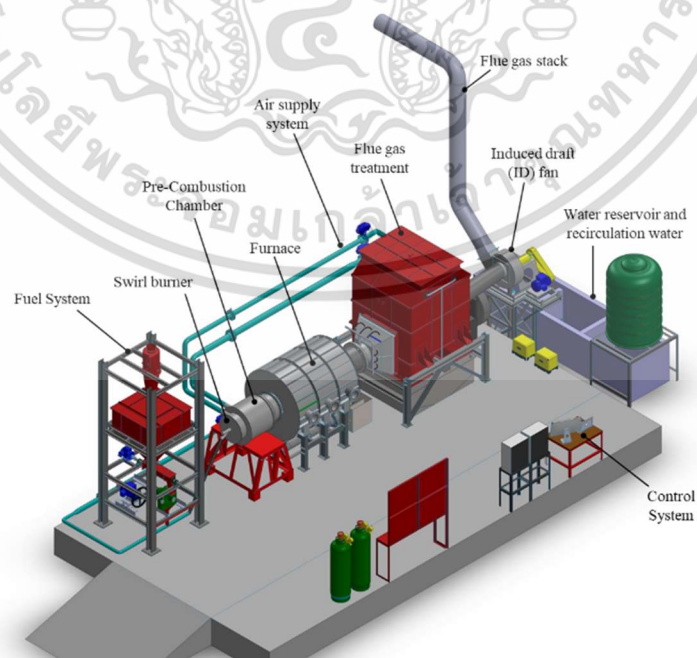
### อุปกรณ์ ระบบสนับสนุนการทดลองและวิธีการทดลอง

จากเนื้อหาเรื่องทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย นำไปสู่การเลือกใช้งานอุปกรณ์และออกแบบการทดลองต่าง ๆ สำหรับการหาข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ รวมไปถึงหาข้อมูลที่เป็นต่อการจำลองพลศาสตร์ของไหลคำนวณเกี่ยวกับการเผาไหม้ ไม่ว่าจะเป็นขนาดของอนุภาค อุณหภูมิในการปล่อยสารระเหยของเชื้อเพลิงชีวมวล และการทดลองการเผาไหม้เพื่อเก็บค่าอุณหภูมิและองค์ประกอบของแก๊สร้อน

#### 5.1 อุปกรณ์และระบบสนับสนุนการทดลอง

##### 5.1.1 อุปกรณ์ของระบบเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงและระบบสนับสนุนการทดลอง

หัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ได้รับแนวคิดในการออกแบบให้คล้ายคลึงกับหัวเผาเชื้อเพลิงถ่านในที่มีใช้งานในอุตสาหกรรม ในการทดลองระบบจะประกอบไปด้วยระบบสนับสนุนต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นระบบเผาไหม้เชื้อเพลิง ระบบควบคุมการทดลอง ระบบป้อนอากาศ ระบบพัดและลำเลียงเชื้อเพลิงและระบบบำบัดไอเสีย



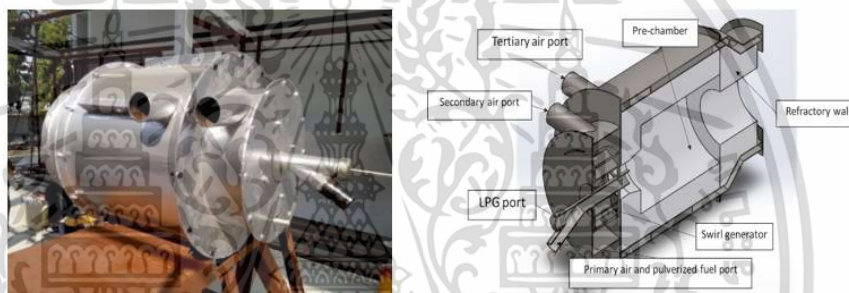
รูปที่ 5.1 แสดงอุปกรณ์ของระบบเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่เสียประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.1.1.1 หัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผง

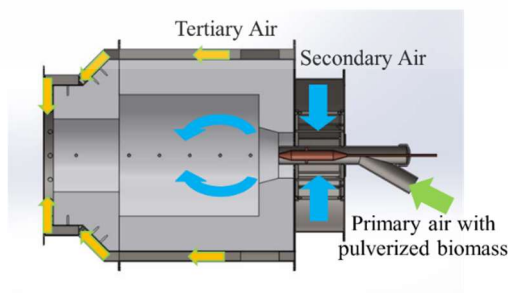
หัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงสามารถอาจเรียกอีกชื่อว่า ห้องเผาไหม้ช่วย วัตถุประสงค์ของหัวเผาชีวมวลผงนี้เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งที่ต้องใช้เวลาในการเผาไหม้นาน เนื่องจากกระบวนการต่าง ๆ ระหว่างการเผาไหม้เชื้อเพลิง ดังนั้นจึงมีแนวคิดในการสร้างห้องเผาไหม้ช่วยที่มีขนาดเล็กเพื่อที่ให้การบวนการเผาไหม้ส่วนใหญ่เกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้ช่วย อีกทั้งยังมีส่วนช่วยในการรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟ

หัวเผาของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประกอบไปด้วย ห้องเผาไหม้ช่วยที่มีผนังเป็นอิฐทนไฟ ช่องทางเข้าอากาศส่วนปฐมภูมิ ทุติยภูมิ ตติยภูมิ ช่องทางเข้าของLPG อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควง วัสดุขวางการไหล ดังที่แสดงในรูป 5.2



รูปที่ 5. 2 แสดงห้องเผาไหม้ช่วยและภาพตัดภายใน

อากาศในส่วนปฐมภูมิเป็นอากาศที่ใช้ในการลำเลียงเชื้อเพลิงเข้าสู่หัวเผาทางช่องอากาศปฐมภูมิผ่านวัสดุขวางการไหลเข้าสู่ห้องเผาไหม้ อากาศส่วนทุติยภูมิไหลเข้าช่องทุติยภูมิผ่านอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงเพื่อสร้างการไหลหมุนควงไปผสมกับอากาศส่วนปฐมภูมิและเชื้อเพลิงที่บริเวณช่วงต้งของห้องเผาไหม้ อากาศส่วนตติยภูมิเป็นอากาศสำหรับการหล่อเย็นผนังห้องเผาไหม้ จะเข้าสู่ห้องเผาไหม้บริเวณปลายหัวเผา



รูปที่ 5. 3 แสดงลักษณะการไหลของอากาศภายในห้องเผาไหม้ช่วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.1.1.2 ระบบเผาไหม้เชื้อเพลิง

ระบบเผาไหม้เชื้อเพลิงเป็นระบบสำหรับรองรับการเผาไหม้ที่อยู่นอกเหนือหัวเผา นั่นก็คือห้องเผาไหม้หลัก เป็นการจำลองห้องเผาไหม้ของหม้อน้ำอุตสาหกรรม โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.1 เมตร ยาว 1.2 เมตร ผนังทำหล่อด้วยปูนทนไฟ และเซรามิกไฟเบอร์ มีช่องสำหรับสังเกตเปลวไฟ 1 ช่อง และจุดวัดอุณหภูมิ 1 จุด ในการทดลองห้องเผาไหม้จะมีความดันติดลบ



รูปที่ 5.4 ห้องเผาไหม้หลัก



รูปที่ 5.5 แสดง ก. วัสดุวางการไหล ข. อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงชนิดใบตรง  
ค. อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงชนิดใบโค้ง

### 5.1.1.3 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ

ในการทดลองจะทำการวัดอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคัปเปิ้ล ชนิด K โดยทำการวัดตามภายในห้องเผาไหม้ช่วย 5 ตำแหน่ง และมีช่องสังเกตเปลวไฟข้างหน้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5. 6 เทอร์โมคัปเปิ้ล ชนิด K

#### 5.1.1.4 อุปกรณ์วัดองค์ประกอบของแก๊ส

อุปกรณ์วัดองค์ประกอบของแก๊สเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญในการวิเคราะห์ปัญหาการเผาไหม้ ในการทดลองครั้งนี้ได้ใช้ เครื่องวัดแก๊ส Testo 330-2LL รูปที่5.7 ในการทดลอง เครื่องวัดแก๊สชนิดนี้ สามารถวัด ปริมาณ $O_2$  (ค่าความถูกต้อง 0.2% vol) CO (ค่าความถูกต้อง 20 ppm) NOx (ค่าความถูกต้อง 5 ppm) อุณหภูมิของแก๊สร้อน การสูญเสียที่เกิดขึ้นจากแก๊สร้อนและประสิทธิภาพ อีกทั้งยังมีความสามารถเพิ่มเติมในการเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์เพื่อบันทึกข้อมูลแบบ real time

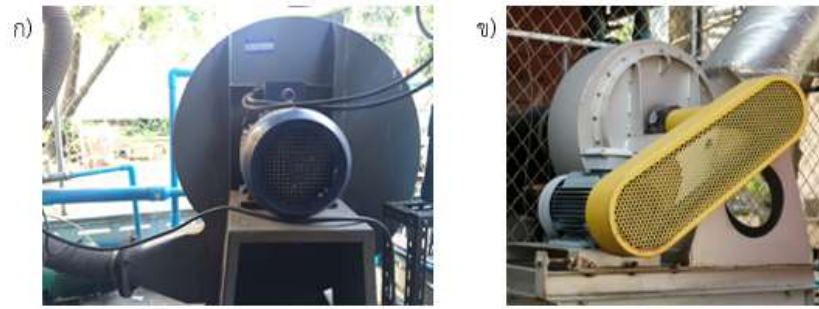


รูปที่ 5. 7 Testo 330-2LL [42]

#### 5.1.2 ระบบป้อนอากาศ

ระบบป้อนอากาศเข้าสู่ห้องเผาไหม้ ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ได้แก่ส่วนนำอากาศเข้าและส่วนนำอากาศออก ซึ่งส่วนนำอากาศเข้าได้แก่ โบลเวอร์ (FD Fan) ชนิดแรงเหวี่ยง สำหรับป้อนอากาศส่วนปฐมภูมิ ทุติยภูมิและตติยภูมิ วาล์วปีกผีเสื้อชนิดควบคุมด้วยสัญญาณดิจิทัลและอนาล็อก ทำการควบคุมอัตราการป้อนอากาศด้วยระบบ Programmable Logic Controller, PLC และวัดอัตราการไหลจากความดันตกค่อมที่บริเวณแผ่นออริฟิสิกจาก Differential pressure transmitter และในส่วนของการนำอากาศออก จะอาศัยโบลเวอร์ดูด(ID fan) ที่สร้างแรงดูดจากการเหวี่ยงใบพัดในการสร้างความดันต่ำในห้องเผาไหม้และดูดไอเสียเพื่อปล่อยสู่บรรยากาศ

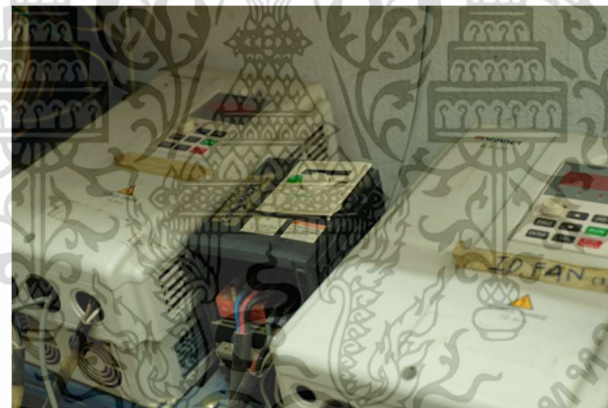
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5. 8 แสดง ก. FD Fan ข.ID Fan



รูปที่ 5. 9 แสดง ก.คอนโทรลวาล์ว ข.แผ่นออริฟิส ค. Differential pressure sensor

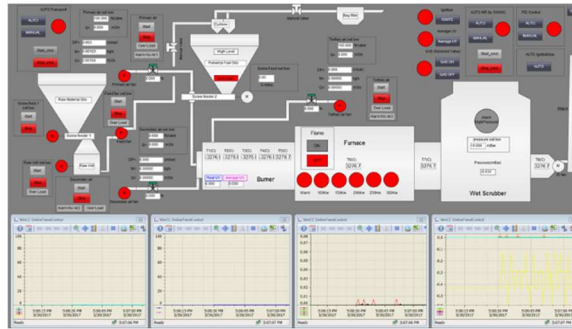


รูปที่ 5. 10 แสดงอินเวอร์เตอร์

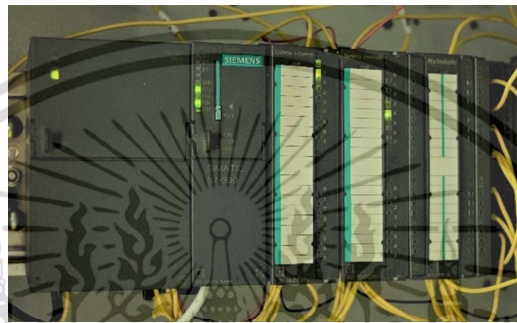
### 5.1.3 ระบบควบคุมการการทดลอง

การเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลตามเงื่อนไขการทดลองตามที่ได้กำหนดไว้จำเป็นต้องอาศัยความแม่นยำในการทดลองด้วยการนำคอมพิวเตอร์มาใช้ในการควบคุมการเผาไหม้โดยอาศัยชุดควบคุม Programmable Logic Controller หรือ PLC ในการรับสัญญาณจากเครื่องมือวัด เพื่อนำสัญญาณที่ได้ไปประมวลผลเพื่อปรับแก้การทำงานของอุปกรณ์ควบคุมให้เป็นไปตามเงื่อนไขการทดลอง การอ่านค่าสำหรับการเก็บผลการทดลอง รวมไปถึงการแจ้งเตือนเพื่อความปลอดภัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



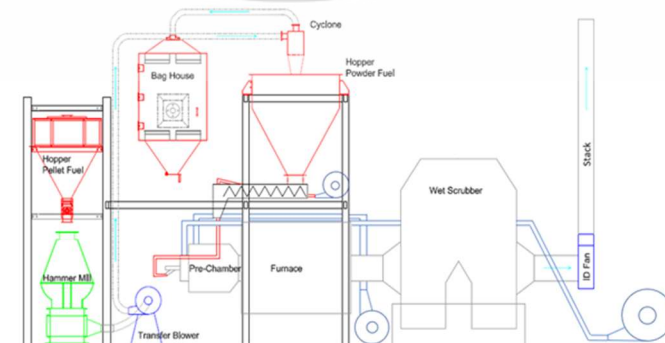
รูปที่ 5. 11 โปรแกรมควบคุมหัวเผา



รูปที่ 5. 12 ชุดควบคุม PLC

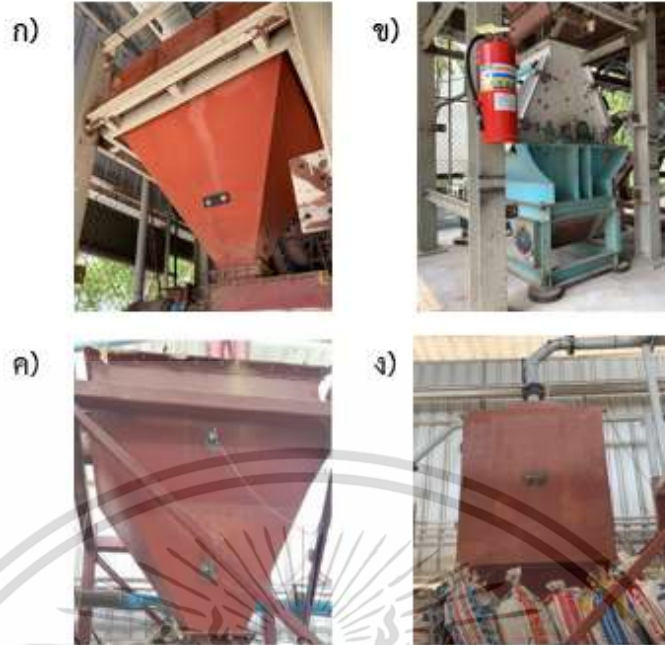
#### 5.1.4 ระบบบดและลำเลียงเชื้อเพลิง

ระบบบดและลำเลียงเชื้อเพลิงเป็นหนึ่งในระบบที่สำคัญต่อการทดลอง เนื่องจากการควบคุมขนาดของอนุภาค การบดเชื้อเพลิงจะทำการบดเชื้อเพลิงจากไซโลเก็บเชื้อเพลิงอัดเม็ดโดยใช้สกรูพืด เข้าสู่เครื่องบดที่มีการทดลองจุดเหมาะสมของทิศทางการหมุน เชื้อเพลิงที่บดแล้วนั้นจะถูกคัดกรองโดยตะแกรงและลำเลียงผ่านไซโคลนเพื่อแยกออกอากาศและเชื้อเพลิงก่อนเข้าสู่ไซโลเก็บเชื้อเพลิงเพื่อรอทำการทดลอง อากาศที่ถูกแยกออกมานั้นจะถูกบำบัดโดยถุงการก่อนปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมต่อไป



รูปที่ 5. 13 ผังระบบลำเลียงเชื้อเพลิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในพิธีการทักท้วงเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นว่าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5. 14 แสดง ก.ไซโลเก็บเชื้อเพลิงอัดเม็ด ข. เครื่องบดเชื้อเพลิง ค.ไซโลเก็บเชื้อเพลิงผง  
ง.ถุงกรอง

### 5.1.5 ระบบบำบัดไอเสีย

กระบวนการบำบัดไอเสียหลังจากการเผาไหม้เป็นหนึ่งในกระบวนการสำคัญเพื่อที่จะบำบัดแก๊สไอเสียก่อนที่เราจะปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม เนื่องจากในไอเสียนั้นเป็นไอเสียที่มีอุณหภูมิสูงและประกอบไปด้วยอนุภาคของแข็งที่หลงเหลือจากการเผาไหม้ไม่ว่าจะเป็นขนาดเล็กและใหญ่ ดังนั้นการปล่อยก๊าซไอเสียออกสู่สิ่งแวดล้อมในทันทีนั้นจึงเป็นสิ่งที่ไม่ควรทำอย่างยิ่งจึงมีความจำเป็นในการบำบัดไอเสียก่อนปลดปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม การลดอุณหภูมิและดักจับของแข็งในไอเสียจะใช้ระบบบำบัดที่ประกอบไปด้วย หอบำบัดเปียก (Wet scrubber) ดังที่แสดงในรูป 5.15 ก. ภายในได้ออกแบบให้ไอเสียไหลคดเคี้ยวไปตามทางที่ออกแบบไว้เพื่อเพิ่มเวลาในการดักจับฝุ่น ภายในหอบำบัดเปียกได้ติดตั้งม่านน้ำชนิดสเปรย์สำหรับลดอุณหภูมิและดักจับอนุภาค จากนั้นน้ำที่ผ่านการบำบัดจะส่งไปลดอุณหภูมิที่หอผึ่งเย็น (cooling tower) ดังที่แสดงในรูปที่ 5.15 ข. และนำกลับมาใช้งานอีกครั้ง



รูปที่ 5. 15 แสดง ก.หอบำบัดเปือก ข.หอดึงเย็น

## 5.2 การทดลองและวิธีการทดลอง

### 5.2.1 การทดลองหาขนาดอนุภาคด้วยวิธีการ Sieve Analysis

1. เตรียมตัวอย่างเชื้อเพลิง
2. เตรียมตะแกรง (Sieve) จำนวน 1 ชุด โดยมีจำนวนตะแกรงไม่เกิน 7 ชั้นและต้องมีตะแกรงละเอียด เบอร์ 200 ถาดและฝาปิดอยู่ด้วยทุกครั้ง
3. นำตะแกรงไปซั่ง และบันทึกค่าน้ำหนักของแต่ละตะแกรง
4. นำตะแกรงทั้งหมดมาเรียงกัน โดยเรียงลำดับให้ตะแกรงที่มีขนาดช่องใหญ่ที่สุดอยู่ด้านบนและไล่ลำดับความละเอียดลงมา ทั้งนี้ต้องมีฝาปิดอยู่ด้านบนสุด และมีถาดรองอยู่ด้านล่างสุด จากนั้นนำตะแกรงไปประกอบเข้าเครื่องเขย่า
5. ใส่ตัวอย่างตัวอย่างลงในชุดตะแกรงบนสุด ปิดฝา จากนั้นเขย่าด้วยเครื่องเขย่าประมาณ 10 นาที
6. ชั่งเชื้อเพลิงที่ค้างอยู่ในแต่ละตะแกรงรวมทั้งน้ำหนักตะแกรง จากนั้นนำไปคำนวณหาค่า % ผ่าน (%Passing) ต่อไป

### 5.2.2 การทดลองหาอัตราการป้อนเชื้อเพลิงชีวมวล

1. ทำการเตรียมเชื้อเพลิงให้เต็มสกรูป้อนเชื้อเพลิง อุปกรณ์ลำเลียงและตาซั่ง
2. ทำการป้อนเชื้อเพลิงใส่ภาชนะรองรับ โดยการกำหนดความถี่ของอินเวอร์เตอร์ที่ 0.75, 1, 1.25, 1.5, 1.75, 2, 2.25, 2.5 เฮิรต เป็นเวลา 1 นาที
3. นำภาชนะไปชั่งน้ำหนักและบันทึกผล
4. ทำซ้ำจำนวน 3 ครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.2.3 การทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง

การทดลองการเผาไหม้ด้วยเชื้อเพลิงชีวมวลผงประกอบไปด้วยการทดลอง 3 ส่วน ได้แก่ 1. การอุ่นเตาด้วยLPG 2. การอุ่นเตาด้วยLPGและเชื้อเพลิงชีวมวล 3. การเริ่มทำการเก็บผลการทดลอง

#### 5.2.3.1 การอุ่นเตาด้วยLPG

1. ทำการเตรียมความพร้อมอุปกรณ์ต่าง ตรวจสอบการทำงานของระบบควบคุมและระบบที่เกี่ยวข้องกับการทดลองรวมถึงความปลอดภัย
2. เริ่มทำการอุ่นเตาโดยทำการเปิดพัดลมดูด 10 Hz จากนั้นเปิดแก๊ส LPG ที่อัตราการป้อนกำลังความร้อน 100 kW และทำการจุดเตา
3. ตรวจสอบเปลวไฟจากสัญญาณ UV และช่องมองไฟ
4. รอ 30 นาที จึงเริ่มเข้าสู่กระบวนการอุ่นเตาด้วยเชื้อเพลิงชีวมวล

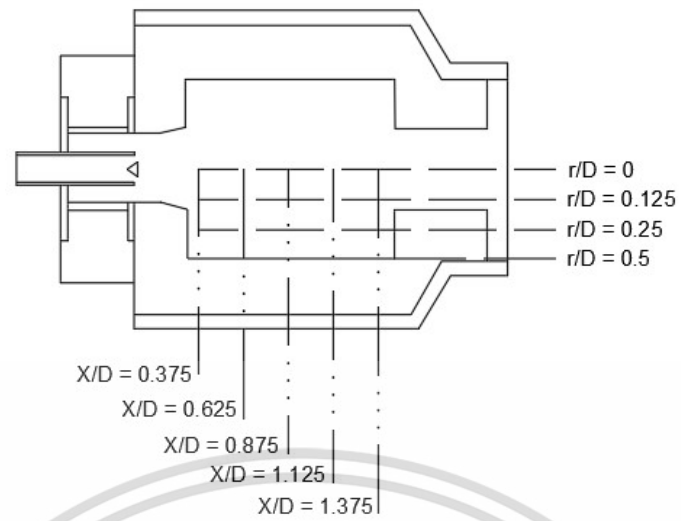
#### 5.2.3.2 การเริ่มทำการอุ่นเตาด้วยLPGและเชื้อเพลิงชีวมวล

1. ทำการเริ่มปล่อยเชื้อเพลิงที่กำลังความร้อน 200 kW และLPG 100 kW อากาศในอัตราส่วนระหว่างอากาศปฐมภูมิต่ออากาศทุติยภูมิต่ออากาศตติยภูมิที่ร้อยละ 25 ต่อ 65 ต่อ 10 ตามเงื่อนไขที่อากาศส่วนเกินร้อยละ 15
2. เมื่อมีอุณหภูมิคงที่จึงค่อยๆขยับขึ้นทีละ 50 kW จนกระทั่งถึง 300 kW แต่ยังคงการป้อนแก๊สLPG ที่ 100kW เท่าเดิม
3. รอให้อุณหภูมิคงที่จากนั้นทำการหยุดการป้อนLPG
4. รอให้อุณหภูมิคงที่ แล้วจึงเข้าสู่กระบวนการเก็บผลการทดลอง

#### 5.2.3.3 การเริ่มทำเก็บผลการทดลอง

1. การเก็บผลการทดลองจะทำการเก็บผลของอุณหภูมิและแก๊สไอเสีย โดยทำการเก็บข้อมูลของอุณหภูมิที่ระยะ 0.375, 0.625, 0.875, 1.125, 1.375 และ r/D 0, 0.125, 0.25, 0.375, 0.5 และทำการเก็บค่าองค์ประกอบของแก๊สร้อนไปพร้อมกัน โดยเริ่มจากR/D 0.5ก่อนแล้วจึงจะขยับเทอร์โมคัปเปิ้ลเข้าไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5. 16 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

### ผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองตามที่ได้แสดงวิธีการทดลองไว้ก่อนหน้านี้ ภายในประกอบไปด้วย ผลการทดลองหาขนาดอนุภาคด้วยวิธีการ Sieve Analysis ผลการทดลองหาอัตราการป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลและการทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง

#### 6.1 ผลการทดลองหาขนาดอนุภาคด้วยวิธีการ Sieve Analysis

จากวิทยานิพนธ์ของ คุณพีรพัฒน์[7] ที่ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบก่อนหน้านี้นั้น ให้ผลการทดลองว่าการบดโดยใช้ตะแกรง 0.5 และ 1 มิลลิเมตร แบบทวนเข็มนาฬิกา ให้ทิศทางการตีเชื้อเพลิงตีเข้าหาตะแกรง 1 มิลลิเมตร จะส่งผลให้มีปริมาณเชื้อเพลิงที่ละเอียดและประหยัดพลังงานจากการใช้ตะแกรง 0.5 ทั้งสองข้างและตะแกรง 0.5 และ 1 มิลลิเมตร โดยการตีเชื้อเพลิงตามเข็มนาฬิกา ในการทดลองนี้จะทำการทดลองซ้ำเพื่อหาขนาดอนุภาคก่อนนำไปใช้งานในการจำลอง

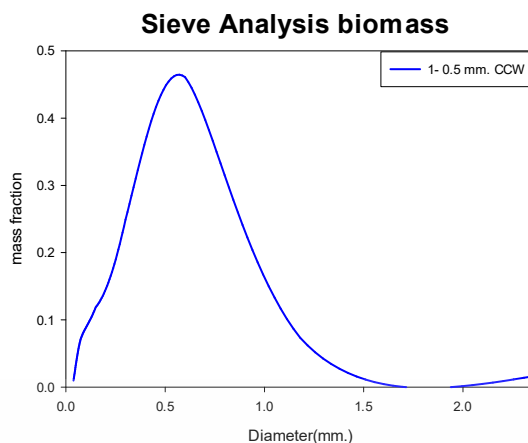
ผลการทดลองการทดลองหาขนาดอนุภาคด้วยวิธีการ Sieve Analysis จากการบดเชื้อเพลิงด้วยตะแกรง 0.5 และ 1 มิลลิเมตร ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา ดังที่แสดงในตารางที่ 6.1

#### ตารางที่ 6.1 แสดงการกระจายตัวของอนุภาคที่ผ่านตะแกรงขนาดต่าง ๆ

Size distribution	
2.36-1.18 mm.	1.64%
1.18-0.6 mm.	7.33%
0.6-0.3 mm.	46.09%
0.3-0.15 mm.	24.89%
0.15-0.075 mm.	11.87%
0.075-0.038 mm.	7.20%
<0.038 mm.	0.97%

พบว่าขนาดของเชื้อเพลิงส่วนใหญ่ 0.3 - 0.6 มิลลิเมตร โดยพบร้อยละ 46.09 รองลงมาคืออนุภาคที่มีขนาด 0.15 - 0.3 มิลลิเมตร ร้อยละ 24.89 ถัดมาเป็น 0.075 - 0.15 มิลลิเมตร ร้อยละ 11.87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6. 1 แสดงการกระจายตัวของขนาดอนุภาคเชื้อเพลิง

## 6.2 ผลการทดลองหาอัตราการป้อนเชื้อเพลิงชีวมวล

การทดลองหาอัตราการป้อนเชื้อเพลิงเชื้อเพลิงเป็นการสอบเทียบสกรูป้อนเชื้อเพลิงชีวมวล ผงที่ทำหน้าที่ป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลผงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ การทดลองจะเริ่มต้นที่ 0.75 Hz ไปจนกระทั่ง 5.5 Hz ทำซ้ำ 3 ครั้ง เมื่อนำข้อมูลจากการทดลองนี้ไปใช้งานจะทำการป้อนข้อมูลความถี่เข้าสู่โปรแกรมควบคุมการเผาไหม้ให้การกำหนดกำลังทางความร้อนของการเผาไหม้ ดังนั้นในการสอบเทียบสกรูป้อนเชื้อเพลิงจะอาศัยความสัมพันธ์ของความถี่ (Hz) กับ อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงชีวมวลผง (kg/s) จากการทดลองพบว่า สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่าง ความถี่ (Hz) กับ อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงชีวมวลผง (kg/s) ได้สมการดังต่อไปนี้

$$y=101.26x+0.4141 \quad (6.1)$$

เมื่อ

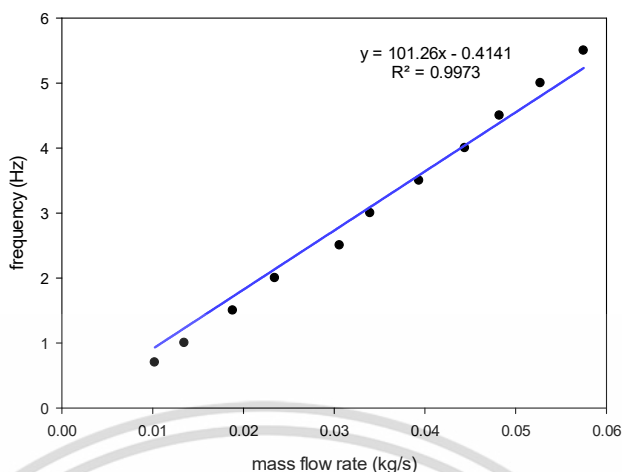
$y$  คือ ความถี่ของสกรูป้อนเชื้อเพลิง (Hz)

