

อิทธิพลของการขยายทางออกของท่อปฐมภูมิต่อสมรรถนะหัวเผาชีวมวล

EFFECT OF PRIMARY TUBE OUTLET EXPANSION ON PERFORMANCE  
BIOMASS BURNER



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2566

KMITL-2023-EN-M-030-083

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EFFECT OF PRIMARY TUBE OUTLET EXPANSION ON PERFORMANCE  
BIOMASS BURNER



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING  
SCHOOL OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2023

KMITL-2023-EN-M-030-083

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2023**

**SCHOOL OF ENGINEERING**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	อิทธิพลของการขยายทางออกของท่อปลัสมุมุมิต่อสมรรถนะหัวเผาชีวมวล
นักศึกษา	นายพงศกร สิริภูมิ
รหัสประจำตัว	64601090
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2566
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผศ.ดร.ภรณ์เพ็ญ ลภีรัตนากุล

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีเป้าหมายเพื่อประเมินอิทธิพลของการขยายทางออกของท่อปลัสมุมุมิและการปรับปรุงปูนทนไฟที่มีผลต่อการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผง ที่ 300 กิโลวัตต์ความร้อน ผ่านการจำลองด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ โดยมีการตรวจสอบความเป็นอิสระของกริดหรือเมชที่ใช้คำนวณอุณหภูมิ และการปลดปล่อยไอเสียเพื่อประเมินความน่าเชื่อถือของผลการจำลองกับการทดสอบจริงสำหรับกรณีท่อปลัสมุมุมิและรูปร่างปูนทนไฟแบบดั้งเดิม จากนั้นทำการจำลองเพิ่มเติมอีก 5 รูปแบบ คือ 1.ท่อปลัสมุมุมิขยาย 1.25 เท่า 2.ท่อปลัสมุมุมิขยาย 1.5 เท่า 3.ท่อปลัสมุมุมิขยาย 1.75 เท่า 4.ท่อปลัสมุมุมิขยาย 1.5 เท่า และมีการเปลี่ยนรูปทรงทางเข้าของห้องเผาไหม้ช่วยเป็นทรงกรวยแบบไม่มีระดับ 5.ท่อปลัสมุมุมิขยาย 1.5 เท่า และเปลี่ยนรูปทรงทางเข้าของห้องเผาไหม้ช่วยจากทรงกรวยเป็นทรงชาม (bowl shape) จากการทดลองพบว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิของท่อปลัสมุมุมิแบบดั้งเดิมจะให้อุณหภูมิที่บริเวณทางออกของหัวเผาสูง โดยอุณหภูมิที่ตำแหน่ง T1 วัดได้ 800 องศาเซลเซียส เมื่อพิจารณาร่วมกับผลการจำลองกรณีท่อปลัสมุมุมิแบบดั้งเดิม พบว่ามีกระแสการไหลย้อนกลับรุนแรง พัดพาสารระเหยที่ปลดปล่อยออกจากอนุภาครวมที่บริเวณตรงกลางห้องเผาไหม้ช่วย ช่วยยืนยันผลการทดลองเป็นอย่างดี กรณีขยายท่อปลัสมุมุมิ 1.25 เท่า อุณหภูมิหลังวัดอุณหภูมิจากหัวเผาจะต่ำลงและจะอยู่ห่างจากวัดอุณหภูมิจากหัวเผามากกว่ากรณีท่อปลัสมุมุมิดั้งเดิม กรณีขยายท่อปลัสมุมุมิ 1.5 เท่า อุณหภูมิสูงอยู่ห่างจากวัดอุณหภูมิจากหัวเผา เกิดการเป่าดับใกล้หัวเผา แต่การกระจายตัวของอนุภาคภายในห้องเผาไหม้เพิ่มขึ้น กรณีขยาย 1.75 เท่า ความเร็วในแนวแกนสูงมากทำให้อนุภาคหลุดออกจากห้องเผาไหม้ช่วยมากขึ้น จึงเลือกใช้กรณี 1.5 เท่าในการเปลี่ยนรูปทรงทางเข้าของห้องเผาไหม้ช่วย ทำให้การกระจายตัวของอุณหภูมิใกล้หัวเผาที่ขยาย 1.5 เท่าดีขึ้น สามารถสร้างอุณหภูมิสูงใกล้ทางออกของหัวเผาได้ใกล้เคียงหัวเผาเดิม และยังคงข้อดีของการกระจายตัวของอนุภาคในห้องเผา

ไหม้ช่วยไว้ได้ ในส่วนของการปล่อยปล่อย CO จะแปรตามการเผาไหม้ไม่หมดของถ่านชาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Thesis Title</b>	Effect of primary tube outlet expansion on performance biomass burner
<b>Student</b>	Mr. Pongsakorn Siripoom
<b>Student ID.</b>	64601090
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Mechanical Engineering
<b>Year</b>	2023
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof. Dr. Jarruwat Charoensuk
<b>Thesis Co-Advisor</b>	Asst. Prof. Dr. Ponpen Laphirattanakul

### ABSTRACT

This research aims at assessing the effects of primary tube expansion and modification of the refractory quarl on combustion of pulverized fuel at 300 kilowatts thermal throughput. The work was carried out by simulation with computational fluid dynamics and the experiment. The mesh independent test and model calibration were performed against measured temperature and flue gas emission of the base case as part of model validation. Based on the validated model, simulations were carried out on 4 burner configurations, having the expanded primary tube at 1) 1.25 times, 2.) 1.5 times, 3) 1.75 times, 4) 1.5 times with cone-shape refractory quarl and 5) 1.5 times with bowl-shape refractory quarl. Experiment of the base case suggested high temperature at the first monitoring location, T1, being at 800 °C, where the simulation revealed strong recirculation, favoring peak temperature in the near burner zone. This observation agrees well with the experimental result. With 1.25 expanded tube, however, lower peak temperature was observed, where flame blow-off was found with 1.5 expanded tube and the peak temperature shifted to the exit zone of the pre-chamber and with 1.75 expanded tube, it had a high axial velocity that allows more particles to escape from the pre-chamber. Nevertheless, this modification yielded greater dispersion of the char particles in the furnace section, leading to lower CO emission. Modification of the refractory quarl from the original shape regained the recirculation in the near burner zone while maintaining good particle dispersion, CO emission vary in reverse proportion with the degree of char burnout.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จรูกลงไปได้ด้วยดี ต้องขอขอบพระคุณ รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข อาจารย์ที่ปรึกษา และ ผศ.ดร.ภรณ์เพ็ญ ลภีรัตนากุล อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผู้ซึ่งคอยให้คำปรึกษา คำแนะนำ ให้ความรู้ทางด้านวิชาการ และสอนวิธีการใช้โปรแกรมจำลองการเผาไหม้ ตลอดจนติดตามความก้าวหน้าของวิทยานิพนธ์ ให้คำแนะนำในการแก้ปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นในการทำวิจัยครั้งนี้ ทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้มีความสมบูรณ์

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณครอบครัวของข้าพเจ้า ได้แก่ บิดา มารดา และญาติพี่น้อง ที่ให้กำลังใจ ข้าพเจ้ามาโดยตลอด อีกทั้งยังสนับสนุนด้านทุนทรัพย์ในการศึกษา เพื่อให้ข้าพเจ้าเข้าถึงโอกาสทางการศึกษาได้ดีที่สุด

พงศกร สิริภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และเผยแพร่อย่างอื่นถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.5 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์.....	5
2.1 เชื้อเพลิงชีวมวล.....	5
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเชื้อเพลิงชีวมวล.....	6
2.3 งานวิจัยที่ใช้ CFD มาใช้ในการจำลอง.....	7
2.4 การพัฒนาหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวล.....	8
บทที่ 3 ทฤษฎีในการคำนวณและการสอบเทียบแบบจำลอง.....	11
3.1 ทฤษฎีในการคำนวณ.....	11
3.1.1 สมการความต่อเนื่อง.....	11
3.1.1.1 สมการอนุรักษ์มวล.....	11
3.1.1.2 สมการอนุรักษ์โมเมนตัม.....	12
3.1.1.3 สมการอนุรักษ์พลังงาน.....	13
3.1.2 แบบจำลองการไหลปั่นป่วน.....	13
3.1.2.1 แบบจำลอง k- $\epsilon$ ชนิดมาตรฐาน.....	14
3.1.2.2 แบบจำลองการปั่นป่วนขนาดใหญ่ (Large Eddy Simulation; LES).....	15
3.1.3 แบบจำลองการแผ่รังสี (Radiation Model).....	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้ผู้อื่นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.3.1 แบบจำลองการแผ่รังสี Discrete Ordinate (DO).....	16
3.1.4 Discrete Phase Models.....	17
3.1.4.1 สมการการเคลื่อนที่ของอนุภาค.....	17
3.1.4.2 แบบจำลอง Discrete Random Walk (DRW).....	18
3.1.4.3 Rosin-Rammler Diameter Distribution.....	18
3.1.5 การแลกเปลี่ยนโมเมนตัม.....	18
3.1.6 การแลกเปลี่ยนความร้อน.....	19
3.1.7 การแลกเปลี่ยนมวล.....	19
3.1.8 แบบจำลองการถ่ายโอนสปีชีส์.....	19
3.1.8.1 Volumetric Reactions.....	20
3.1.8.2 Eddy-Dissipation Model.....	20
3.1.9 แบบจำลองการเผาไหม้ของอนุภาค.....	20
3.1.9.1 Inert Heating or Cooling.....	20
3.1.9.2 การปลดปล่อยสารระเหย (Devolatilization).....	21
3.1.9.3 แบบจำลอง single kinetic rate.....	22
3.1.9.4 การเผาไหม้บริเวณผิว (Surface Combustion).....	22
3.1.9.5 แบบจำลอง Kinetic/Diffusion Surface Reaction Rate.....	23
3.2 การตรวจสอบความเป็นอิสระของเมช.....	23
3.3 ข้อมูลเชิงทดลอง.....	27
3.4 กรณีศึกษา.....	29
3.4.1 การปรับ Devolatilization.....	30
3.4.2 การปรับ Combustion.....	32
3.4.3 การปรับ Enthalpy of formation ของสารระเหย.....	34
3.4.4 การทดลองใช้ LES ในการจำลอง.....	38
บทที่ 4 ผลการจำลองและการอภิปรายผล.....	42
4.1 ผลของท่อปฐุมภูมิตั้งเดิม (1.0 IB).....	42
4.2 ผลของการขยายท่อปฐุมภูมิ 1.25 เท่า (1.25 SB).....	44
4.3 ผลของการขยายท่อปฐุมภูมิ 1.5 เท่า (1.5 SB).....	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4 ผลของการขยายท่อปฐมภูมิ 1.75 เท่า (1.75 SB).....	47
4.5 การปรับปรุงรูปร่างของปูนทนไฟ.....	51
4.5.1 การปรับปรุงรูปร่างของปูนทนไฟเป็นทรงกรวยแบบไม่มีระดับ.....	52
4.5.2 การปรับปรุงรูปร่างของปูนทนไฟเป็นทรงชาม (Bowl Shape).....	54
4.6 การปลดปล่อย CO.....	56
บทที่ 5 สรุปผลการจำลองและข้อเสนอแนะ.....	58
5.1 สรุปผลการจำลอง.....	58
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	59
เอกสารอ้างอิง.....	60
ภาคผนวก งานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....	62
ประวัติผู้เขียน.....	70

## สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
3.1 คุณสมบัติเชื้อเพลิง.....	28
3.2 โมเดลการจำลองและค่าพารามิเตอร์.....	29
3.3 เงื่อนไขขอบเขต.....	29
3.4 การปรับค่า Devolatilization.....	30
3.5 ค่าความคลาดเคลื่อนในการปรับค่า Devolatilization.....	31
3.6 การปรับค่า Combustion.....	32
3.7 ค่าความคลาดเคลื่อนในการปรับค่า Combustion.....	33
3.8 การปรับค่าเอนทาลปี.....	34
3.9 ค่าความคลาดเคลื่อนในการปรับเอนทาลปี.....	34
3.10 สรุปลค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง.....	38
3.11 การปรับค่า Combustion สำหรับ LES.....	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ VII อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	4
2.1 เทคโนโลยีการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงชีวมวล.....	6
2.2 รูปทรงของอุณหภูมิตั้งเดิม (K).....	8
2.3 ลักษณะหัวเผาและการไหลของอากาศในห้องเผาไหม้ช่วย.....	9
2.4 แสดงลักษณะของเปลวไฟจากการเผาไหม้ขนาด 1.5, 1.0 และ 0.5 มิลลิเมตร.....	9
3.1 โมเดลการจำลอง.....	24
3.2 เปรียบเทียบจำนวน Elements ของเมช.....	24
3.3 กราฟการกระจายอุณหภูมิตั้งเดิมในแนวแกน.....	26
3.4 กราฟความเร็วในแนวแกน.....	26
3.5 ท่อปฐมน้ำมัน.....	26
3.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเศษส่วนมวลต่อขนาดอนุภาค.....	28
3.7 ตำแหน่งในการตรวจวัดอุณหภูมิตั้งเดิม.....	30
3.8 เปรียบเทียบอุณหภูมิตั้งเดิมตามแนวแกนกับการปรับ Devolatilization.....	31
3.9 เปรียบเทียบอุณหภูมิตั้งเดิมตามแนวแกนกับการปรับ Combustion.....	33
3.10 เปรียบเทียบอุณหภูมิตั้งเดิมตามแนวแกนกับการปรับค่าเอนทัลปี.....	31
3.11 อุณหภูมิตั้งเดิมตามแนวรัศมีของ k- $\epsilon$ .....	36
3.12 อุณหภูมิตั้งเดิมตามแนวรัศมีของ LES.....	39
4.1 ผลของท่อปฐมน้ำมันขนาดดั้งเดิม.....	42
4.2 ผลของการขยายท่อปฐมน้ำมัน 1.25 เท่า.....	44
4.3 ผลของการขยายท่อปฐมน้ำมัน 1.5 เท่า.....	45
4.4 ผลของการขยายท่อปฐมน้ำมัน 1.75 เท่า (1.75 SB).....	47
4.5 เส้นทางการเดินอนุภาค.....	49
4.6 ภาพขยายบริเวณทางออกท่อปฐมน้ำมันกรณีขยาย 1.75 เท่า.....	50
4.7 อุณหภูมิตั้งเดิมตามแนวแกนของหัวเผาแต่ละกรณี.....	51
4.8 การปรับปรุงรูปร่างของปุนทนไฟ.....	51
4.9 ผลของการปรับปรุงรูปร่างของปุนทนไฟเป็นทรงกรวยแบบไม่มีระดับ.....	53
4.10 ผลของการปรับปรุงรูปร่างของปุนทนไฟเป็นทรงชาม (Bowl Shape).....	54
4.11 อุณหภูมิตั้งเดิมตามแนวแกนกรณีปรับปรุงรูปร่างปุนทนไฟ.....	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ VIII อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

4.12 การปลดปล่อย CO..... 57



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ IX อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

พลังงานเป็นปัจจัยพื้นฐานที่สำคัญในการตอบสนองความต้องการขั้นพื้นฐานของประชาชน จึงต้องมีการจัดหาพลังงานให้มีปริมาณที่เพียงพอ โดยพลังงานที่ใช้ในปัจจุบันแบ่งออกเป็นสองประเภทคือ พลังงานสิ้นเปลืองและพลังงานหมุนเวียน พลังงานสิ้นเปลืองคือพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป เช่น หินน้ำมัน น้ำมันดิบ และก๊าซธรรมชาติ ส่วนพลังงานหมุนเวียน คือพลังงานที่ได้จากผลผลิตจากการเกษตรหรือเรียกโดยรวมว่าเชื้อเพลิงชีวมวล โดยในหนังสือภาพรวมพลังงาน ม.ค. - ต.ค. 2565 ของสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน ได้ระบุการผลิตพลังงานจากพลังงานหมุนเวียนหรือชีวมวลอยู่ที่ประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ และมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น [1] ซึ่งการใช้เชื้อเพลิงถ่านหินในปัจจุบันก่อให้เกิดเป็นมลพิษจำนวนมาก จึงมีแนวคิดที่จะใช้เชื้อเพลิงชีวมวลมาผสมในอัตราส่วนที่เหมาะสมเพื่อไม่ให้ประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าลดลง หรือการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลมาใช้ในกระบวนการผลิตพลังงานทั้งหมดเพื่อลดมลพิษที่เกิดขึ้น จึงทำให้มีการศึกษาเกี่ยวกับการเผาไหม้ถ่านหินร่วมกับชีวมวล และศึกษาเกี่ยวกับการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลแบบ 100 เปอร์เซ็นต์