$x$  คือ อัตราการไหลเชิงมวล (kg/s)

โดยมีค่า R-Squared ที่ได้จากสมการนี้ มีค่าเท่ากับ 0.9973 ดังนั้นเมื่อทำการทดลองที่ 300 กิโลวัตต์ความร้อน จะใช้ความถี่ 1.32 Hz โดยมีอัตราการไหลอยู่ที่ 0.017 kg/s แต่ในการทดลองจะทำการทดลองร่วมงานวิจัยหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงขนาด 1 เมกะวัตต์ความร้อน ดังนั้นจึงทำการสอบเทียบเพื่อให้ครอบคลุมย่านการใช้งานในการเผาไหม้เชื้อเพลิงในแต่ละครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Relative of screw feed frequency and mass flow rate of pulverized



รูปที่ 6. 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ (Hz) กับ อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิง (kg/s)

### 6.3 การทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง

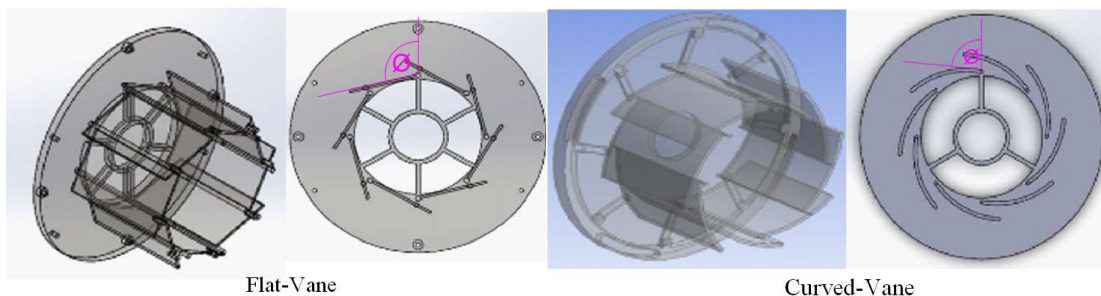
ตารางที่ 6. 2 เงื่อนไขการทดลอง

#### เงื่อนไขการทดลอง

อัตราการไหลเชื้อเพลิงที่ 300 kW (kg/s)	0.017
อัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิ (kg/s)	0.029
อัตราการไหลของอากาศทุติยภูมิ (kg/s)	0.075
อัตราการไหลของอากาศตติยภูมิ (kg/s)	0.012
ความดันทางออก (Pa)	-1500

การทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผงจะทำการทดลองที่กำลังความร้อน 300 กิโลวัตต์ ความร้อน ปริมาณอากาศส่วนเกินร้อยละ 15 ที่อัตราส่วนของอากาศ ปฐมภูมิ : ทุติยภูมิ : ตติยภูมิ อยู่ที่ 25 : 65 : 10 ดังที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 6.2 การทดลองจะแบ่งออกเป็นการทดลองหลัก 2 การทดลอง ได้แก่ 1) การทดลองอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงร่วมกับการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง โดยจะทำการทดลองด้วยการใช้งาน อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงชนิดใบตรง 100 องศา ที่มีการวิจัยก่อนหน้านี้ เปรียบเทียบกับ อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงชนิดใบโค้ง ที่ 70 และ 85 องศา ในการทดลองที่ 2) เป็นการทดลองเปรียบเทียบของระยะวัตถุขวางการไหลที่มีอัตราการขวางกั้นอยู่ที่ 0.42 ต่อการเผาไหม้ ด้วยระยะ 10 และ 20 มิลลิเมตรระหว่าง ที่วัตถุระยะทางจากทางออกหัวเผาไปจนกระทั่งปลายของวัตถุขวางการไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



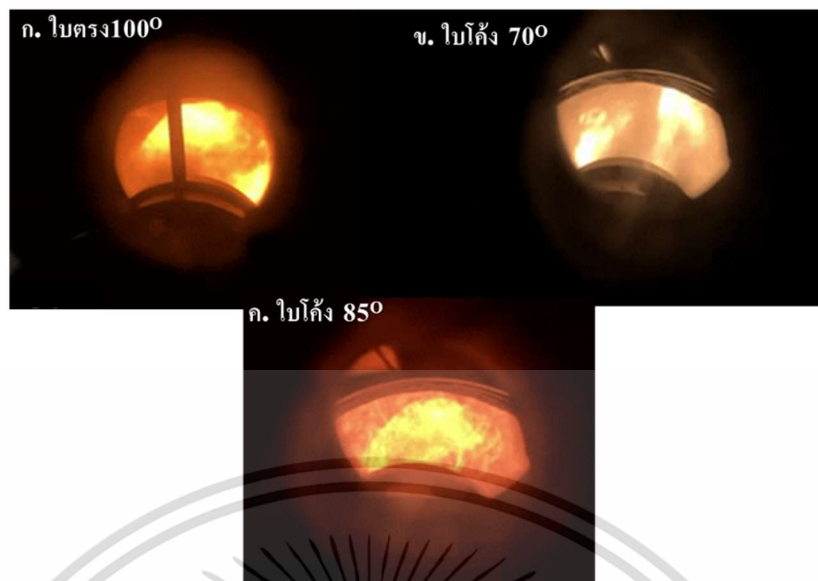
รูปที่ 6. 3 แสดงอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงชนิดใบตรงและใบโค้ง

### 6.3.1 ผลการทดลองอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงร่วมกับการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง

#### 6.3.1.1 อิทธิพลของอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงต่อการเคลื่อนที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้ของอนุภาค

การทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผงโดยใช้อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงชนิดใบตรงที่ 100 องศา ได้แสดงไว้ในรูปที่ 6.3ก. การเคลื่อนที่ของเชื้อเพลิงมีลักษณะพุ่งตรงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ การกระจายตัวของอนุภาคที่ไปผสมกับอากาศหุดยภูมิเกิดขึ้นในปริมาณน้อย การติดไฟของเชื้อเพลิงจึงเกิดห่างจากบริเวณหัวเผาเข้าไปติดบริเวณใกล้ทางออกห้องเผาไหม้ช่วยโดยสังเกตได้จากผนังห้องเผาไหม้ช่วยฝั่งตรงข้าม

เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองเผาไหม้เชื้อเพลิงโดยใช้อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงชนิดใบโค้ง ที่ 70 และ 85 องศา ดังที่แสดงในรูปที่ 6.3ข.และ 6.3ค ตามลำดับ พบว่าสามารถสังเกตลักษณะการเคลื่อนที่ของเชื้อเพลิงชีวมวลผงที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้ที่ได้รับอิทธิพลจากอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควง ณ มุมองศาที่ได้กำหนดไว้ ที่มุม 70 องศายังสามารถสังเกตการพุ่งเข้าห้องเผาไหม้ของลำเชื้อเพลิงและลักษณะการไหลเป็นลำที่เบาบาง อีกทั้งสังเกตเห็นการหมุนของลำเชื้อเพลิง เมื่อทำการปรับมุมอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงให้เป็นมุม 85 องศา พบว่าเชื้อเพลิงสามารถกระจายตัวไปผสมกับอากาศหุดยภูมิได้ดี สังเกตเห็นเปลวไฟได้ชัดเจน



รูปที่ 6.4 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของเชื้อเพลิงที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้ ก) ไบตรง 100 องศา  
ข) ไบโค้ง 70 องศา ค) ไบโค้ง 85 องศา

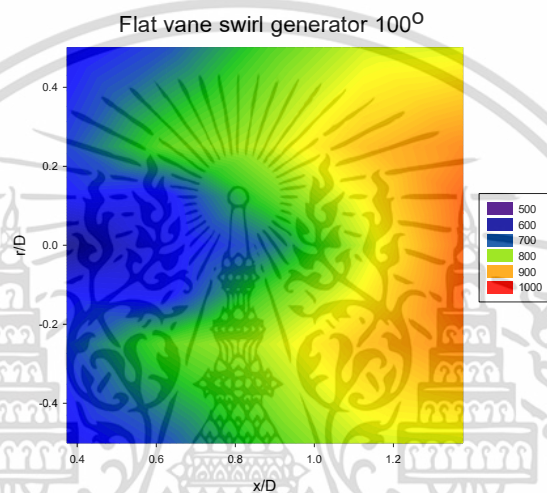
### 6.3.1.2 อิทธิพลของอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ช่วย

การทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผงโดยใช้อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงชนิดไบตรงที่ 100 องศา สามารถสังเกตถึงการกระจายตัวของอุณหภูมิตัวบริเวณทางออกหัวเผาและมีอุณหภูมิที่สูงบริเวณทางออกห้องเผาไหม้ช่วย ดังที่แสดงในรูป 6.5 การที่ห้องเผาไหม้ช่วยมีอุณหภูมิสูงบริเวณที่ปลายห้องเผาไหม้ช่วย เนื่องจากความรุนแรงของการไหลหมุนควงที่ต่ำ ที่เกิดจากลักษณะจำเพาะของอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงชนิดไบตรง ส่งผลให้เกิดการแยกตัวบริเวณด้านหลังใบ ความรุนแรงของการไหลหมุนควงจึงลดลงตามมา

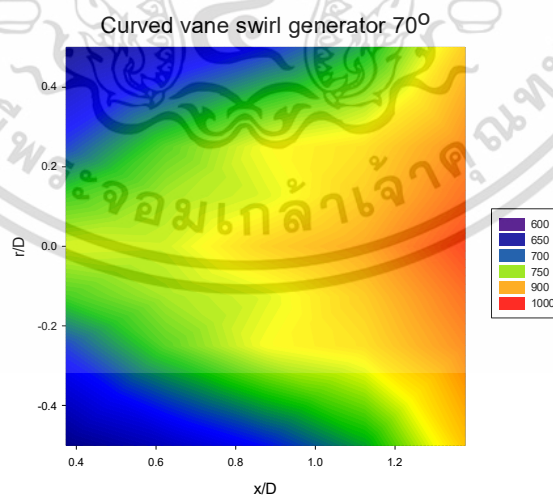
ในส่วนของการกระจายตัวของอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ของอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงชนิดไบโค้งที่ 70 และ 85 ได้แสดงไว้ในรูป 6.6 และ 6.7 ตามลำดับ พบว่า เมื่อมีการเพิ่มมุมของอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควง จะเกิดการกระจายตัวของอุณหภูมิทั่วทั้งห้องเผาไหม้ช่วย การกระจายตัวของอุณหภูมิที่ระยะ  $\times/D$  ของมุม 70 องศา ให้ผลของการกระจายอุณหภูมิที่ต่ำกว่ามุม 85 องศาในทุกจุด เนื่องจากที่มุม 70 สามารถสร้างแรงเหวี่ยงในการเหวี่ยงอนุภาคได้น้อยกว่ามุม 85 องศา ทำให้ลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาคเข้าสู่ห้องเผาไหม้มีลักษณะพุ่งเป็นลำตรง มีเพียงอนุภาคบางส่วน

กระจายเข้าไปผสมกับอากาศทุติยภูมิ ผลที่ตามมาคือกระบวนการเผาไหม้ที่เริ่มเกิดขึ้นช้า ขณะที่มุมเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

85 องศา มีการกระจายของอุณหภูมิทั่วทั้งห้องเผาไหม้ช่วย เนื่องจากอิทธิพลของหมุนควงที่รุนแรงในการสร้างแรงเหวี่ยงในการเหวี่ยงอนุภาคให้ไปผสมกับลมทุติยภูมิ เมื่อการหมุนควงเกิดการสลายตัวจะเกิดปรากฏการณ์การไหลหมุนวนและการไหลย้อนกลับในการดึงแก๊สร้อนจากการเผาไหม้บริเวณใกล้ทางออกของห้องเผาไหม้ไหลย้อนกลับมาสู่บริเวณหัวเผา แก๊สร้อนที่ไหลย้อนกลับมานั้นได้ให้ความร้อนแก่อากาศที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้โดยสามารถสังเกตจากบริเวณอุณหภูมิสูงที่ระยะ  $r/D$  เท่ากับ 0 ส่งผลให้กระบวนการเผาไหม้จึงขยับเข้าใกล้หัวเผาและเกิดได้เร็วกว่าการใช้อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงที่มุม 70 องศา

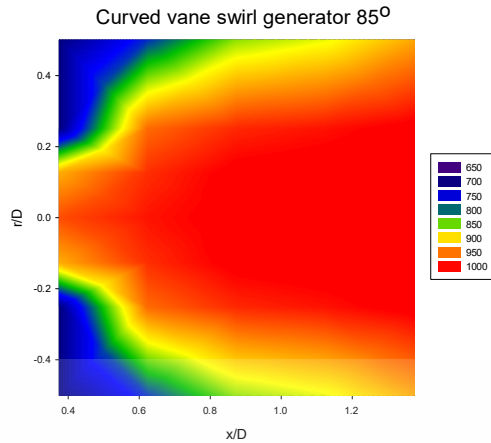


รูปที่ 6.5 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิ( $^{\circ}\text{C}$ ) ภายในห้องเผาไหม้ช่วย ชนิด ใบตรง 100 องศา

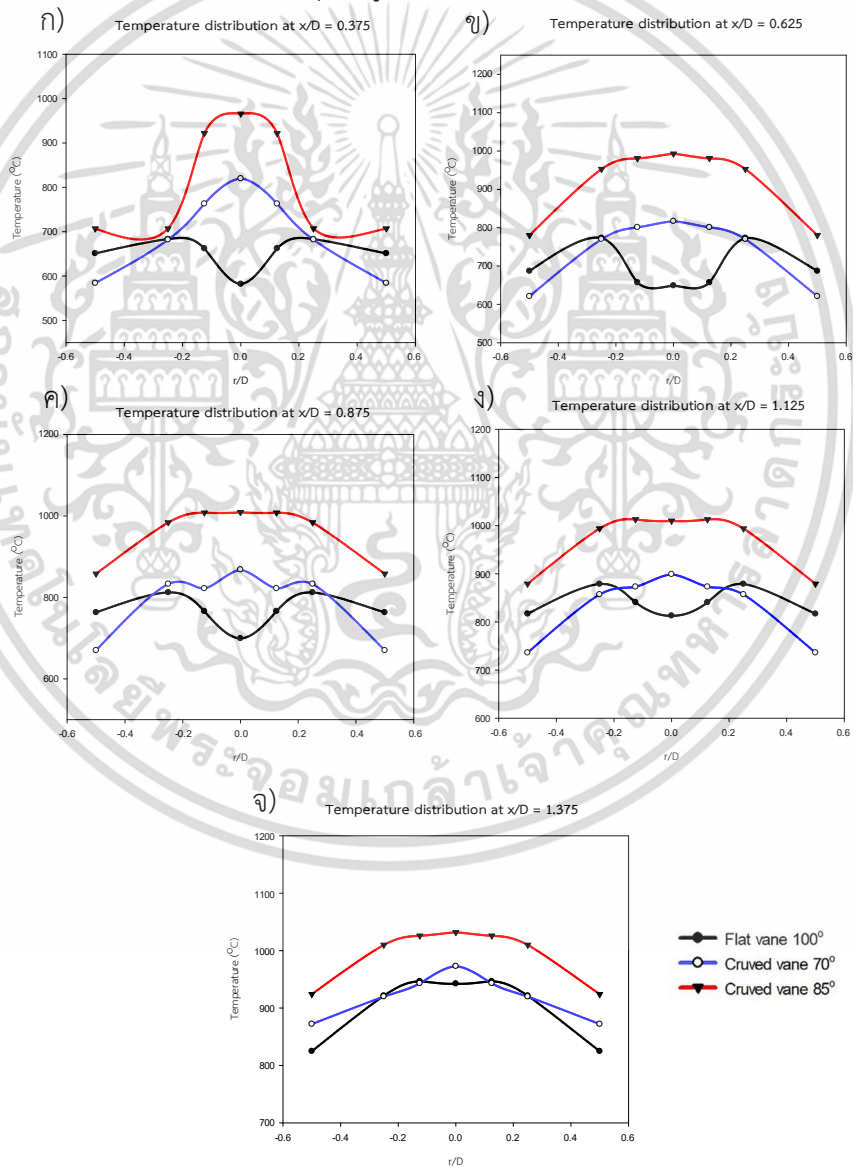


รูปที่ 6.6 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิ( $^{\circ}\text{C}$ ) ภายในห้องเผาไหม้ช่วย ชนิด ใบโค้ง 70 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.7 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิ(°C) ภายในห้องเผาไหม้ช่วย ชนิด ใบโค้ง 85 องศา



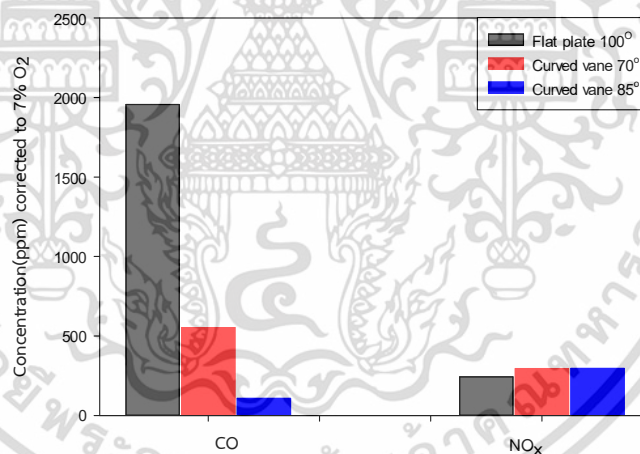
รูปที่ 6.8 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนวรัศมี ก) x/D ที่ 0.375 ข) x/D ที่ 0.625 ค) x/D ที่ 0.875 ง) x/D ที่ 1.125 จ) x/D ที่ 1.375

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 6.3.1.3 อิทธิพลของอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงต่อการปลดปล่อยมลพิษ

การไหลหมุนควงที่สร้างอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงชนิดใบตรงมุม 100 องศา มีความสามารถในการกระจายเชื้อเพลิงต่ำ ส่งผลให้การคลุกเคล้าระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงผสมการไม่ทั่วถึง องค์ประกอบของแก๊สร้อนที่ตรวจวัดหลังห้องเผาไหม้หลักจึงมีส่วนประกอบของคาร์บอนมอนอกไซด์สูงถึง 1,956 ppm และไนโตรเจนออกไซด์ 243 ppm. เมื่อเปรียบเทียบที่ออกซิเจนร้อยละ 7 ในส่วนของการใช้งานอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงชนิดใบโค้ง เมื่อมีการเพิ่มมุมองศาของอุปกรณ์ แรงเหวี่ยงที่ถูกสร้างจะช่วยให้การกระจายตัวของอนุภาคเชื้อเพลิงให้ไปผสมกับอากาศทุติยภูมิให้ดียิ่งขึ้น อีกทั้งยังสามารถสร้างการไหลย้อนกลับเพื่อให้ความร้อนกลับมาแลกเปลี่ยนให้กับอากาศใหม่ที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้ กระบวนการเผาไหม้จึงขยับเข้าใกล้หัวเผา เมื่อวัดองค์ประกอบของแก๊สร้อน ที่มุม 70 และ 85 พบว่ามีปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ 553 และ 107 ppm ตามลำดับ การปลดปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ 295 และ 296 ppm. เมื่อเปรียบเทียบที่ออกซิเจนร้อยละ 7

Concentration of flue gas composition



รูปที่ 6. 9 กราฟแสดงปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์และไนโตรเจนออกไซด์ กรณีอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงชนิดใบตรง 100 องศา ใบโค้ง 70 และ 85 องศา

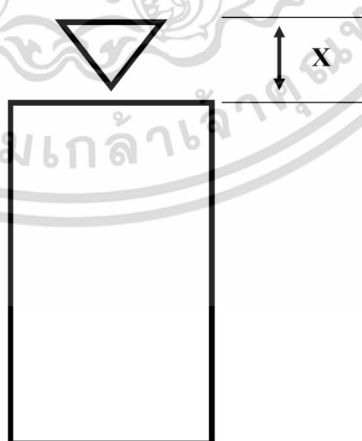
ดังนั้นเมื่อทำการเปรียบเทียบการเปลี่ยนชนิดของอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงในกรณีของใบตรง 100 องศา ใบโค้งมุม 70 และ 85 องศา พบว่า การติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงใบตรง 100 องศา และ ใบโค้ง 70 องศา สร้างการไหลหมุนควงได้ไม่เพียงพอที่จะเหวี่ยงอนุภาคเชื้อเพลิงไปผสมกับอากาศทุติยภูมิ จึงสังเกตเห็นเชื้อเพลิงพุ่งเข้าสู่ห้องเผาไหม้และเปลวไฟบริเวณปลายห้องเผาไหม้ช่วย อุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้บริเวณช่วงต้นจึงต่ำและสูงช่วงปลาย เมื่อวัด

องค์ประกอบของแก๊สร้อนจึงพบปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ 1956 และ 553 ppm ไนโตรเจนออกไซด์ 243 และ 295 ppm. เมื่อเปรียบเทียบที่ออกซิเจนร้อยละ 7 ในส่วนของการใช้งานอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงชนิดใบโค้ง เมื่อมีการเพิ่มมุมองศาของอุปกรณ์ แรงเหวี่ยงที่ถูกสร้างจะช่วยให้การกระจายตัวของอนุภาคเชื้อเพลิงให้ไปผสมกับอากาศทุติยภูมิให้ดียิ่งขึ้น อีกทั้งยังสามารถสร้างการไหลย้อนกลับเพื่อให้ความร้อนกลับมาแลกเปลี่ยนให้กับอากาศใหม่ที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้ กระบวนการเผาไหม้จึงขยับเข้าใกล้หัวเผา เมื่อวัดองค์ประกอบของแก๊สร้อน ที่มุม 70 และ 85 พบว่ามีปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ 553 และ 107 ppm ตามลำดับ การปลดปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ 295 และ 296 ppm. เมื่อเปรียบเทียบที่ออกซิเจนร้อยละ 7

ออกไซด์ 246 และ 295 ppm ในส่วนของการติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวนชนิดใบโค้งมุม 85 องศา สามารถสร้างความรุนแรงของกระแสการไหลได้มากกว่า 2 กรณี ก่อนหน้านี้ ซึ่งสังเกตได้จากลักษณะการกระจายตัวของเชื้อเพลิงที่ไม่เห็นเชื้อเพลิงพุ่งเข้าสู่ห้องเผาไหม้และเปลวไฟได้ชัดเจน การกระจายตัวที่เกิดขึ้นทำให้อากาศและเชื้อเพลิงคลุกเคล้ากันได้ดีต่ออุณหภูมิที่วัดได้ภายในห้องเผาไหม้ช่วย จึงสูงกว่า 2 กรณีก่อนหน้านี้ เมื่อวัดแก๊สร้อนพบว่าปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ 107 ppm ไนโตรเจนออกไซด์ 296 ppm จากผลของไนโตรเจนออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นยังไม่ชัดเจนว่าเกิดจาก thermal  $\text{NO}_x$  Fuel  $\text{NO}_x$  หรือ prompt  $\text{NO}_x$

### 6.3.2 ผลการทดลองการปรับระยะของวัตถุขวางการไหลที่ระยะ 10 และ 20 มิลลิเมตรร่วมกับการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง

การทดลองการปรับระยะของวัตถุขวางการไหลเป็นการปรับระยะเพื่อให้ความเร็วของอากาศปฐมภูมิมีความเร็วที่ต่ำ ลง ณ บริเวณทางออกของหัวเผา นั้นหมายความว่าโมเมนตัมของอนุภาคจะลดลงตามโมเมนตัมของลมที่ใช้ในการลำเลียงเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ที่ทางออกหัวเผา ดังนั้นอนุภาคจะใช้เวลาในการเคลื่อนที่ในห้องเผาไหม้ช่วยได้นานมากขึ้น ในการทดลองนี้จะใช้วัตถุขวางการไหลที่สร้างมาจากสแตนเลส 304 มีลักษณะเป็นทรงกรวย ที่มุมยอดมีขนาด 90 องศา ฐานกว้าง 34 มิลลิเมตร มีอัตราสัดส่วนขวางกัน (blockage ratio) อยู่ที่ 0.39 ระยะของวัตถุขวางการไหลอยู่ที่ระยะ 10 และ 20 มิลลิเมตร โดยวัดจากปากหัวเผาไปยังด้านหลังวัตถุขวางการไหล ตามที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 6.11



รูปที่ 6. 10 ระยะของวัตถุขวางการไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 6.3.2.1 อิทธิพลของการปรับระยะของวัตถุวางการไหลที่ระยะ 10 และ 20 ต่อการกระจายตัวของอนุภาค

จากการทดลองสามารถสังเกตการกระจายตัวของเชื้อเพลิงชีวมวลผง ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 6.12 และ 6.13 พบว่า การกระจายตัวของเชื้อเพลิงในทั้ง 2 กรณี มีลักษณะที่คล้ายกันคือเชื้อเพลิงได้รับอิทธิพลจากอากาศหุดิยภูมิที่เป็นอากาศส่วนที่ไหลผ่านอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควง อากาศส่วนนี้จึงเป็นอากาศที่เกิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ส่งผลให้อนุภาคกระจายตัวไปยังผนังของห้องเผาไหม้ช่วย เปลวไฟที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ เป็นเปลวไฟที่มีความสว่าง ส่วนใหญ่เกิดขึ้นทั่วห้องเผาไหม้ ในลักษณะคล้ายชดหอย หมุนตามเข็มนาฬิกา โดยที่ตรงกลางชดหอยไม่พบเปลวไฟ



รูปที่ 6. 11 ลักษณะการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลที่ติดตั้งวัตถุวางการไหลที่ระยะ 10 มิลลิเมตร



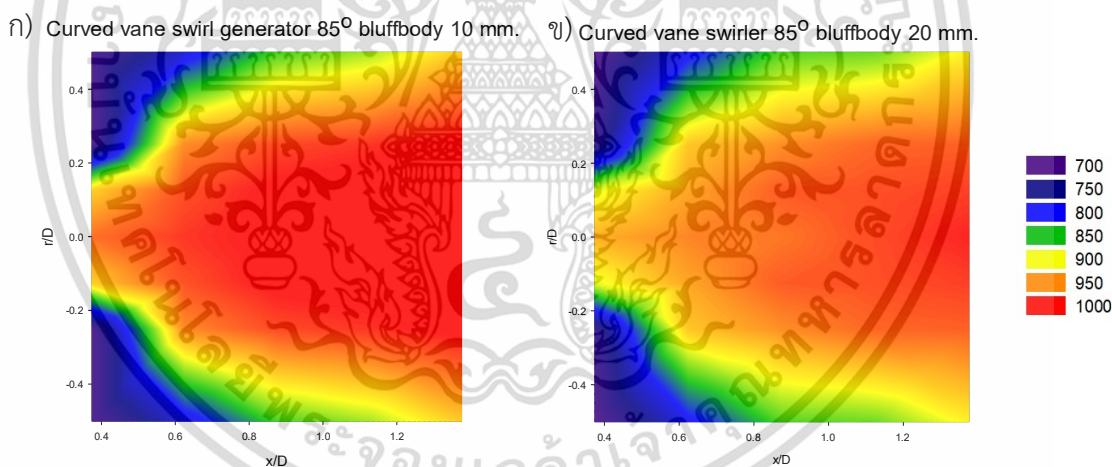
รูปที่ 6. 12 ลักษณะการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลที่ติดตั้งวัตถุวางการไหลที่ระยะ 20 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 6.3.2.2 อิทธิพลของการปรับระยะของวัตถุขวางการไหลที่ระยะ 10 และ 20

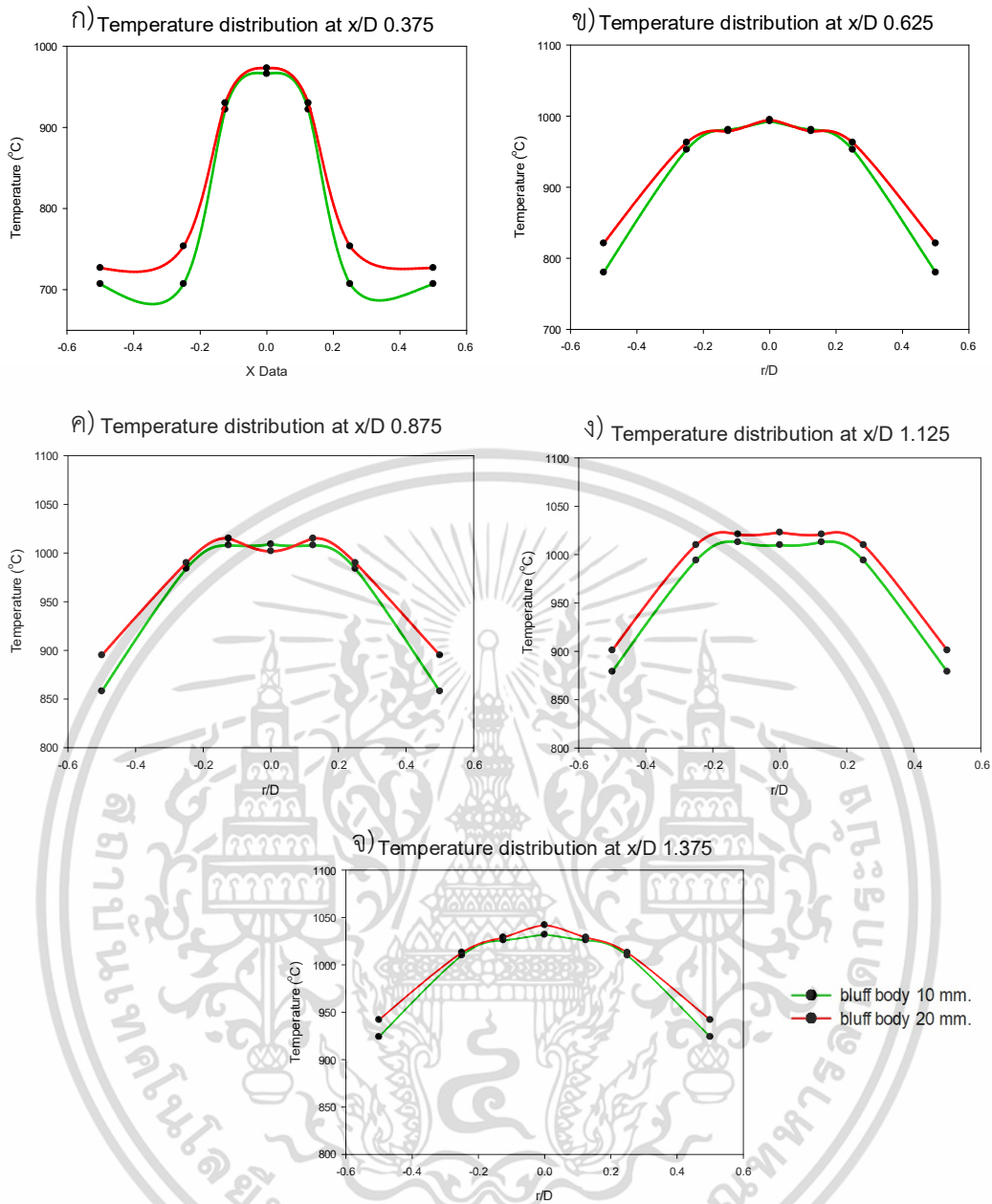
#### มิลลิเมตร ต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิ

ผลการทดลองการปรับระยะของวัตถุขวางการไหลที่ระยะ 10 และ 20 มิลลิเมตรต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิ แสดงในรูปที่ 6.14 จากผลการทดลองพบว่า รูปแบบของการกระจายตัวของอุณหภูมิมีลักษณะที่คล้ายกัน ที่ระยะ  $r/D$  เท่ากับ 0 มีอุณหภูมิสูงเนื่องจากการไหลย้อนกลับ ในระยะ  $x/D$  0.375 และ 0.625 บริเวณผนังห้องเผาไหม้ของกรณีวัตถุขวางการไหลที่ระยะ 20 มิลลิเมตรมีอุณหภูมิสูงกว่าระยะ 10 มิลลิเมตร ในส่วนของบริเวณอื่นพบอุณหภูมิใกล้เคียงกัน ทั้งนี้การวัดอุณหภูมิเป็นการวัดแบบเลื่อนเทอร์โมคัปเปิ้ล ชนิด เค เข้าไปยังตำแหน่ง อาจเกิดความคลาดเคลื่อนหรือความผิดพลาดได้ อีกทั้งเทอร์โมคัปเปิ้ล ชนิด เค อาจได้รับผลกระทบจากการแผ่รังสีที่เกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้ช่วยและการนำความร้อนหรือการสูญเสียความร้อน ที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดลอง



รูปที่ 6.13 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิ( $^{\circ}\text{C}$ ) ภายในห้องเผาไหม้ช่วยจากการติดตั้งวัตถุขวางการไหล

ก) ระยะ 10 มิลลิเมตร ข) ระยะ 20 มิลลิเมตร

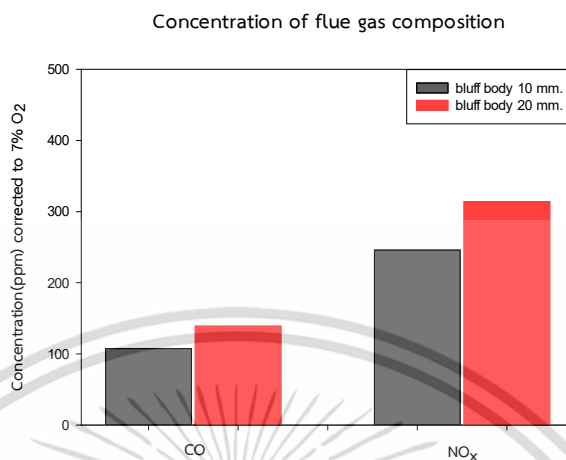


รูปที่ 6. 14 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนวรัศมี ก) x/D ที่ 0.375 ข) x/D ที่ 0.625 ค) x/D ที่ 0.875 ง) x/D ที่ 1.1255 จ) x/D ที่ 1.375

### 6.3.2.3 อิทธิพลของการปรับระยะของวัตถุขวางการไหลที่ระยะ 10 และ 20 มิลลิเมตร ต่อการปลดปล่อยมลพิษ

การปลดปล่อยมลพิษจากการทดลองการปรับระยะของวัตถุขวางการไหลที่ระยะ 10 และ 20 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 6.12 พบว่าการปลดปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ ในกรณีวัตถุขวางการไหลระยะ 10 มิลลิเมตรอยู่ที่ 107 ppm วัตถุขวางการไหลระยะ 20 มิลลิเมตรอยู่ที่ 139 ppm การปลดไนโตรเจนออกไซด์เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกไซด์ ในกรณีวัดถุขวางการไหลระยะ 10 มิลลิเมตรอยู่ที่ 296 ppm วัดถุขวางการไหลระยะ 20 มิลลิเมตรอยู่ที่ 314 ppm เมื่อทำการเปรียบเทียบที่ปริมาณออกซิเจนร้อยละ 7



**รูปที่ 6.15** กราฟแสดงปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์และไนโตรเจนออกไซด์ กรณีระยะวัดถุขวางการไหลที่ 10 และ 20 มิลลิเมตร

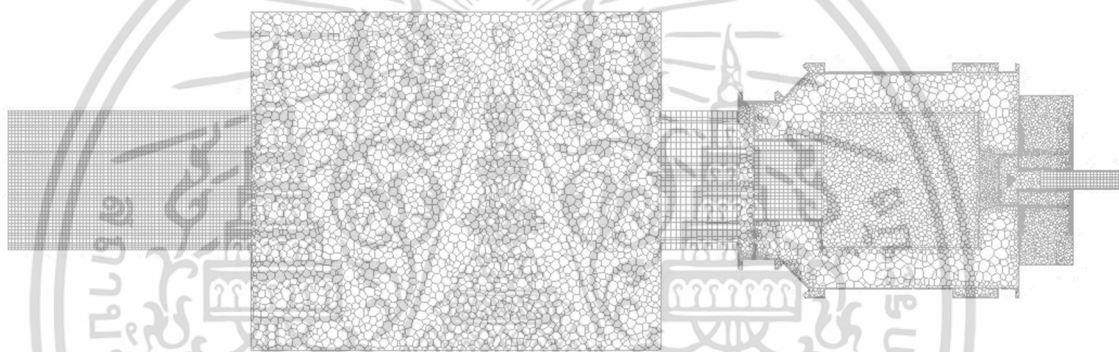
การปรับระยะของวัดถุขวางการไหลส่งผลต่อความเร็วของอากาศปฐมภูมิที่ใช้สำหรับลำเลียงเชื้อเพลิงชีวมวล ทำให้เชื้อเพลิงมีความเร็วลดลงนั้นหมายความว่ามีการเคลื่อนจะมีเวลาในการเคลื่อนที่ในห้องเผาไหม้มากขึ้น ช่วยเพิ่มเวลาในการปลดปล่อยสารระเหย ดังนั้นในกรณีระยะห่างของวัดถุขวางการไหล 20 มิลลิเมตร จึงทำให้สามารถปลดปล่อยสารระเหยได้นานกว่า หากลักษณะของการไหลภายในห้องเผาไหม้ไม่เปลี่ยนแปลง คาดว่าความเข้มข้นของสปีชีส์เชื้อเพลิงจะมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นดังนั้นอุณหภูมิบริเวณใกล้ผนังห้องเผาไหม้จึงสูงกว่า เพราะบริเวณใกล้ผนังห้องเผาไหม้เป็นบริเวณที่มีความเข้มข้นของออกซิเจนสูงจึงเกิดการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ในส่วนของพื้นบริเวณกลางห้องเผาไหม้มีอุณหภูมิที่ไม่แตกต่างจากเดิมเนื่องจากมีปริมาณออกซิเจนไม่เพียงพอในการทำปฏิกิริยา ในส่วนของปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ที่สูงขึ้น เกิดจากความเข้มข้นของสปีชีส์เชื้อเพลิงในบริเวณพื้นที่ที่มีการผสมกับอากาศไม่ดีบริเวณท้ายห้องเผาไหม้ สปีชีส์ของเชื้อเพลิงเหล่านี้จึงไม่เกิดการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนล่องลอยออกห้องเผาไหม้ อย่างไรก็ตาม สามารถทำการตรวจสอบได้จากการทำการจำลองที่ได้แสดงไว้ในบทที่ 7

## บทที่ 7

### ผลการจำลอง

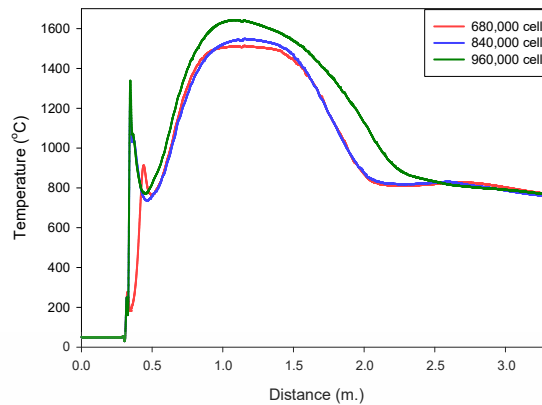
จากเนื้อหาที่กล่าวมาก่อนหน้านี้ เป็นการทดลองการเผาไหม้ตามเงื่อนไขที่ได้กำหนดไว้ แต่การทดลองรวมถึงการสังเกตปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นระหว่างการทดลองนั้นทำได้ยากเนื่องจากข้อจำกัดต่าง ๆ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องอาศัยเครื่องมือในการช่วยเหลือในการวิเคราะห์ปรากฏการณ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นภายใน เพื่อให้สามารถเข้าสู่สิ่งที่เกิดในระหว่างการเผาไหม้ได้มากขึ้น

#### 7.1 การหาจำนวนกริดที่เหมาะสมต่อการจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง



รูปที่ 7.1 แสดงลักษณะกริด polyhedral และ hexahedral

การจำลองการเผาไหม้เพื่อให้เกิดความแม่นยำ สิ่งหนึ่งที่มีความจำเป็นอย่างยิ่งคือการหาจำนวนอิลิเมนต์หรือในที่นี้เราจะใช้คำว่ากริด ที่เพียงพอต่อการทำการจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง ในการจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผงเบื้องต้นเพื่อตัดอิทธิพลของจำนวนกริดต่อผลของคำตอบในครั้งนี้ จะเลือกใช้กริด 680,000 เซลล์ 840,000 เซลล์ และ 960,000 เซลล์ พบว่า ที่ 680,000 เซลล์ มีความแตกต่างของผลการจำลอง 0.3 – 0.5 เมตร ซึ่งเป็นบริเวณภายในห้องเผาไหม้ช่วยที่เป็นบริเวณที่สำคัญของการศึกษาครั้งนี้ ในส่วนของจำนวนกริด 840,000 และ 960,000 เซลล์ ผลการจำลองบริเวณห้องเผาไหม้ช่วยมีความใกล้เคียงกัน แต่มีความแตกต่างบริเวณห้องเผาไหม้หลัก ดังนั้นในการจำลองครั้งนี้จึงเลือกใช้ กริดปริมาณ 870,000 เซลล์ ในการจำลองซึ่งเป็นกริดจำนวนน้อยที่สุดที่ปราศจากอิทธิพลของเซลล์



รูปที่ 7.2 แสดงผลลัพธ์จำนวนกริดที่เหมาะสมในการจำลอง

## 7.2 ผลการจำลองพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการเผาไหม้

หลังจากการหาจำนวนกริดที่เพียงพอและปราศจากอิทธิพลของกริดที่ส่งผลกระทบต่อคำตอบนั้น ขั้นตอนต่อไปเป็นการจำลองพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในการจำลอง เหตุเพราะแบบจำลองที่นำมาใช้นั้นเป็นแบบจำลองการเผาไหม้สำหรับถ่านหินผง แม้ว่าตัวถ่านหินจะเป็นเชื้อเพลิงแข็งเช่นเดียวกับชีวมวลผงแต่ตัวถ่านหินนั้นมีความร้อนที่สูงกว่า อุณหภูมิปล่อยสารระเหยที่สูงกว่า ทำให้ต้องมีการจำลองค่าพารามิเตอร์เพื่อหาค่าเริ่มต้นก่อนนำไปจำลองในกรณีต่าง ๆ อีกครั้ง

ในการจำลองครั้งนี้เป็นการจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผงที่กำลังความร้อน 300 กิโลวัตต์ต่อความร้อน ที่อากาศส่วนเกินร้อยละ 15 พารามิเตอร์ส่วนใหญ่ในการจำลองเบื้องต้นจะใช้ค่าพารามิเตอร์ตามการแนะนำของโปรแกรมAnsys และเงื่อนไขขอบเขตสำหรับการทดลองตามตารางที่ 7.1

### ตารางที่ 7.1 เงื่อนไขขอบเขตสำหรับการจำลองพารามิเตอร์

เงื่อนไขขอบเขตการจำลองของกรณีพื้นฐาน

อัตราการไหลเชื้อเพลิงที่ 300 kW (kg/s)	0.017
อัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิ (kg/s)	0.029
อัตราการไหลของอากาศทุติยภูมิ (kg/s)	0.075
อัตราการไหลของอากาศตติยภูมิ (kg/s)	0.012
อุณหภูมิเริ่มต้นเชื้อเพลิง (K)	303
อุณหภูมิเริ่มต้นอากาศ (K)	323
อุณหภูมิผนังเตา (K)	773
อุณหภูมิการปลดปล่อยสารระเหย (K)	463
ความดันทางออก (Pa)	-1500

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนของคุณสมบัติของเชื้อเพลิงและขนาดของเชื้อเพลิงสำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผงได้แสดงไว้ในตารางที่ 7.2

ตารางที่ 7. 2 แสดงคุณสมบัติของเชื้อเพลิงและขนาดของเชื้อเพลิง

Biomass pulverized properties.

Proximate analysis (as received)	
Moisture %	5.81
Volatiles %	76.68
Ash %	2.28
Fixed carbon %	15.23
Ultimate analysis (wt%, daf)	
C %	45.42
H %	6.31
N %	0.48
S %	0
O %	45.54
Calorific value (MJ/kg, daf)	17.5
Size distribution	
<0.038 mm.	0.97%
0.075-0.038 mm.	7.20%
0.15-0.075 mm.	11.87%
0.3-0.15 mm.	24.89%
0.6-0.3 mm.	46.09%
1.18-0.6 mm.	7.33%
2.36-1.18 mm.	1.64%

### 7.2.1 ผลการจำลองการลดค่าเอนทัลปีมาตรฐาน (Standard state enthalpy) ของสารระเหย

เนื่องจากลักษณะของถ่านหินที่กล่าวมาก่อนหน้านั้นนั้น เมื่อทำการจำลองผลลัพธ์ที่ออกมา นั้น ทำให้มีอุณหภูมิสูงเกินกว่าอุณหภูมิที่วัดได้จากการทดลอง ดังนั้นสิ่งแรกที่จำการศึกษาคือการลดค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอนทัลปีมาตรฐานให้มีค่าใกล้เคียงกับการทดลอง โดยการลดค่าเอนทัลปีมาตรฐานจะเริ่มจาก ค่าเริ่มต้น ลดลงร้อยละ 20, 30 และ 40ตามลำดับ ค่าเอนทัลปีมาตรฐานได้แสดงในตารางที่ 7.1

ตารางที่ 7. 3 แสดงค่าเอนทัลปีมาตรฐานที่ใช้ในการจำลอง

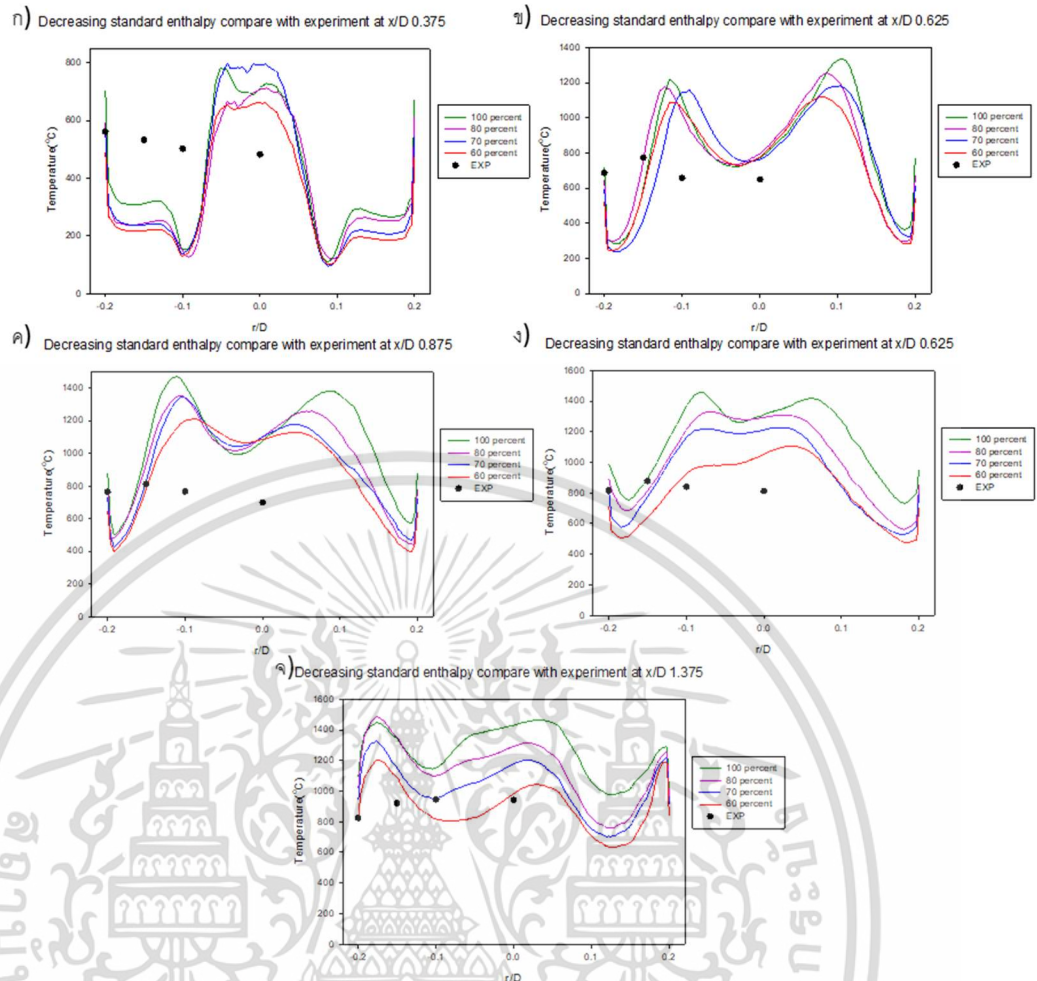
Standard enthalpy	
อัตราการลดร้อยละ	J/kgmol
ไม่มีการลด	$-2.2 \times 10^8$
20	$-2.7 \times 10^8$
30	$-2.9 \times 10^8$
40	$-3.1 \times 10^8$

ผลการจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผงด้วยการเปลี่ยนค่าเอนทัลปีมาตรฐาน แสดงไว้ในตารางที่ 7.3 พบว่า เมื่อลดค่าเอนทัลปีมาตรฐานลง ค่าเฉลี่ยร้อยละความผิดพลาดเริ่มลดลงจนกระทั่งลดถึงร้อยละ 30 จากนั้นค่าเฉลี่ยร้อยละความผิดพลาดจะเพิ่มขึ้น ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าค่าเอนทัลปีมาตรฐานที่เหมาะสมต่อการจำลอง ได้แก่ การลดค่าเอนทัลปีมาตรฐานลงร้อยละ 30 ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $-2.9 \times 10^8$  J/kgmol ซึ่งให้ค่าค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดอยู่ที่ร้อยละ 35.47 แต่ค่าความผิดพลาดยังมีค่าสูง โดยค่าร้อยละของความผิดพลาดส่วนใหญ่อยู่ที่บริเวณทางเข้าห้องเผาไหม้ช่วย จึงทำให้เกิดการสันนิษฐานว่า ความผิดพลาดเกิดขึ้นจากการเลือกใช้แบบจำลองการไหลปั่นป่วนเนื่องจากลักษณะของอุณหภูมิบริเวณปากหัวเผาที่สูงกว่าอุณหภูมิที่ได้จากการทดลอง

ตารางที่ 7. 4 ค่าความผิดพลาดของคำตอบจากการจำลองโดยลดค่าเอนทัลปีมาตรฐาน

อัตราการลดร้อยละ	ค่าเฉลี่ยของร้อยละความผิดพลาด
ไม่มีการลด	38.32
20	36.97
30	35.47
40	40.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.3 แสดงผลลัพธ์ของการจำลองการลดค่าเอนทัลปีมาตรฐาน  
เมื่อเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง

## 7.2.2 ผลการจำลองการไหลปั่นป่วน

จากหัวข้อก่อนหน้าที่ยังพบปัญหาความผิดพลาดจากการจำลอง ข้อสันนิษฐานถัดมาคือแบบจำลองการไหลปั่นป่วนที่ส่งผลต่อคำตอบเนื่องจากสมการการไหลปั่นป่วนแบบ  $k-\epsilon$  มีให้เลือกใช้งานอยู่ 3 แบบ ในแบบละแบบก็มีการปรับปรุงต่อ ๆ กันมา เพื่อให้ใช้งานได้ครอบคลุมมากขึ้น โดย  $k-\epsilon$  ประกอบไปด้วย 1.สมการการไหลปั่นป่วนแบบ  $k-\epsilon$  มาตรฐาน 2.สมการการไหลปั่นป่วนแบบ  $k-\epsilon$  RNG 3.สมการการไหลปั่นป่วนแบบ  $k-\epsilon$  Realizable ร่วมกับค่าเอนทัลปีมาตรฐานที่  $-2.9 \times 10^8$  J/kgmol

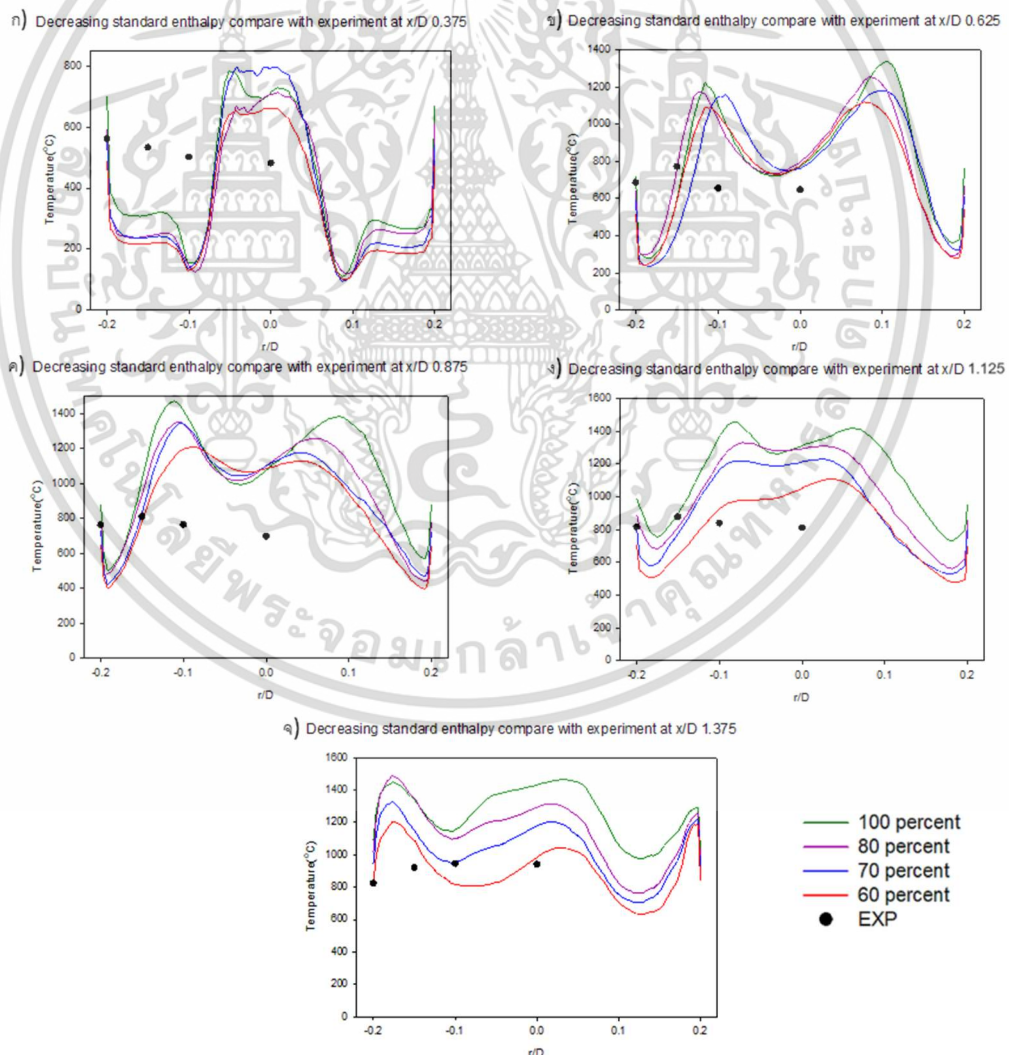
การจำลองด้วยการใช้งานสมการการไหลปั่นป่วนแบบ  $k-\epsilon$  ทั้ง 3 แบบ ผลที่ได้แสดงไว้ใน

ตารางที่ 7.3 พบว่า สมการการไหลปั่นป่วนแบบ  $k-\epsilon$  Realizable ให้ผลค่าเฉลี่ยความผิดพลาดน้อย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่สุดอยู่ที่ร้อยละ 34.78 ค่าอุณหภูมิที่ได้ในช่วงต้นหัวเผามีค่าใกล้เคียงกับการทดลองมากกว่าการใช้ งานแบบจำลองสมการการไหลปั่นป่วนแบบ  $k-\epsilon$  อื่น ๆ ในส่วนปลายหัวเผาให้ค่าความผิดพลาดสูง กว่า การจำลองด้วยการใช้สมการการไหลปั่นป่วนแบบ  $k-\epsilon$  แบบอื่น ๆ แต่ความมีความแตกต่าง ประมาณร้อยละ 9 ดังนั้นสมการการไหลปั่นป่วนแบบ  $k-\epsilon$  Realizable จึงมีความเหมาะสมต่อการ นำมาใช้ในการจำลอง แต่ยังให้อุณหภูมิในการจำลองที่สูงกว่าการทดลอง

ตารางที่ 7. 5 แสดงความคลาดเคลื่อนจากการจำลองสมการความปั่นป่วน

สมการความปั่นป่วน	ค่าเฉลี่ยของร้อยละความผิดพลาด
Standard	35.47
RNG	53.59
Realizable	34.78



รูปที่ 7. 4 แสดงผลลัพธ์ของการจำลองสมการการไหลปั่นป่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เปรียบเทียบ กับผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง เมื่อเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง เมื่อเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง ไม่ว่าการณ์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 7.2.3 การเพิ่มอัตราการปลดปล่อยสารระเหยโดยการลดค่า Activation energy ของการปลดปล่อยสารระเหย

หัวข้อก่อนหน้า เราพบว่าการศึกษาการใช้งานสมการการไหลปั่นป่วนแบบ  $k$ - $\epsilon$  Realizable ให้ผลการจำลองใกล้เคียงมากที่สุด แต่ยังคงมีความผิดพลาดมากเนื่องมาจากอุณหภูมิในการจำลองสูงกว่าอุณหภูมิการทดลอง ดังนั้นแนวคิดในการลดอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วยนั้นสามารถทำได้โดยการเพิ่มอัตราการปลดปล่อยสารระเหยภายในเชื้อเพลิงซึ่งตรงลักษณะทางเคมีของชีวมวลที่มีอุณหภูมิการปลดปล่อยสารระเหยต่ำ จากการมีสารระเหยเบาเป็นองค์ประกอบในเชื้อเพลิงมากทำให้อุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้ชีวมวลน้อยเช่นกัน ดังนั้นการเพิ่มอัตราในการปลดปล่อยสารระเหยจะส่งผลให้อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วยลดลงตามมา

การเพิ่มอัตราการปลดปล่อยสารระเหยทำได้โดยการปรับค่าในแบบจำลองการปลดปล่อยสารระเหย ชนิด The Single Kinetic Rate ที่ใช้สมการ

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

ที่  $k$  มีผลโดยตรงต่อการลดลงของปริมาณสารระเหยในเชื้อเพลิงชีวมวล ค่า  $k$  ที่กล่าวมานั้น จะหาได้โดยตัวแปร Arrhenius ที่ประกอบด้วยตัวแปร Pre-exponential และ Activation energy ดังสมการ

$$k = A_1 e^{-(E/RT)}$$

ในการจำลองนี้จะทำการลดค่า Activation energy ( $E$ ) ในสมการก่อนหน้านี้จะทำให้ค่า  $k$  เพิ่มขึ้น โดยจะจำลองในกรณีไม่ลดค่า Activation energy จากนั้นลด ร้อยละ 40, 80, และลดลง 10 เท่า

ตารางที่ 7. 6 ค่า Activation energy สำหรับการทดลอง  
การเพิ่มอัตราการปลดปล่อยสารระเหย