งานวิจัยเกี่ยวกับเชื้อเพลิงชีวมวลในปัจจุบันจะมีการปรับปรุงคุณภาพของชีวมวลผ่านกระบวนการ Torrefaction [2-4] โดยกระบวนการ Torrefaction คือ การทำให้ชีวมวลมีคุณสมบัติเหมาะสมต่อการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงด้วยการให้ความร้อนแก่ชีวมวลอย่างช้าๆ ที่อุณหภูมิ 200 – 300 องศาเซลเซียส ซึ่งกระบวนการทอร์รีแฟคชันประกอบด้วยสามส่วนหลักๆ ได้แก่ กระบวนการอบแห้ง (Drying), กระบวนการทอร์รีแฟคชัน (Torrefaction) และกระบวนการทำให้เย็นลง (Cooling) ซึ่งในงานวิจัยหลายๆงานวิจัยไม่ว่าจะเป็นการศึกษาการเผาไหม้ร่วมกับชีวมวล หรือการใช้เชื้อเพลิงชีวมวล 100 เปอร์เซ็นต์ จะมีการใช้วิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) ในการวิเคราะห์การเผาไหม้ของเชื้อเพลิง และทำนายการเกิดมลพิษต่างๆ โดยสร้างแบบจำลองขึ้นมา ซึ่งจะช่วยลดจำนวนในการทดสอบจริงทำให้ต้นทุนในการศึกษาวิจัยลดลง

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาเสถียรภาพของการเผาไหม้และการเกิดมลพิษ โดยเฉพาะการปลดปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) โดยมีการตรวจสอบความเป็นอิสระ ของกริดหรือเมชที่ใช้คำนวณ อุณหภูมิ และการปลดปล่อยไอเสีย เพื่อประเมินความ น่าเชื่อถือของผลจำลองกับการทดสอบจริง สำหรับกรณีที่ท่อปฐมภูมิ และรูปร่างปูนทนไฟเดิม จากนั้นในเงื่อนไขเดียวกันจะทำการจำลองเพิ่มอีก 5 รูปแบบ คือ 1.ท่อปฐมภูมิขยาย 1.25 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.ท่อปฐมภูมิขยาย 1.5 เท่า 3.ท่อปฐมภูมิขยาย 1.75 เท่า 4.ท่อปฐมภูมิขยาย 1.5 และมีการเปลี่ยนรูปทรงป้อนไฟที่ทางเข้าของห้องเผาไหม้ช่วยเป็นทรงกรวยแบบไม่มีระดับ 5.ท่อปฐมภูมิขยาย 1.5 เท่า และเปลี่ยนรูปทรงป้อนไฟที่ทางเข้าของห้องเผาไหม้ช่วยจากทรงกรวยเป็นทรงชาม (bowl shape)

## 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 ศึกษาอิทธิพลของการขยายทางออกท่อปฐมภูมิของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) ในการวิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคนิวเคลียสและการกระจายตัวของอนุภาคภายในห้องเผาไหม้ช่วย

1.2.2 ศึกษาผลของการปรับปรุงรูปร่างของป้อนไฟบริเวณทางเข้าของห้องเผาไหม้ช่วยเป็นทรงกรวย และทรงชาม เพื่อเปรียบลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคนิวเคลียส และการกระจายตัวของอนุภาคกับป้อนไฟรูปร่างดั้งเดิม

## 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

1.3.1 การขยายทางออกท่อปฐมภูมิของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลจะทำให้ที่อัตราการไหลเดียวกันความเร็วของอนุภาคในแนวแกนลดลง และจากการขยายทางออกทำให้วัตถุวางการไหลมีขนาดใหญ่ขึ้นอนุภาคขนาดใหญ่จึงมีโอกาสชนกับวัตถุวางการไหล และกระจายตัวอยู่ในห้องเผาไหม้ช่วยมากขึ้น

1.3.2 การขยายทางออกท่อปฐมภูมิทำให้ช่องทางออกของลมทุติยภูมิมีขนาดเล็กลง ทำให้ความเร็วในแนวแกนบริเวณนั้นสูงขึ้น มีโอกาสที่กระแสไหลย้อนกลับมีความรุนแรงลดลง และพัดพาอนุภาคไปที่บริเวณมุมทางออกของห้องเผาไหม้ช่วย ทำให้มีโอกาสที่อนุภาคนิวเคลียสหัวเผาตกลง และเปลวไฟดับได้

1.3.3 การปรับปรุงรูปร่างป้อนไฟเป็นทรงกรวยและทรงชาม ทำให้ลดความรุนแรงความเร็วในแนวแกนของลมทุติยภูมิลงมา ทำให้กระแสไหลย้อนกลับมีความรุนแรงเพิ่มขึ้น อนุภาคอยู่ใกล้กับวัตถุวางการไหลมากขึ้น ลดความเสี่ยงที่เปลวไฟจะดับลงได้

## 1.4 ขอบเขตของการศึกษา

1.4.1 ในการจำลองเชิงตัวเลขจะทำการศึกษาที่กำลังความร้อน 300 กิโลวัตต์

1.4.2 ใช้แบบจำลองการไหลปั่นป่วนแบบ Standard k-ε ในการจำลองทั้ง 5 กรณีศึกษา

1.4.3 ใช้แบบจำลองการไหลปั่นป่วนแบบ Large-eddy simulation (LES) ในการศึกษากรณีหัวเผา และรูปร่างป้อนไฟกรณีพื้นฐาน (Base case) เพียงเท่านั้น เพื่อเปรียบเทียบการกระจายอนุภาคนิวเคลียสในแนวรัศมี และเป็นแนวทางในการศึกษาขั้นต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4.4 ในกรณีการปรับปรุงรูปร่างปูนทนไฟบริเวณทางเข้าห้องเผาไหม้ช่วยเป็นทรงกรวยและทรงสาม จะปรับปรุงเพียงกรณีขยายท่อทางออกปลั๊กมูมิ 1.5 เท่า ที่มีการกระจายตัวของอนุภาคภายในห้องเผาไหม้ช่วยมากที่สุด

1.4.5 การวิเคราะห์การปลดปล่อยไอเสีย จะเปรียบเทียบการปลดปล่อย CO เท่านั้น

## 1.5 ขั้นตอนการศึกษา

1.5.1 กำหนดหัวข้อ วัตถุประสงค์ และขอบเขตของการศึกษา

1.5.2 ศึกษาทฤษฎี งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข

1.5.3 ศึกษาการใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT เพื่อใช้ในการจำลองด้วยวิธีเชิงตัวเลข

1.5.4 ศึกษาผลการทดลองในกรณีหัวเผาตั้งเดิม เพื่อใช้เป็นพื้นฐานในการเปรียบเทียบกับผลการจำลอง และใช้ในการหาเงื่อนไขของการจำลองเพื่อให้ได้ผลใกล้เคียงกับการทดลองมากที่สุด

1.5.5 จำลองการเผาไหม้ทุกกรณีศึกษาในเงื่อนไขเดียวกัน

1.5.6 อภิปรายผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองในกรณีต่างๆ

1.5.7 สรุปผลการจำลอง และข้อเสนอแนะเพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาขั้นต่อไป

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

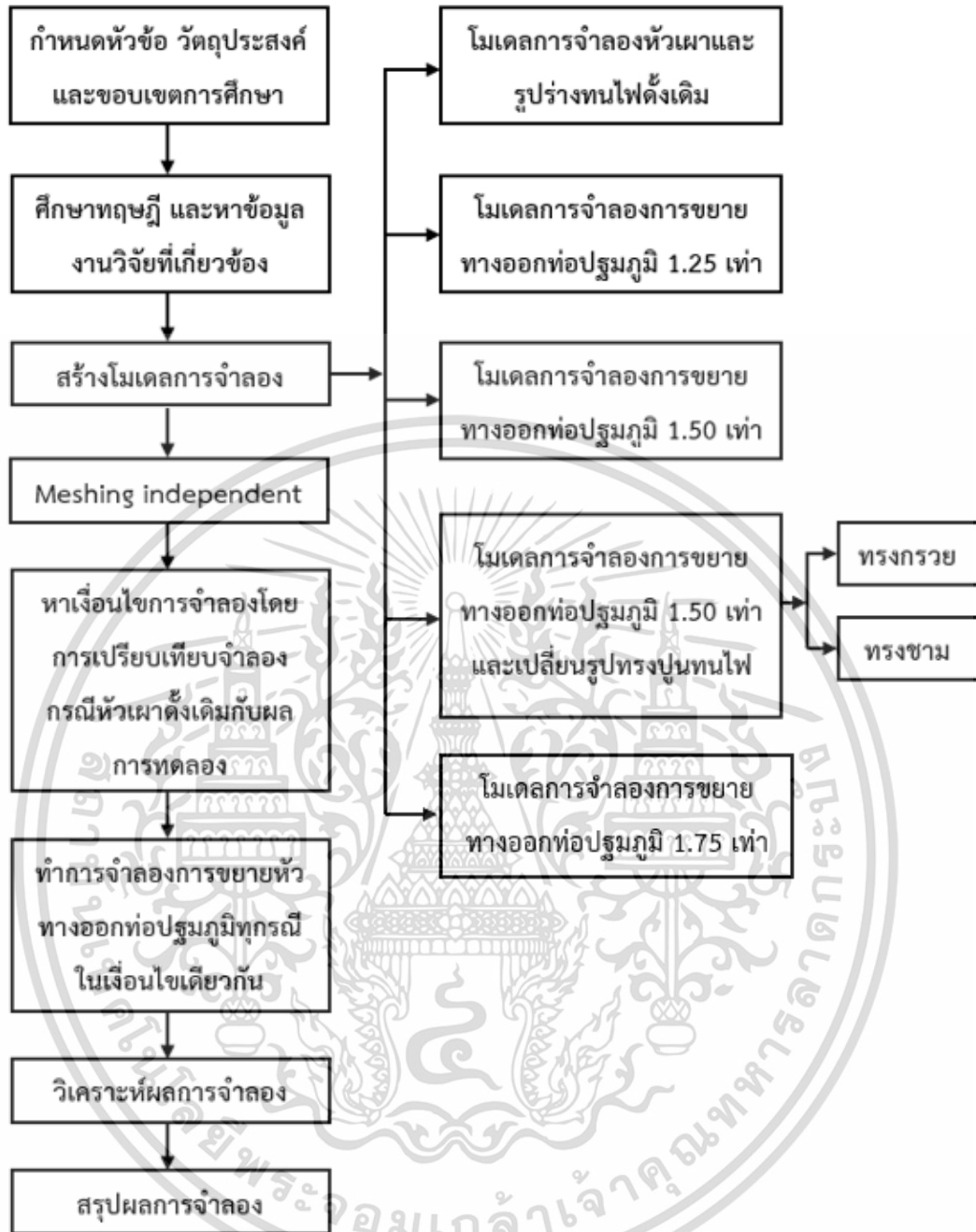
1.6.1 การขยายทางออกท่อปลั๊กมูมิจะทำให้มีอนุภาคกระจายตัวภายในห้องเผาไหม้ช่วยมากขึ้น และมีอนุภาคหลุดออกจากห้องเผาไหม้ซึ่งยังไม่เกิดการเผาไหม้ลดลง

1.6.2 การปรับปรุงรูปร่างปูนทนไฟทำให้เกิดกระแสไหลย้อนกลับที่มากขึ้นในกรณีขยายทางออกท่อปลั๊กมูมิ ลดความเสี่ยงที่เปลวไฟจะดับ

1.6.3 การใช้การจำลองเชิงตัวเลขทำให้สามารถทำนายพฤติกรรมของหัวเผาของเชื้อเพลิงได้ใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงหัวเผาชีวมวล ปรับปรุงการทดลอง และลดจำนวนครั้งในการทดลองจริงลงได้

1.6.4 ในการศึกษาการจำลอง โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ LES เพื่อดูลักษณะการไหลวนแบบละเอียดเทียบกับแบบ Standard k-ε ในกรณีหัวเผาขนาดตั้งเดิมนั้น สามารถใช้เป็นพื้นฐานและปรับปรุงในงานวิจัยขั้นต่อไปได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# วรรณกรรมปริทัศน์

ในการออกแบบการจำลองให้เหมาะสมจำเป็นต้องทำการศึกษาหลักการทํางาน ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องรวมถึงการศึกษางานวิจัยในอดีตที่มี เพื่อให้ทราบถึงแนวคิดทางการวิจัย ขั้นตอนการวิจัยที่อาจจะจำเป็นต่อการจำลอง และปัจจัยต่างๆที่อาจส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของหัวเผา และเป็นการป้องกันการละเมิดสิทธิบัตรของผู้วิจัยท่านอื่นจากอดีตจนถึงปัจจุบัน ซึ่งมีนักวิจัยทั้งในและต่างประเทศได้ทำการศึกษาในหัวข้อที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยที่ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์กำลังศึกษาอยู่ โดยมีเนื้อหาที่ทำการศึกษาค้นคว้าดังนี้

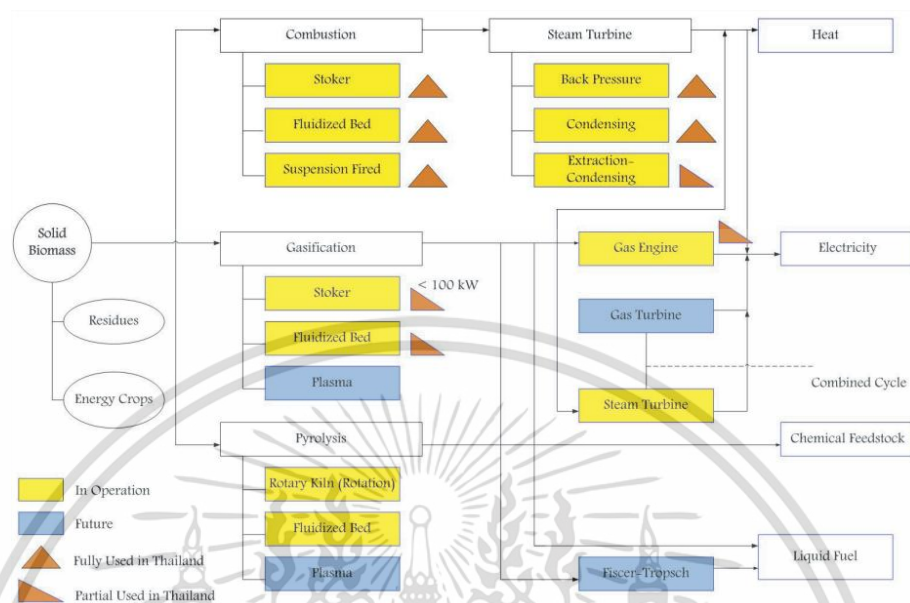
### 2.1 เชื้อเพลิงชีวมวล [5]

ชีวมวลคือ วัสดุหรือสารที่ได้จากธรรมชาติหรือสิ่งมีชีวิตบนผิวโลก ซึ่งไม่เหมือนกับเชื้อเพลิงฟอสซิลที่ต้องใช้การทับถมของซากพืชซากสัตว์เป็นเวลานานในการถือกำเนิด ชีวมวลจึงเป็นพลังงานทางเลือกที่นำมาทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลที่ลดลง ซึ่งประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมทำให้มีผลผลิตทางการเกษตรหลากหลายชนิด เช่น ข้าว มันสำปะหลัง ยางพารา อ้อย เป็นต้น ซึ่งเศษซากเหล่านี้ในอดีตเป็นเพียงปุ๋ยอินทรีย์หรือถูกกำจัดโดยการเผาทำลาย ซึ่งเป็นการสร้างมลพิษให้กับสิ่งแวดล้อม แต่ในปัจจุบันมีการศึกษาและการวิจัยชีวมวลเหล่านี้มากขึ้นทำให้ทราบว่าชีวมวลมีคุณสมบัติในการเป็นเชื้อเพลิงได้อย่างดี และให้ค่าความร้อนในระดับที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการเป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตพลังงานความร้อน ไอน้ำหรือผลิตกระแสไฟฟ้าได้ ซึ่งการนำเชื้อเพลิงชีวมวลมาใช้จะช่วยลดค่าใช้จ่ายในการนำเข้าเชื้อเพลิงและสามารถสร้างรายได้ให้กับคนในท้องถิ่นหรือเกษตรกรได้ ซึ่งกระทรวงพลังงานได้ทำแผนพัฒนาพลังงานทดแทน 15 ปี ในการพัฒนาพลังงานทดแทนด้านต่างๆ ให้สามารถผลิตไฟฟ้ารวมสะสมถึงปี 2565 จำนวน 5,604 เมกะวัตต์ โดยในจำนวนพลังงานทดแทนทั้งหมดจะผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงชีวมวลมากที่สุดคือ 3,700 เมกะวัตต์ ซึ่งช่วยยืนยันความสำคัญของการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลได้อย่างดี

ปัจจุบันประเทศไทยมีการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลในการผลิตพลังงานความร้อนและไฟฟ้าอย่างแพร่หลาย ตั้งแต่ระบบขนาดเล็กจนถึงระดับโรงไฟฟ้า โดยการเปลี่ยนชีวมวลเป็นพลังงานจะมีระบบหลักๆอยู่ 4 ระบบ คือ 1. การเผาไหม้โดยตรง (Direct-Fired) 2. การเผาไหม้โดยเชื้อเพลิงสองชนิดขึ้นไป (Co-Firing) 3. การผลิตก๊าซเชื้อเพลิง (Gasification) และ 4. ไพโรไลซิส (Pyrolysis) ซึ่งการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงส่วนใหญ่จะใช้ระบบการเผาไหม้โดยตรง โดยนำเชื้อเพลิงชีวมวลมาเผาไหม้ใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หม้อไอน้ำ (Boiler) และผ่านกระบวนการต่างๆจนเกิดเป็นพลังงานไฟฟ้า ในโรงไฟฟ้าถ่านหินหลายแห่งมีการนำระบบเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลร่วมกับถ่านหิน เพื่อเป็นการลดการปล่อยมลพิษ



รูปที่ 2.1 เทคโนโลยีการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงชีวมวล

## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้เชื้อเพลิงชีวมวล

Georg และคณะ [6] ทำการทดลองกับหม้อไอน้ำแบบใช้เชื้อเพลิงหลายชนิดขนาด 200 กิโลวัตต์ เพื่อไม่ให้เกิดตะกรันและลดการปล่อย NOx โดยจะใช้ความเข้มข้นของออกซิเจนต่ำใน Fixed-bed และ เพิ่มอากาศสองครั้งรวมถึงใช้การหมุนเวียนของก๊าซไอเสีย ผลที่ได้คือ ตะกรันลดลง การปลดปล่อย NOx สำหรับเชื้อเพลิง ชีวมวล เศษไม้ ไม้อัดแท่ง และถ่านอัดแท่ง ลดลง 39%, 40% และ 45% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับเตาเผาขนาดเล็กทั่วไป

Wang และคณะ [7] ทำการทดสอบการเผาไหม้ร่วมถ่านหินและชีวมวลในหม้อไอน้ำขนาด 300 เมกะวัตต์ โดยเชื้อเพลิงที่ใช้คือฟางข้าว โดยใช้อัตราส่วนของชีวมวลอยู่ที่ 16.1% จากผลการวิจัย ในระหว่างกระบวนการเผาไหม้ร่วมของชีวมวล เปลวไฟที่บริเวณหัวเผาจะคงที่ แต่อุณหภูมิบริเวณทางออกจะลดลง จำนวนคาร์บอนจากการเผาลอยไม่ถูกเผาไหม้จะเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับการเผาถ่านหินเพียงอย่างเดียว และการปล่อย NOx ลดลง โดยจากการทดลองป้อนชีวมวล 24 ตันต่อชั่วโมง พบว่าการปล่อย NOx จะลดลงประมาณ 10%

ราชภัฏ ไชยโย [8] ได้ทำการประเมินทางเศรษฐศาสตร์จากการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลทดแทนเชื้อเพลิงถ่านหิน และศึกษาพฤติกรรมกรรมการเผาไหม้ โดยเชื้อเพลิงชีวมวลจะผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันแบบบดละเอียด จากการศึกษาพบว่าเมื่อกระบวนการทอรีแฟคชันรุนแรงขึ้นทำให้อุณหภูมิในการเผาไหม้เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากเชื้อเพลิงมีความชื้นต่ำ และมีความหนาแน่นสูง โดยพลังงานที่ได้จากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเผาไหม้เพิ่มขึ้นจากชีวมวลธรรมดา 40.1 % และจากการเผาไหม้ที่ดีขึ้นทำให้การปลดปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ 92.6 % ในส่วนของต้นทุนต่อพลังงาน เชื้อเพลิงชีวมวลทอรีแพคชั้นมีค่าใช้จ่ายน้อยกว่าเชื้อเพลิงถ่านหิน 38.5 %

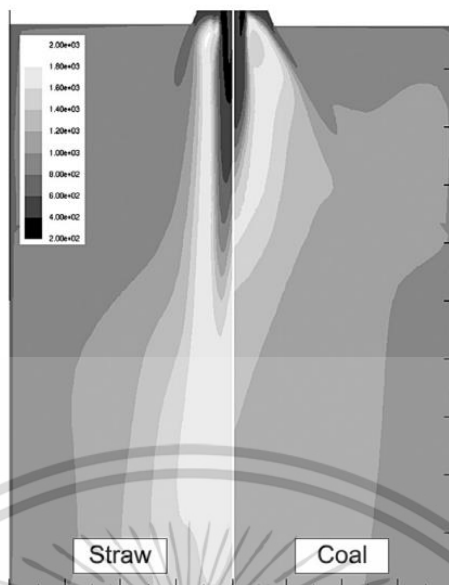
Chen และคณะ [9] ทำการประเมินการปรับปรุงคุณสมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวลบด เมื่อผ่านกระบวนการทอรีแพคชั้น โดยจะพิจารณาเชื้อเพลิงสามชนิดคือ ไม้ไผ่ ต้นไทร และไม้วิลโลว์ ผลลัพธ์บ่งชี้ว่าที่อุณหภูมิทอรีแพคชั้น 230 และ 260 องศาเซลเซียส การสูญเสียน้ำหนักของมวลชีวภาพจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่ออุณหภูมิทอรีแพคชั้นถึง 290 องศาเซลเซียส การสูญเสียน้ำหนักของชีวมวลมีแนวโน้มลดลงอย่างสม่ำเสมอ เพื่อชีวมวลผ่านกระบวนการทอรีแพคชั้นจะทำให้ค่าความร้อนเพิ่มขึ้น การกระจายตัวของชีวมวลดีขึ้น ทำให้การป้อนเชื้อเพลิงง่ายขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการใช้งานของหม้อไอน้ำเพิ่มขึ้น

### 2.3 งานวิจัยที่ใช้ CFD มาใช้ในการจำลอง

Ruben และคณะ [10] ได้ทำการจำลองการเผาไหม้ร่วมถ่านหินและชีวมวลของหม้อน้ำขนาด 150 เมกะวัตต์ เพื่อลดการปล่อย CO<sub>2</sub> โดยใช้แบบจำลองของไหลเชิงคำนวณ (CFD) มาช่วยในการทำนายประสิทธิภาพของหม้อน้ำ เชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้ผสมคือขี้เลื่อยสน โดยอัตราส่วนผสมของชีวมวลในแต่ละหัวเผาคือ 5% จำนวน 4 หัวเผา ผลที่ได้คือ CO และ SO<sub>2</sub> ลดลง การถ่ายเทความร้อนลดลงเล็กน้อย (6%) และจากการผสมเชื้อเพลิงชีวมวลในปริมาณน้อยสามารถปรับปรุงกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงและประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำได้

Muhammad และคณะ [11] ทำการใช้ CFD ในการศึกษาการเผาไหม้ร่วมของกะลาปาล์มและถ่านหินของหม้อน้ำขนาด 300 เมกะวัตต์ โดยทำการจำลองส่วนผสมของกะลาปาล์มที่แตกต่างกันคือ 0%, 10%, 15%, 25% และ 50% ผลที่ได้คือ ที่อัตราส่วน 25% มีการเผาไหม้ดีที่สุด แต่เกิดค่า NO<sub>x</sub> มาก เงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดจึงอยู่ที่อัตราส่วน 10%-15%

Mando และคณะ [12] ได้จำลองการเผาไหม้ด้วยวิธี CFD ในการเปรียบเทียบระหว่างถ่านหินบดและฟาง เพื่อตรวจสอบความแตกต่างของลักษณะการเผาไหม้ ซึ่งจะมุ่งเน้นไปที่การสร้างแบบจำลองเพื่อจัดการอนุภาคของฟางที่ไม่ใช่ทรงกลม โดยกำหนดเงื่อนไขต่างๆ อาทิเช่น อัตราการสลายตัว ปรับเปลี่ยนการเคลื่อนที่ของอนุภาค เงื่อนไขขอบเขตที่ทางเข้า เป็นต้น โดยผลที่ได้คือ การเผาไหม้ของฟางมีเปลวไฟที่ยาวกว่าถ่านหินอย่างเห็นได้ชัด ดังรูปที่ 2.2

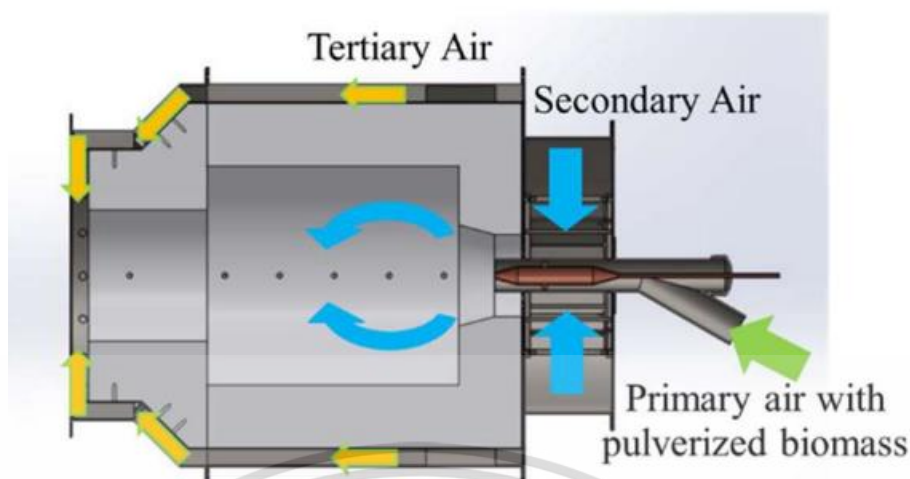


รูปที่ 2.2 รูปทรงของอุณหภูมิ (K)

Masaya และคณะ [13] ทำการจำลองการไหลวนขนาดใหญ่ (Large-eddy simulation: LES) ของการเผาไหม้ถ่านหินในระบบหลายหัวเผาและมีการผสมถ่านหินสองชนิด โดยในการทำแบบจำลอง LES จะทำให้จับการหมุนวนขนาดเล็กได้ ทำให้สามารถเห็นการกระจายตัวแบบละเอียดได้ โดยจากผลการวิจัยพบว่าออกซิเจนถูกใช้ไปอย่างรวดเร็ว และ NO<sub>x</sub> ใกล้เคียงกับหัวเผาสดลง และการเผาไหม้คาร์บอนของหัวเผาด้านบนดีขึ้น เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้ถ่านหินนานขึ้น ซึ่งในงานวิจัยอื่นๆ ก็มีการใช้การจำลองแบบ LES เพื่อดูการไหลวนแบบละเอียด ไม่ว่าจะเป็นการใช้เชื้อเพลิงถ่านหิน [14-17] หรือการใช้ torrefied biomass [18]

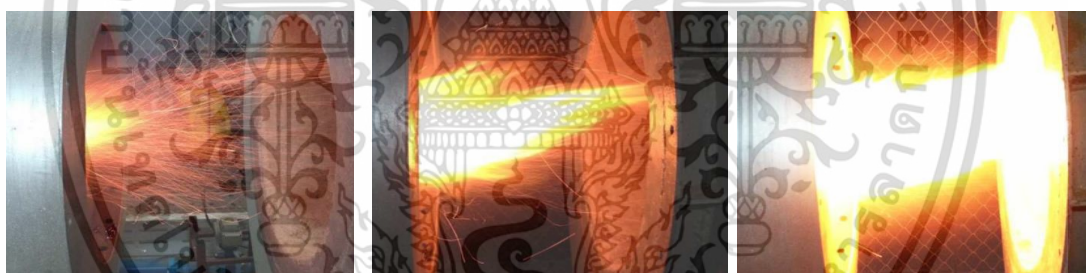
#### 2.4 การพัฒนาหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวล

หัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดผงของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากสำนักงานวิจัยแห่งชาติ และโครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรมภายใต้กองสนับสนุนงานวิจัย ในการออกแบบและสร้างหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลสำหรับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก



รูปที่ 2.3 ลักษณะหัวเผาและการไหลของอากาศในห้องเผาไหม้ช่วย

ในการพัฒนาช่วงแรก ชินภัทร ชูระการ [19] ได้ทำการศึกษาขนาดของอนุภาคเชื้อเพลิงชีวมวลผงที่ส่งผลต่อการเผาไหม้ โดยทำการศึกษาสามขนาดคือ 0.5, 1.0 และ 1.5 มิลลิเมตร พบว่าที่ขนาด 0.5 มิลลิเมตร สามารถรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟในห้องเผาไหม้ช่วยไว้ได้



1.5 มิลลิเมตร

1.0 มิลลิเมตร

0.5 มิลลิเมตร

รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะของเปลวไฟจากการเผาไหม้ขนาด 1.5, 1.0 และ 0.5 มิลลิเมตร

จากนั้น พงศนันท แกนพรม [20] ได้ทำการพัฒนาหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลด้วยการนำแผ่นขวางกั้นช่องการไหล (bluff body) และแผ่นบิด (swirl plate) มาใช้เพื่อทำให้การเผาไหม้มีความเสถียรมากขึ้นที่กำลังความร้อน 300 กิโลวัตต์ โดยวิธีการจำลองเชิงตัวเลข (CFD) และการทดลอง ซึ่งจะแบ่งการจำลองเป็นสองส่วนคือ กรณีพื้นฐานที่ไม่มีการติดตั้งแผ่นขวางการไหล และกรณีที่ติดตั้งแผ่นขวางการไหล จากผลการจำลองพบว่า การติดตั้งวัตถุขวางการไหลทำให้อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วยสูงกว่ากรณีพื้นฐาน มีการปลดปล่อยสารระเหยที่สูงกว่า และมีการกระจายตัวของอนุภาคขนาดใหญ่ไปที่บริเวณผนังห้องเผาไหม้ช่วยมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองที่พบว่ากรณีติดตั้งวัตถุขวางการไหลสามารถรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟไว้ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฉัตรเฉลิม แก้วขมภู [21] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของอุปกรณ์การสร้างการไหลหมุนควงแบบ คีปนาร์รองและวัตถุขวางการไหลต่อการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวลที่กำลังความร้อน 300 กิโลวัตต์ โดยการทดลองและใช้การจำลองเชิงตัวเลขในการเปรียบเทียบการเผาไหม้ระหว่างการใช้งานอุปกรณ์ สร้างการไหลแบบหมุนควงชนิดใบตรงที่ 100 องศา และใบโค้งที่ 70 และ 85 องศา และทำการ เปรียบเทียบการเผาไหม้ของระยะห่างของวัตถุขวางการไหลที่ห่างจากปากหัวพ่นเชื้อเพลิงชีวมวลผง 10 และ 20 มิลลิเมตร จากการทดลองพบว่าการติดตั้งวัตถุขวางการไหลที่ 10 มิลลิเมตร และปรับ แผ่นบังคับทิศทางการไหลแบบตรงที่ 100 องศา และชนิดใบโค้งที่มุม 70 องศา ไม่สามารถสร้าง กระแสการไหลแบบหมุนวนที่รุนแรงทำให้การเผาไหม้ไม่เสถียร ส่วนมุมโค้ง 85 องศา สามารถ กระจายเชื้อเพลิงให้ผสมกับลมทุติยภูมิทำให้อุณหภูมิกระจายตัวทั่วทั้งห้องเผาไหม้ช่วย ในส่วนของการ ติดตั้งวัตถุขวางการไหลที่ 20 มิลลิเมตร และแผ่นบังคับการไหล 85 องศา ส่งผลให้ขนาดพื้นที่ ทางออกของหัวพ่นเชื้อเพลิงใหญ่ขึ้น อุณหภูมิใกล้ผนังสูงกวาระยะ 10 มิลลิเมตร และในเงื่อนไข เดียวกันจากการจำลองพบว่าที่การติดตั้งวัตถุขวางการไหล 10 มิลลิเมตร ร่วมกับแผ่นบังคับทิศ ทางการไหลแบบตรง 100 องศา ใบโค้ง 75 องศา และ 85 องศา ให้ตัวเลขการหมุนควง 0.84, 0.74 และ 1.48 ตามลำดับ และในกรณีเพิ่มระยะของวัตถุขวางการไหลเป็น 20 มิลลิเมตร ทำให้อุณหภูมิ เคลื่อนที่ในห้องเผาไหม้ช่วยนานขึ้น อุณหภูมิใกล้ผนังจึงสูงขึ้น ซึ่งจากผลการจำลองที่ได้จะมีความ ใกล้เคียงกับการทดลองซึ่งช่วยยืนยันได้ว่าผลการจำลองมีความน่าเชื่อถือ

## บทที่ 3

# ทฤษฎีในการคำนวณและการสอบเทียบแบบจำลอง

### 3.1 ทฤษฎีในการคำนวณ

ในการจำลองจะใช้วิธีคำนวณแบบพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics: CFD) โดยใช้โปรแกรม Ansys Fluent ซึ่งภายในตัวโปรแกรมจะมีสมการที่ใช้ในการคำนวณเป็นจำนวนมากเพื่อให้ได้ผลการจำลองที่มีความแม่นยำ เช่น สมการความต่อเนื่อง สมการการไหลแบบปั่นป่วน สมการความไม่ต่อเนื่อง เป็นต้น

#### 3.1.1 สมการความต่อเนื่อง [21, 22]

สมการความต่อเนื่องเป็นสมการหลักที่ใช้ในการจำลองลักษณะการไหลภายในโมเดล โดยจะมีการแก้ไขทั้งสมการอนุรักษ์มวลและสมการอนุรักษ์โมเมนตัม สำหรับการไหลที่มีการถ่ายเทความร้อนจะใช้สมการอนุรักษ์พลังงานในการคำนวณ สำหรับการไหลที่มีการผสมกันของสปีชีส์หรือมีการทำปฏิกิริยากันจะใช้สมการอนุรักษ์สปีชีส์ในการคำนวณ และเมื่อมีการไหลแบบปั่นป่วนจะใช้สมการการถ่ายโอนมาคำนวณ ซึ่งสมการต่าง ๆ สามารถอธิบายโดยสมการของออยเลอร์ (Euler Equation) ดังนี้