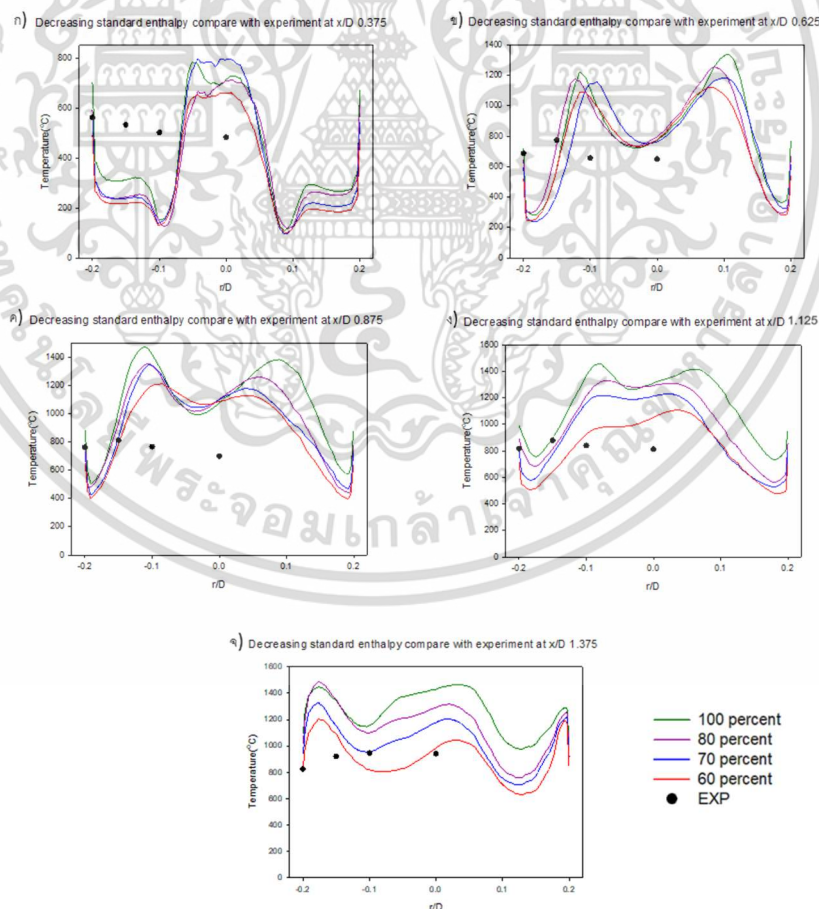
Activation energy	j/kgmol
ไม่มีการลด	$6.80 \times 10^7$
ลดลงร้อยละ 40	$4.08 \times 10^7$
ลดลงร้อยละ 80	$1.36 \times 10^7$
ลดลง 10 เท่า	$6.80 \times 10^6$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการจำลองพบว่าเมื่อทำการลดค่า Activation energy ส่งผลให้อุณหภูมิลดลงตามที่แสดงไว้ในตารางที่ 7.5 โดยเมื่อทำการลดค่า Activation energy ร้อยละ 80 จะให้ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดของอุณหภูมิระหว่างการจำลองและการทดลองอยู่ที่ร้อยละ 19.38 หากลดมากไปกว่านี้ (ลดลง 10 เท่า) ความแตกต่างของค่าความผิดพลาดระหว่างการจำลองกับการทดลองแตกต่างกันในกรณีอื่นๆ ห่างกันไม่เกินร้อยละ 1 ดังนั้น ค่าที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้จำลองคือการลดค่า Activation energy ร้อยละ 80 ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $1.36 \times 10^7$  J/kgmol

ตารางที่ 7. 7 แสดงอัตราการลดลงของค่าActivation energyและค่าร้อยละความผิดพลาด

อัตราการลดค่า Activation energy	ค่าเฉลี่ยของร้อยละความผิดพลาด
ค่ามาตรฐาน	34.44
ลดลงร้อยละ 40	22.45
ลดลงร้อยละ 80	19.38
ลดลง 10 เท่า	19.52



รูปที่ 7. 5 แสดงผลลัพธ์ของการจำลองการเพิ่มอัตราการปลดปล่อยสารระเหย

เมื่อเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการเปรียบเทียบผลการจำลองกรณีอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงชนิดโดยตรง 100 องศา  
กับการจำลองพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในการเผาไหม้ได้แก่ ค่าเอนทัลปีมาตรฐาน  $-2.9 \times 10^8$  J/kgmol  
ค่า Activation energy  $1.36 \times 10^7$  J/kgmol ร่วมกับ สมการการไหลปั่นป่วน  $k-\epsilon$  Realizable ที่ให้  
ค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดเมื่อเทียบกับการทดลองอยู่ที่ร้อยละ 19.38 พบว่า ที่  $x/D$  0.375 อุณหภูมิ  
บริเวณผนังของห้องเผาไหม้ช่วยที่วัดได้จากการทดลองมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิที่ได้จากการจำลอง ทั้งที่  
บริเวณนั้นควรมีอุณหภูมิต่ำเนื่องจากการพาของอากาศที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้ สิ่งที่เกิดขึ้นนี้ สามารถ  
เกิดขึ้นได้จากการแผ่รังสีของเปลวไฟที่เกิดขึ้นอย่างรุนแรงในห้องเผาไหม้ช่วย อีกทั้งยังสามารถเกิดได้  
จากลักษณะของเทอร์โมคัปเปิล ที่มีขนาดใหญ่ เมื่อมีการไหลร่วมกับเชื้อเพลิงจะทำให้เกิดจุดหยุดนิ่ง  
(Stagnation point) พร้อมกับการมีเชื้อเพลิงเข้ามาปะทะ ผลที่ตามมาคือการเผาไหม้บริเวณจุดหยุด  
นิ่งความร้อนที่เกิดขึ้นทำให้การอ่านอุณหภูมิเกิดความผิดพลาดขึ้น ในส่วนของระยะ  $x/D$  อื่น ๆ  
ความคลาดเคลื่อนในการวัดอุณหภูมิของการทดลอง สามารถเกิดได้จาก การแผ่รังสี การพาความร้อน  
การนำความร้อน และการสูญเสียความร้อน ที่เป็นสิ่งที่สามารถเกิดขึ้นได้ในระหว่างการทดลอง

### 7.3 ผลการจำลองอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงต่อการเผาไหม้

การจำลองก่อนหน้านี้ทำให้ได้ข้อสรุปในส่วนของตัวแปรที่นำมาใช้งานในการจำลองการเผาไหม้  
เชื้อเพลิงชีวมวลผงเพื่อคาดการณ์ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นระหว่างการเผาไหม้ เงื่อนไขขอบเขตทั้งหมดที่  
จะนำมาใช้ได้แสดงไว้ในตารางที่ 7.8

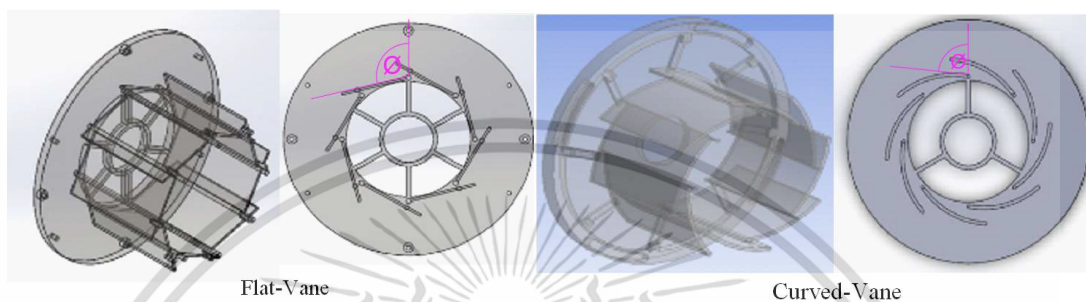
ตารางที่ 7.8 แสดงเงื่อนไขขอบเขต สมการการไหลปั่นป่วนและพารามิเตอร์ในการจำลอง

เงื่อนไขขอบเขตการจำลองของกรณีพื้นฐาน

อัตราการไหลเชื้อเพลิงที่ 300 kW (kg/s)	0.017
อัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิ (kg/s)	0.029
อัตราการไหลของอากาศทุติยภูมิ (kg/s)	0.075
อัตราการไหลของอากาศตติยภูมิ (kg/s)	0.012
อุณหภูมิเริ่มต้นเชื้อเพลิง (K)	303
อุณหภูมิเริ่มต้นอากาศ (K)	323
อุณหภูมิผนังเตา (K)	773
อุณหภูมิการปลดปล่อยสารระเหย (K)	463
ความดันทางออก (Pa)	-1500
เอนทัลปีมาตรฐาน (J/kgmol)	$-2.9 \times 10^8$
Activation energy (J/kgmol)	$1.36 \times 10^7$
สมการการไหลปั่นป่วน	Realizable

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของงานวิจัยการศึกษานี้ ไม่อนุญาตให้ผู้อื่นใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผงเพื่อปรับปรุงการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผงด้วยการลดการปลดปล่อยปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ จากการปรับเปลี่ยนอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวนชนิดใบตรงเป็นชนิดใบโค้งให้สร้างพื้นที่การไหลย้อนกลับที่ใหญ่ขึ้นตามที่ได้กล่าวไว้ในวรรณกรรมปริทรรศน์ การจำลองครั้งนี้จะทำการจำลองอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวนชนิดใบตรง 100 องศา ใบโค้ง 70 และ 85 องศา มุมองศาของอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวนสามารถวัดได้โดยรูปที่ 7.6



รูปที่ 7. 6 แสดงการวัดมุมของอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวน

ผลการจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผงพบว่า อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวนชนิดใบโค้ง 85 องศา ให้ผลของตัวเลขการหมุนวนมากกว่ากรณีอื่น ๆ โดยมีค่าตัวเลขการหมุนวนอยู่ที่ 1.48 ในส่วนของตัวเลขการไหลหมุนวนของอุปกรณ์อื่น ๆ ค่าตัวเลขการหมุนวนจะแสดงไว้ในตารางที่ 7.9

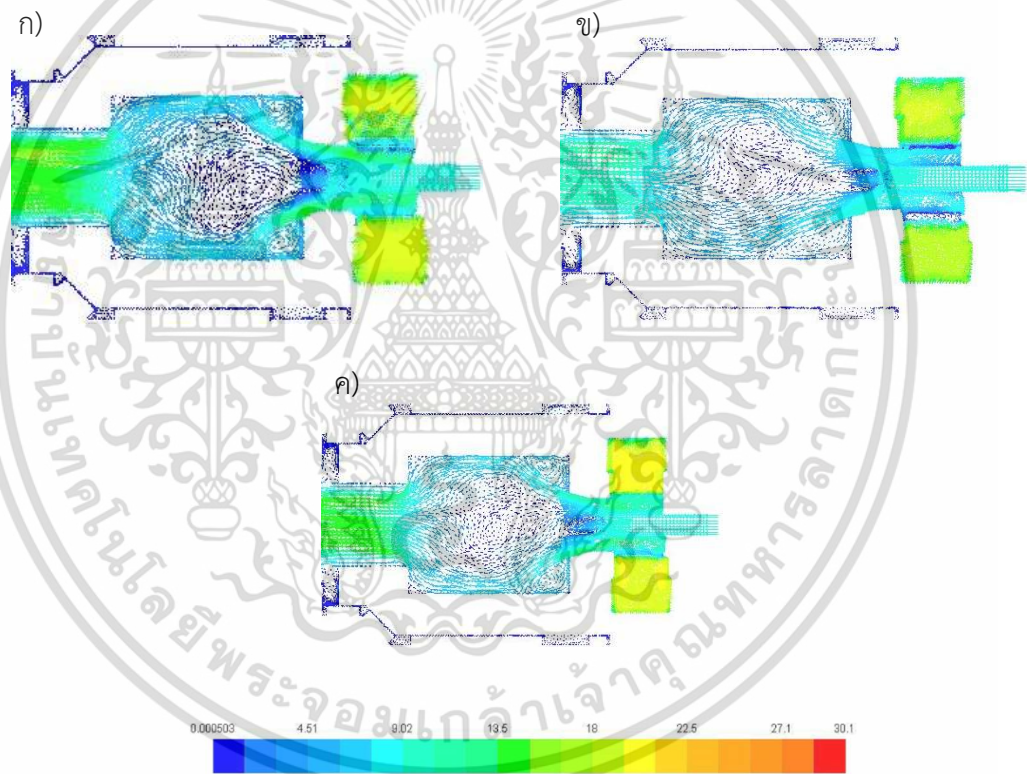
ตารางที่ 7. 9 ค่าตัวเลขการหมุนวนจากการจำลอง

อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวน	ตัวเลขหมุนวน
ใบตรง มุม 100 องศา	0.84
ใบโค้ง มุม 70 องศา	0.74
ใบโค้ง มุม 85 องศา	1.48

จากการหาค่าตัวเลขหมุนวนก่อนหน้านี้ เมื่อเราพิจารณาลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้ช่วยได้จากรูปที่ 7.7 เมื่อเราสังเกตพื้นที่การไหลบริเวณทางออกอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวนจะพบว่า อากาศที่บริเวณทางออกจะถูกเหวี่ยงให้กระจายไปติดผนัง ยิ่งตัวเลขการหมุนวนสูงขึ้นเท่าไร มุมองศาของการเหวี่ยงยิ่งกว้างขึ้นเท่านั้น ความรุนแรงของการไหลได้ไว้ในรูปแบบสีของลูกศรเวกเตอร์ ตามระดับความเร็วที่ได้แสดงไว้ พบว่าอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวนชนิดใบโค้ง มุม 85

องศา ให้ขนาดของความเร็วประมาณ 12 m/s รองลงมาเป็นอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวนชนิดใบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น มิฉะนั้นผู้ใดเห็นไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

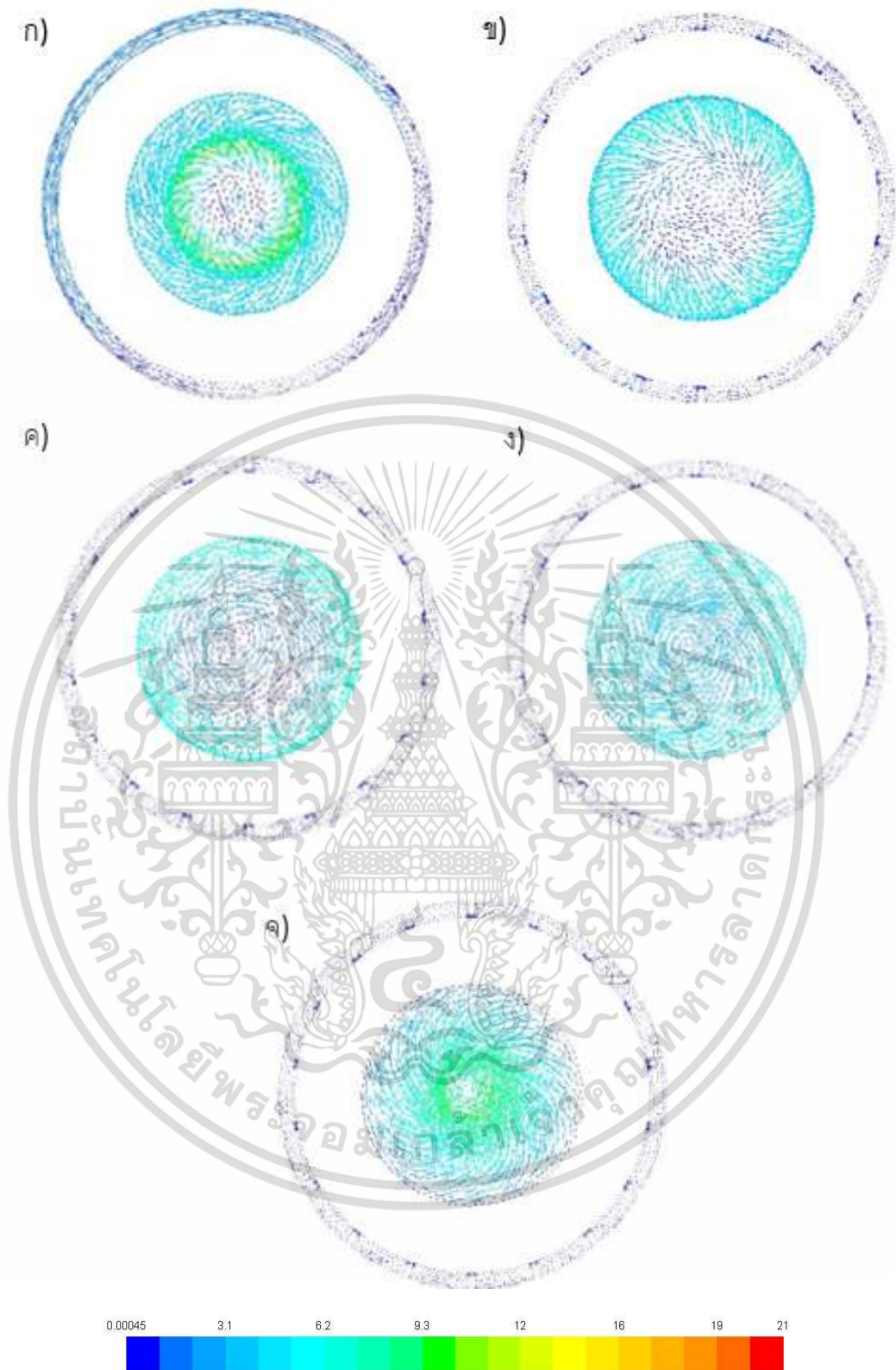
ตรง มุม 100 องศา ที่ประมาณ 9.3 m/s และ อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงชนิดใบโค้ง 70 องศา ที่ 7.4 m/s เมื่อการไหลหมุนควงเกิดการสลายตัวขึ้นจะสร้างพื้นที่การไหลหมุนขึ้นบริเวณกลางห้องเผาไหม้ช่วย พื้นที่การไหลหมุนที่เกิดขึ้นมานี้ มีส่วนช่วยในการเผาไหม้ด้วยดีดแก๊สร้อนมาช่วยในการปลดปล่อยสารระเหยตามวัตถุประสงค์ของการออกแบบ เมื่อเปรียบเทียบขนาดของพื้นที่การไหลหมุน พบว่า อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงมุม 85 องศา ให้ผลลัพธ์ของขนาดพื้นที่การไหลหมุนที่ใหญ่กว่ากรณีอื่น ๆ โดยพื้นที่การไหลหมุน เกิดขึ้นตั้งแต่บริเวณหลังวัตถุของขวางการไหลยาวตลอดจนกระทั่งบริเวณกลางห้องเผาไหม้ช่วย ในส่วนของกรณีอื่น ๆ รูปทรงและความยาวใกล้เคียงกับกรณีก่อนหน้านี้เพียงแต่มีขนาดที่แคบกว่า



รูปที่ 7. 7 แสดงลักษณะการไหลภายในห้องเผาไหม้ช่วย ก) ใบตรง 100 องศา

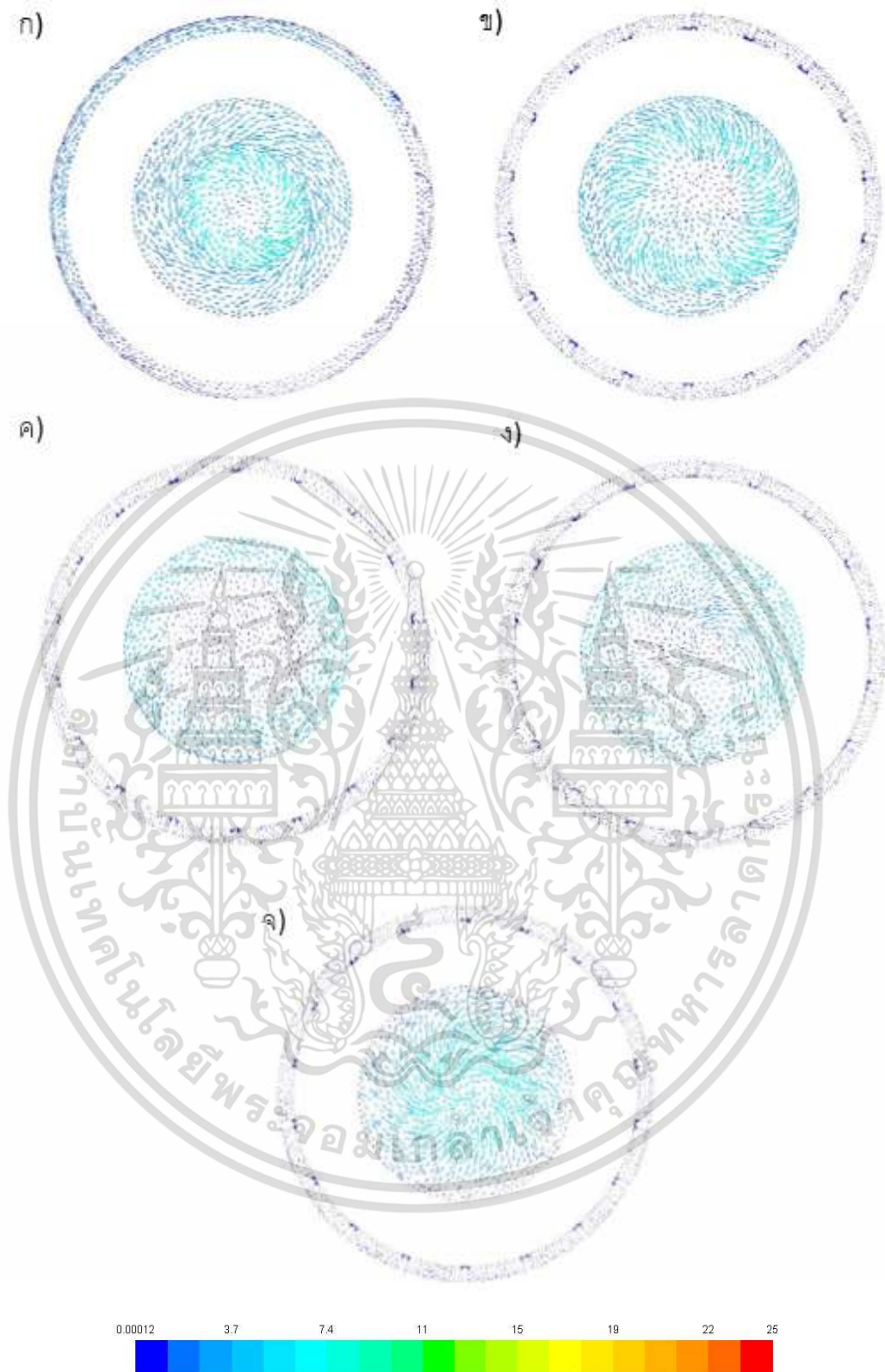
ข) ใบโค้ง 70 องศา ค) ใบโค้ง 85 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



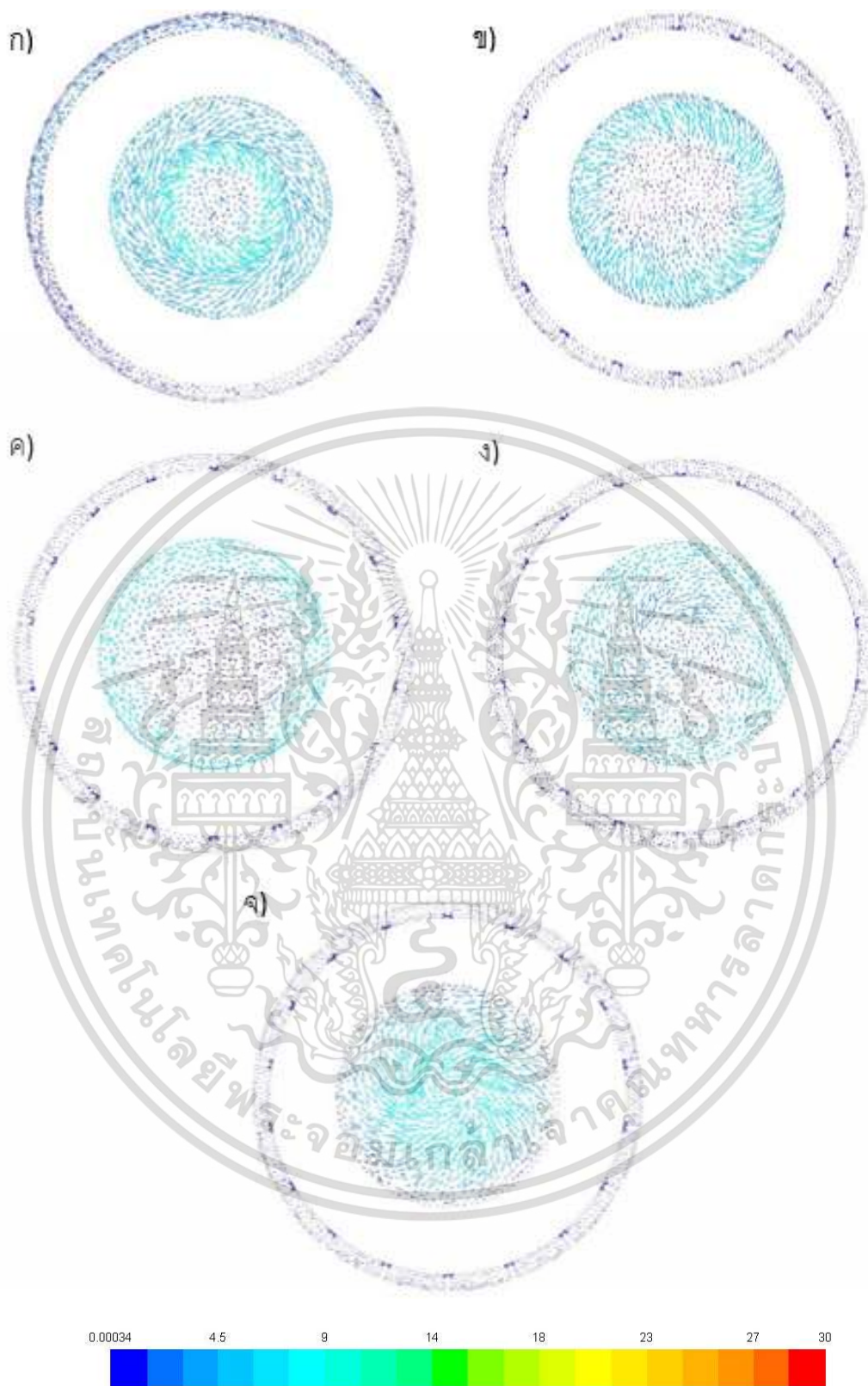
รูปที่ 7. 8 แสดงลักษณะของการไหลภายในห้องเผาไหม้ช่วยเมื่อติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควง  
 ชนิดใบตรง มุม 100 องศา ก.ที่ระยะ $x/D$  0.375 ข.ที่ระยะ $x/D$  0.625 ค.ที่ระยะ $x/D$  0.875  
 ง.ที่ระยะ $x/D$  1.125 จ.ที่ระยะ $x/D$  1.375

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7. 9 แสดงลักษณะของการไหลภายในห้องเผาไหม้ช่วยเมื่อติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควง  
ชนิดใบโค้ง มุม 70 องศา ก.ที่ระยะ $x/D$  0.375 ข.ที่ระยะ $x/D$  0.625 ค.ที่ระยะ $x/D$  0.875  
ง.ที่ระยะ $x/D$  1.125 จ.ที่ระยะ $x/D$  1.375

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

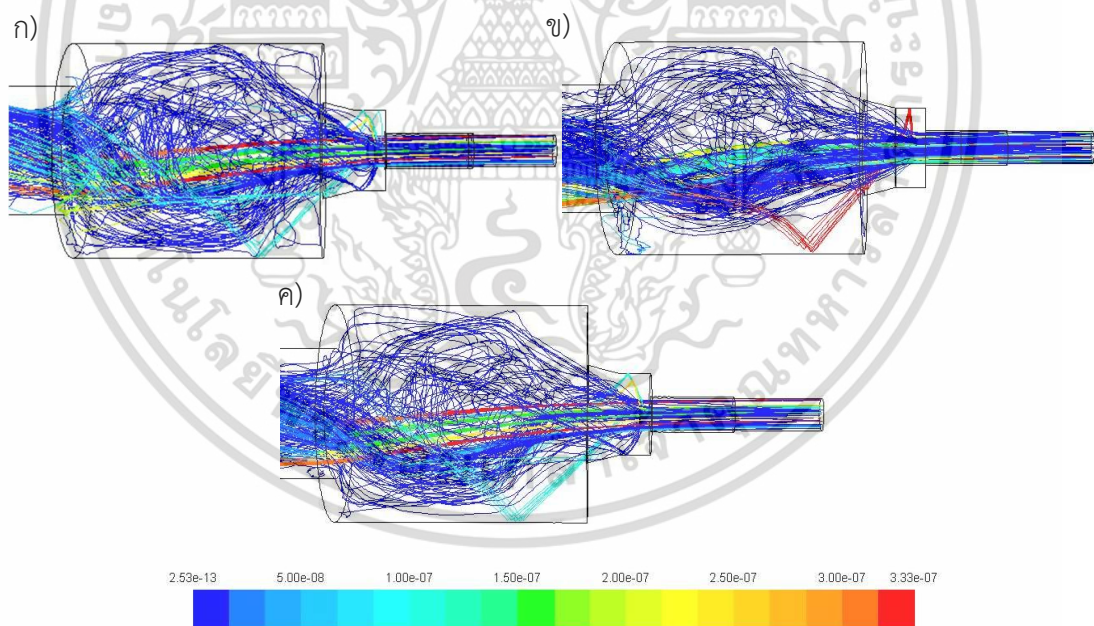


รูปที่ 7. 10 แสดงลักษณะของการไหลภายในห้องเผาไหม้ช่วยเมื่อติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลหมุน  
 ความชนิดใบโค้ง มุม 70 องศา ก.ที่ระยะ $\times/D$  0.375 ข.ที่ระยะ $\times/D$  0.625 ค.ที่ระยะ $\times/D$  0.875  
 ง.ที่ระยะ $\times/D$  1.125 จ.ที่ระยะ $\times/D$  1.375

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

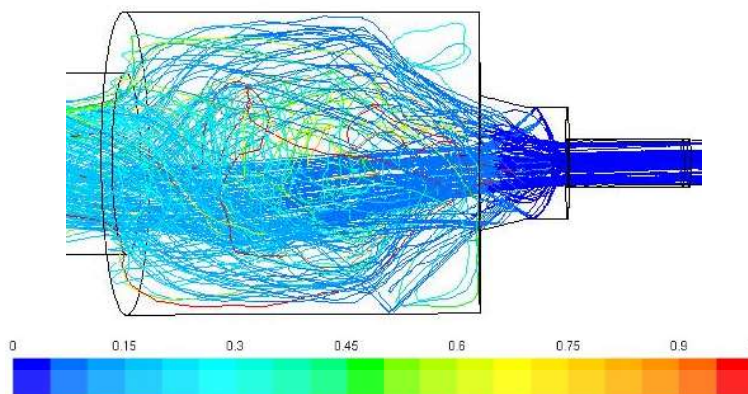
อนุภาคที่ถูกฉีดเข้าสู่ห้องเผาไหม้จะไหลแบ่งออกเป็น 2 ทิศทาง ในทิศทางแรกอนุภาคเคลื่อนที่เป็นพุ่งตรงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ อนุภาคส่วนนี้จะมีเวลาในการเคลื่อนที่อยู่ในห้องเผาไหม้ช่วยไม่เพียงพอก่อนไหลออกจากห้องเผาไหม้ช่วยไป ในทิศทางที่สองอนุภาคจะเคลื่อนที่เข้าพุ่งชนวัตถุวางการไหลก่อนจะสะท้อนไปชนบริเวณมุมทางเข้าห้องเผาไหม้ช่วยและผนังห้องเผาไหม้ช่วย อนุภาคที่สะท้อนเหล่านี้บางส่วนยังสะท้อนกับผนังห้องเผาไหม้ บริเวณปลายห้องเผาไหม้ช่วย ก่อนจะกลับมาเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ช่วยอีกครั้ง

เมื่อเปรียบเทียบน้ำหนักของอนุภาคที่ปล่อยบริเวณทางเข้าโดยใช้อากาศปฐมภูมิในการลำเลียงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ ดังที่แสดงในรูป 7.8 น้ำหนักของอนุภาคแบ่งตามระดับของสี โดยสีน้ำเงินคืออนุภาคที่มีน้ำหนักน้อย สีแดงคืออนุภาคที่มีน้ำหนักมาก พบว่า อนุภาคที่มีน้ำหนักน้อยได้รับอิทธิพลจากอากาศทุติยภูมิมากกว่าอนุภาคที่มีน้ำหนักมาก ทำให้ล่องลอยไปตามกระแสการไหลในห้องเผาไหม้ช่วย อนุภาคบางส่วนยังสะท้อนกลับมาเคลื่อนที่ในพื้นที่การไหลหมุนวน ในส่วนของอนุภาคที่มีน้ำหนักมากทิศทางการเคลื่อนที่จะมีลักษณะการเคลื่อนที่เป็นแบบโปรเจกไทล์ ตามแรงโน้มถ่วงก่อนหลุดออกจากห้องเผาไหม้ช่วยไป



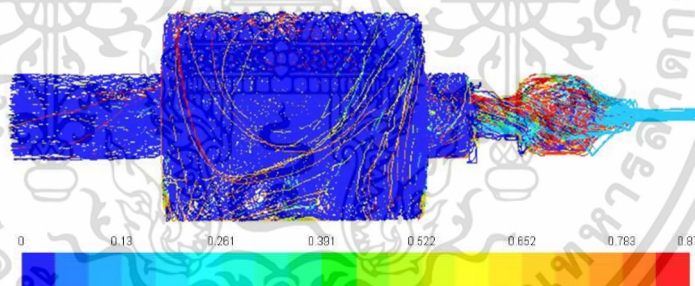
รูปที่ 7. 11 น้ำหนักของอนุภาคเคลื่อนที่ภายในห้องเผาไหม้ช่วย(กิโลกรัม) ที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควง

ก..ใบตรง 100 องศา ข. ใบโค้ง 70 องศา ค. ใบโค้ง 85 องศา



รูปที่ 7. 12 เวลาที่อนุภาคเคลื่อนที่ภายในห้องเผาไหม้ช่วย (วินาที) จากการติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงชนิดใบตรง 100 องศา

ในส่วนองเวลาที่อนุภาคเคลื่อนที่ในห้องเผาไหม้ช่วย และปริมาณคาร์บอนในอนุภาค การจำลองการเผาไหม้ด้วยการใช้อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงชนิดใบตรง 100 องศา ดังรูปที่ 7.9 และ 7.10 พบว่าเวลาที่อนุภาคเคลื่อนที่ในห้องเผาไหม้ช่วย ส่วนใหญ่อยู่ที่ประมาณ 0.3- 0.25 วินาที การเผาไหม้ผ่านจากการสังเกตผลลัพธ์จากการฉีดอนุภาค พบว่าคาร์บอนเริ่มสลายตัวในห้องเผาไหม้หลัก นั้นหมายความว่า อนุภาคได้ปล่อยสารระเหยภายในห้องเผาไหม้ช่วยทำให้สามารถรักษาเสถียรภาพเปลวไฟไว้ได้

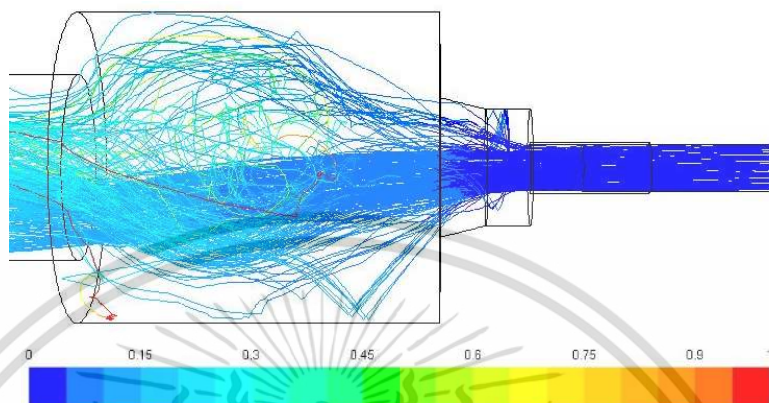


รูปที่ 7. 13 สัดส่วนเชิงมวลของคาร์บอนที่หลงเหลือในอนุภาคขณะเคลื่อนที่ในห้องเผาไหม้จากการติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงชนิดใบตรง 100 องศา

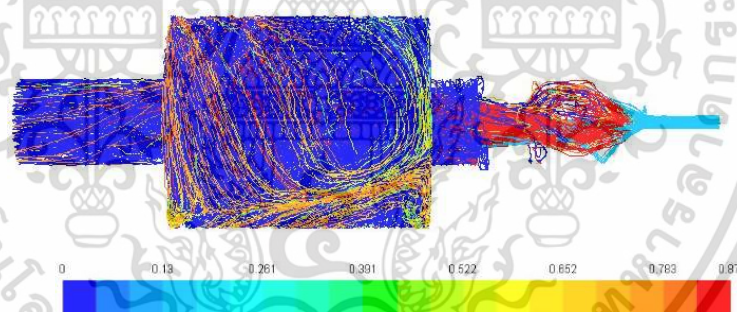
ในส่วนการติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงชนิดใบโค้ง 70 องศา ตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 7.11 และ 7.12 อนุภาคที่กระทบกับวัตถุขวางการไหลก่อนได้รับอิทธิพลจากอากาศสุญญากาศทำมุมที่กว้างกว่า(เทียบกับแกนตั้ง) การใช้งานอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงชนิดใบตรง 100 องศา เวลาที่อนุภาคเคลื่อนที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้ อยู่ที่ 0.2-0.25 วินาที เนื่องจากอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควง ชนิดใบโค้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

70 องศา สร้างความรุนแรงการไหลหมุนควงได้น้อยกว่าทุกกรณีศึกษา อนุภาคส่วนใหญ่ปลดปล่อยสารระเหยออกในช่วงห้องเผาไหม้ช่วย ยาวจนกระทั่งห้องเผาไหม้หลักก่อนจะหลุดออกไป



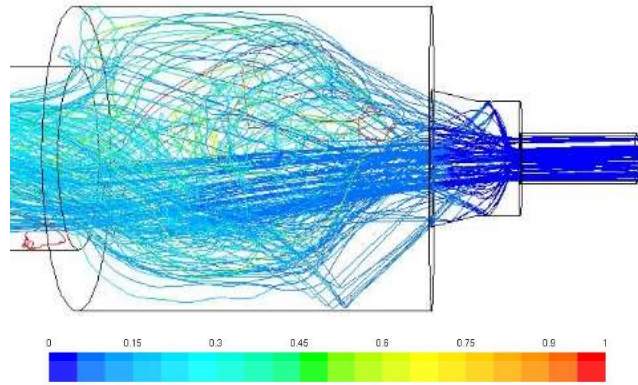
รูปที่ 7. 14 เวลาที่อนุภาคเคลื่อนที่ภายในห้องเผาไหม้ช่วย(วินาที) จากการติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงชนิดใบโค้ง 70 องศา



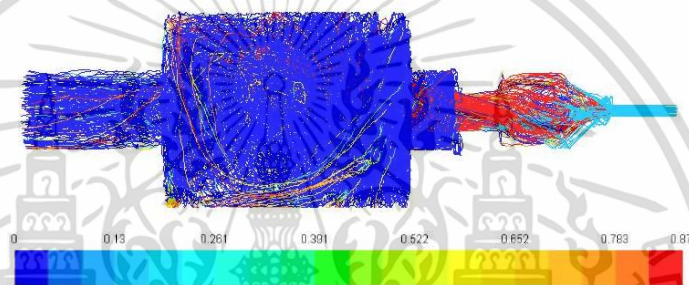
รูปที่ 7. 15 สัดส่วนเชิงมวลของคาร์บอนที่หลงเหลือในอนุภาคขณะเคลื่อนที่ในห้องเผาไหม้จากการติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงชนิดใบโค้ง 70 องศา

ในขณะที่อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควง ชนิดใบโค้ง มุม 85 องศา ตามที่แสดงไว้ในรูป 7.13 และ 7.14 มุมองศาของอนุภาคที่กระทบวัตถุขวางการไหลมีความใกล้เคียงกับการใช้งานอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควง ชนิดใบตรง มุม 100 องศา การสลายตัวของคาร์บอนเกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้หลักและยังเกิดในห้องเผาไหม้ช่วยบางส่วน การสลายตัวของคาร์บอนแสดงในตาราง 7.10 พบว่ากรณีใบตรง 100 องศา ใบโค้ง 70 และ 85 องศา มีปริมาณคาร์บอนสลายตัวร้อยละ 99.21 97.35 และ 99.42 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.16 เวลาที่อนุภาคเคลื่อนที่ภายในห้องเผาไหม้ช่วย(วินาที) จากการติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงชนิดใบโค้ง 85 องศา



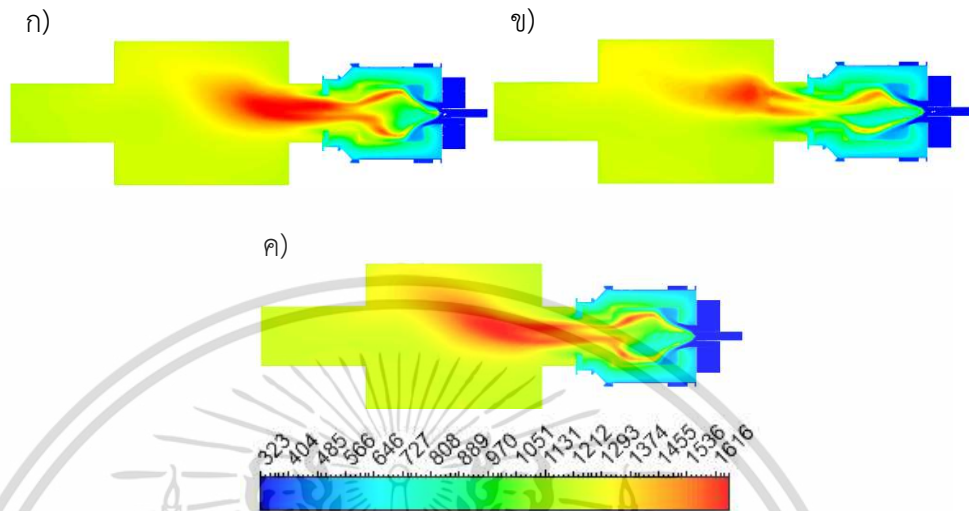
รูปที่ 7.17 สัดส่วนเชิงมวลของคาร์บอนที่หลงเหลือในอนุภาคขณะเคลื่อนที่ในห้องเผาไหม้จากการติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงชนิดใบโค้ง 85 องศา

ตารางที่ 7.10 แสดงมวลของคาร์บอนเริ่มต้นและทางออก ร้อยละการสลายตัวของคาร์บอน เมื่อติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงชนิดใบตรง 100 องศา ใบโค้ง 70 และ 85 องศา

กรณี	ทางเข้า (kg/s)	ทางออก (kg/s)	%conversion
ใบตรง มุม 100 องศา	$5.55 \times 10^{-5}$	$4.38 \times 10^{-7}$	99.21
ใบโค้ง มุม 70 องศา	$1.64 \times 10^{-4}$	$4.13 \times 10^{-6}$	97.35
ใบโค้ง มุม 85 องศา	$1.41 \times 10^{-4}$	$8.17 \times 10^{-7}$	99.42

ผลลัพธ์ของอุณหภูมิที่ได้จากการจำลองทั้ง 3 กรณี พบจุดอุณหภูมิสูงตั้งแต่บริเวณหลังวัตถุ ขวางการไหลเกิดจากลักษณะการไหลภายในห้องเผาไหม้ช่วย อีกทั้งพื้นที่อุณหภูมิสูงกว่าปกติสามารถพบได้ที่บริเวณขอบของพื้นที่การไหลหมุนวนจากการทำปฏิกิริยาระหว่างสารระเหยกับอากาศหตุติภูมิ และปลายของห้องเผาไหม้ช่วยซึ่งเป็นบริเวณที่อากาศหตุติภูมิเข้ามาผสม เมื่อนำทั้ง 3 กรณีมาเปรียบเทียบกันในรูปแบบที่ 7.15 พบว่ากรณีใช้งานอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงชนิดใบโค้งที่มุม 70 องศาให้ผลลัพธ์ของอุณหภูมิที่ต่ำกว่ากรณีอื่น ๆ ในส่วนของอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควง ชนิดใบโค้ง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่มุม 85 องศา พบพื้นที่อุณหภูมิสูงแคบและยาวกว่า ชนิดใบตรง 100 องศา จุดอุณหภูมิสูงสุดอยู่ในบริเวณเดียวกันโดยอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 1616 องศาเซลเซียส

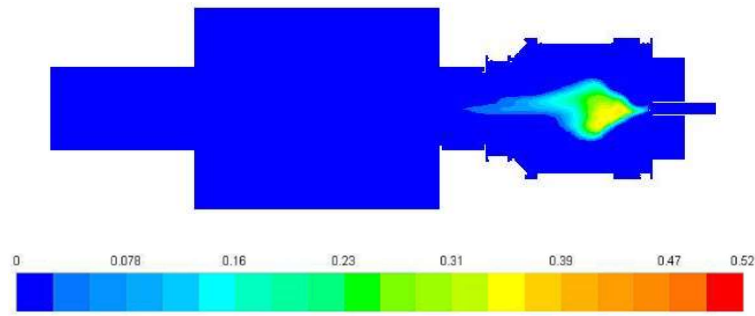


รูปที่ 7. 18 แสดงอุณหภูมิจากการจำลอง(เคลวิน) ก. ชนิดใบตรง 100 องศา ข.ใบโค้ง 70 องศา  
ค.ใบโค้ง 85 องศา

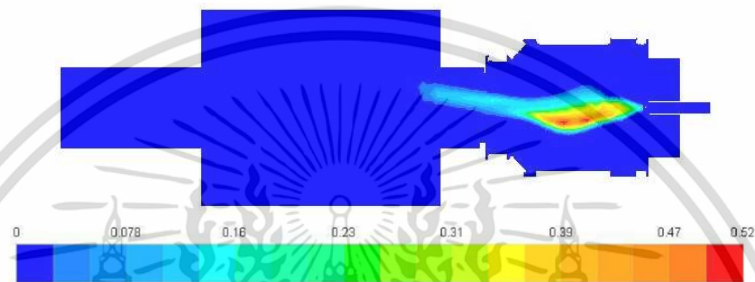
ผลการจำลองการปลดปล่อยสารระเหยแสดงไว้ในรูปที่ 7.16-7.18 พบว่า ในกรณีศึกษาทั้ง 3 กรณี พื้นที่การปลดปล่อยสารระเหยปรากฏตั้งแต่บริเวณด้านหลังของวัตถุขวางการไหล ซึ่งพื้นที่ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำจากการไหลหมุนควงให้การไหลหมุนวนขึ้นมา การไหลหมุนวนนี้เป็นการนำความร้อนจากการเผาไหม้กลับมาแลกเปลี่ยนความร้อนให้กับอนุภาคที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้เพื่อช่วยเร่งการปลดปล่อยสารระเหย ดังนั้นอุณหภูมิบริเวณพื้นที่การไหลหมุนวนจึงเป็นอุณหภูมิของแก๊สร้อนจากการทำปฏิกิริยาและไม่ใช่จุดที่มีอุณหภูมิสูงสุด อีกทั้งพลังงานความร้อนที่หมุนวนมานั้นยังถูกนำไปใช้งานการปลดปล่อยสารระเหยอีกด้วย

เมื่อสังเกตความสัมพันธ์ระหว่างการไหลภายในห้องเผาไหม้กับปริมาณสารระเหยพบว่า พื้นที่ที่มีปริมาณสารระเหยสูง มีรูปทรงใกล้เคียงกับพื้นที่การไหลหมุนวนเพียงแต่จะมีสารระเหยบางส่วนที่ลอยหลุดออกมากเนื่องจากการเคลื่อนที่ของอนุภาค

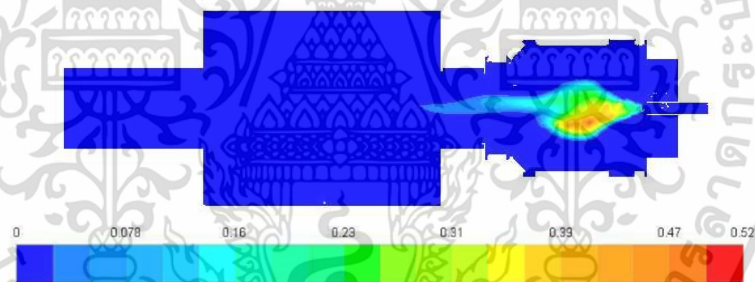
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7. 19 สัดส่วนเชิงมวลของสารระเหยในห้องเผาไหม้จากการติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควง  
ชนิดใบตรง 100 องศา

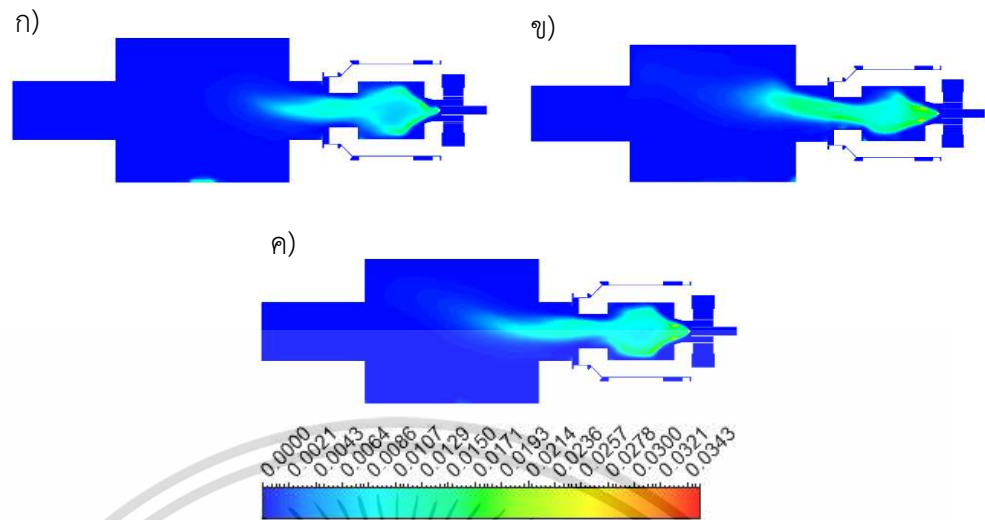


รูปที่ 7. 20 สัดส่วนเชิงมวลของสารระเหยในห้องเผาไหม้จากการติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควง  
ชนิดใบโค้ง 70 องศา



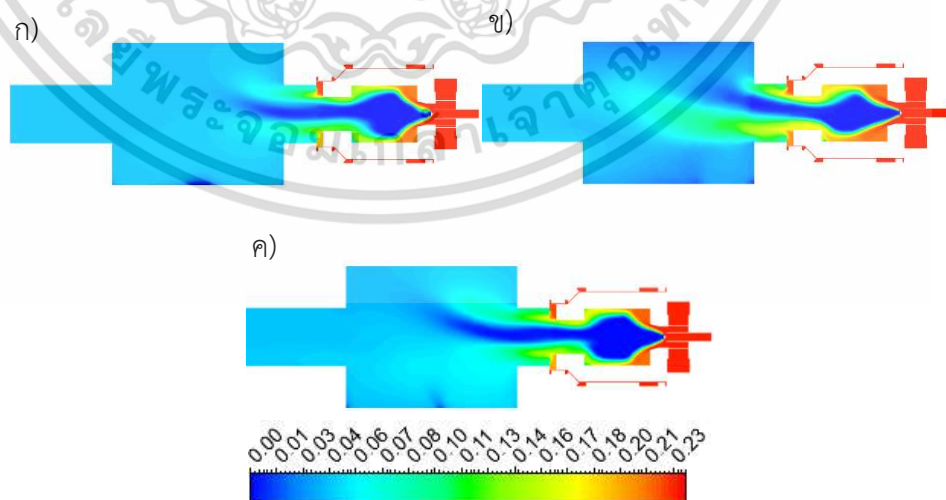
รูปที่ 7. 21 สัดส่วนเชิงมวลของสารระเหยในห้องเผาไหม้จากการติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควง  
ชนิดใบโค้ง 85 องศา

ผลลัพธ์ของคาร์บอนมอนอกไซด์จากการจำลอง แสดงในรูป 7.19 พบปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ใกล้เคียงกัน ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ทั้ง 3 กรณี อยู่ที่ 113 89.4 และ 29.4 ppm ตามลำดับ พื้นที่ที่มีปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์สูงอยู่ในบริเวณพื้นที่การไหลหมุนควงยาวออกไปยังบริเวณห้องเผาไหม้หลัก เนื่องจากคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นหนึ่งในผลิตภัณฑ์ในกระบวนการปลดปล่อยสารระเหยและการที่ออกซิเจนไม่สามารถแพร่เข้ามายังพื้นที่การไหลหมุนวน



รูปที่ 7.22 สัดส่วนเชิงมวลของคาร์บอนมอนอกไซด์ในห้องเผาไหม้จากการติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวนจากการจำลอง ก. ชนิดใบตรง 100 องศา ข. ใบโค้ง 70 องศา ค. ใบโค้ง 85 องศา

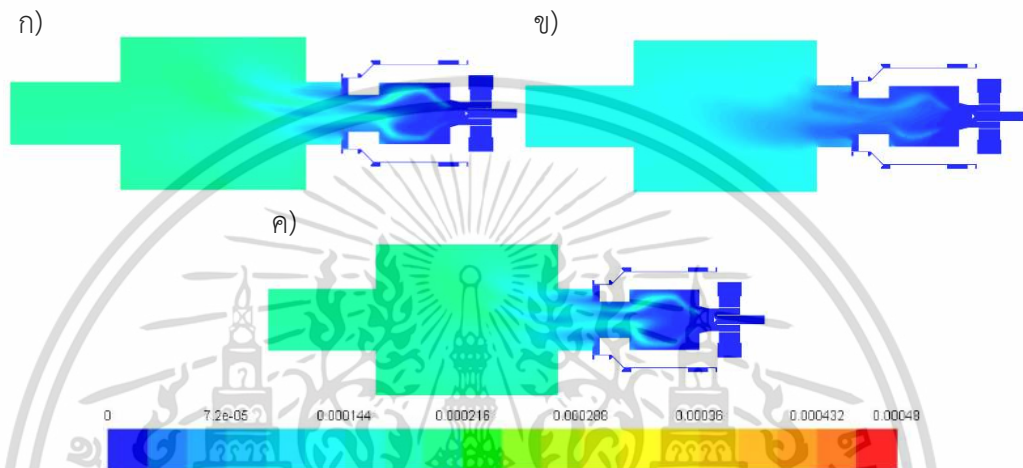
ปริมาณออกซิเจนจากการจำลองแสดงไว้ในรูปที่ 7.20 ผลการจำลองกรณีใบตรง 100 องศา ใบโค้ง 70 และ 85 องศา บริเวณทางออกห้องเผาไหม้หลัก พบว่า ปริมาณออกซิเจนร้อยละ 3.8 3.9 และ 3.86 ตามลำดับ ในขณะที่บริเวณห้องเผาไหม้ช่วยมีปริมาณออกซิเจนต่ำเนื่องจากการทำปฏิกิริยาในการบวนการปลดปล่อยสารระเหยและการทำปฏิกิริยากับคาร์บอนมอนอกไซด์เพื่อสร้างความร้อนและการไหลหมุนวนที่เหวี่ยงอากาศที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้ไปยังผนัง ส่งผลให้ออกซิเจนไม่สามารถแพร่เข้าสู่พื้นที่การไหลหมุนวนได้ อย่างไรก็ตามเรายังสามารถพบพื้นที่ที่มีปริมาณออกซิเจนสูงบริเวณอากาศตติยภูมิเข้าสู่ห้องเผาไหม้



รูปที่ 7.23 สัดส่วนเชิงมวลของออกซิเจนในห้องเผาไหม้จากการติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวนจากการจำลอง ก. ชนิดใบตรง 100 องศา ข. ใบโค้ง 70 องศา ค. ใบโค้ง 85 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณไนโตรเจนออกไซด์จากการจำลอง แสดงในรูป 7.20 ผลการจำลองอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวนชนิดใบตรง 100 องศา ใบโค้ง 70 และ 85 องศา สามารถวัดไนโตรเจนบริเวณทางออกห้องเผาไหม้หลักได้เท่ากับ 209.5 134 และ 197.9 ppm.ตามลำดับ ในกรณีใบตรง 100 องศา และใบโค้ง 85 องศา ให้ผลการจำลองไนโตรเจนออกไซด์สูงกว่ากรณีใช้งานอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวนชนิดใบโค้ง 70 องศา ในขณะที่บริเวณที่เกิดปฏิกิริยาสูงอยู่ที่บริเวณขอบของการไหลหมุนวนซึ่งเป็นบริเวณที่มีความเข้มข้นของออกซิเจนสูง และบริเวณห้องเผาไหม้หลัก



รูปที่ 7. 24 สัดส่วนเชิงมวลของไนโตรเจนออกไซด์ในห้องเผาไหม้จากการติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวนจากการจำลอง ก. ชนิดใบตรง 100 องศา ข.ใบโค้ง 70 องศา ค.ใบโค้ง 85 องศา

ดังนั้นการปรับมุมมองของอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวน ทำให้การไหลหมุนวนมีความรุนแรงที่ต่างกัน กระแสการไหลหมุนวนที่รุนแรงเพียงพอจะสามารถเหวี่ยงเชื้อเพลิงให้กระจายทั่วห้องเผาไหม้ช่วย โดยมวลที่ได้รับผลกระทบคืออนุภาคที่มีน้ำหนักน้อย อนุภาคที่มีน้ำหนักมากจะพุ่งผ่านออกไปได้รับอิทธิพลของแรงโน้มถ่วง การปลดปล่อยสารระเหยจะเริ่มปลดปล่อยในห้องเผาไหม้ช่วย บริเวณผนังแสดงปริมาณสารระเหยน้อยเนื่องอัตราการผลิตปล่อยสารระเหยน้อยกว่าอัตราการบริโภค สามารถสังเกตได้จากปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนที่ลดลงและอุณหภูมิไม่สูงมาก บริเวณกลางห้องเผาไหม้ช่วยที่มีความเข้มข้นของสารระเหยสูงมีรูปทรงคล้ายกับพื้นที่การไหลหมุนวนเป็นบริเวณที่มีอนุภาคส่วนใหญ่เคลื่อนที่ผ่านและปลดปล่อยสารระเหยเกิดการบริโภคออกซิเจนจนกลายเป็นพื้นที่ออกซิเจนต่ำ แต่อุณหภูมิไม่สูงมากเนื่องจากการนำพลังงานความร้อนไประเหยสารระเหยภายในเชื้อเพลิง ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นสารผลิตภัณฑ์จากการปลดปล่อยสารระเหยจึงมีพื้นที่ที่กว้างกว่า บริเวณที่น่าสนใจยังมีในส่วนของบริเวณขอบของพื้นที่การไหลหมุนวนที่เป็นบริเวณที่มีสารระเหยและคาร์บอนมอนอกไซด์เข้มข้นสูงสัมผัสกับบริเวณที่มีออกซิเจนสูงและบริเวณ

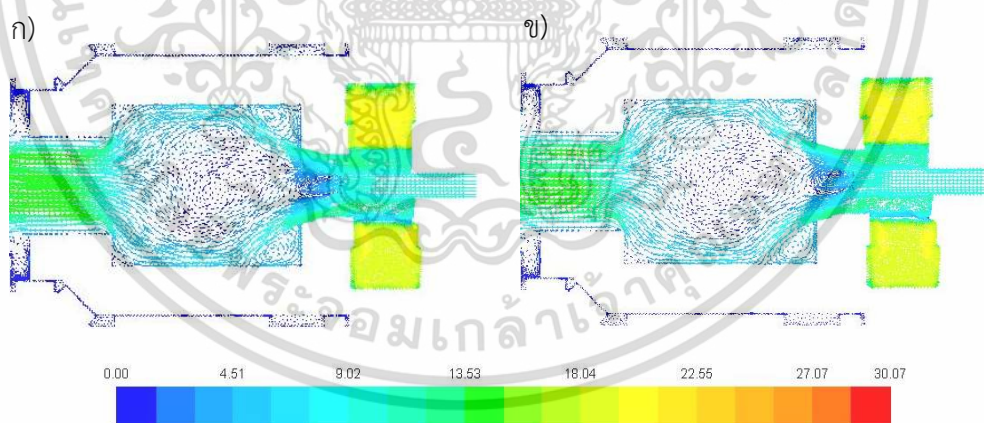
ปลายของห้องเผาไหม้ช่วยที่มีการเติมของอากาศตติยภูมิทำให้เกิดอุณหภูมิสูง ไนโตรเจนออกไซด์เกิดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสารประกอบไนโตรเจน จำพวกไนโตรเจนไฮยาไนด์ทำปฏิกิริยากับOและOH จึงพบปริมาณที่สูง บริเวณขอบของพื้นที่การไหลหมุนวนละในห้องเผาไหม้หลัก องค์ประกอบของแก๊สบริเวณทางออกห้องเผาไหม้หลักและปริมาณคาร์บอนที่สลายตัว พบว่ากรณีไบโคง 85 องศา ที่ให้ค่าตัวเลขการไหลหมุนวนคงสูงที่สุด มีปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ต่ำที่สุดและมีการสลายตัวมากที่สุดเช่นกัน