##### 3.1.1.1 สมการอนุรักษ์มวล

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (3.1)$$

สมการที่ 3.1 เป็นรูปแบบทั่วไปของสมการการอนุรักษ์มวล สามารถใช้ได้ทั้งของไหลที่อัดตัวได้และอัดตัวไม่ได้ โดยที่  $S_m$  คือมวลที่เพิ่มเข้าไปในช่วงที่มีความต่อเนื่อง สำหรับสมการความต่อเนื่องของเรขาคณิตเชิงสมมาตรตามแกน 2 มิติ จะเป็นไปตามสมการที่ 3.2

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial r}(\rho v_r) + \frac{\rho v_r}{r} = S_m \quad (3.2)$$

โดยที่  $x$  คือ พิกัดในแนวแกน

$r$  คือ พิกัดในแนวรัศมี

$v_x$  คือ ความเร็วในแนวแกน

$v_r$  คือ ความเร็วในแนวรัศมี

### 3.1.1.2 สมการอนุรักษ์โมเมนตัม

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla(\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (3.3)$$

สมการที่ 3.3 เป็นสมการอนุรักษ์โมเมนตัมแบบไม่มีความเร่ง

โดยที่  $p$  คือ ความดัน

$\rho \vec{g}$  คือ แรงโน้มถ่วงเนื่องจากน้ำหนัก

$\vec{F}$  คือ แรงกระทำภายนอก

$\bar{\tau}$  คือ เทนเซอร์ของความเค้น

เทนเซอร์ของความเค้นหาได้จากสมการที่ 3.4

$$\bar{\tau} = \mu[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I] \quad (3.4)$$

โดยที่  $\mu$  คือ ความหนืดของโมเลกุล

$I$  คือ หน่วยเทนเซอร์ และในเทอมที่สองของสมการด้านขวาคือผลของการขยายปริมาตร สำหรับสมการการอนุรักษ์โมเมนตัมตามแนวแกนและแนวรัศมีของเรขาคณิตเชิงสมมาตรตามแกน 2 มิติ จะเป็นไปตามสมการที่ 3.5 และ 3.6

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho v_x) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x}(r \rho v_x v_x) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v_r v_x) = -\frac{\partial p}{\partial x} \\ + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left[ r \mu \left( 2 \frac{\partial v_x}{\partial x} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{v}) \right) \right] \\ + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \mu \left( \frac{\partial v_x}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial x} \right) \right] + F_x \quad (3.5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x}(r \rho v_x v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v_r v_r) = -\frac{\partial p}{\partial r} \\ + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left[ r \mu \left( \frac{\partial v_r}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial r} \right) \right] \\ + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \mu \left( 2 \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{v}) \right) \right] \\ - 2\mu \frac{v_r}{r^2} + \frac{2}{3} \frac{\mu}{r} (\nabla \cdot \vec{v}) + \rho \frac{v_z^2}{r} + F_r \quad (3.6) \end{aligned}$$

โดยที่  $\nabla \cdot \vec{v} = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r}$

$v_z$  คือ ความเร็วการหมุนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.1.3 สมการอนุรักษ์พลังงาน

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot \left( k_{eff} \nabla T - \sum_q \sum_j h_{j,q} \vec{J}_{j,q} + (\vec{\tau}_{eff} \cdot \vec{v}) \right) + S_h \quad (3.7)$$

สมการที่ 3.7 เป็นสมการในการถ่ายโอนพลังงานระหว่างเฟส

โดยที่  $k_{eff}$  คือ ค่า effective conductivity

$h_{j,q}$  คือ เอนทาลปีของสปีชีส์  $j$  ในเฟสของ  $q$

$\vec{J}_{j,q}$  คือ ฟลักซ์การแพร่ของสปีชีส์  $j$  ในเฟสของ  $q$

$E$  คือ ความร้อนจำเพาะ

$S_h$  คือ แหล่งความร้อนเชิงปริมาตรจากปฏิกิริยาเคมี

สามารถหา  $S_h$  ได้จากสมการที่ 3.8

$$S_h = - \sum_j \frac{h_j^0}{M_j} \mathcal{R}_j \quad (3.8)$$

โดยที่  $h_j^0$  คือ เอนทาลปีก่อกำเนิดของสปีชีส์  $j$

$\mathcal{R}_j$  คือ อัตราการเกิดโดยปริมาตรของสปีชีส์  $j$

### 3.1.2 แบบจำลองการไหลปั่นป่วน

ในงานเชิงวิศวกรรมบางงาน ความปั่นป่วนของการไหลเป็นสิ่งที่จำเป็นต้องการให้มีการผสมกันระหว่างของไหลที่ใช้ระยะเวลาที่สั้น เช่น การผสมกันระหว่างสารระเหยของเชื้อเพลิงกับอากาศภายในห้องเผาไหม้ เพื่อลดความสูญเสียของพลังงาน ซึ่งความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นในของไหลควรได้รับการจัดสรรให้เหมาะสมตามเป้าหมายของการออกแบบอุปกรณ์การคำนวณ เพื่อให้ทราบลักษณะของความปั่นป่วนด้วยวิธีการเชิงตัวเลขในลักษณะต่าง ๆ ซึ่งเป็นสิ่งที่พบอยู่มากในงานวิจัยทางด้านวิศวกรรมของไหล โดยสามารถจำแนกวิธีการเชิงตัวเลขออกเป็นกลุ่มหลัก ๆ ได้ดังนี้

แบบจำลองเพื่อใช้หาค่าเฉลี่ยของคุณสมบัติความปั่นป่วนที่อยู่ในสมการ เรย์โนลด์นาเวียร์-สโตกส์เฉลี่ย (Reynolds-Averaged Navier-Stokes equation; RANS) เป็นวิธีการคำนวณโดยแก้สมการนาเวียร์-สโตกส์ของกระแสการไหลเฉลี่ย ซึ่งจะมีตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับความปั่นป่วนแฝงอยู่ โดยพจน์ที่เกี่ยวข้องกับความปั่นป่วนจะถูกอธิบายด้วยสมการควบคุมคือ Mixing length model และแบบจำลอง k-ε ซึ่งมีสมการพลังงานจลน์แบบปั่นป่วน (Turbulent kinetic energy; k) และสมการอัตราการสลายตัวของพลังงานจลน์แบบปั่นป่วน (Turbulent energy dissipation rate; ε) โดยคำตอบของสมการชุดนี้จะนำมาใช้หาค่าคุณสมบัติความปั่นป่วนภายใต้สมมุติฐานอย่างง่าย ซึ่งใช้ทรัพยากรในการคำนวณไม่มาก จึงเป็นที่นิยมกันอย่างแพร่หลาย

Large Eddy Simulation (LES) เป็นวิธีการจำลองความปั่นป่วน โดยจับการเคลื่อนที่ของการหมุนวนขนาดย่อมด้วยการแก้สมการนาเวียร์-สโตกส์แบบไม่คงที่ ที่มีการถ่ายโอนโมเมนตัมไปสู่กระแสนวนขนาดเล็ก ซึ่งอิทธิพลของกระแสนวนขนาดเล็กที่มีต่อกระแสนวนขนาดย่อมนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะถูกจำลองด้วยแบบจำลองที่เรียกว่า Sub-grid scale model (SGS) เนื่องจากเป็นแบบจำลองที่ใช้อธิบายกระแสมุขขนาดเล็กลงกว่าขนาดของเซลล์ และมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นในคาบเวลาที่กำหนดขึ้นในการคำนวณ โดยในการแก้ไขสมการแบบไม่คงที่นี้จะใช้ทรัพยากรอย่างมากในการคำนวณ

Direct Numerical Simulation (DNS) การคำนวณนี้จะทำการเก็บรายละเอียดการหมุนวนจนถึงระดับที่มีขนาดเล็กที่สุด ด้วยการกำหนดขนาดของปริมาตรควบคุมและคาบเวลาให้เล็กเพียงพอที่จะเห็นการเกิดขึ้นและสลายไปของกระแสมุขทุกระดับ โดยทำการแก้ไขสมการนาเวียร์-สโตกส์แบบไม่คงที่แบบ 3 มิติ ซึ่งจะใช้ทรัพยากรในการคำนวณสูงมาก จึงไม่เหมาะกับการนำไปใช้ในปัญหาการไหลทางวิศวกรรมที่มีความซับซ้อนและมีขนาดใหญ่

โดยในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะทำการศึกษา แบบจำลอง k-ε ชนิดมาตรฐาน ในการจำลองทุกเงื่อนไข และแบบจำลองการปั่นป่วนขนาดใหญ่ (Large Eddy Simulation; LES) ในการจำลองท่อปฐมภูมิตั้งเดิม

### 3.1.2.1 แบบจำลอง k-ε ชนิดมาตรฐาน

เป็นแบบจำลองความปั่นป่วนที่ใช้สมการการถ่ายโอนสองสมการคือ การถ่ายโอนพลังงานจลน์แบบปั่นป่วน (Turbulence kinetic energy; k) และอัตราการสลายตัวของพลังงานจลน์แบบปั่นป่วน (rate of dissipation; ε) ซึ่งจะใช้ในการคำนวณกระแสการไหลแบบปั่นป่วน ณ ช่วงเวลาหนึ่ง โดยค่า k และ ε สามารถหาได้จากสมการที่ 3.9 และ 3.10

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (3.10)$$

โดยที่  $G_k$  คือ การก่อกำเนิดของพลังงานจลน์แบบปั่นป่วนเนื่องจากความชันของความเร็วเฉลี่ย

$G_b$  คือ การก่อกำเนิดของพลังงานจลน์แบบปั่นป่วนเนื่องจากแรงลอยตัว

$Y_M$  คือ ความผันผวนในการขยายตัวของความปั่นป่วนแบบอัดตัวได้อัตราการกระจายตัว

โดยรวม

$C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$  คือ ค่าคงที่มีค่าเท่ากับ 1.44 และ 1.92 ตามลำดับ และค่า  $C_{3\varepsilon}$  สามารถหาได้ตั้งสมการที่ 3.11

$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$  คือ ตัวเลข Prandtl ของ k และ ε มีค่าเท่า 1 และ 1.3 ตามลำดับ

$S_k, S_\varepsilon$  คือ เทอมของการก่อกำเนิด

$$C_{3\varepsilon} = \tanh \left| \frac{v}{u} \right| \quad (3.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $v$  คือ ความเร็วตามแนวแรงโน้มถ่วง

$u$  คือ ความเร็วตั้งฉากกับแรงโน้มถ่วง

ซึ่งค่า  $C_{3\epsilon}$  จะเท่ากับ 1 เมื่อทิศทางการไหลหลักของชั้นแรงเฉือนลอยตัวมีทิศเดียวกับแรงโน้มถ่วง และจะเท่ากับ 0 เมื่อมีทิศตั้งฉากกับแรงโน้มถ่วง

สำหรับค่าความหนืดปั่นป่วน  $\mu_t$  สามารถหาได้จากสมการที่ 3.12

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (3.12)$$

โดยที่  $C_\mu$  คือ ค่าคงที่มีค่าเท่ากับ 0.09

### 3.1.2.2 แบบจำลองการปั่นป่วนขนาดใหญ่ (Large Eddy Simulation; LES)

แม้ว่าแบบจำลอง RANS จะได้รับการพัฒนามาหลายปี เพื่อใช้จำลองการไหลในทางวิศวกรรมทั่วไปและสามารถประยุกต์ใช้ได้หลากหลาย แต่ผลของสนามความเร็วมักจะทำให้ภาพที่แตกต่างจากพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงในการทดลอง เนื่องจากพฤติกรรมที่แตกต่างกันอย่างมาของกระแสการหมุนวนขนาดใหญ่กับขนาดเล็ก โดยในกระแสการหมุนวนขนาดเล็กจะมีพฤติกรรมแบบไอโซโทรปิก แต่กระแสการหมุนวนปั่นป่วนขนาดใหญ่มีความเกี่ยวข้องกับกระแสการไหลหลักโดยตรงนั้นมีความไม่เป็นไอโซโทรปิกอยู่สูง และพฤติกรรมการไหลจะถูกกำหนดโดยโครงสร้างของการไหลหลักและแรงต่างๆที่กระทำต่อมวลของของไหล โดยจะคำนวณการไหลปั่นป่วนขนาดใหญ่ด้วยสมการนาเวียร์-สโตกส์แบบไม่คงที่ ในขณะที่กระแสปั่นป่วนขนาดเล็กจะถูกจำลองด้วยแบบจำลอง SGS โดยในแบบจำลอง SGS จะใช้สมมติฐานของ Boussinesq ในการคำนวณความเค้น จะเป็นไปตามสมการที่ 3.13 และภายในแบบจำลอง SGS จะมีแบบจำลองย่อยอยู่ เช่น Smagorinsky-Lilly, WALE, WMLES S-Omega เป็นต้น ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะศึกษาเพียงแบบจำลองย่อย Wall-Adapting Local Eddy-Viscosity (WALE)

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} = -2\mu_t \bar{S}_{ij} \quad (3.13)$$

โดยที่  $\bar{S}_{ij}$  คือ อัตราการเกิดความเค้นเทนเซอร์ สามารถหาได้จากสมการที่ 3.14

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.14)$$

ซึ่งในแบบจำลองย่อยแบบ WALE จะสามารถหาค่าความหนืดปั่นป่วน ( $\mu_t$ ) ได้จากสมการที่ 3.15

$$\mu_t = \rho L_s^2 \frac{(S_{ij}^d S_{ij}^d)^{3/2}}{(S_{ij}^d \bar{S}_{ij})^{5/2} + (S_{ij}^d S_{ij}^d)^{5/4}} \quad (3.15)$$

โดยที่  $L_s$  และ  $S_{ij}^d$  ในแบบจำลอง WALE สามารถหาได้จากสมการที่ 3.16 และ 3.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$L_s = \min(\kappa d, C_w V^{1/3}) \quad (3.16)$$

$$S_{ij}^d = \frac{1}{2}(g_{ij}^{-2} + g_{ji}^{-2}) - \frac{1}{3}\delta_{ij} g_{kk}^{-2} \quad (3.17)$$

โดยที่  $\bar{g}_{ij} = \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}$

$\kappa$  คือ ค่าคงที่ของคาร์มาน มีค่าเท่ากับ 0.41

$C_w$  คือ ค่าคงที่ของแบบจำลอง WALE โดยใน Ansys Fluent มีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 0.325

### 3.1.3 แบบจำลองการแผ่รังสี (Radiation Model)

แบบจำลองการแผ่รังสีที่ใช้ใน Ansys Fluent มีอยู่ 6 แบบจำลองคือ Discrete Transfer Radiation Model (DTRM), P-1 Radiation Model, Rosseland Radiation Model, Surface-to-Surface (S2S) Radiation Model, Discrete Ordinates (DO) Radiation Model และ Monte Carlo (MC) Radiation Model โดยในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะศึกษาและนำเสนอเพียงแบบจำลองการแผ่รังสี DO

#### 3.1.3.1 แบบจำลองการแผ่รังสี Discrete Ordinate (DO)

การแผ่รังสีความร้อนของอนุภาคสู่อีกอนุภาค ความร้อนที่แผ่ออกมาจะขึ้นอยู่กับมุมที่แผ่รังสีออกมาจากอนุภาค ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีและความถี่ เมื่ออนุภาคแผ่รังสีไปยังอีกอนุภาคหนึ่ง ความร้อนที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับมุมตกกระทบและการดูดซับรังสีที่มีค่าเปลี่ยนไปตามระยะห่างของอนุภาค ซึ่งแบบจำลองการแผ่รังสีแบบไม่ต่อเนื่อง (DO) จะแก้สมการการถ่ายโอนรังสี (Radiative Transfer Equation; RTE) สำหรับมุมการแผ่รังสีแบบไม่ต่อเนื่อง ซึ่งเกี่ยวข้องกับเวกเตอร์ในระบบพิกัดคาที่เขียน โดยสมการที่ใช้ในการจำลองดังสมการที่ 3.18

$$\nabla \cdot (I(\vec{r}, \vec{s}) \vec{s}) + (a + \sigma_s) I(\vec{r}, \vec{s}) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} (I(\vec{r}, \vec{s}') \vec{s}') \Phi(\vec{s} \cdot \vec{s}') d\Omega' \quad (3.18)$$

โดยที่  $\vec{r}$  คือ พิกัดของเวกเตอร์

$\vec{s}$  คือ ทิศทางของเวกเตอร์

$\vec{s}'$  คือ เวกเตอร์ของการกระจายตัว

$s$  คือ ความยาวของเส้นทางเดิน

$a$  คือ สัมประสิทธิ์การดูดซึม

$n$  คือ ดัชนีการหักเหของแสง

$\sigma_s$  คือ สัมประสิทธิ์การกระเจิง

$\sigma$  คือ ค่าคงที่ของ Stefan-Boltzmann มีค่าเท่ากับ  $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$

$I$  คือ ความเข้มของรังสี

$T$  คือ อุณหภูมิตั้งเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\Phi$  คือ เฟสฟังก์ชัน

$\Omega'$  คือ มุมตกกระทบ

### 3.1.4 Discrete Phase Models

สมการถ่ายโอนของแบบจำลองแบบเฟสไม่ต่อเนื่อง (DPM) จะเป็นไปตามสมการ Lagrange โดยจะคำนึงถึงแรงต้านพลศาสตร์ แรงเฉื่อยจากความไม่ต่อเนื่อง แรงโน้มถ่วง ผลกระทบจากการไหลปั่นป่วนในส่วนของการเผาไหม้อนุภาคเชื้อเพลิง จะมีการคำนวณการปลดปล่อยสารระเหย และการเผาไหม้ถ่านชาร์

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

การคาดการณ์การเคลื่อนที่ของอนุภาคแบบเฟสไม่ต่อเนื่อง โดยทำสมดุลแรงของอนุภาค ซึ่งอ้างอิงจากสมการ Lagrange เป็นไปตามสมการที่ 3.19

$$m_p \frac{d\vec{u}_p}{dt} = m_p \frac{\vec{u} - \vec{u}_p}{\tau_r} + m_p \frac{g(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \vec{F} \quad (3.19)$$

โดยที่  $m_p$  คือ มวลอนุภาค  
 $\vec{u}$  คือ ความเร็วของเฟสของไหล  
 $\vec{u}_p$  คือ ความเร็วของอนุภาค  
 $\rho$  คือ ความหนาแน่นของของไหล  
 $\rho_p$  คือ ความหนาแน่นของอนุภาค  
 $\vec{F}$  คือ แรงกระทำที่เพิ่มเข้ามา  
 $m_p \frac{\vec{u} - \vec{u}_p}{\tau_r}$  คือ แรงเฉื่อยที่เกิดขึ้นจากอนุภาค  
 $\tau_r$  คือ เวลาที่อนุภาคใช้เร่งความเร็ว

ซึ่ง  $\tau_r$  สามารถหาได้จากสมการที่ 3.20

$$\tau_r = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu C_d \text{Re}} \quad (3.20)$$

โดยที่  $\mu$  คือ ความหนืดโมเลกุลของของไหล

$d_p$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค

ซึ่ง Re สามารถหาได้จากสมการที่ 3.19

$$\text{Re} = \frac{\rho d_p |\vec{u}_p - \vec{u}|}{\mu} \quad (3.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.4.2 แบบจำลอง Discrete Random Walk (DRW)

แบบจำลองเส้นทางเดินแบบสุ่มแบบไม่ต่อเนื่อง (DRW) หรือ eddy lifetime จะเป็นการเชื่อมโยงอนุภาคในกระแสการไหลแบบปั่นป่วน ด้วยความเร็วของการกระจายแบบสุ่มในแต่ละแกนความเร็ว ซึ่งความผันผวนของความเร็วแบบสุ่มสามารถอธิบายด้วยฟังก์ชันของ Gaussian ตามสมการที่ 3.22

$$u' = \zeta \sqrt{u'^2} \quad (3.22)$$

โดยที่  $\zeta$  คือ การกระจายตัวแบบสุ่ม

ค่าความผันผวนของความเร็วเนื่องจากพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนในแต่ละจุดของการไหล โดยค่าความผันผวนของความเร็วสามารถประมาณได้ดังสมการที่ 3.23

$$\sqrt{u'^2} = \sqrt{v'^2} = \sqrt{w'^2} = \sqrt{2k/3} \quad (3.23)$$

### 3.1.4.2 Rosin-Rammler Diameter Distribution

ใช้สำหรับอธิบายการกระจายตัวของอนุภาค ซึ่งจะแบ่งออกเป็นช่วงขนาด 3 ขนาดคือ อนุภาคขนาดเล็กที่สุด อนุภาคขนาดเฉลี่ยจากอนุภาคทั้งหมด และอนุภาคขนาดใหญ่ที่สุด และนำมาใช้คำนวณ mass fraction ตามสมการที่ 3.24

$$Y_d = e^{-(d/\bar{d})^n} \quad (3.24)$$

โดยที่  $d$  คือ ขนาดอนุภาคที่พิจารณา

$\bar{d}$  คือ ขนาดอนุภาคเฉลี่ย

$n$  คือ Spread Parameter

### 3.1.5 การแลกเปลี่ยนโมเมนตัม

การถ่ายโอนโมเมนตัมจากเฟสต่อเนื่องไปยังเฟสไม่ต่อเนื่อง โดยตรวจสอบโมเมนตัมผ่านที่ผ่านปริมาตรควบคุม ดังสมการที่ 3.25

$$F = \sum \left( \frac{18\mu C_d \text{Re}}{24\rho_p d_p^2} (u_p - u) + F_{\text{other}} \right) \dot{m}_p \Delta t \quad (3.25)$$

โดยที่  $\mu$  คือ ความหนืดของของไหล

$\rho_p$  คือ ความหนาแน่นของอนุภาค

$d_p$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค

$u_p$  คือ ความเร็วของอนุภาค

$u$  คือ ความเร็วของของไหล

$C_D$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน

$\dot{m}_p$  คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอนุภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\Delta t$  คือ time step

$F_{other}$  คือ แรงกระทำอื่นๆ

### 3.1.6 การแลกเปลี่ยนความร้อน

การถ่ายเทความร้อนจากเฟสต่อเนื่องไปยังเฟสไม่ต่อเนื่อง จะถูกตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนของอนุภาคผ่านปริมาตรควบคุม และการแลกเปลี่ยนความร้อนจะถูกคำนวณตามสมการที่ 3.26

$$Q = \frac{\dot{m}_{p,0}}{m_{p,0}} \left[ (m_{p_{in}} - m_{p_{out}}) [-H_{lat_{ref}} + H_{pyrol}] - m_{p_{out}} \int_{T_{ref}}^{T_{p_{out}}} c_{p_p} dT + m_{p_{in}} \int_{T_{ref}}^{T_{p_{in}}} c_{p_p} dT \right] \quad (3.26)$$

โดยที่  $\dot{m}_{p,0}$  คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอนุภาคเริ่มต้น

$m_{p,0}$  คือ มวลอนุภาคเริ่มต้น

$m_{p_{in}}$  คือ มวลของอนุภาคเมื่อเข้าสู่เซลล์

$m_{p_{out}}$  คือ มวลของอนุภาคเมื่อออกจากเซลล์

$c_{p_p}$  คือ ค่าความจุความร้อนของอนุภาค

$H_{pyrol}$  คือ ค่าความร้อนของสารระเหย

$T_{p_{in}}$  คือ อุณหภูมิของอนุภาคเมื่อเข้าสู่เซลล์

$T_{p_{out}}$  คือ อุณหภูมิของอนุภาคเมื่อออกจากเซลล์

$T_{ref}$  คือ อุณหภูมิอ้างอิงของเอนทัลปี

$H_{lat_{ref}}$  คือ ความร้อนแฝงที่สภาวะอ้างอิง

### 3.1.7 การแลกเปลี่ยนมวล

การถ่ายโอนมวลจากเฟสแบบไม่ต่อเนื่องไปยังเฟสต่อเนื่อง จะตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงมวลของอนุภาคผ่านปริมาตรควบคุม โดยคำนวณการเปลี่ยนแปลงมวลตามสมการที่ 3.27 ซึ่งการแลกเปลี่ยนมวลนี้จะเป็นพจน์ของการก่อกำเนิดมวลในสมการความต่อเนื่องของการไหล

$$M = \frac{\Delta m_p}{m_{p,0}} \dot{m}_{p,0} \quad (3.27)$$

### 3.1.8 แบบจำลองการถ่ายโอนสปีชีส์

เป็นแบบจำลองที่ใช้คาดการณ์การผสมหรือการถ่ายโอนทางเคมี โดยใช้สมการการพาความร้อนแบบแพร่กระจายของสปีชีส์ และยังสามารถนำมาใช้กับการจำลองที่เกิดขึ้นใน Volumetric Reaction ได้

### 3.1.8.1 Volumetric Reactions

การจำลองที่เกิดขึ้นใน volumetric reactions จะทำการจำลอง mass fraction ของแต่ละสปีชีส์ ด้วยการแก้ไขสมการการพาความร้อนและการแพร่สปีชีส์ ดังสมการที่ 3.28

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{Y}_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + R_i + S_i \quad (3.28)$$

โดยที่  $R_i$  คือ อัตราการผลิตสปีชีส์สุทธิ  
 $S_i$  คือ อัตราการสร้าง  
 $\vec{J}_i$  คือ การแพร่กระจายของสปีชีส์

### 3.1.8.2 Eddy-Dissipation Model

ในสภาวะการเผาไหม้ เชื้อเพลิงจะถูกเผาไหม้อย่างรวดเร็ว และอัตราการเกิดปฏิกิริยาโดยรวมจะอยู่ภายใต้การควบคุมแบบปั่นป่วน ในการเผาไหม้แบบผสมก่อนที่สารตั้งต้นมีอุณหภูมิต่ำ ปฏิกิริยาเคมีจะเกิดจากความปั่นป่วนที่นำสารผลิตภัณฑ์ที่มีอุณหภูมิสูงมาช่วยทำปฏิกิริยา ในส่วนของการเผาไหม้แบบไม่ผสมก่อน กระแสการไหลของเชื้อเพลิงและอากาศจะทำปฏิกิริยาด้วยการผสมกันในบริเวณที่การไหลปั่นป่วน ในการจำลองแบบ Eddy-Dissipation อัตราการผลิตสปีชีส์สุทธิของแต่ละสปีชีส์จะเป็นไปตามสมการที่ 3.29 และ 3.30

$$R_{i,r} = (v''_{i,r} - v'_{i,r}) M_{w,i} A \rho \frac{\varepsilon}{k} \min_R \left( \frac{Y_R}{v'_{R,r} M_{w,R}} \right) \quad (3.29)$$

$$R_{i,r} = (v''_{i,r} - v'_{i,r}) M_{w,i} A B \rho \frac{\varepsilon}{k} \min_R \left( \frac{\sum_p Y_p}{\sum_j v''_{j,r} M_{w,j}} \right) \quad (3.30)$$

โดยที่  $Y_p$  คือ mass fraction ของสารผลิตภัณฑ์  
 $Y_R$  คือ mass fraction ของสารเริ่มต้น  
 $A$  คือ ค่าคงที่มีค่าเท่ากับ 4  
 $B$  คือ ค่าคงที่มีค่าเท่ากับ 0.5

## 3.1.9 แบบจำลองการเผาไหม้ของอนุภาค

### 3.1.9.1 Inert Heating or Cooling

กฎการให้ความร้อนหรือความเย็นแบบเฉื่อย จะนำมาใช้คำนวณเมื่ออุณหภูมิอนุภาคน้อยกว่าอุณหภูมิการกลายเป็นสารระเหย ซึ่งจะเป็นอุณหภูมิจุดระเหยเฉพาะของแต่ละอนุภาค และหลังจากสารระเหยปลดปล่อยออกมาจะสามารถเขียนสมการได้ดังสมการที่ 3.31 และ 3.32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T_p < T_{vap} \quad (3.31)$$

$$m_p \leq (1 - f_{v,0}) m_{p,0} \quad (3.32)$$

โดยที่  $T_p$  คือ อุณหภูมิอนุภาค  
 $m_{p,0}$  คือ มวลอนุภาคเริ่มต้น  
 $m_p$  คือ มวลอนุภาค

กฎข้อนี้จะนำมาใช้กับอนุภาคจนอนุภาคมีอุณหภูมิเข้าใกล้จุดระเหย และจากการทำสมดุลทางความร้อนที่เกี่ยวข้องกับอนุภาค  $T_p$  จะมีการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาความร้อน การดูดซับและการแผ่รังสีที่พื้นผิวของอนุภาคจะเป็นไปตามสมการที่ 3.33

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = h A_p (T_\infty - T_p) + \varepsilon_p A_p \sigma (\theta_R^4 - T_p^4) \quad (3.33)$$

โดยที่  $c_p$  คือ ค่าความจุความร้อนของอนุภาค  
 $A_p$  คือ พื้นที่ผิวของอนุภาค  
 $T_\infty$  คือ อุณหภูมิบริเวณเฟสต่อเนื่อง  
 $h$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน  
 $\varepsilon_p$  คือ ค่าการแผ่รังสีของอนุภาค  
 $\theta_R$  คือ ค่าการแผ่รังสีของอนุภาค  $\left(\frac{G}{4\sigma}\right)^{1/4}$   
 $G$  คือ รังสีตกกระทบ

### 3.1.9.2 การปลดปล่อยสารระเหย (Devolatization)

กฎการปลดปล่อยสารระเหยจะใช้กับอนุภาคที่เผาไหม้เมื่ออนุภาคของเชื้อเพลิงได้รับอุณหภูมิจนอนุภาคมีอุณหภูมิจุดที่ปลดปล่อยสารระเหย ( $T_{vap}$ ) และยังมีมวลอนุภาคที่หลงเหลืออยู่หลังจากที่ปลดปล่อยสารระเหยหมดแล้ว ซึ่งกระบวนการนี้จะเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิ  $T_p > T_{vap}$  และ  $T_p > T_{bp}$  และมวลของอนุภาค  $m_p > (1 - f_{v,0})(1 - f_{w,0})m_{p,0}$  โดยที่  $f_{w,0}$  คือ mass fraction ในการจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งโดยทั่วไปจะมีแบบจำลองการปลดปล่อยสารระเหยอยู่ 4 แบบคือ constant rate model, single kinetic rate, two competing rates และ chemical percolation devolatization (CPD) โดยในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะทำการศึกษาเพียงแบบจำลอง single kinetic rate ในการจำลอง

### 3.1.9.3 แบบจำลอง single kinetic rate

แบบจำลอง single kinetic rate มีสมมติฐานว่าเป็นอัตราการเกิดการเปลี่ยนแปลงอันดับแรกที่ขึ้นอยู่กับปริมาณของสารระเหยที่เหลืออยู่ในอนุภาคเป็นไปตามสมการที่ 3.34

$$-\frac{dm_p}{dt} = k [m_p - (1 - f_{v,0})(1 - f_{w,0})m_{p,0}] \quad (3.34)$$

โดยที่  $m_p$  คือ มวลอนุภาค (kg)

$f_{v,0}$  คือ mass fraction ของสารระเหยในอนุภาค

$f_{w,0}$  คือ mass fraction ของความชื้น

$m_{p,0}$  คือ มวลอนุภาคเริ่มต้น (kg)

$k$  คือ ค่าอัตราจลนพลศาสตร์ ( $s^{-1}$ )

ในส่วนของค่า kinetic rate ( $k$ ) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.35

$$k = Ae^{-(E_a/RT)} \quad (3.35)$$

การถ่ายเทความร้อนไปยังอนุภาคระหว่างกระบวนการปลดปล่อยสารระเหย รวมถึงมีการพาความร้อนและการแผ่รังสี และการนำความร้อนมาใช้ในการระเหยภายในเชื้อเพลิง ดังสมการที่ 3.36

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = hA_p (T_\infty - T_p) + A_p \epsilon_p \sigma (T_R^4 - T_p^4) \quad (3.36)$$

### 3.1.9.4 การเผาไหม้บริเวณผิว (Surface Combustion)

หลังจากกระบวนการปลดปล่อยสารระเหย จะเกิดการทำปฏิกิริยาบริเวณพื้นผิวด้วยการใช้เชื้อเพลิงบางแหล่งที่ใช้ mass fraction ของสารติดไฟ  $f_{comb}$  ของอนุภาคซึ่งปริมาณคาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบของเชื้อเพลิง โดยสมการสำหรับการเผาไหม้บริเวณพื้นผิวหลังการปลดปล่อยสารระเหยจนเริ่มมีการนำปริมาณสารติดไฟมาใช้ จะเป็นไปตามสมการที่ 3.37 และ 3.38

$$m_p < (1 - f_{v,0})(1 - f_{w,0})m_{p,0} \quad (3.37)$$

$$m_p > (1 - f_{v,0} - f_{comb})(1 - f_{w,0})m_{p,0} \quad (3.38)$$

ในโปรแกรมจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลจะมีแบบจำลองการเกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวสำหรับการเผาไหม้ต่างกัน 4 รูปแบบคือ diffusion-limited rate model, kinetics/diffusion-limited rate model, intrinsic model และ multiple surface reactions model โดยในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะทำการศึกษาเพียงแบบจำลอง kinetics/diffusion-limited rate

### 3.1.9.5 แบบจำลอง Kinetic/Diffusion Surface Reaction Rate

อัตราการเปลี่ยนแปลงของมวลอนุภาคในช่วงการเผาไหม้ถ่านชาร์สามารถหาได้จากสมการ

3.39

$$\frac{dm_p}{dt} = -A_p p_{ox} \frac{D_0 \mathcal{R}}{D_0 + \mathcal{R}} \quad (3.39)$$

โดยที่  $A_p$  คือ พื้นที่ผิว ( $m^2$ )  
 $p_{ox}$  คือ ความดันย่อย (Pa)  
 $D_0$  คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของ  $O_2$  ( $cm^2/s$ )  
 $\mathcal{R}$  คือ อัตราจลนพลศาสตร์