#### 7.4 ผลการจำลองระยะของวัตถุขวางการไหลต่อการเผาไหม้

การจำลองระยะของวัตถุขวางการไหลต่อการเผาไหม้ เพื่อศึกษาโมเมนต์ของอากาศปฐมต่อการเผาไหม้จากการขยับวัตถุขวางการไหลให้ห่างจากปากของหัวเผา ผลจากการปรับระยะคือการทำให้โมเมนต์ของอากาศปฐมภูมิลดลงตามมา ในการจำลองครั้งนี้ จะประกอบด้วย 2 กรณี ได้แก่ ระยะห่างจากปากหัวเผา 10 มิลลิเมตร และ 20 มิลลิเมตร โดยวัดจากปากหัวเผาไปจนถึงท้ายของวัตถุขวางการไหล ร่วมกับอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวนชนิดไบโคง 85 องศา

จากการจำลองดังที่แสดงในรูป 7.22 พบว่า ความเร็วของระยะวัตถุขวางการไหลที่ 10 มิลลิเมตร มีค่าเท่ากับ 9.02 m/s ความเร็วของระยะวัตถุขวางการไหลที่ 20 มิลลิเมตร มีค่าเท่ากับ 7.51 m/s ลักษณะของพื้นที่การไหลหมุนวนที่คล้ายกันทั้ง 2 กรณี มีพื้นที่ครอบคลุมตั้งแต่ด้านหลังวัตถุขวางการไหลไปจนกระทั่งบริเวณกลางห้องเผาไหม้ช่วย



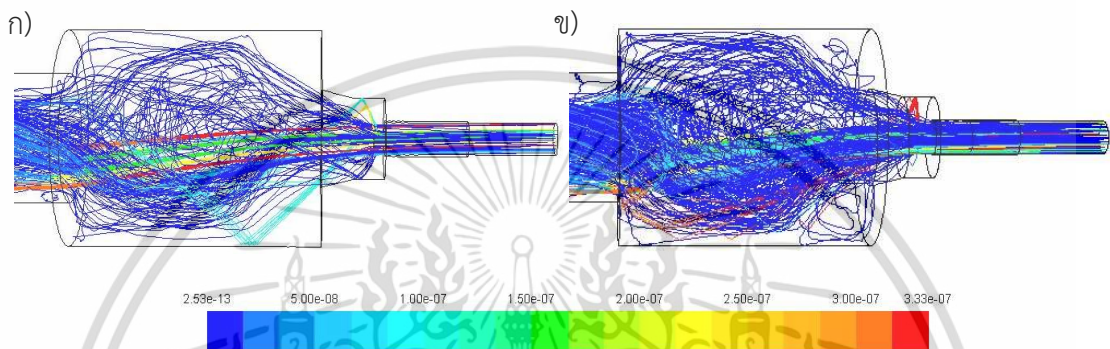
รูปที่ 7. 25 แสดงพื้นที่การไหลย้อนกลับภายในห้องเผาไหม้ช่วย ก. ระยะ 10 มิลลิเมตร  
ข. 20 มิลลิเมตร

ในส่วนของการเคลื่อนที่ของอนุภาค วัตถุขวางการไหลที่ระยะ 20 มิลลิเมตร พบว่า อนุภาคเชื้อเพลิงพุ่งเข้ากระทบกับวัตถุขวางการไหลจากนั้นกระจายไปกระทบกับผนังบริเวณทางเข้าห้องเผาไหม้ช่วยมากกว่าวัตถุขวางการไหลระยะ 10 มิลลิเมตร อีกทั้งยังพบว่าอนุภาคบางส่วนเคลื่อนที่บริเวณ

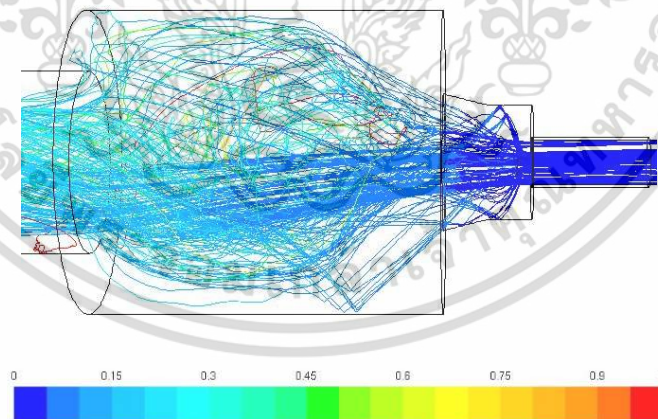
มุมของเข้าเผาไหม้ช่วยซึ่งมีความแตกต่างจากกรณีวัตถุขวางการไหล ระยะ 10 มิลลิเมตร ระยะเวลาที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่โดยระบบอัตโนมัติ ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อนุภาคเคลื่อนที่ของกรณีศึกษาวัตถุขวางการไหลที่ 10 มิลลิเมตร อยู่ที่ 0.25 - 0.3 วินาที และ 20 มิลลิเมตร 0.3 - 0.35 วินาที

การเผาไหม้ถ่านซาร์ในการจำลองทั้ง 2 กรณี พบมีอนุภาคบางส่วนเริ่มเผาไหม้ในระหว่างเคลื่อนที่ในห้องเผาไหม้ช่วย แต่โดยส่วนใหญ่เกิดขึ้นบริเวณห้องเผาไหม้หลัก เมื่อเปรียบเทียบ 2 กรณีศึกษา พบว่า ในกรณีศึกษาวัตถุขวางการไหลที่ระยะ 20 มิลลิเมตร อนุภาคถ่านซาร์เผาไหม้ได้เสร็จสิ้นมากกว่ากรณีศึกษาวัตถุขวางการไหลที่ระยะ 10 มิลลิเมตร

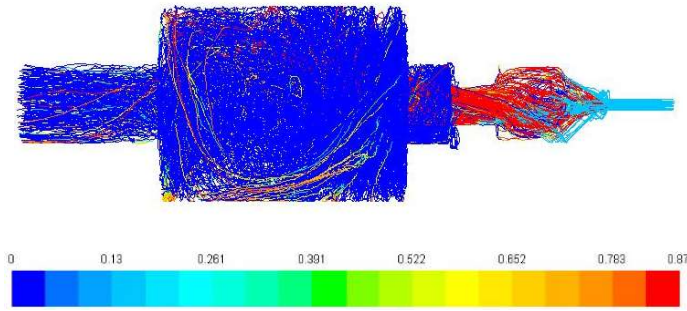


รูปที่ 7. 26 น้ำหนักของอนุภาค(กิโลกรัม) เคลื่อนที่ภายในห้องเผาไหม้ช่วยจากการปรับระยะวัตถุขวางการไหล  
ก.10 มิลลิเมตร ข. 20 มิลลิเมตร

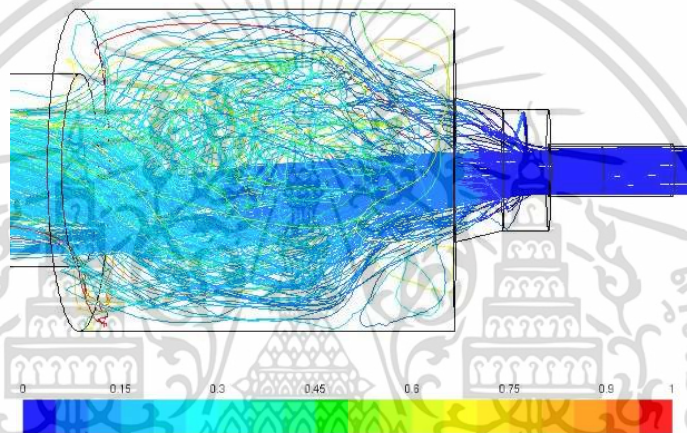


รูปที่ 7. 27 เวลาที่อนุภาคเคลื่อนที่ภายในห้องเผาไหม้ช่วย(วินาที) จากการติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงชนิดใบโค้ง 85 องศา วัตถุขวางการไหลที่ระยะ 10 มิลลิเมตร

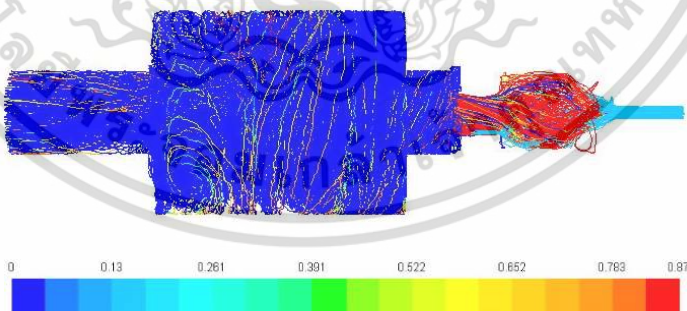
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7. 28 สัดส่วนเชิงมวลของคาร์บอนที่หลงเหลือในอนุภาคขณะเคลื่อนที่ในห้องเผาไหม้จากการติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวนชนิดใบโค้ง 85 องศา ระยะของวัตถุขวางการไหล 10 มิลลิเมตร



รูปที่ 7. 29 เวลาที่อนุภาคเคลื่อนที่ภายในห้องเผาไหม้ช่วย(วินาที) จากการติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวนชนิดใบโค้ง 85 องศา วัตถุขวางการไหลที่ระยะ 20 มิลลิเมตร



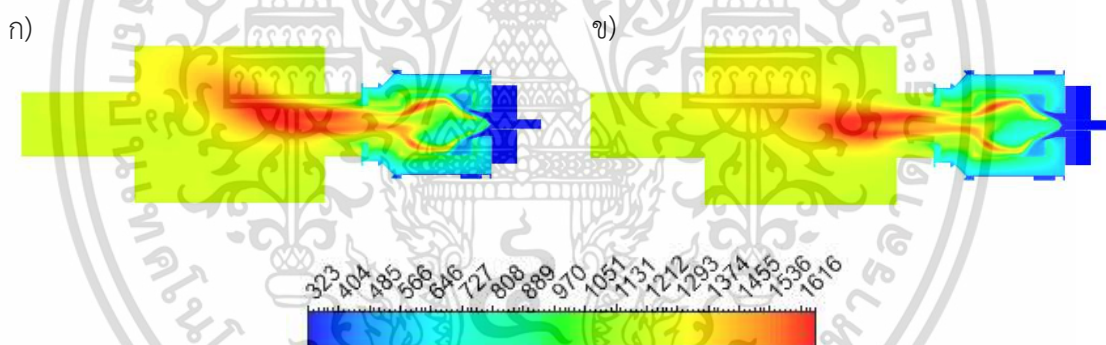
รูปที่ 7. 30 สัดส่วนเชิงมวลของคาร์บอนที่หลงเหลือในอนุภาคขณะเคลื่อนที่ในห้องเผาไหม้จากการติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวนชนิดใบโค้ง 85 องศา ระยะของวัตถุขวางการไหล 20 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7. 11 แสดงมวลของคาร์บอนเริ่มต้นและทางออก ร้อยละการสลายตัวของคาร์บอน ที่ระยะห่างของวัตถุขวางการไหล 10 และ 20 มิลลิเมตร

กรณี	ทางเข้า	ทางออก	%conversion
ระยะวัตถุขวางการไหล 10 มม.	$1.41 \times 10^{-4}$	$8.17 \times 10^{-7}$	99.42
ระยะวัตถุขวางการไหล 20 มม.	$1.20 \times 10^{-4}$	$5.62 \times 10^{-6}$	95.32

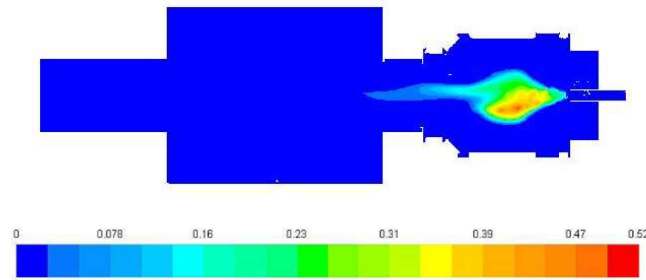
อุณหภูมิการเผาไหม้จากการจำลองแสดงในรูปที่ 7.26 พบว่า จุดที่อุณหภูมิสูงอยู่บริเวณขอบพื้นที่การไหลหมุนวนและทางเข้าห้องเผาไหม้หลักซึ่งเป็นบริเวณอากาศตติยภูมิมาทำปฏิกิริยาอุณหภูมิสูงสุดที่พบอยู่ที่ 1,616 องศาเซลเซียส ลักษณะของพื้นที่อุณหภูมิสูงบริเวณทางเข้าห้องเผาไหม้หลัก ในกรณีวัตถุขวางการไหลที่ระยะ 20 มิลลิเมตร พบระยะของพื้นที่อุณหภูมิสูงสั้นกว่าระยะ 10 มิลลิเมตร ในส่วนของพื้นที่ด้านหลังของวัตถุขวางการไหลไปจนกระทั่งกลางห้องเผาไหม้ช่วยได้รับผลกระทบจากปรากฏการณ์การปลดปล่อยสารระเหยทำให้มีอุณหภูมิต่ำกว่าพื้นที่การเผาไหม้อื่น



รูปที่ 7. 31 แสดงอุณหภูมิ(เคลวิน) จากการจำลอง ก. ระยะของวัตถุขวางการไหล 10 มิลลิเมตร ข. ระยะของวัตถุขวางการไหล 20 มิลลิเมตร

ปริมาณสารระเหยที่เป็นผลมาจากการจำลองในทั้ง 2 กรณีศึกษา แสดงไว้ในรูปที่ 7.29 และ 7.30 พบว่า การปลดปล่อยสารเกิดขึ้นที่บริเวณห้องเผาไหม้ช่วยเป็นหลัก ตั้งแต่ด้านหลังของวัตถุขวางการไหลไปจนกระทั่งบริเวณทางเข้าของห้องเผาไหม้หลัก ลักษณะของพื้นที่ที่มีความเข้มข้นของสารระเหยสูง อีกทั้งยังมีลักษณะคล้ายพื้นที่การไหลหมุนวน เพียงแต่จะมีสารระเหยบางส่วนหลุดออกไปทางเข้าห้องเผาไหม้ตามลักษณะการไหลของของไหลในห้องเผาไหม้ช่วย ในส่วนของกรณีศึกษาวัตถุขวางการไหลที่ระยะ 20 มิลลิเมตร จะพบความเข้มข้นของสารระเหยมากกว่ากรณีศึกษาแรก เนื่องจากเชื้อเพลิงมีเวลาให้การปลดปล่อยสารระเหยมากกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7. 32 สัดส่วนเชิงมวลของสารระเหยในห้องเผาไหม้จากการติดตั้งวัตถุขวางการไหล ที่ระยะ 10 มิลลิเมตร

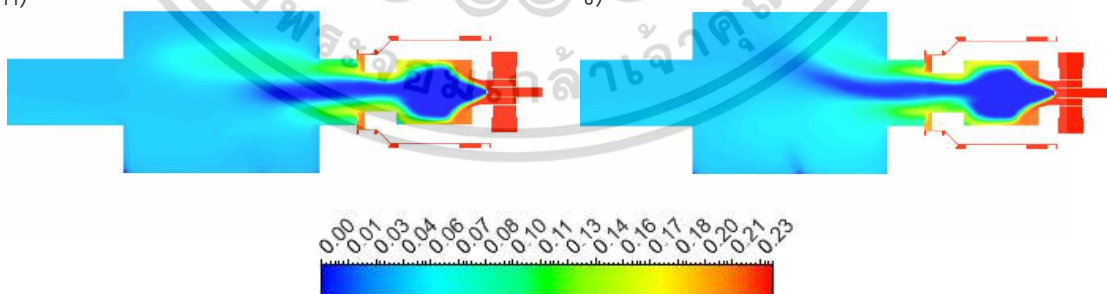


รูปที่ 7. 33 สัดส่วนเชิงมวลของสารระเหยในห้องเผาไหม้จากการติดตั้งวัตถุขวางการไหล ที่ระยะ 20 มิลลิเมตร

จากการจำลองการเผาไหม้ ผลลัพธ์ในส่วนของออกซิเจนแสดงในรูปที่ 7.31 พบว่า ผลของออกซิเจนที่ทางออกห้องเผาไหม้ช่วย ของกรณีระยะ 10 มิลลิเมตร อยู่ที่ร้อยละ 3.86 และระยะ 20 มิลลิเมตร อยู่ที่ร้อยละ 3.72 ในทั้ง 2 กรณีพื้นที่ที่มีความเข้มข้นของออกซิเจนต่ำ คือพื้นที่ที่มีปริมาณสารระเหยและปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์สูง เนื่องจากการทำปฏิกิริยาเพื่อให้ความร้อน ออกซิเจนที่อยู่ในพื้นที่การไหลหมุนควงไม่สามารถแพร่เข้าสู่พื้นที่การไหลหมุนวนได้

ก)

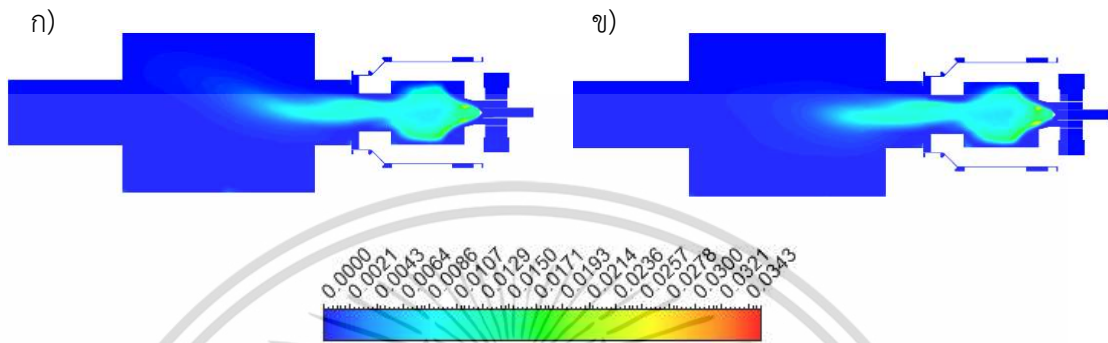
ข)



รูปที่ 7. 34 สัดส่วนเชิงมวลของออกซิเจนในห้องเผาไหม้จากการติดตั้งวัตถุขวางการไหล  
ก. ระยะ 10 มิลลิเมตร ข. ระยะ 20 มิลลิเมตร

ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ได้แสดงไว้ในรูปที่ 7.30 พบว่า ความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ทางออกห้องเผาไหม้ช่วย ของวัตถุขวางการไหลที่ระยะ 10 มิลลิเมตร อยู่ที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

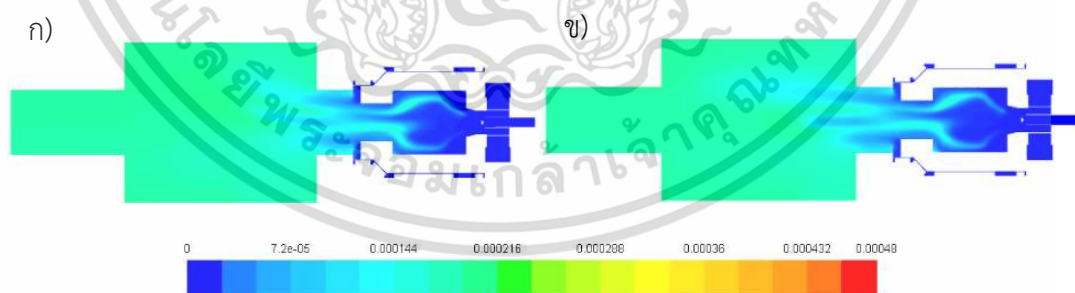
29.4 ppm และระยะ 20 มิลลิเมตร อยู่ที่ 45.3 ppm ในทั้ง 2 กรณี พื้นที่ที่มีปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ มีความใกล้เคียงกันโดยเริ่มเกิดขึ้นตั้งแต่บริเวณข้างหลังวัตถุขวางการไหล ไปจนกระทั่ง ทางเข้าห้องเผาไหม้หลัก



รูปที่ 7. 35 สัดส่วนเชิงมวลของคาร์บอนมอนอกไซด์ในห้องเผาไหม้จากการติดตั้งวัตถุขวางการไหล

ก. ระยะ 10 มิลลิเมตร ข. ระยะ 20 มิลลิเมตร

ไนโตรเจนออกไซด์จากการจำลอง แสดงในรูปที่ 7.31 ผลลัพธ์ของทั้ง 2 กรณี มีความคล้ายคลึงกัน ส่วนใหญ่ไนโตรเจนออกไซด์จะเกิดบริเวณรอบพื้นที่การไหลหมุนวน และเพิ่มสูงขึ้นหลังจากได้รับอากาศตติยภูมิ ผลของไนโตรเจนออกไซด์ที่ทางออกห้องเผาไหม้หลักของวัตถุขวางการไหลที่ระยะ 10 มิลลิเมตร อยู่ที่ 197.9 ppm และระยะ 20 มิลลิเมตร อยู่ที่ 193.35 ppm



รูปที่ 7. 36 สัดส่วนเชิงมวลของไนโตรเจนออกไซด์ในห้องเผาไหม้จากการติดตั้งวัตถุขวางการไหล

ก. ระยะ 10 มิลลิเมตร ข. ระยะ 20 มิลลิเมตร

ดังนั้นระยะของวัตถุขวางการไหลที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อความเร็วของอนุภาคเชื้อเพลิงที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้ให้มีเวลาในการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้น 1.5 วินาที ทำให้มีการปลดสารระเหยเพิ่มขึ้น แสดงในรูปของพื้นที่สารระเหยและคาร์บอนมอนอกไซด์บริเวณกลางห้องเผาไหม้ช่วยมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น แต่อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงมีความแตกต่างกันเล็กน้อย ความเข้มข้นที่สูงขึ้นเกิดขึ้นทั่วทุกบริเวณ ทั้งนี้การเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงผลที่ชัดเจนจะขึ้นอยู่กับอัตราการปลดปล่อยและการบริโภค ในขณะที่ความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้น ภูมิภาคที่การทำให้ปฏิกิริยาไม่ตีจะแสดงออกมาในรูปของคาร์บอนมอนอกไซด์บริเวณทางออกที่สูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบในสลายตัวของคาร์บอนในเชื้อเพลิงพบว่าในกรณีวัดดูขวางการไหล 20 มิลลิเมตร มีการสลายตัวของคาร์บอนลดลงร้อยละ 4.1 ไนโตรเจนที่สูงขึ้นเกิดจาก thermal NO<sub>x</sub> และ prompt NO<sub>x</sub> จากอุณหภูมิที่สูงขึ้นและความเข้มข้นของสารระเหยที่เพิ่มขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 8

### สรุปผลการทดลองและการจำลอง

การศึกษาการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผงที่กำลังความร้อน 300 กิโลวัตต์ความร้อน ในครั้งนี้ ประกอบไปด้วย 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนแรกเป็นการทำการทดลอง เพื่อหาตัวแปรที่สำคัญสำหรับการจำลองการเผาไหม้ รวมไปถึง การทดลองสอบเทียบ และที่สำคัญคือการทดลองการเผาไหม้ภายใต้เงื่อนไขที่ได้กำหนดไว้ ในส่วนที่ 2 เป็นการจำลองการเผาไหม้โดยอาศัยพารามิเตอร์จากการทดลอง และการจำลองพารามิเตอร์เพื่อยืนยันค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองการเผาไหม้ให้ได้ผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำ จากนั้นจึงทำการจำลองเพื่ออธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการเผาไหม้

#### 8.1 สรุปผลการทดลอง

การทดลองในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้แบ่งแยกย่อยเป็น 3 การทดลองหลัก ได้แก่ 1.ทดลองหาขนาดอนุภาคด้วยวิธีการSieve Analysis 2.การทดลองหาอัตราการป้อนเชื้อเพลิงชีวมวล 3.การทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง

##### 8.1.1 การทดลองหาขนาดอนุภาคด้วยวิธีการSieve Analysis

การทดลองหาขนาดอนุภาคด้วยวิธีการ Sieve Analysis เป็นการที่เชื้อเพลิงชีวมวลผงที่บดผ่านตะแกรงขนาด 0.5 และ 1 มิลลิเมตร มีขนาดอยู่ในช่วง 2.36 มิลลิเมตร ไปจนถึงขนาดที่เล็กกว่า 0.038 มิลลิเมตร จากผลการกรองอนุภาคพบว่า อนุภาคส่วนใหญ่กว่าร้อยละ 46 อยู่ในช่วงขนาด 0.6 ถึง 0.3 มิลลิเมตร และอนุภาคร้อยละ 45 มิลลิเมตร มีขนาดเล็กกว่า 0.3 มิลลิเมตร

##### 8.1.2 การทดลองหาอัตราการป้อนเชื้อเพลิงชีวมวล

การทดลองหาอัตราการป้อนเชื้อเพลิงชีวมวล เป็นการสอบเทียบสกรูป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลผงที่อาศัยความสัมพันธ์ระหว่าง ความถี่ของอินเวอร์เตอร์(Hz) กับ อัตราการไหลเชิงมวล ( kg/s) พบว่ามีความสัมพันธ์ดังนี้  $Y_{(ความถี่)} = 101.26X_{(อัตราการไหลเชิงมวล)} + 0.4141$  ดังนั้นที่ 300 กิโลวัตต์ความร้อน จะใช้ความถี่ 1.32 Hz

##### 8.1.3 การทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง

สำหรับการทดลองการใช้งานอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงชนิดใบตรงที่มุม 100 องศา และ อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงชนิดใบโค้งที่มุม 70 และ 85 องศา ที่ติดตั้งไว้บริเวณทางเข้าห้องเผาไหม้ของอากาศชุดวิทยุเพื่อทำการสร้างการไหลหมุนควงในการเหวี่ยงอนุภาคเชื้อเพลิงชีวมวลจากแรงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหวี่ยงหนีศูนย์กลางให้สามารถคลุกเคล้าเข้ากับอากาศ ทั้งนี้ความรุนแรงของการเหวี่ยงสามารถสังเกตได้จากการทดลอง เมื่อใช้งานอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงชนิดใบตรงที่มุม 100 องศา และอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงชนิดใบโค้งที่มุม 70 องศา สามารถสังเกตลำเชื้อเพลิงที่พุ่งเข้าสู่ห้องเผาไหม้ นั้นหมายความว่าอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงไม่สามารถสร้างความรุนแรงในการเหวี่ยงเชื้อเพลิงได้ดี ผลที่ตามมาคือการพื้นที่อุณหภูมิต่ำบริเวณช่วงต้นของห้องเผาไหม้ช่วยและพื้นที่อุณหภูมิสูงบริเวณปลายห้องเผาไหม้ช่วยแสดงว่าการเผาไหม้จึงเกิดขึ้นได้ช้า ค่าคาร์บอนมอนอกไซด์ ในกรณีอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงชนิดใบตรงที่มุม 100 องศา และอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงชนิดใบโค้งที่มุม 70 องศา อยู่ที่ 1,956 และ 553 ppm ไนโตรเจนออกไซด์ อยู่ที่ 243 และ 295 ppm ตามลำดับ อย่างไรก็ตามเมื่อสังเกตการณ์เผาไหม้เมื่อใช้งานอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงชนิดใบโค้งที่มุม 85 พบว่า เชื้อเพลิงชีว-มวลถูกเหวี่ยงเข้าไปคลุกเคล้ากับอากาศได้ดี เกิดเปลวไฟที่สว่างในห้องเผาไหม้ช่วย ค่าคาร์บอนมอนอกไซด์ ในกรณีอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงชนิดใบโค้งที่มุม 85 107.5 ppm ไนโตรเจนออกไซด์ 246 ppm

สำหรับการทดลองการปรับระยะวัตถุขวางการไหลที่ระยะ 10 และ 20 มิลลิเมตร จากปากหัวเผา การเผาไหม้ที่เกิดขึ้นในทั้ง 2 กรณี เชื้อเพลิงสามารถกระจายตัวคลุกเคล้ากับอากาศได้ดี สามารถสังเกตเปลวไฟที่สว่างในห้องเผาไหม้ ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิคล้ายกัน แต่บริเวณกึ่งกลางเตาในกรณีติดตั้งวัตถุขวางการไหลที่ 20 มิลลิเมตร จะพบอุณหภูมิสูงกว่า การวัดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์พบว่า การปรับระยะวัตถุขวางการไหลที่ระยะ 10 มีปริมาณ 107 ppm ไนโตรเจนออกไซด์ 246 ppm และการปรับระยะวัตถุขวางการไหลที่ระยะ 20 มิลลิเมตร ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ 139 ppm และไนโตรเจนออกไซด์ 314 ppm

## 8.2 สรุปผลการจำลอง

การจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผงในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ใช้จำนวนกริด 960,000 เซลล์ ด้วยเซลล์แบบ polyhedral และ hexahedral ผลการจำลองเพื่อหาพารามิเตอร์สำหรับการจำลองการเผาไหม้ พบว่าการจำลองด้วยการใช้สมการการไหลแบบ K- $\epsilon$  Realizable ค่าเอนทัลปีมาตรฐาน  $-2.9 \times 10^8$  J/kgmol ของเชื้อเพลิงและ activation energy สำหรับการปลดปล่อยสารระเหยแบบ Single Kinetic Rate  $1.36 \times 10^7$  J/kgmol ให้ค่าผิดพลาดเฉลี่ยของอุณหภูมิอยู่ที่ ร้อยละ 19.38 ซึ่งเป็นค่าความผิดพลาดที่น้อยที่สุดในการจำลองพารามิเตอร์ครั้งนี้

สำหรับการจำลองการเผาไหม้ร่วมกับอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงที่ใช้อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงชนิดใบตรง 100 องศา ชนิดใบโค้ง 70 และ 85 องศา พบว่า อุปกรณ์สร้างการไหลหมุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ควงชนิดใบตรง 100 องศา ให้ตัวเลขการหมุนควง อยู่ที่ 0.84 ชนิดใบโค้ง 70 และ 85 องศา ให้ตัวเลขการหมุนควง อยู่ที่ 0.74 แล 1.48 ตามลำดับ จากการเปรียบเทียบผลการจำลองพบว่า ชนิดใบโค้งมุม 85 องศา ให้พื้นที่การไหลหมุนวนที่ใหญ่กว่าและกว้างกว่ากรณีอื่น ๆ อนุภาคของเชื้อเพลิงจึงกระจายได้ดีกว่า และใช้เวลาอยู่ในห้องเผาไหม้ประมาณ 0.25 - 0.35 วินาที อุณหภูมิจากการจำลองในกรณีอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงชนิดใบตรง 100 องศา ใบโค้ง 85 องศา ให้ผลของการจำลองอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกันโดยอุณหภูมิสูงเกิดบริเวณขอบของพื้นที่การไหลหมุนวนซึ่งเป็นทำปฏิกิริยาระหว่างสารระเหยกับออกซิเจนและบริเวณทางออกของห้องเผาไหม้ช่วยที่เป็นทางเข้าของลมตติยภูมิบริเวณกลางห้องเผาไหม้ช่วยเป็นพื้นที่ที่มีสารระเหยเข้มข้นและคาร์บอนมอนอกไซด์สูง ออกซิเจนต่ำ และไนโตรเจนออกไซด์สามารถพบได้ที่บริเวณขอบของพื้นที่การไหลหมุนวนและบริเวณทางออกของห้องเผาไหม้ช่วยไปจนถึงห้องเผาไหม้หลัก ผลองค์ประกอบของก๊าซร้อนที่ทางออกของห้องเผาไหม้ของกรณีอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงชนิดใบตรง 100 องศา ชนิดใบโค้ง 70 และ 85 องศา พบประมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ 113 91.85 และ 29.4 ppm ไนโตรเจนออกไซด์ 170.29 164.74 และ 197.43 ppm เมื่อเปรียบเทียบกับออกซิเจนร้อยละ 7

สำหรับการจำลองระยะของวัตถุขวางการไหลต่อการเผาไหม้ที่ระยะ 10 และ 20 มิลลิเมตร ลักษณะการไหลภายในห้องเผาไหม้ช่วยมีลักษณะคล้ายกันของการไหลใกล้เคียงกัน เพียงแต่ความเร็วของอากาศปฐมภูมิของระยะของวัตถุขวางการไหลต่อการเผาไหม้ที่ระยะ 10 เท่ากับ 9.02 m/s และ 20 มิลลิเมตร เท่ากับ 7.51 m/s ทำให้ที่ระยะ 20 มิลลิเมตร สามารถเพิ่มเวลาให้อนุภาคเคลื่อนที่ของในห้องเผาไหม้ได้นานขึ้น 0.5 วินาที และการกระจายตัวของอนุภาคที่ระยะของวัตถุขวางการไหล 20 มิลลิเมตร สามารถกระจายตัวได้กว้างกว่าที่ระยะ 10 มิลลิเมตร ในส่วนของอุณหภูมิของการเผาไหม้พื้นอุณหภูมิสูงเกิดขึ้นบริเวณขอบของพื้นที่การไหลหมุนวนและปลายห้องเผาไหม้ช่วยที่มีความเข้มข้นออกซิเจนสูง สารระเหยและคาร์บอนมอนอกไซด์เกิดขึ้นบริเวณห้องเผาไหม้ช่วยโดยที่ระยะของวัตถุขวางการไหลที่ระยะ 20 มิลลิเมตร มีความเข้มข้นสูงกว่าที่ 10 มิลลิเมตร ในส่วนของไนโตรเจนออกไซด์จะเกิดขึ้นบริเวณขอบของพื้นที่การไหลหมุนวนและห้องเผาไหม้หลัก ผลลัพธ์ของคาร์บอนมอนอกไซด์และไนโตรเจนออกไซด์ ในกรณี วัตถุขวางการไหลที่ 10 และ 20 มิลลิเมตร พบคาร์บอนมอนอกไซด์ 29.33 และ 55.1 ppm ไนโตรเจนออกไซด์อยู่ที่ 197.43 และ 235.21 ppm.

## บทที่ 9

### ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากกระแสการไหลหมุนวนที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้ยังมีความรุนแรงไม่เพียงพอต่อการสร้างกระแสการไหลย้อนกลับ ดังนั้นจึงควรปรับปรุงการสร้างกระแสการไหลหมุนวนให้รุนแรงขึ้น
2. จากการทดลองและการจำลองให้ผลที่สอดคล้องไปในทิศทางเดียวกัน โดยเมื่ออุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวนสร้างการการไหลหมุนวนที่รุนแรงขึ้น ส่งผลให้มีปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลง แต่ในกรณีเพิ่มระยะของวัตถุวางการไหลทำให้เชื้อเพลิงกระจายตัวได้ดี แต่มีปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นถึงการเผาไหม้ควบคุมโดยการผสมกันระหว่างอากาศและสปีชีส์เชื้อเพลิง(mixing control)

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Jorg Schindler, Werner Zittel and et.al. “A supply-driven forecast for the future global coal production”. Contribution to ASPO,2008, pp.1-49
- [2] สำนักงานนโยบายแผนและพลังงาน กระทรวงพลังงาน. แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558 - 2579. สำนักงานนโยบายแผนและพลังงาน. กระทรวงพลังงาน. 2558.
- [3] A.Williams, J.M.Jones and et.al. “Pollutants from the combustion of solid biomass fuels” Progress in Energy and Combustion Science, Vol.38, 2012, pp. 113-137
- [4] สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน. 2552.ความเชื่อมโยงยุทธศาสตร์กระทรวงและยุทธศาสตร์ สนพ. กับนโยบายที่สำคัญของประเทศ [online]. Available [http://www.dede.go.th/ewt\\_news.php?nid=41272](http://www.dede.go.th/ewt_news.php?nid=41272)
- [5] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) กระทรวงพลังงาน. 2552.ศักยภาพพลังงานทดแทน [online]. Available: [http://www.dede.go.th/ewt\\_news.php?nid=41272](http://www.dede.go.th/ewt_news.php?nid=41272)
- [6] ชินภัทร ชูการ. การพัฒนาหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลในหม้อน้ำอุตสาหกรรม. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2558.
- [7] พีรพัฒน์ เทพลิบ. การพัฒนาระบบควบคุมการไหลของอากาศและเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่องสำหรับหัวเผาเชื้อเพลิงแข็งชนิดผงขนาด 1 MW. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2560
- [8] พงศนันท์ แก่นพรม. ผลกระทบของวัตถุขวางการไหลและใบปิดต่อสมรรถนะการเผาไหม้หัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวล. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2560
- [9] นรเศรษฐ์ พิกุลเงิน. ผลกระทบของสัดส่วนการป้อนอากาศต่อสมรรถนะของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดฝุ่น. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [10] Yiheng Tong., Xiao Liu, et.al.. “Effect of the position of a bluff body on the diffusion flames: A combined experimental and numerical study.”, Applied Thermal Engineering, vol.131, 2018. Pp. 507-521
- [11] David J.C. Dennis and Robert John Poole. “Controlling vortex breakdown in swirling pipe flows: Experiments and simulations” Physics of Fluids. Vol.26, 2014, pp. 1-12
- [12] F. El-Mahallawy and S. El-Din Hablik 2000 *Fundamental and technology of combustion* (Amsterdam: ELSEVIER)
- [13] Hari Prasad Neopane and et.al. “PARTICLE VELOCITY MEASUREMENT IN SWIRL FLOW, LABORATORY STUDIES “KATHMANDU UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE. VOL.8.2012, pp1-14
- [14] L.X. Zhou et al. “Simulation of swirling coal combustion using a full two-fluid model and an AUSM turbulence -chemistry model” Fuel. Vol.82, 2003, pp. 1001-1007
- [15] Erol Kilik “THE INFLUENCE OF SWIRLER DESIGN PARAMETERS ON THE AERODYNAMICS OF THE DOWNSTREAM RECIRCULATION REGION.” Ph.D. Thesis of Cranfield Institute of Technology. 1976
- [16] Syred.and J. M. Beer. “Combustion in Swirling Flow: A Review.”, Combustion and Flame, Vol 23, 1974, pp.143-201
- [17] J.F. Derakhshandeh and Md Mahbub Alam. “A review of bluff body wakes.”, Ocean Engineering, vol.182, 2019. Pp. 475-488
- [18] Yiheng Tong.and et.al. “Effect of the position of a bluff body on the diffusion flames: A combined experimental and numerical study.”, Applied Thermal Engineering, vol.131, 2018. Pp. 507-521

- [19] Minghou Xu., Jianwei Yuan., Caiyuan Han. and Chuguang Zheng. “Investigation of particle dynamics and pulverized coal combustion in a cavity bluff-body burner.”, *Fuel*, vol.74, 1995. Pp. 1913-1917
- [20] Yiheng Tong., Xiao Liu, Shuang Chen. and Jens Klingmann. “Effect of the position of a bluff body on the diffusion flames: A combined experimental and numerical study.”, *Applied Thermal Engineering*, vol.131, 2018. Pp. 507-521
- [21] Sarath C.G., Sreejith M. and Reji R.V. “Flow Field Prediction of Bluff Body Introduced Micro combustor.”, *International Conference on Emerging Trends in Engineering Science and Technology*, vol.24, 2016. Pp. 420-427
- [22] G. Sankar, D. Santhosh Kumar “Computational modeling of pulverized coal fired boilers — A review on the current position.”, *Fuel*, vol.236, 2019. Pp. 643–665
- [23] จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2552. เชื้อเพลิงแข็ง [online]. Available: [http://cuir.car.chula.ac.th/dspace/bitstream/123456789/28791/7/Sattagan\\_sa\\_ch2](http://cuir.car.chula.ac.th/dspace/bitstream/123456789/28791/7/Sattagan_sa_ch2)
- [24] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) กระทรวงพลังงาน. 2552. ศักยภาพชีวมวลในประเทศไทย [online]. Available: [http://www.dede.go.th/ewt\\_news.php?nid=486](http://www.dede.go.th/ewt_news.php?nid=486)
- [25] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) กระทรวงพลังงาน. 2556. ชีวมวล [online]. Available : [http://biomass.dede.go.th/biomass\\_web/index.html](http://biomass.dede.go.th/biomass_web/index.html)
- [26] ผู้จัดการออนไลน์. 2562. “พาณิชย์” ถกคณวงกรม้ำมันสำปะหลัง ร่วมทำแผนรับมือผลผลิตปี 62/63 [online]. Available: <https://mgronline.com/business/detail/9620000045689>
- [27] มติชนออนไลน์. 2562. คาดผลผลิตอ้อยฤดูหีบใหม่เหลือ 119 ล้านตัน เหตุราคาน้ำตาลโลก ตกต่ำชาวไร่หันปลูกพืชอื่นแทนแถมเผชิญภัยแล้ง [online]. Available: <https://mgronline.com/business/detail/9620000045689>
- [28] มติชนออนไลน์. 2562. เสียงจากสวนปาล์ม ส่ง มาตรการรัฐ ช่วยขยับราคา [online]. Available: [https://www.matichon.co.th/region/news\\_1465507](https://www.matichon.co.th/region/news_1465507)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [29] puechkaset. 2557. แกลบ/แกลบดำ/ขี้เถ้าแกลบ วิธีทำแกลบดำ และประโยชน์แกลบดำ [online]. Available: <https://puechkaset.com/%E0%B9%81%E0%B8%81%E0%B8%A5%E0%B8%9A/>
- [30] กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2560. เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด [online]. Available: <https://www.mhesi.go.th/main/th/165-knowledge/practical-rad/7497-wood-pellets>
- [31] ฐานิตย์ เมธิยานนท์. ทฤษฎีและเทคโนโลยีการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งและชีวมวล. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: มินเซอร์วิศซัพพลาย. 2559
- [33] Stephen R. Turns 2000 *An Introduction to Combustion* (McGraw-Hill)
- [34] Peter Mullinger 2008 *Industrial and Process Furnaces Principles, Design and Operation* (Amsterdam: ELSEVIER)
- [35] Manuel García Pérez “Modeling the effects of unsteady flow patterns on the fireside ash fouling in tube arrays of kraft and coal-fired boilers.” Ph.D. Thesis of Lappeenranta University of Technology. 2016
- [36] P K Nag 2008 *Power Plant Engineering* (McGraw-Hill)
- [37] International Flame Research Foundation 2006 IFRF Today [online]. Available: [http://www.ffrc.fi/Liekkipaiva\\_2006/Liekkipaiva2006\\_IFRF\\_Today\\_HUPA](http://www.ffrc.fi/Liekkipaiva_2006/Liekkipaiva2006_IFRF_Today_HUPA)
- [38] Piotr walanski., Stanislaw Wojcicki. “Stabilization Of Coal Dust-Air Mixture By Bluff Body”, Symposium (International) On Combustion, Vol15, 1975. Pp.1295-1302
- [39] J.M. Beer and N.A. Chigier 1972 *Combustion aerodynamics* (London: Applied Science Publishers Ltd)
- [40] Ansys, Inc. “ANSYS FLUENT USER’S GUIDE” [Manual]. USA: Ansys, Inc. 2009.
- [41] จารุวัตร เจริญสุข. พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณและการประยุกต์ในงานวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: มินเซอร์วิศซัพพลาย. 2561
- [42] testo. 2006 testo 330-2LL [online]. Available: <https://www.testo.com/en-TH/testo-330-2-ll/p/0632-3307>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

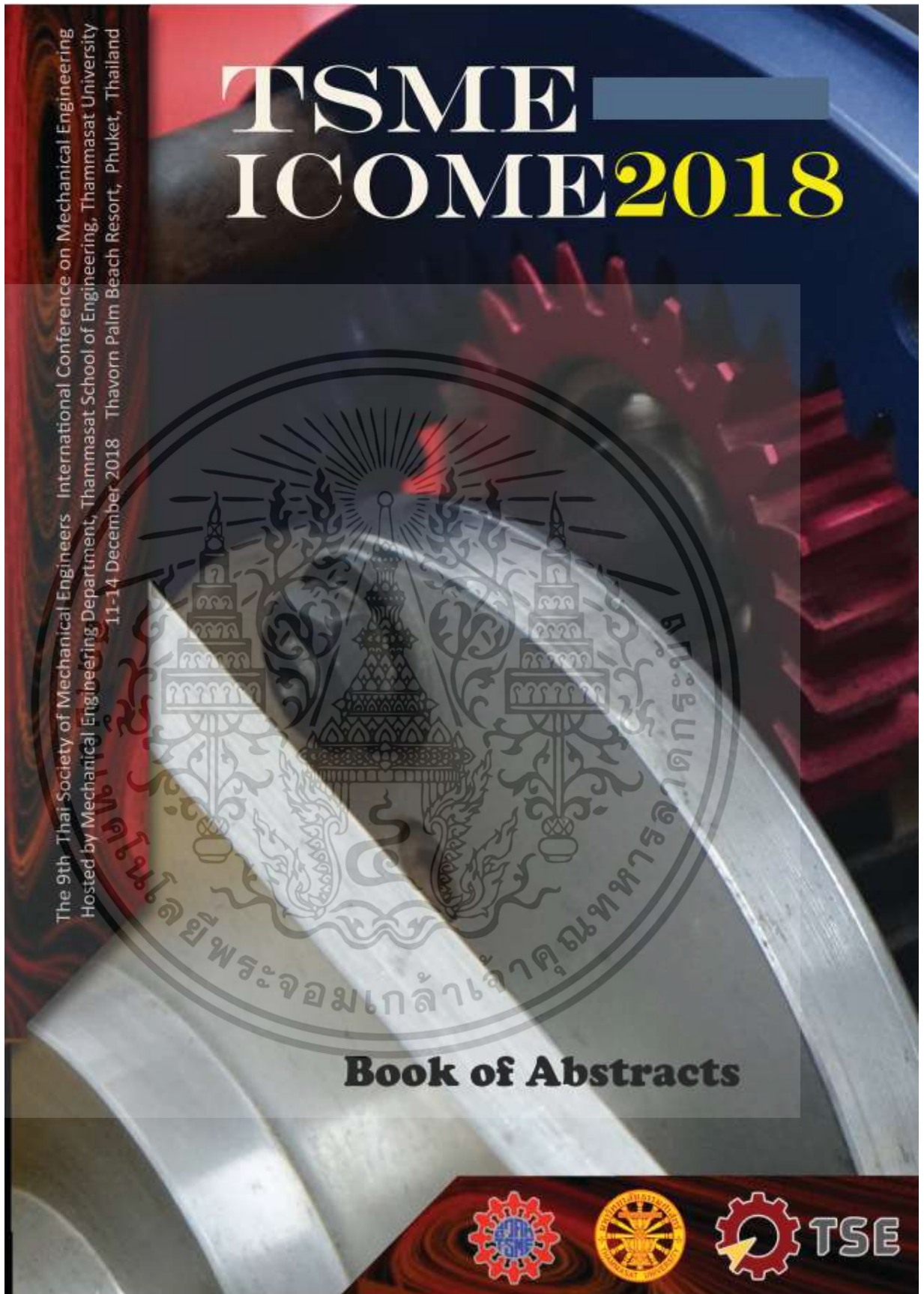
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก.

งานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Contents

### Abstract Contents

- Alternative Energy and Combustion (AEC)	1
- Automotive, Aerospace and Marine Engineering (AME)	43
- Applied Mechanics, Materials and Manufacturing (AMM)	65
- Biomechanics and Bioengineering (BME)	85
- Computation and Simulation Techniques (CST)	109
- Dynamic Systems, Robotics and Controls (DRC)	130
- Engineering Education (EDU)	152
- Energy Technology and Management (ETM)	156
- IThermal System and Fluid Mechanics (TSF)	177

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



AEC0002

## Effect of secondary air swirler shape on flow aerodynamic and combustion of pulverized biomass

Chatchalerm Kaewchompoo<sup>1</sup>, Ponepen Laphirattanakul<sup>1</sup> and Jarruwat Charoensuk<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, 1 Chalongkrung Rd., Ladkrabang, Bangkok, Thailand, 10520

\* Corresponding Author: kcjaruw@kmitl.ac.th, Tel. 02-3298350-1

**Abstract.** The effect of secondary air swirler shape on flow aerodynamic and combustion of pulverized biomass was investigated at 300 kW thermal throughput with excess air 15% and the ratios of primary: secondary: tertiary air flows were at 25: 65:10 percent, respectively. The flat-vane swirler and curve-vane swirler were compared in identical operating condition. The transportation of pulverized fuel, temperature of combustion and exhaust gas composition were considered. It was found that curve-vane swirler generated stronger swirl flow than flat-vane swirler. Temperature in the pre-chamber was found higher in the case of curve-vane swirler. As a result, CO concentration of exhaust gas was 379 ppm, NO<sub>x</sub> 296 ppm that corrected to 7% O<sub>2</sub>.

### 1. Introduction

The advancement of technologies for renewable energy in Thailand has been steadily developed as a result of government policy to promote renewable energy for industry. From AEDP report, in 2012, the total renewable energy consumption was 9.6 % and raised to 11.91 % in 2014. Among others, majority of biomass consumption in Thailand is from agricultural industry. Most of them use their by-product from manufacturing processes as fuel to reduce operating cost.

In 2015, Combustion laboratory King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang was supported by the Thailand Research Fund (TRF) and National Research Council for design and development of pulverized biomass burner with pre-chamber configuration. Chinnapat Turakarn [1] investigated combustion of pulverized biomass in a pre-chamber with secondary air inlet installed with flat vane swirl generator at three different swirl angles. He showed that the 100-degree of swirl blade angle induced a strong recirculation inside the pre-chamber, thus enabling the combustion stability without blowing off. However, flue gas composition from combustion process at 300 kW thermal throughput emitted CO at 3665 ppm indicating low combustion efficiency. Pongsanun Kanprom [2] later studied the effect of bluff body and swirl vane on performance of pulverized biomass burner. These tests employed conical bluff body at blockage ratio of 0.42 with flat vane swirl generator and the ratios of primary: secondary: tertiary air flows were at 25: 65:10 percent. He observed that the bluff body was able to spread the pulverized biomass into a pre-chamber at greater degree of dispersion than that without the bluff body and the recirculation was generated by a flat vane swirl generator. The CO emissions from experiment was 484 ppm, corrected to 7% oxygen.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The know-how for improving the combustion efficiency of the burner has already been available in the literatures. F. El-Mahallawy and S. El-Din Habik [3] suggested three T's of combustion comprising of; time, temperature and turbulence. The conventional method to achieve these three essential factors which will eventually improve combustion efficiency is by using swirl generator. It generates swirl flow and recirculation zone as a result of vortex break down. Recirculation transfers flue gas to heating the incoming air and fuel that flow into the combustion chamber. This also leads to higher rate of combustion which benefit to reduction in capital cost. Effect of swirl flow on combustion of gas liquid and solid fuel have been extensively investigated by many researchers. [4] Among others, Arthur H. Lefebvre and Dilip R. Ballal [5] showed that radial swirl generator could generated tangential velocity component on the incoming air. If designed properly, it would reduce wake zone on suction side and make high swirl flow on discharge side, leading to larger recirculation in combustion chamber. Therefore, it is interesting to investigate how curved vane swirl generator would be more effective than the flat vane swirl generator.

This paper presents the progress of study on effect of curved vane on aerodynamic and combustion performance with 80-degree of curved vane versus those obtained by using flat vane with 100-degree swirl generator for pulverized biomass burner. It was expected that this work will have some implication for industrial burner design.

## 2. Solid fuel combustion

Combustion of solid fuel comprises of 3 major processes which include; drying, devolatilization, volatile and char combustion. As when the pulverized particle transports to combustion chamber, it receives heat from hot gas by means of radiation, and convection. When the temperature rises to 100°C, the water inside the particle get evaporated until evaporation process finish. Then particle temperature is kept increasing to devolatilization temperature between 200 to 500°C. The volatile matter (gas) releases from inside of pulverized particle to outside and creates a cloud around particle and burning. It's called devolatilization or volatile formation. The heat is generated in this process and transfer to back to drying and devolatilization for new particle, and so on. After devolatilization is completed, char combustion occurs by oxygen on char surface. The time of char combustion depend on oxygen diffusion rate as well as the transport rates of CO and CO<sub>2</sub>.

## 3. The pulverized biomass burner system

The pulverized biomass burner system is shown in Figure 1. It consists of pre-chamber, furnace, hopper, hammer mill, wet scrubber. The air and fuel feeding systems, in Figure 2, were interlocked by PLC to control air and fuel ratio on operating condition range. The pre-chamber was designed to establish continuous reaction and flame stabilization.

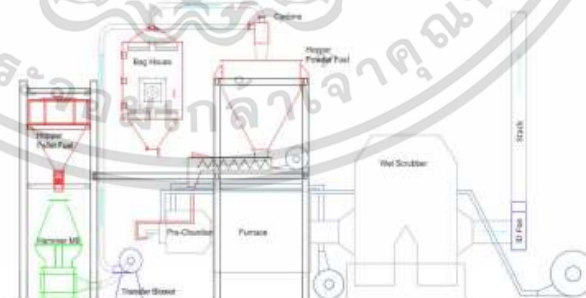


Figure 1. The pulverized biomass burner system

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4. Materials and method

##### 4.1. Pre-chamber and furnace

Figure 2 and 3 show schematic diagram of pre-chamber and furnace. It has inner diameter of 396 mm and length of 460 mm, built up from refractory brick of 113 mm. thick. It is expected that the design would promote flame stability by reducing radiation loss. Primary air duct has 52.5 mm. in diameter and made of stainless steel 304. Secondary and tertiary air is fed through the pipe of 85 mm. in diameter. The conical bluff body with blockage ratio of 0.42 is installed at the end of primary air inlet. The swirl generator is installed in a swirl box locating before the secondary air inlet connecting to the combustion chamber. The furnace has 1000 mm. of inner diameter and length of 1215 mm. with refractory brick of 113 mm. thick, wrapped around with a layer of 50 mm. ceramic fibre and 6 mm. of steel vane.

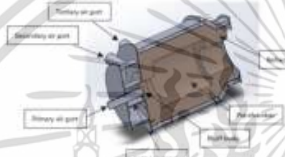


Figure 2. Pre-chamber

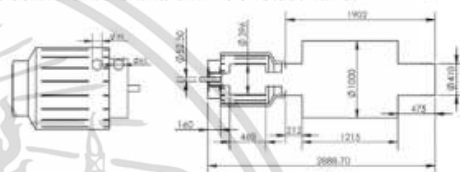


Figure 3. Schematic diagram of pre-chamber and furnace

##### 4.2. Swirl number

The swirling flow often uses to control flame range in combustion chamber. Beer and Chigier [4] was explained that swirling flow has characteristic of rotating motion and free stream turbulent. While fluid is swirling through the burner nozzle, it has tangential radial and axial velocity components. In addition, the result of swirling creates radial pressure and axial pressure gradients that strongly affect to the flow field. In the case of strong swirl, negative pressure is created to generate reverse flow thus establishing an internal recirculation. The swirl intensity is presented by swirl number.

$$S' = \frac{G_\phi}{G'_x R} \quad (1)$$

Where  $R$  is exit radius of swirl generator  
 $G_\phi$  is axial flux of angular momentum  
 $G'_x$  is axial flux of linear momentum

##### 4.3. Swirl generator

Two types of radial swirl generator were employed in this experiment. It comprised of flat vane swirler with swirl number 0.74 and curve vane swirler with swirl number 1.66, as shown in Figure 4. Swirler blades were made from steel and installed in swirl box before the pre-chamber.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

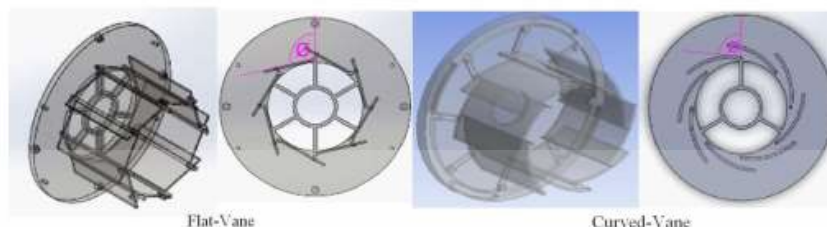


Figure 4. Flat and curve swirl generator

Table 1. Operating condition of pulverized 300 kW thermal throughput excess air 15%\*

	Mass flow rate (kg/s)	ratio
Pulverized biomass	0.0172	-
Primary air	0.029	25
Secondary air	0.075	65
Tertiary air	0.012	10

\*benchmarking with combustion of heavy fuel oil under similar environment of fire tube boiler

#### 4.4. Operating conditions and Measurement

The experiment of pulverized biomass combustion was carried out at 300kW thermal throughput with 15% excess air, the incoming air at ambient temperature was separated into primary air, secondary air, and tertiary air. As suggested by previous worker [6], the ratios between primary, secondary and tertiary air 25 %, 65 % and 10 %, respectively. A start up period required for the Pre-chamber to be heated up by LPG burner of 20 kW was about 30 min., from cold state. Then the pulverised biomass was introduced at 100 kW throughput. The pre-chamber was further warmed up by both fuel at 120 kW total throughput until steady state was reached. Pulverized biomass was transported with primary air and burned by LPG burner. The hot pulverized particle was diverted by a conical bluff body and released volatile to heat up the pre-chamber. Secondary air flow into swirl box and flow through swirl generator to create swirl flow. When swirl flow broke down in a pre-chamber, it produced recirculation thus reversing hot gas back near the bluff body, promoting flame stability and heating air near the inlet. Tertiary air flow help cooling the pre-chamber and then flow into a combustion domain at the end of the pre-chamber. After the LPG burner was switched off, the burner was left for few minutes until the temperature was stable. Thermal throughput was then raised up by 50kW until reaching the target at 300kW. When steady state was reached, temperature values inside the pre-chamber were measured by thermocouple type-K at the positions  $X/D$  0.375, 0.625, 0.875, 1.125, 1.375 and  $r/R$  0, 0.125, 0.25, 0.5. The flue gas composition is detected by flue gas analyser for CO, NO<sub>x</sub> and O<sub>2</sub> measurements.

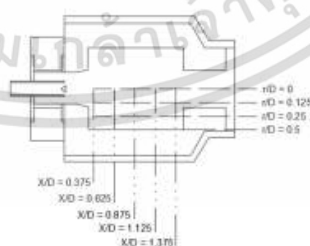


Figure 5. Position to measured temperature distribution

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Table 2.** Wood pallet properties.

Proximate analysis (as received)	
Moisture %	16.16
Volatiles %	81.41
Ash %	2.43
Fixed carbon %	16.16
Calorific value (MJ/kg, daf)	17.5
Ultimate analysis (wt%, daf)	
C %	45.42
H %	6.31
O %	45.54
N %	0.54
Size distribution	
<0.038	0.97
0.075-0.038	7.20
0.15-0.075	11.87
0.3-0.15	24.89
0.6-0.3	46.09
1.18-0.6	7.33
2.36-1.18	1.64

## 5. Result and discussion

### 5.1. Flat vane swirl generator

Effect of flat vane swirler, with 100 degree of vane angle, on combustion performance of pulverized biomass were observed while operating at 300kW thermal throughput. It was observed that flat vane swirler at 100° was not effectively create strong shear flow to disperse pulverized particles inside the pre-chamber. Pulverized biomass particle was transported straight into a pre-chamber, similarly to jet flow as shown in Figure 6(a). As a result, CO concentration of exhaust gas composition was found at 1,956 ppm, NO<sub>x</sub> 243 ppm that corrected to 7% O<sub>2</sub>. Accordingly, Figure 8(a) shows high temperature near the end of pre-chamber. This implied that ignition was delayed and took place somewhere in the middle of pre-chamber, not well-attached with the burner tip.