ซึ่งค่า  $D_0$  จะหาได้จากสมการที่ 3.40 และ  $\mathcal{R}$  หาได้จากสมการที่ 3.41

$$D_0 = C_1 \frac{[(T_p + T_\infty) / 2]^{0.75}}{d_p} \quad (3.40)$$

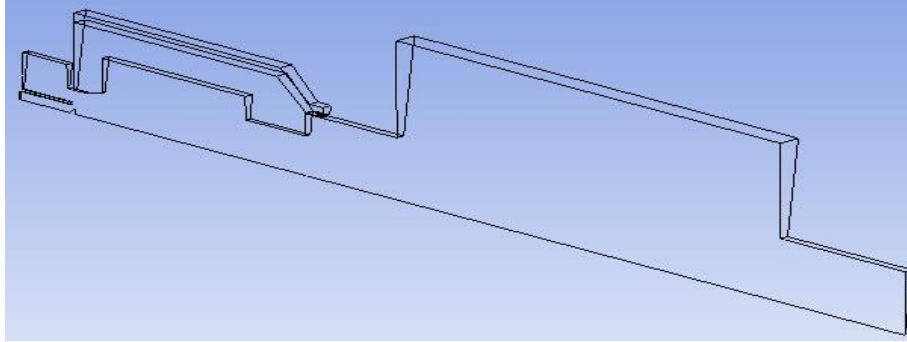
โดยที่  $T_p$  คือ อุณหภูมิของอนุภาค (K)  
 $T_\infty$  คือ อุณหภูมิของบรรยากาศ (K)  
 $d_p$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (m)

$$\mathcal{R} = C_2 e^{-(E_2 / RT_p)} \quad (3.41)$$

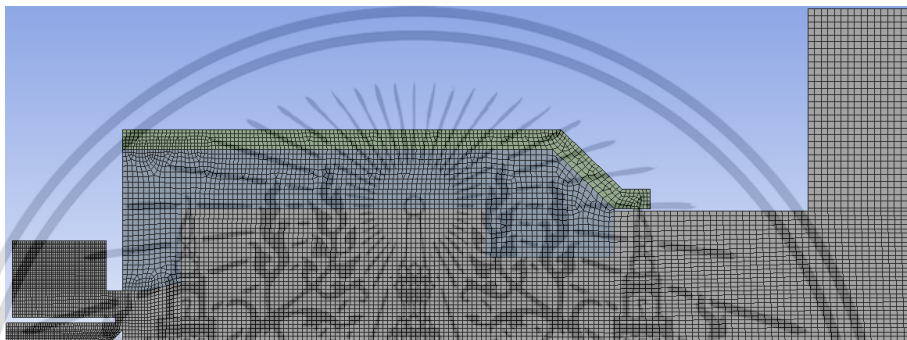
ก่อนที่จะทำการจำลอง ต้องทำการตรวจสอบความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง โดยการศึกษาผลกระทบของขนาดเมชที่เกิดขึ้นในการจำลอง และค่าพารามิเตอร์ของการจำลองที่มีผลต่อการเผาไหม้ เพื่อให้ได้การจำลองสอดคล้องกับผลการทดลอง โดยมีรายละเอียดดังนี้

### 3.2 การตรวจสอบความเป็นอิสระของเมช

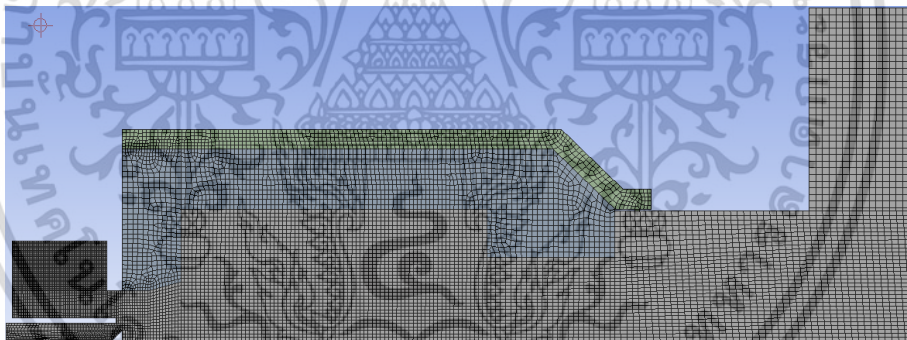
การออกแบบโมเดลที่ใช้ในการจำลองจะเป็นไปตามรูปที่ 3.1 โดยมีการตรวจสอบความเป็นอิสระของกริดหรือเมชที่ใช้คำนวณ อุณหภูมิ และการปลดปล่อยไอเสียเพื่อประเมินความน่าเชื่อถือของผลการจำลองกับการทดสอบจริง สำหรับกรณีท่อปฐมภูมิและรูปร่างปูนทนไฟแบบดั้งเดิม โดยเปรียบเทียบจำนวน Elements ของเมช 5 ขนาดคือ 16800, 20356, 28584, 37738 และ 51805 Elements ตามลำดับ ดังรูปที่ 3.2



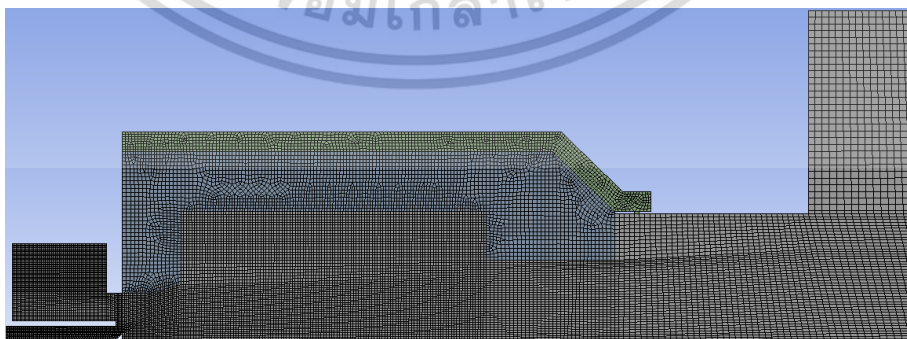
รูปที่ 3.1 โมเดลการจำลอง



ก)

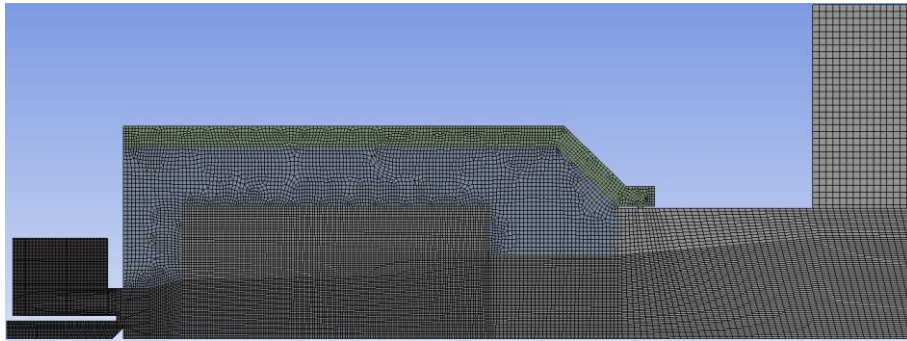


ข)

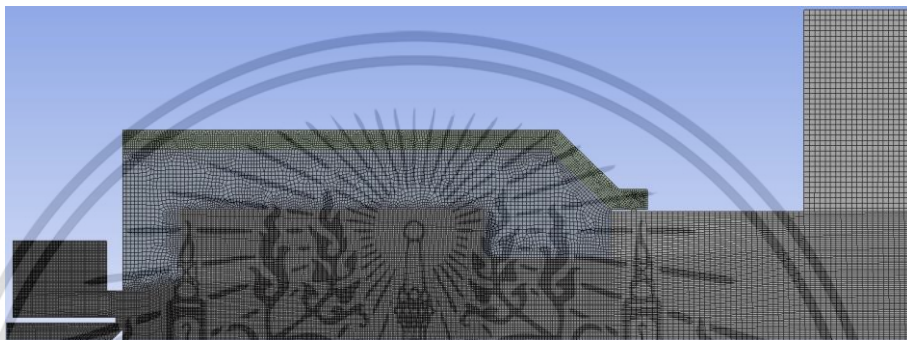


ค)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



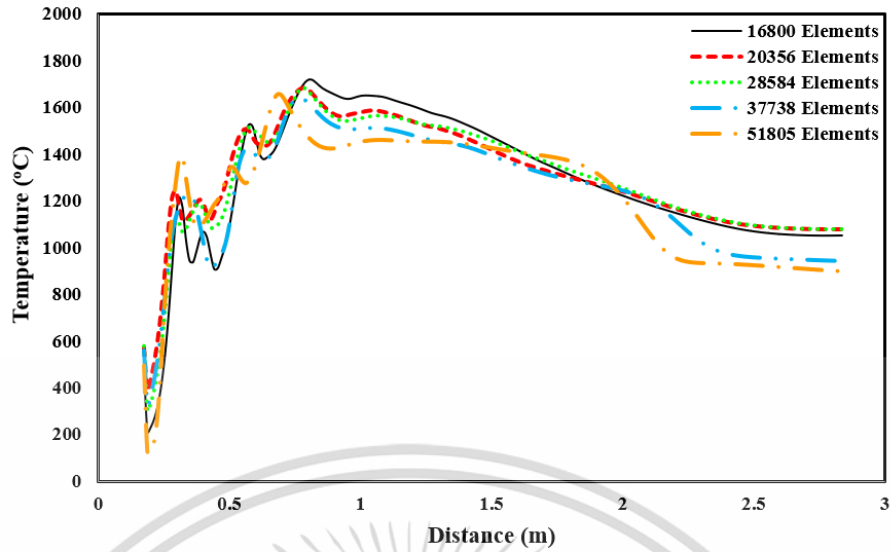
ง)



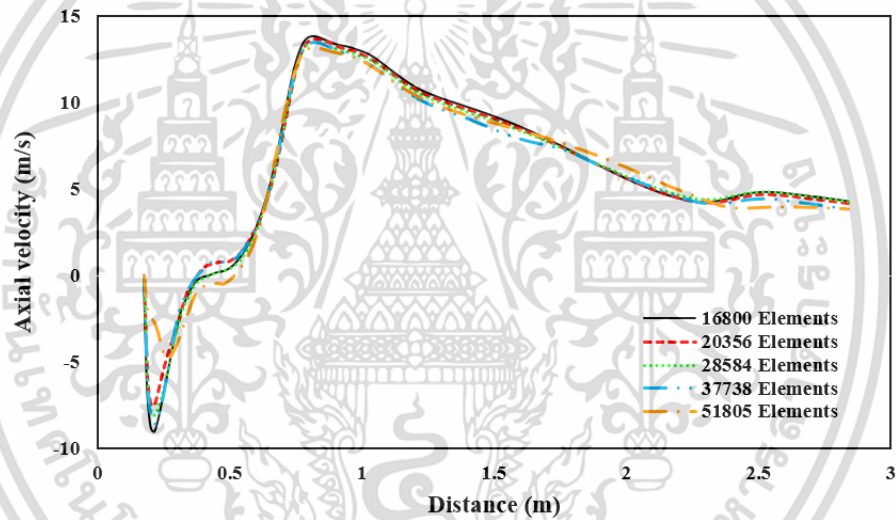
จ)

รูปที่ 3.2 เปรียบเทียบจำนวน Elements ของเมช ก) 16800 Elements  
 ข) 20356 Elements ค) 28584 Elements  
 ง) 37738 Elements จ) 51805 Elements

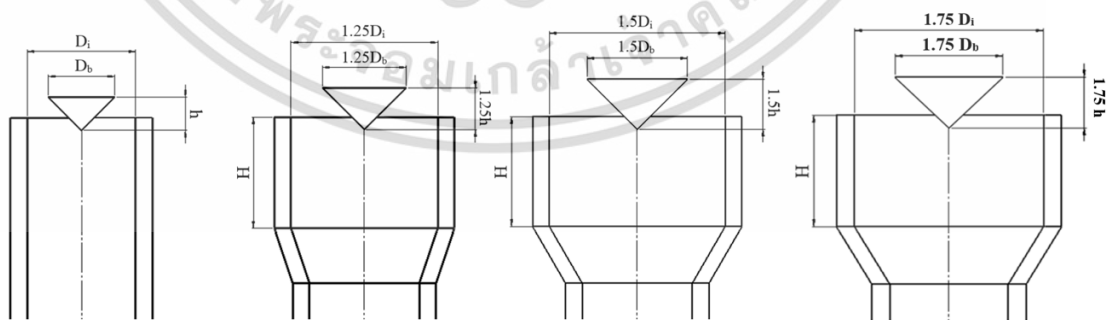
เมื่อเปรียบเทียบความละเอียดของเมชทั้งสามกับการกระจายตัวของอุณหภูมิในแนวแกนและความเร็วในแนวแกน ดังรูปที่ 3.3 และ 3.4 จะเห็นว่าเมื่อความละเอียดของเมชมากขึ้นลักษณะของกราฟจะมีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้น แต่เมื่อใช้ความละเอียดของเมชที่มากเกินไปจะทำให้เกิดการคลาดเคลื่อนในการจำลองได้สังเกตได้ตั้งเส้นกราฟสีฟ้า และสีส้ม ดังรูปที่ 3.3 และ 3.4 กราฟของอุณหภูมิจะเริ่มไม่เสถียรเมื่อความละเอียดเพิ่มขึ้น และความเร็วตามแนวแกนจะแกว่งมากขึ้นเมื่อความละเอียดของเมชสูงขึ้น จึงสามารถสรุปได้ว่าความละเอียดที่เหมาะสมสำหรับนำมาเปรียบเทียบมีความละเอียดที่มากพอที่จะไม่ทำให้เกิดการคลาดเคลื่อนขึ้นในการจำลองการเผาไหม้ ไม่จำเป็นต้องมีความละเอียดมากเกินไป จึงเลือกใช้ความละเอียดของเมช 28,584 Elements ในการจำลองกรณีท่อปฐุมภูมิและรูปร่างปูนทนไฟแบบดั้งเดิม และในการจำลองการขยายท่อปฐุมภูมิขนาดต่าง ๆ จะใช้ขนาดของกริดเดียวกับรูปแบบดั้งเดิม เพื่อให้มีความละเอียดใกล้เคียงกับกรณีดั้งเดิม



รูปที่ 3.3 การกระจายอุณหภูมิในแนวแกน



รูปที่ 3.4 ความเร็วในแนวแกน



รูปที่ 3.5 ท่อปฐุมภูมิ

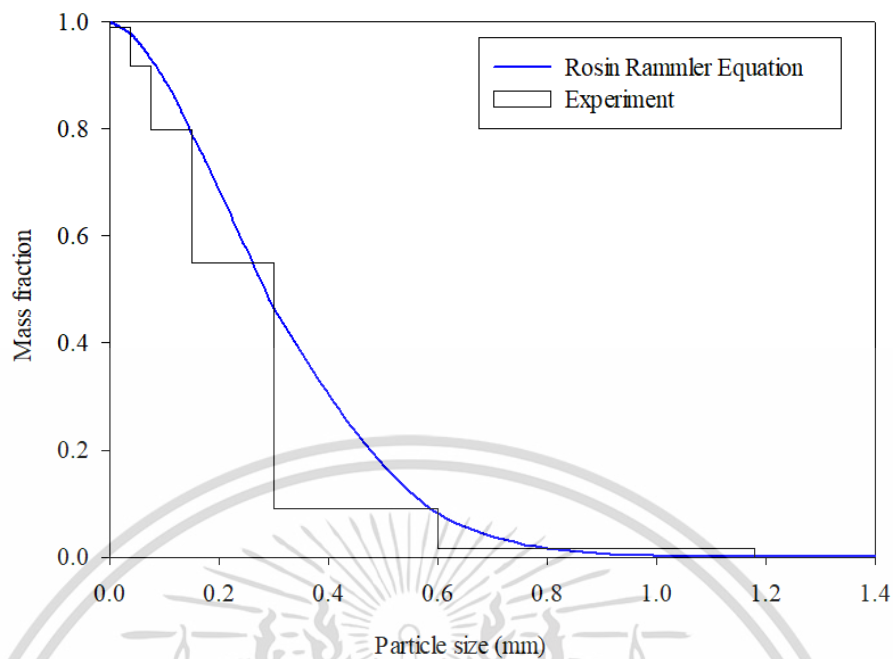
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.5 จะเป็นรูปทรงของการขยายท่อปฐุมภูมิ ซึ่งหลักเกณฑ์ในการขยายทางออกของท่อปฐุมภูมิมาจากสมมติฐานที่ว่า การขยายทางออกของท่อปฐุมภูมิจะนำให้ความเร็วของอนุภาคลดลง ซึ่งจะลดโอกาสที่อนุภาคหลุดออกจากห้องเผาไหม้ช่วย และการขยายท่อทางออกจะทำให้วัตถุขวางการไหลมีขนาดใหญ่ขึ้นในอัตราส่วนเดียวกับการขยายของท่อปฐุมภูมิ ซึ่งการที่วัตถุขวางการไหลมีขนาดใหญ่ขึ้นจะช่วยให้อนุภาคขนาดใหญ่กระจายตัวอยู่ภายในห้องเผาไหม้ช่วยได้มากขึ้น

### 3.3 ข้อมูลเชื้อเพลิง

ชีวมวล (Biomass) คือวัสดุที่ได้จากธรรมชาติหรือสิ่งมีชีวิต โดยในประเทศไทยซึ่งเป็นประเทศเกษตรกรรมที่มีผลผลิตทางการเกษตรหลากหลายชนิด เช่น น้ำตาล ข้าว มันสำปะหลัง ยางพารา เป็นต้น ซึ่งสิ่งที่เหลือจากการผลิตส่วนใหญ่จะถูกทำให้เป็นปุ๋ยอินทรีย์ หรือกำจัดโดยการเผาทำลาย แต่ในปัจจุบันชีวมวลถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตพลังงาน เพราะว่าในชีวมวลมีคุณสมบัติในการเป็นเชื้อเพลิงอย่างดี และมีค่าพลังงานความร้อนอยู่ในระดับที่สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ และจากภาวะถดถอยของแหล่งพลังงาน จึงได้มีการหาพลังงานเพื่อทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิล ชีวมวลจึงเป็นทางเลือกที่ดีของแหล่งพลังงานใหม่ โดยสิ่งที่จะนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงจะเป็นวัสดุที่เหลือจากภาคอุตสาหกรรม เช่น กากอ้อย แกลบ ฟางข้าว เศษไม้ กะลาปาล์ม กะลามะพร้าว เป็นต้น

โดยเชื้อเพลิงที่ใช้ในการจำลองคือไม้ยางพารา อนุภาคขนาดใหญ่ที่สุดมีขนาด  $1180 \mu\text{m}$  ขนาดเล็กที่สุดคือ  $38 \mu\text{m}$  และขนาดโดยเฉลี่ยอยู่ที่  $350 \mu\text{m}$  และมีพารามิเตอร์การแพร่กระจาย (spread parameter) เท่ากับ 1.71 โดยสามารถดูความสัมพันธ์ของเศษส่วนมวล (mass fraction) กับขนาดอนุภาคได้ดังรูปที่ 3.6 และคุณสมบัติของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการจำลองสามารถดูได้ดังตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างเศษส่วนมวลต่อขนาดอนุภาค

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติเชื้อเพลิง

Proximate analysis (as received)	
Volatiles %	65.25
Fixed carbon %	16.16
Ash %	2.43
Moisture %	16.16
Calorific value (MJ/kg, daf)	17.5
Ultimate analysis (wt%, daf)	
C %	46.44
H %	6.45
O %	46.56
N %	0.55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 กรณีศึกษา

ในหัวข้อนี้จะเป็นการหาค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองการเผาไหม้ โดยนำผลการจำลองของกรณีท่อปฐุมภูมิกขนาดดั้งเดิมมาเทียบกับผลการทดลอง ให้มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลอง และเป็นการสังเกตแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงของผลจำลองต่อการปรับค่าพารามิเตอร์ โดยพารามิเตอร์ที่ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์สนใจคือ Devolatilization ของสารระเหย การเผาไหม้ของอนุภาคถ่านชาร์ และเอนทาลปีของสารระเหย ซึ่งใช้ค่าพารามิเตอร์ที่แตกต่างกันในการจำลองการเผาไหม้ เพื่อหาค่าอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกันผลการทดลอง ซึ่งพารามิเตอร์ที่เป็นค่าคงที่ และแบบจำลองที่ใช้จะเป็นไปตามตารางที่ 3.2 ในส่วนของเงื่อนไขขอบเขตสำหรับการจำลองจะเป็นไปตามตารางที่ 3.3 และในส่วนของตำแหน่งที่ใช้วัดอุณหภูมิจะเป็นไปตามรูปที่ 3.7

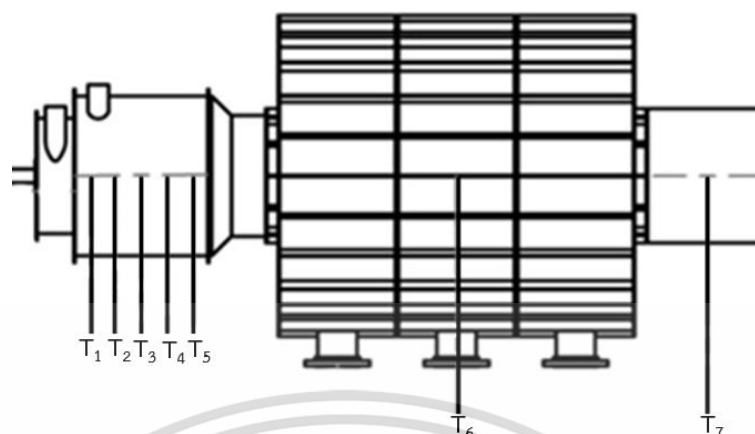
ตารางที่ 3.2 โมเดลการจำลองและค่าพารามิเตอร์

Model and Parameters	
1. Turbulent model	k-ε
2. Turbulent Prandtl number	0.7
3. Turbulent Schmidt number	0.3
4. Turbulent Chemistry Interaction	Eddy-Dissipation
5. Thermal Conductivity	mass weighted mixing law
6. Viscosity	mass weighted mixing law
7. Absorption Coefficient	WSGGM domain based
8. Volatile vaporization temperature	100 °C
9. Devolatilization Model	single rate
10. Combustion Model	Kinetic/diffusion limited

ตารางที่ 3.3 เงื่อนไขขอบเขต

	อัตราการไหล (kg/s)	% อากาศ	ความเร็วเชิงมุมการหมุนวนที่ ทางเข้า (rad/s)
เชื้อเพลิงชีวมวลบด	0.0172	-	-
ลมปฐมภูมิ	0.029	25	-
ลมทุติยภูมิ	0.075	65	62.2
ลมตติยภูมิ	0.012	10	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 ตำแหน่งในการตรวจวัดอุณหภูมิ

### 3.4.1 การปรับพารามิเตอร์ของแบบจำลอง Devolatilization

ในการปรับค่า Devolatilization จะมีอยู่สองพารามิเตอร์ที่สามารถปรับได้คือ Pre-Exponential Factor และ Activation Energy โดยทั้งสองค่านี้จะมีผลต่ออัตราในการปลดปล่อยสารระเหย กล่าวคือหากค่า Pre-Exponential Factor มีค่าเพิ่มขึ้นความเร็วในการปลดปล่อยสารระเหยเพิ่มขึ้น ในทางตรงข้าม ต้องลดค่า Activation Energy เพื่อให้อัตราการปลดปล่อยสารระเหยเร็วขึ้น ซึ่งทั้งสองค่านี้จำเป็นต้องปรับให้สอดคล้องกันเพื่อความเสถียรในการปลดปล่อยสารระเหย หากปรับเพียงค่าใดค่าหนึ่งจะทำให้ผลของการจำลองเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย โดยการปรับพารามิเตอร์ทั้งสองค่านี้จะไปสอดคล้องกับสมการที่ 3.34 ซึ่งเป็นสมการปลดปล่อยมวลของอนุภาคระหว่างปลดปล่อยสารระเหย และสมการที่ 3.35 เป็นสมการหาค่า kinetic rate หากค่า kinetic rate มีค่ามากขึ้นก็จะทำให้การปลดปล่อยสารระเหยได้เร็วขึ้น โดยในการปรับทั้งสองค่านี้สามารถดูได้ดังตารางที่ 3.4 และผลของการจำลองสามารถดูได้ดังตารางที่ 3.5 และรูปที่ 3.8

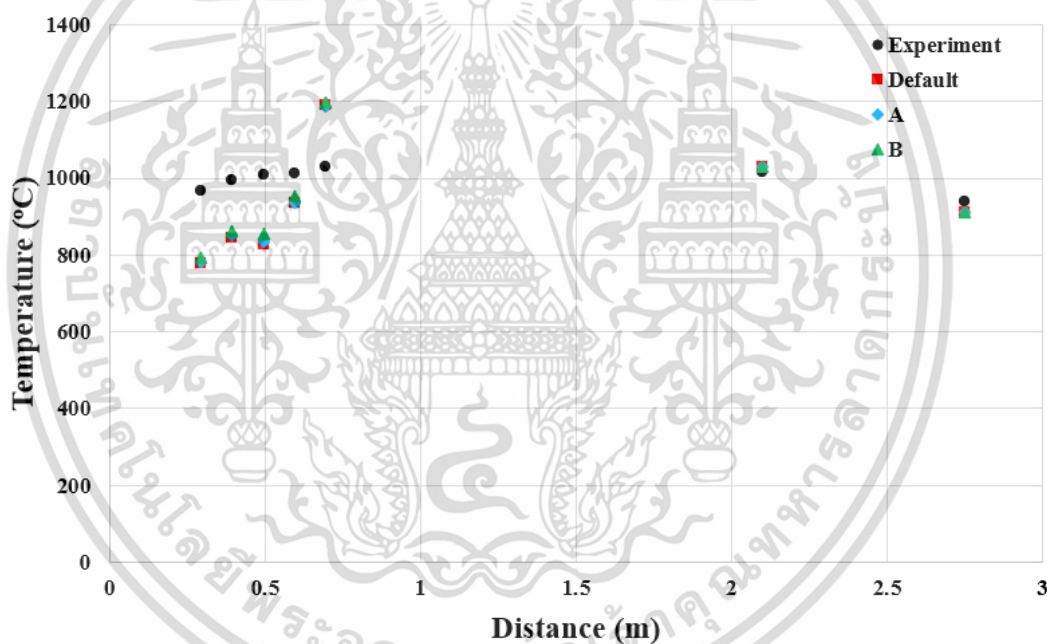
ตารางที่ 3.4 การปรับค่า Devolatilization

Pre-Exponential Factor			Activation Energy		
Default	A (เพิ่ม 10 เท่า)	B (เพิ่ม 100 เท่า)	Default	A (ลด 100 เท่า)	B (ลด 10000 เท่า)
3.82e+7	3.82e+8	3.82e+9	1.36e+7	1.36e+5	1360

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.5 ค่าความคลาดเคลื่อนในการปรับค่า Devolatilization

Position	Experiment	Default		A		B	
		Temp (°C)	%error	Temp (°C)	%error	Temp (°C)	%error
T <sub>1</sub>	966.55	777.75	19.5	783.4	18.9	793.02	17.9
T <sub>2</sub>	994.29	844.66	15.1	852.88	14.2	862.217	13.2
T <sub>3</sub>	1009.91	828.138	17.9	835.88	17.2	855.46	15.3
T <sub>4</sub>	1010.88	933.86	7.6	935.01	7.5	954.58	5.6
T <sub>5</sub>	1031.04	1191.95	15.6	1188.3	15.2	1198.26	16.2
T <sub>6</sub>	1015.61	1028.35	1.2	1028.8	1.3	1028.8	1.3
T <sub>7</sub>	940.21	912.23	2.9	912.05	2.9	911.93	3.0



รูปที่ 3.8 อุณหภูมิตามแนวแกน

จากตารางที่ 3.5 และรูปที่ 3.8 การปรับ Pre-Exponential และ Activation Energy จะส่งผลต่ออุณหภูมิในแนวแกนเล็กน้อย แต่แนวโน้มการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมียังไม่มากนัก เนื่องจากเป็นเพียงการเพิ่มความเร็วในการปลดปล่อยสารระเหยของอนุภาคขนาดใหญ่ และเข้าสู่ช่วงการปลดปล่อยพลังงานของอนุภาคถ่านชาร์ได้เร็วขึ้น ซึ่งในช่วงปฏิกิริยาสลายอนุภาคถ่านชาร์นี้จะมีเส้นทางเดินของอนุภาคขนาดใหญ่ที่ยาวกว่าการปลดปล่อยสารระเหยทำให้อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้สูงขึ้น สังเกตได้จากตำแหน่ง T<sub>5</sub> ที่อยู่ใกล้บริเวณทางออกของห้องเผาไหม้ช่วย ซึ่งมีอนุภาคขนาดใหญ่ที่อยู่ระหว่างอนุภาคถ่านชาร์ทำให้อุณหภูมิสูง ในขั้นถัดไปจะทำการปรับค่า Combustion model เพื่อลดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิของ  $T_5$  ลงมา และทำการปรับค่าเอนทาลปีเพื่อเพิ่มหรือลดอุณหภูมิของทั้งโดเมน ซึ่งสามารถเพิ่มอุณหภูมิ  $T_1$  ถึง  $T_4$  ได้ โดยในการปรับค่า Devolatilization ในการจำลองนี้จะใช้ค่าพารามิเตอร์ B ตามตารางที่ 3.4 ในการจำลองต่อไป

### 3.4.2 การปรับพารามิเตอร์ของแบบจำลอง Char Combustion

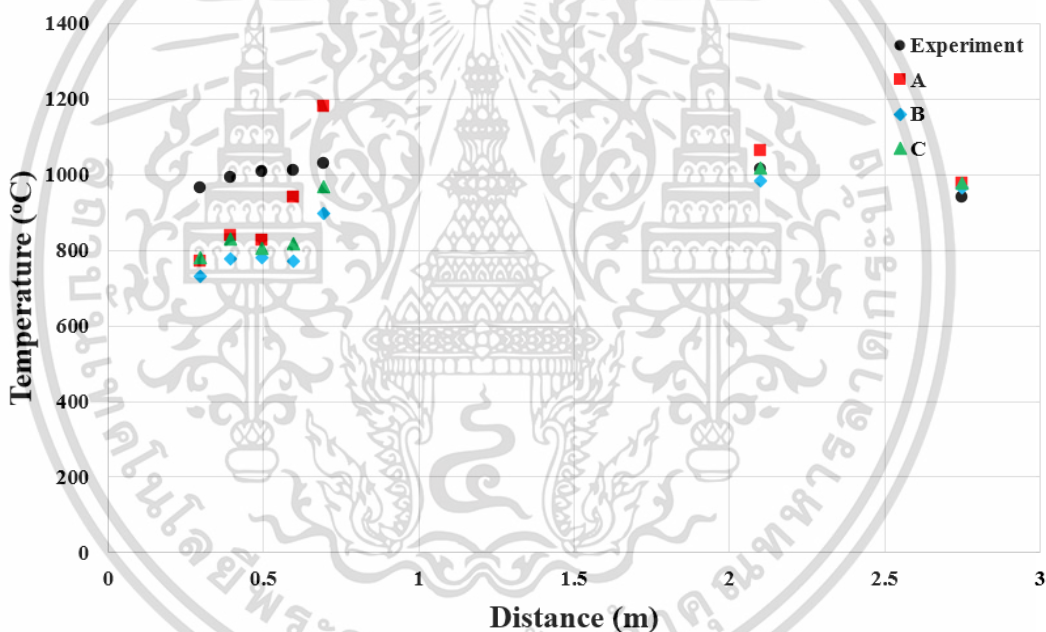
ในการปรับค่า Combustion จะมีพารามิเตอร์สามตัวที่สามารถปรับค่าได้คือ Mass Diffusion-Limited Rate, Kinetics-Limited Rate Pre-Exponential Factor และ Kinetics-Limited Rate Activation Energy ซึ่งทั้งสามค่านี้มีผลต่ออัตราการปลดปล่อยพลังงานของถ่านชาร์ โดยในการจำลองนี้จะทำการปรับเพียงสองพารามิเตอร์แรกเท่านั้น คือการปรับค่า Mass Diffusion-Limited Rate และ Kinetics-Limited Rate Pre-Exponential Factor ซึ่งการปรับทั้งสองพารามิเตอร์นี้จะมีผลไปในทางเดียวกันคือหากมีค่ามากจะมีอัตราการปลดปล่อยพลังงานสูง นั่นคือสามารถเพิ่มอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ได้ โดยค่าเริ่มต้นของทั้งสองค่านี้ที่ทำให้กราฟอุณหภูมิตามแนวแกนเป็นไปตามรูปที่ 3.7 คือ  $1.5 \times 10^{-8}$  และ 0.002 ตามลำดับ และสมการในการหาอัตราการปลดปล่อยพลังงานของถ่านชาร์เป็นไปตามสมการที่ 3.39 ซึ่งเป็นสมการหาอัตราการเปลี่ยนแปลงมวลของอนุภาคในช่วงการเผาไหม้ถ่านชาร์ สมการที่ 3.40 เป็นสมการหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของก๊าซออกซิเจน และสมการที่ 3.41 เป็นสมการหาค่าอัตราจลนพลศาสตร์ โดยการปรับค่าพารามิเตอร์ทั้งสองค่านี้สามารถดูได้ดังตารางที่ 3.6 และผลของการจำลองสามารถดูได้ดังตารางที่ 3.7 และรูปที่ 3.9

ตารางที่ 3.6 การปรับค่า Combustion

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

ตารางที่ 3.7 ค่าความคลาดเคลื่อนในการปรับค่า Combustion

Position	Experiment	A		B		C	
		Temp (°C)	%error	Temp (°C)	%error	Temp (°C)	%error
T <sub>1</sub>	966.55	772.38	20.1	731.43	24.3	781.32	19.2
T <sub>2</sub>	994.29	838.20	15.6	776.46	21.9	830.65	16.5
T <sub>3</sub>	1009.91	827.55	18.1	781.79	22.6	806.11	20.2
T <sub>4</sub>	1010.88	941.08	6.9	771.82	23.6	816.46	19.2
T <sub>5</sub>	1031.04	1182.24	14.6	898.36	12.9	967.34	6.2
T <sub>6</sub>	1015.61	1063.38	4.7	984.09	3.1	1019.06	0.3
T <sub>7</sub>	940.21	979.17	4.1	966.75	2.8	977.53	4.0