### 5.2. Curve vane swirl generator

Effect of curve vane swirler at 80 degree of vane angle is given in Figure 6(b). Pulverized biomass particle was sheared away from the burner axis by swirl flow from swirler. It was clearly observed that pulverized biomass was well-spread right after leaving the burner tip. It was expected that rapid devolatilization would occur. This would brought about good mixing between volatile and secondary air during combustion. As a result, CO concentration of exhaust gas was 379 ppm, NO<sub>x</sub> 296 ppm that corrected to 7% O<sub>2</sub> which temperature distribution causing significant NO<sub>x</sub> formation. As shown in Figure 8(b), wider coverage of high temperature zone was observed in a pre-chamber as a result of good mixing between air and fuel.



Figure 6. The pulverized incoming (a) flat vane swirler (b) curve vane swirler

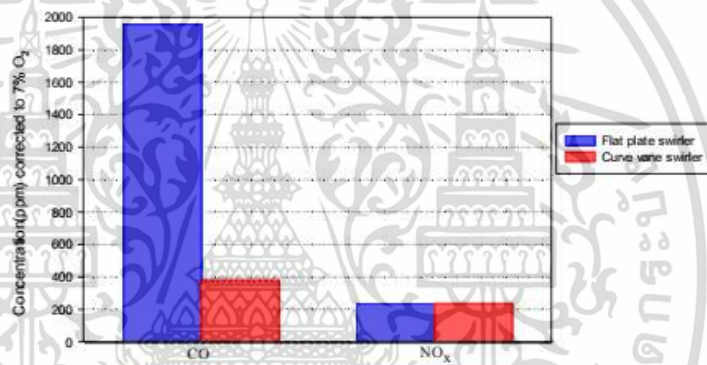


Figure 7. The concentration of CO and NO<sub>x</sub> (ppm) from flat and curve vane swirler

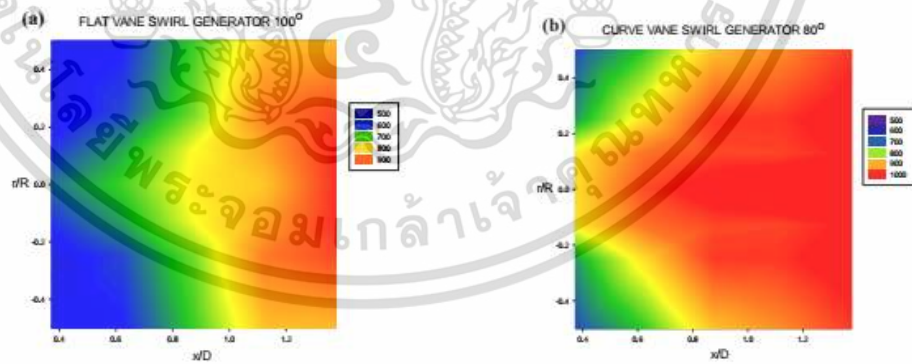


Figure 8. The temperature distribution in pre-chamber from experiment  
(a) flat vane swirler (b) curve vane swirler

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Temperature values inside the pre-chamber were measured at different axial and radial locations and were reconstructed using graphical tool and interpolation function from SigmaPlot®. From the experiment, one can postulate that the curved vane swirl generator creates a stronger swirl flow than flat vane swirl generator, as observed in Figure 8(a) and (b). The curved vane swirler could better spread pulverized biomass to mix with secondary air in the pre-chamber. The vortex flow from curve vane and biomass particle got mixed together while transported radially in the pre-chamber and broke up to generates recirculation in central region of pre-chamber. The influent of stronger swirl flow induced stronger reverse flow thus creating higher mass flow rate from downstream to heat up the air and fuel mixture near the burner inlet and expedite combustion process upstream.

## 6. Conclusion

In this study, the flat and curve vane swirl generator were employed. Their effects on performance of pulverized biomass combustor at 300 kW thermal throughput had been reported. The curve vane swirler with 80° of vane angle would generate a stronger swirl flow than flat vane swirler 100° as observed in Figure 6(a) and Figure 6(b), respectively. The burner tip dispersed pulverized biomass to mix with air and fuel for combustion process. The results from experiment indicated that curve vane swirl generator created greater region of high temperature in the pre-combustion chamber and produces low CO and low NO<sub>x</sub>. Consequently, curve vane swirl generator will be adopted for wider range of operating condition.

## References

- [1] Chinnapat Turakran. *Biomass burner development in industrial boiler*, Thesis of King Mongkut's Institute of Technology Latkrabang, 2015.
- [2] Pongsanun Kanprom. *Effect of bluff body and swiel vane on performance of pulverized biomass burner*, Thesis of King Mongkut's Institute of Technology Latkrabang, 2016.
- [3] F. El-Mahallawy and S. El-Din Hablik 2000 *Fundamental and technology of combustion* (Amsterdam: ELSEVIER)
- [4] J.M. Beer and N.A. Chigier 1972 *Combustion aerodynamics* (London: Applied Science Publishers Ltd)
- [5] Arthur H. Lefebvre and Dilip R. Ballal 2010 *Gas turbine combustion alternative fuels and emissions* (New York: CRC Press)
- [6] Narasad Phikun-Ngoen. *Effect of air ration performance of pulverized biomass combustor*, Thesis of King Mongkut's Institute of Technology Latkrabang, 2016.

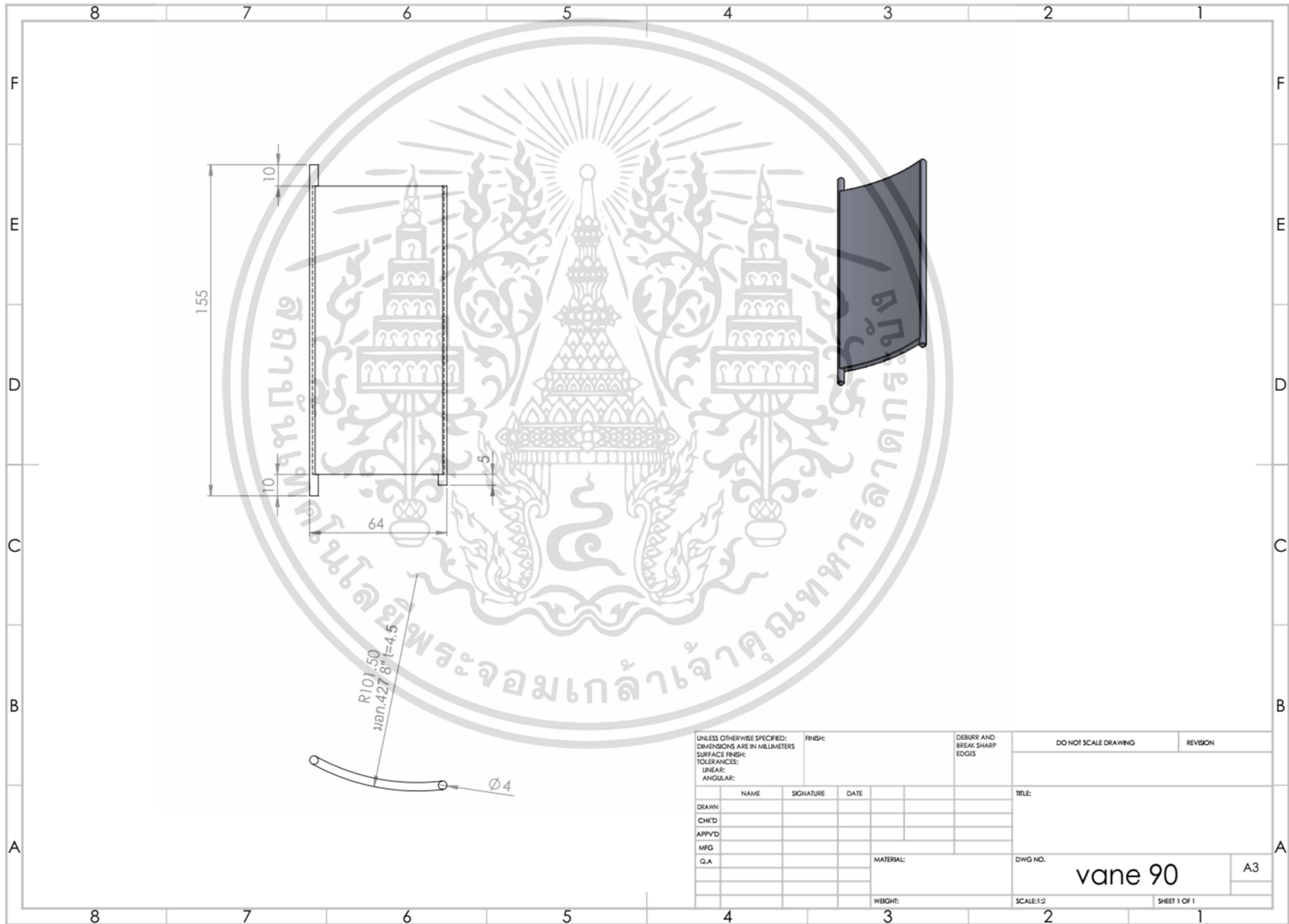
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

แบบอุปกรณ์ทดสอบ

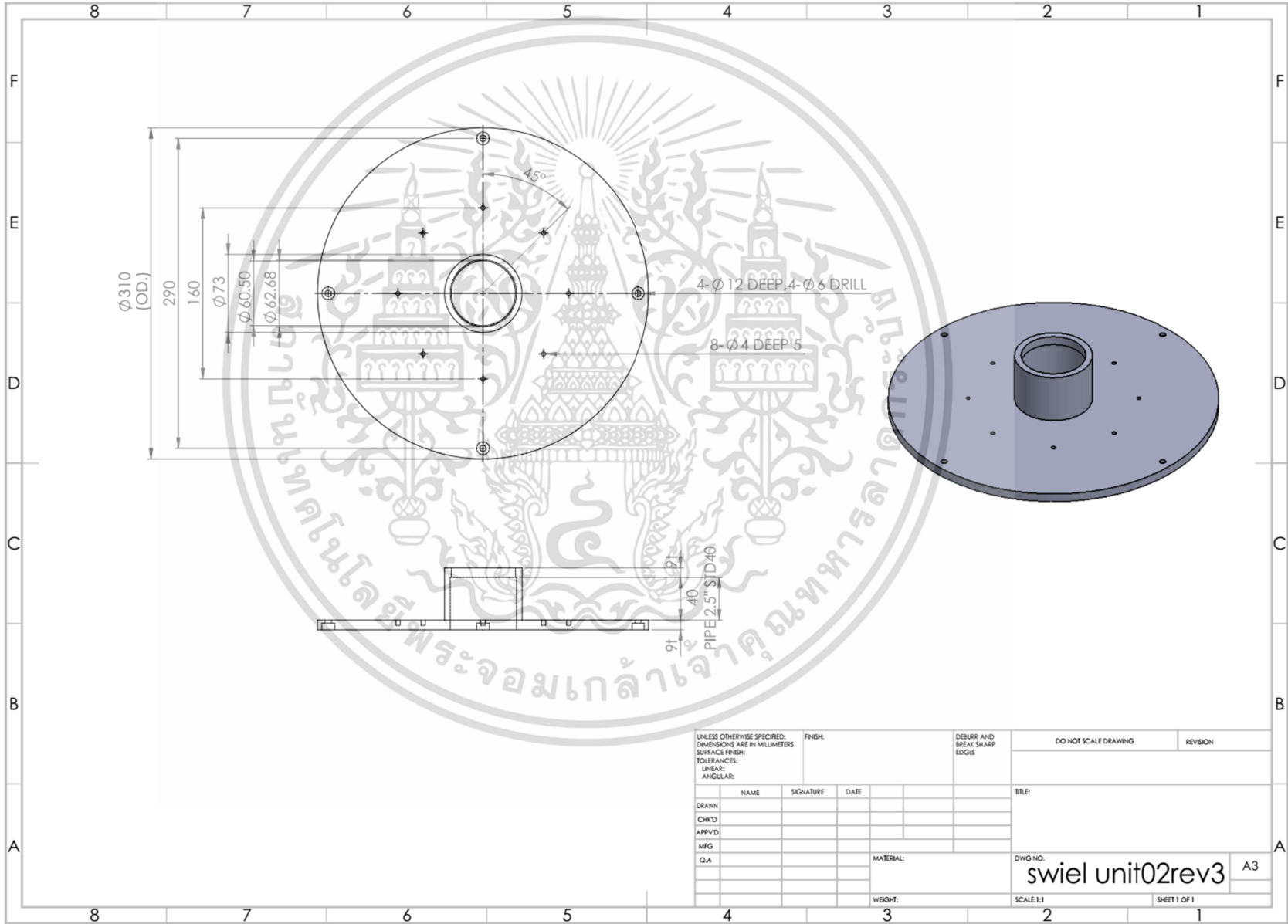


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

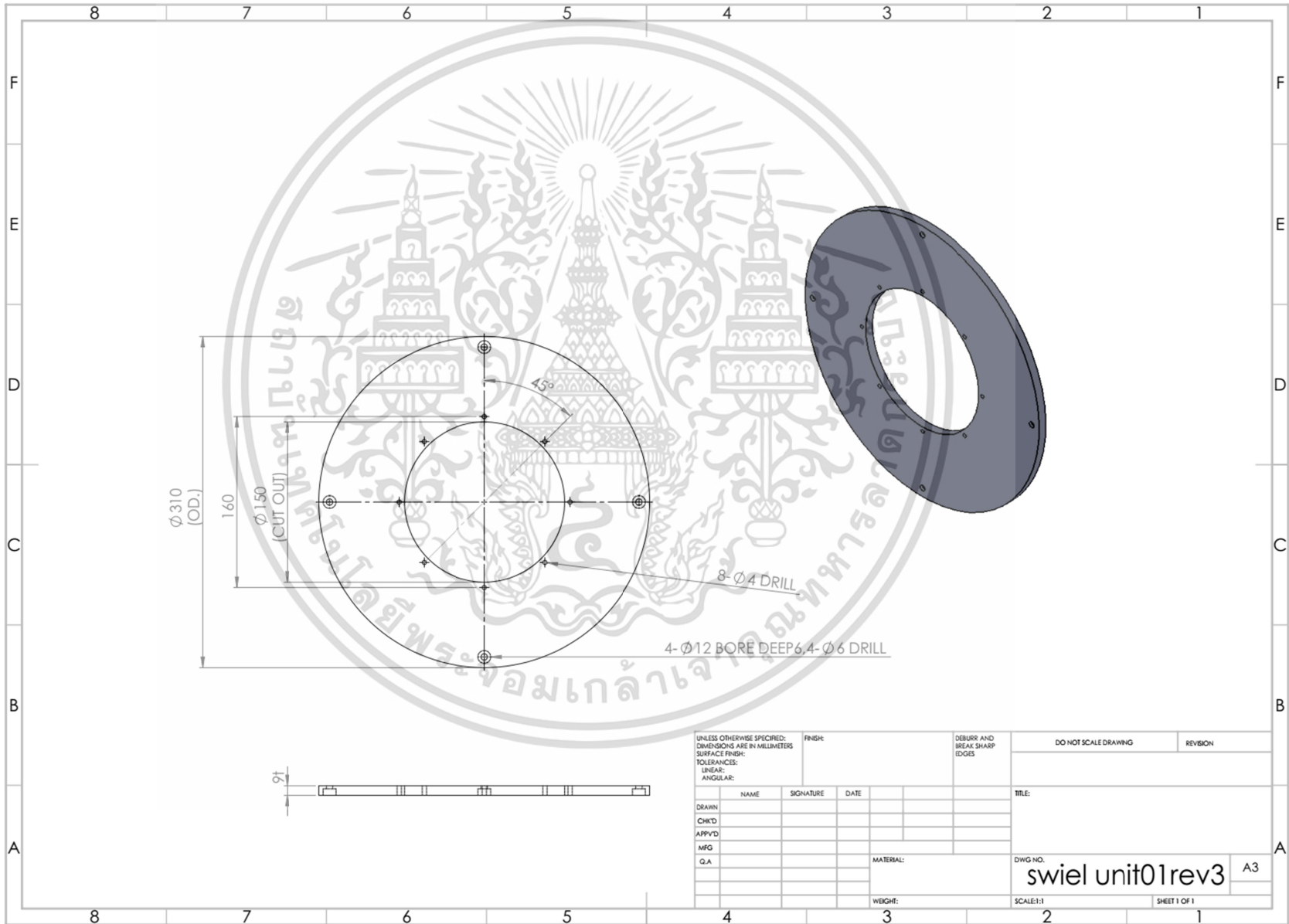


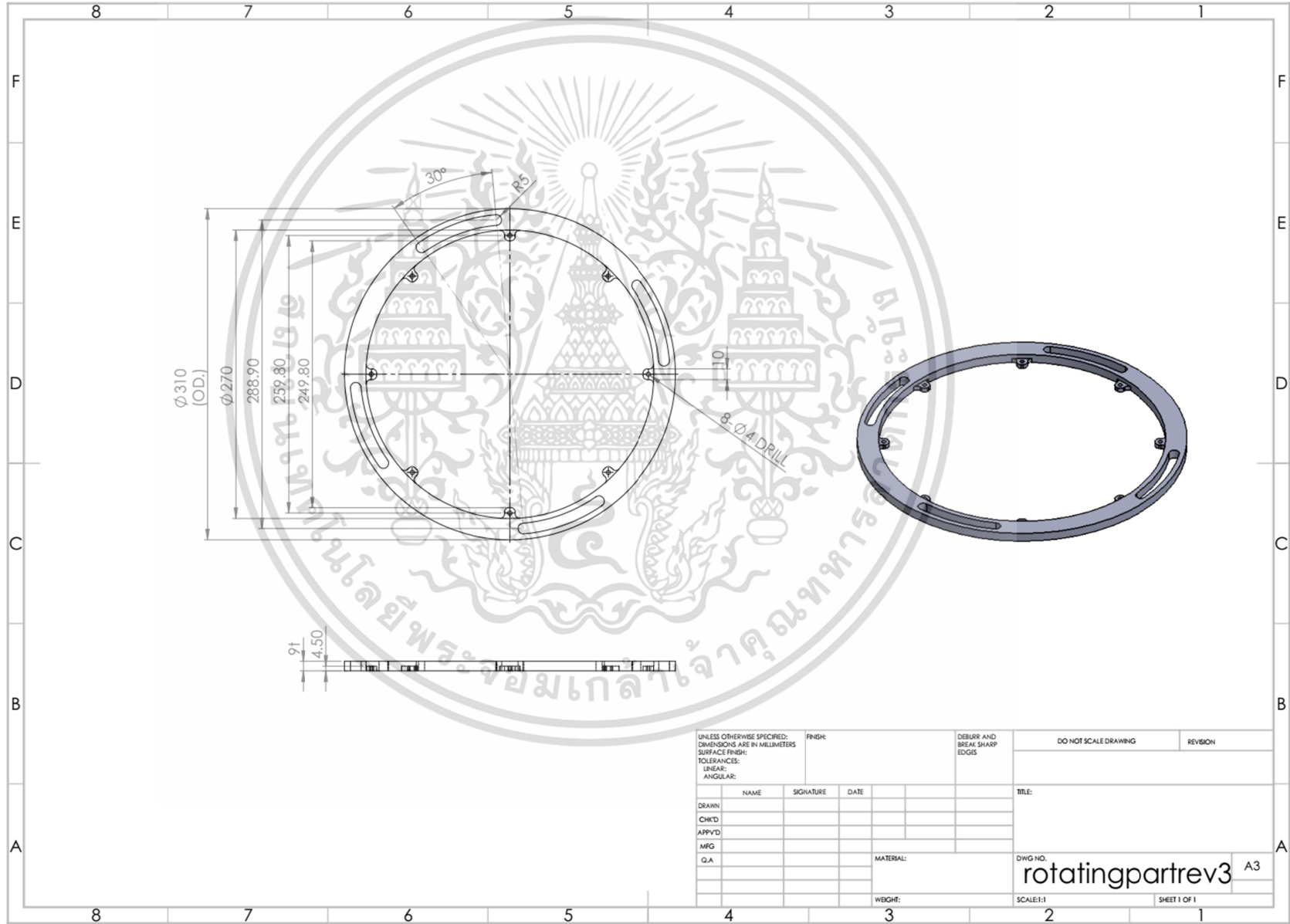
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS				FINISH:		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
SURFACE FINISH:											
TOLERANCES:											
LINEAR:											
ANGULAR:											
DRAWN:		NAME		SIGNATURE		DATE		TITLE:			
CHTD:											
APPVD:											
MFG:											
Q.A:											
				MATERIAL:				DWG NO.		A3	
				WEIGHT:				SCALE:1:2		SHEET 1 OF 1	

vane 90

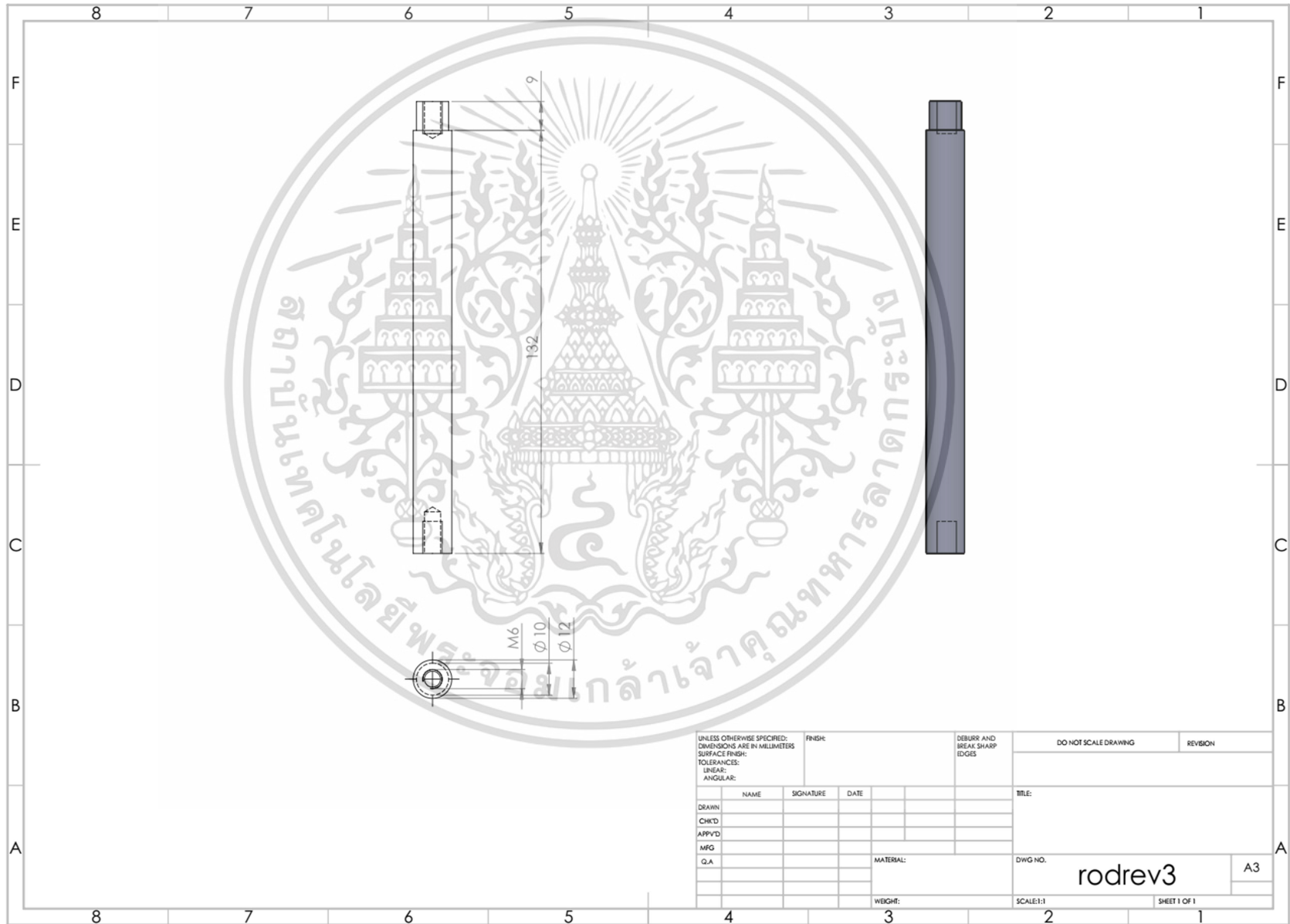


UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:				FINISH:		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DRAWN				NAME		SIGNATURE		DATE		TITLE:	
CHK'D											
APP'VD											
MFG										MATERIAL:	
Q.A.										DWG NO. swiel unit02rev3	
										SCALE:1:1	
										SHEET 1 OF 1	



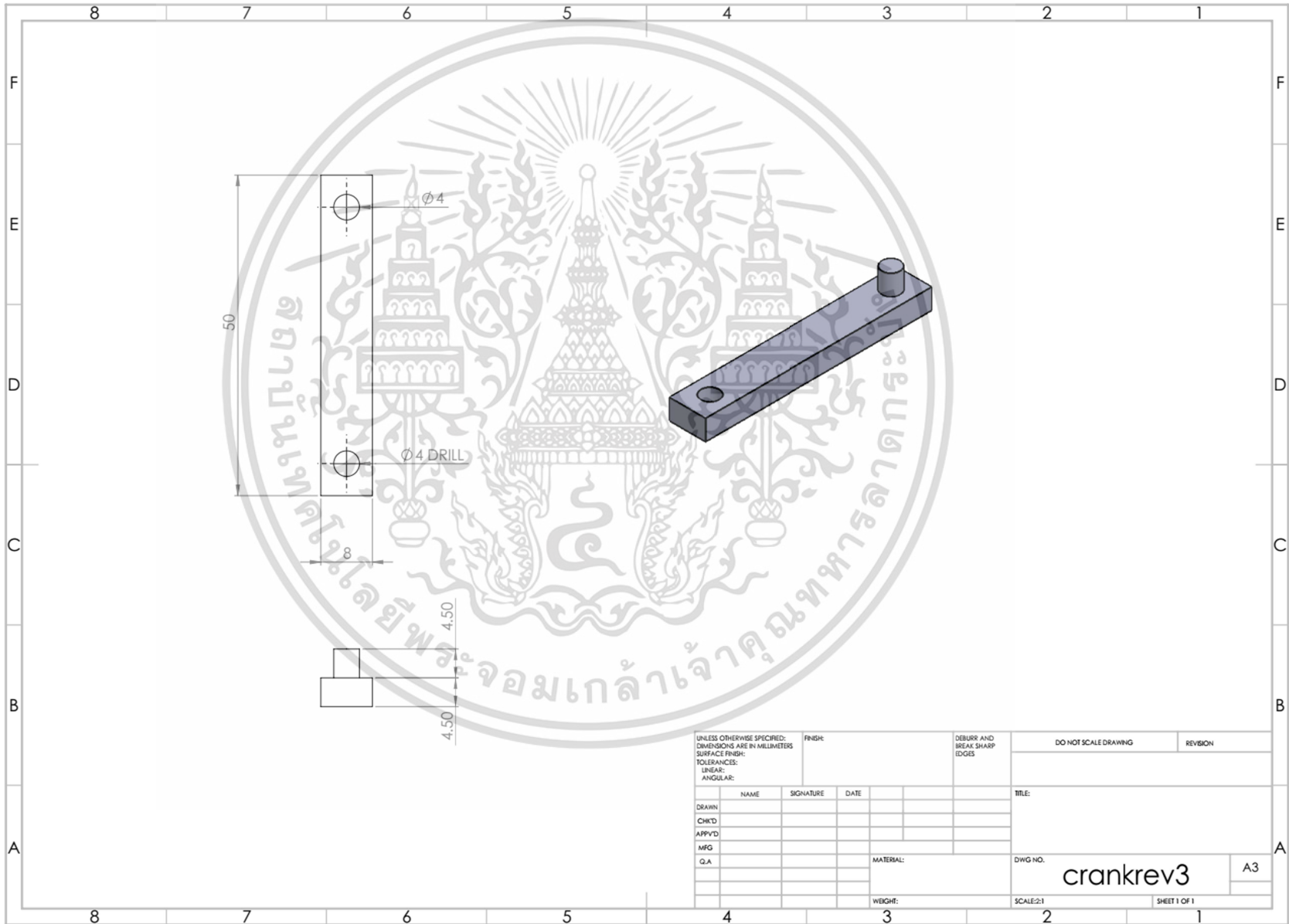


UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS				FINISH:		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
SURFACE FINISH:											
TOLERANCES:											
LINEAR:											
ANGULAR:											
DRAWN		NAME		SIGNATURE		DATE		TITLE:			
CHK'D											
APP'VD											
MFG											
Q.A											
				MATERIAL:				DWG NO.		A3	
				WEIGHT:				SCALE:1:1		SHEET 1 OF 1	
								rotatingpartrev3			



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS				FINISH:		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
SURFACE FINISH:											
TOLERANCES:											
LINEAR:											
ANGULAR:											
		NAME	SIGNATURE	DATE				TITLE:			
DRAWN											
CHKD											
APPVD											
MFG											
G.A.											
						MATERIAL:		DWG NO.		A3	
						WEIGHT:		SCALE:1:1		SHEET 1 OF 1	

rodrev3



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS				FINISH:		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
SURFACE FINISH:											
TOLERANCES:											
LINEAR:											
ANGULAR:											
DRAWN		NAME		SIGNATURE		DATE		TITLE:			
CHK'D											
APP'VD											
MFG											
Q.A											
						MATERIAL:		DWG NO.		A3	
						WEIGHT:		SCALE:2:1		SHEET 1 OF 1	

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายฉัตรเฉลิม แก้วชมภู  
 วัน เดือน ปีเกิด 11 สิงหาคม 2537 ที่จังหวัดเชียงใหม่  
 ที่อยู่ 27 หมู่2 ตำบลร่องวัวแดง อ.สันกำแพง จ.เชียงใหม่ 50130  
 E-mail kim.chatchalerm@gmail.com โทร.094-8308515

ประวัติการศึกษา พ.ศ. 2559 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่งทางราง  
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย

พ.ศ.2561 effect of secondary air swirler shape on flow aerodynamic and  
 combustion of pulverized biomass

พ.ศ.2562 International Internship student Mie University, Mie, Japan

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้