รูปที่ 3.9 อุณหภูมิตามแนวแกน

จากรูปที่ 3.9 จะเห็นว่าการลดค่า Mass Diffusion-Limited Rate ลงมา 100 เท่าตามพารามิเตอร์ A อุณหภูมิที่ตำแหน่ง T<sub>5</sub> ยังลดลงมาไม่มาก จึงทำการลดค่า Mass Diffusion-Limited Rate ลงมาอีกเป็น 10000 เท่า ตามพารามิเตอร์ B จะเห็นว่าอุณหภูมิที่ตำแหน่ง T<sub>5</sub> ลดลงมากตามจุดกราฟสีฟ้า และในกรณีการปรับเป็นพารามิเตอร์ C โดยเพิ่ม Mass Diffusion-Limited Rate และ Kinetics-Limited Rate Pre-Exponential Factor จากกรณี B เป็น 3 เท่าและ 2 เท่าตามลำดับ ทำให้อุณหภูมิตามแนวแกนสูงกว่ากรณี B เล็กน้อย ทำให้ได้ข้อสังเกตว่าการปรับค่า Mass Diffusion-Limited Rate มีอิทธิพลต่อการเพิ่มอุณหภูมิมากกว่าการปรับค่า Kinetics-Limited Rate และมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิทธิพลต่ออุณหภูมิที่ตำแหน่ง  $T_5$  มากกว่าตำแหน่ง  $T_1$  ถึง  $T_4$  ในขั้นถัดไปจะเป็นการปรับค่าเอนทาลปีของตัวสารระเหยเพื่อเพิ่มอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วย โดยจะใช้พารามิเตอร์ C ในตารางที่ 3.6 ในการจำลองขั้นต่อไป

### 3.4.3 การปรับ Enthalpy of formation ของสารระเหย

ในการปรับค่าเอนทาลปีของสารระเหยนั้นจะเป็นการเพิ่มหรือลดระยะห่างระหว่างชั้นพลังงานของสารตั้งต้นกับสารผลิตภัณฑ์ หากมีระยะห่างมากพลังงานที่ใช้ก็จะมากตามไปด้วย โดยในการเผาไหม้จะเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน เชื้อเพลิงและผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้จะมีค่าเอนทาลปีเป็นลบ ซึ่งในการปรับค่าเอนทาลปีนี้จะเป็นการปรับค่าเอนทาลปีตั้งต้นของสารระเหย มีผลให้ระยะห่างของชั้นพลังงานที่กล่าวไปข้างต้นต่างกัน เพราะค่าพลังงานของตัวผลิตภัณฑ์ไม่ได้เปลี่ยนตามไปด้วย และในทางเดียวกันอุณหภูมิระหว่างปฏิกิริยาก็จะเพิ่มสูงขึ้นหรือลดลงก็จะขึ้นอยู่กับระยะห่างของชั้นพลังงาน โดยกรณีของการจำลองในการศึกษานี้จะจำลองโดยใช้ค่าเอนทาลปีตามตารางที่ 3.8 ซึ่งค่าเริ่มต้นคือ  $-2.339e+8$  J/kg.mol และผลของการจำลองสามารถดูได้ดังตารางที่ 3.9 และรูปที่ 3.10

ตารางที่ 3.8 การปรับค่าเอนทาลปี

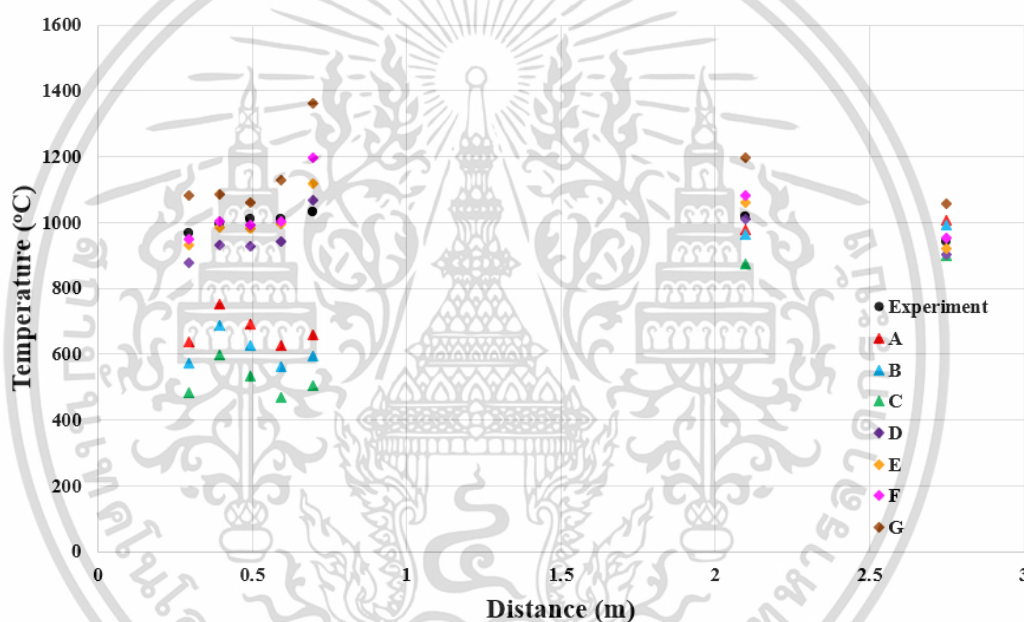
Enthalpy of formation						
A(เพิ่ม30%)	B(เพิ่ม50%)	C(เพิ่ม2เท่า)	D(ลด30%)	E(ลด40%)	F(ลด2เท่า)	G(ลด10เท่า)
$-3.041e+8$	$-3.509e+8$	$-4.678e+8$	$-1.637e+8$	$-1.403e+8$	$-1.169e+8$	$-2.339e+7$

ตารางที่ 3.9 ค่าความคลาดเคลื่อนในการปรับเอนทาลปี

Position	Experiment	A		B		C	
		Temp (°C)	%error	Temp (°C)	%error	Temp (°C)	%error
$T_1$	966.55	637.45	34.0	573.22	40.7	480.82	50.3
$T_2$	994.29	752.58	24.3	688.34	30.8	595.94	40.1
$T_3$	1009.91	690.03	31.7	625.79	38.0	533.39	47.2
$T_4$	1010.88	625.04	38.2	560.81	44.5	468.41	53.7
$T_5$	1031.04	659.10	36.1	594.87	42.3	502.47	51.3
$T_6$	1015.61	977.64	3.7	964.69	5.0	872.29	14.1
$T_7$	940.21	1005.80	7.0	992.85	5.6	900.45	4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

D		E		F		G	
Temp (°C)	%error	Temp (°C)	%error	Temp (°C)	%error	Temp (°C)	%error
878.81	9.1	931.55	3.6	949.40	1.8	1080.79	11.8
931.67	6.3	984.40	1.0	1001.33	0.7	1084.18	9.0
927.71	8.1	980.45	2.9	992.48	1.7	1061.24	5.1
942.03	6.8	994.77	1.6	1003.80	0.7	1126.69	11.5
1066.16	3.4	1118.89	8.5	1196.62	16.1	1361.93	32.1
1008.78	0.7	1061.52	4.5	1061.11	4.5	1186.22	15.1
903.09	3.9	921.82	2.0	953.62	1.4	1056.01	12.3



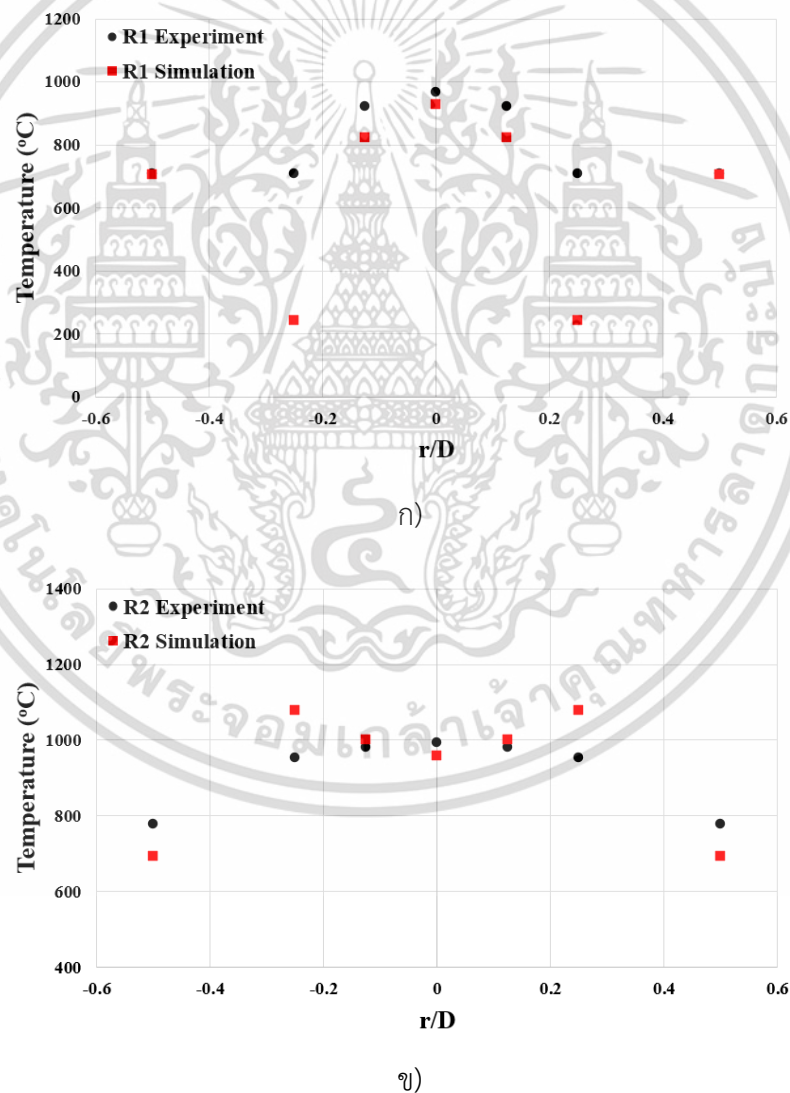
รูปที่ 3.10 อุณหภูมิตามแนวแกน

จากตารางที่ 3.9 และรูปที่ 3.10 จะเห็นว่าการปรับให้ค่าเอนทาลปีติดลบมากเกินไปจะทำให้ อุณหภูมิของห้องเผาไหม้ลดลงอย่างเห็นได้ชัด (กรณี A ถึง C) เป็นเพราะมีระยะห่างของระดับ พลังงานระหว่างสารตั้งต้นและสารผลิตภัณฑ์น้อยลงทำให้ปลดปล่อยพลังงานได้น้อย และมีอุณหภูมิต่ำ ซึ่งส่งผลกระทบต่อเป็นลำดับขั้นคือสารระเหยปลดปล่อยพลังงานออกมาได้ช้าลง อัตราการเผาไหม้ของถ่านชาร์จะเกิดขึ้นช้าลง และท้ายที่สุดจะทำให้อุณหภูมิจากห้องเผาไหม้ช่วยลดลงอย่างมาก และในการปรับค่าเอนทาลปีให้ติดลบน้อยลงจะส่งผลให้อุณหภูมิของทั้งโดเมนยกตัวขึ้นมาเป็นเพราะ ระยะห่างของระดับพลังงานมีมากขึ้น ส่งผลให้การปลดปล่อยสารระเหยและอัตราการปล่อยพลังงานของถ่านชาร์เกิดขึ้นได้เร็ว อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วยจึงยกตัวสูงขึ้น โดยในกรณีศึกษา

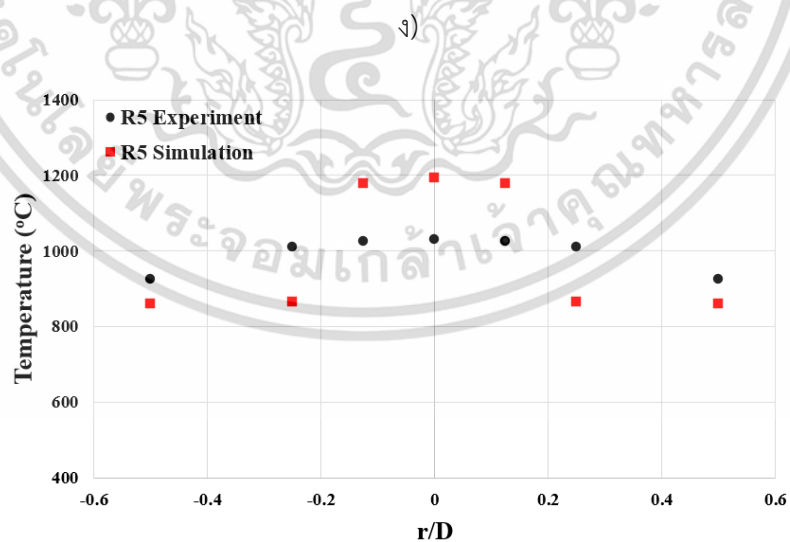
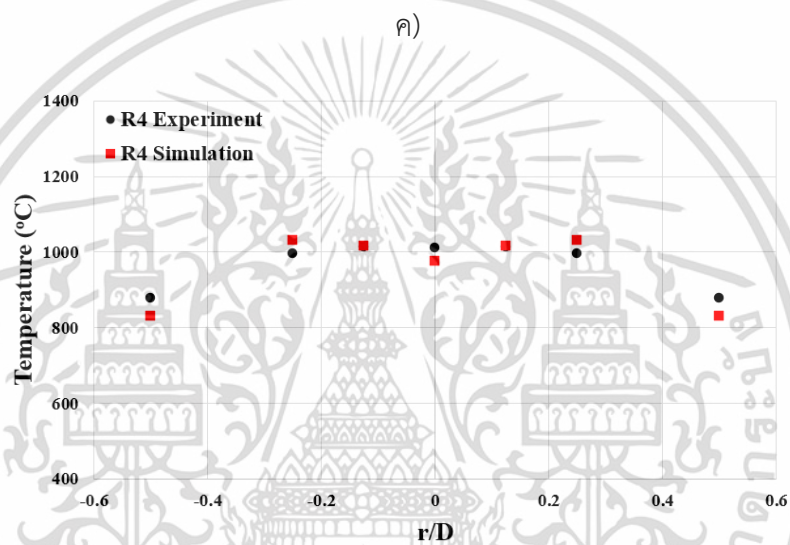
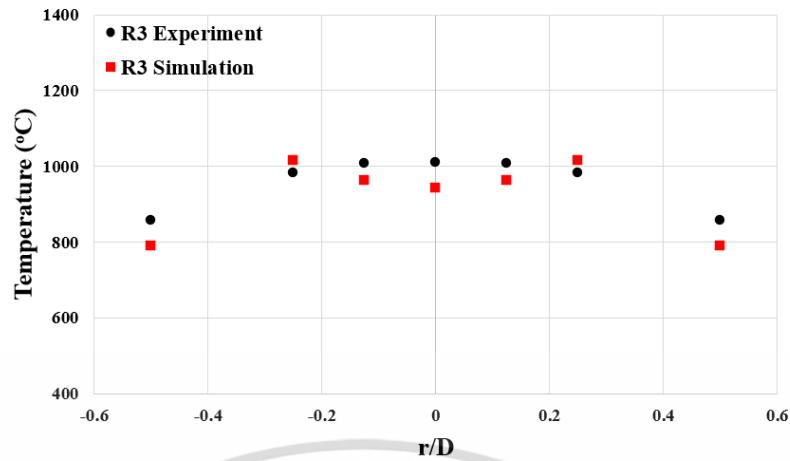
การใช้ค่าเอนทาลปีที่  $-1.169 \times 10^8$  ในการจำลองการขยายหัวเผาขนาดต่าง ๆ เพราะว่ามีค่าความ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลาดเคลื่อนของอุณหภูมิที่ตำแหน่งตรวจวัด  $T_1$  ถึง  $T_7$  น้อยที่สุดดังตารางที่ 3.9 แต่ในส่วนของอุณหภูมิ  $T_5$  ที่มีอุณหภูมิสูงกว่าการทดลอง สันนิษฐานว่าในการจำลองจะมีการรวมตัวของอนุภาคบริเวณใกล้ทางออกของห้องเผาไหม้ช่วยหรือก็คือบริเวณ  $T_5$  เป็นจำนวนมาก จึงทำให้อุณหภูมิที่บริเวณนี้สูง ซึ่งในส่วนนี้จะอธิบายในบทถัดไปซึ่งเป็นผลการจำลองในกรณีหัวเผาขนาดต่าง ๆ และการปรับค่าพารามิเตอร์ที่ผ่านมากอาจจะมีบางค่าที่มีความคลาดเคลื่อนไปบ้าง แต่ก็เพียงพอที่จะสามารถดูแนวโน้มของการเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้ช่วยได้ และสามารถใช้ดูแนวโน้มของลักษณะการเผาไหม้ในการขยายหัวเผาชชนิดต่าง ๆ ได้

ในการทดลองมีการวัดอุณหภูมิตามแนวรัศมี ซึ่งสามารถนำผลของการจำลองมาพล็อตกราฟอุณหภูมิในแนวรัศมีของ  $T_1$  ถึง  $T_5$  เทียบกับผลการทดลองได้ดังรูปที่ 3.11



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



จ)

รูปที่ 3.11 อุณหภูมิตามแนวรัศมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.11 จะแสดงให้เห็นค่าของอุณหภูมิตามแนวรัศมีแต่ละตำแหน่งในห้องเผาไหม้ช่วย ตั้งแต่ R1 ถึง R5 ซึ่งวัดจากตำแหน่งปากทางเข้าของลมปฐมภูมิเป็นระยะ 0.295, 0.395, 0.495, 0.595 และ 0.695 ตามลำดับ โดยเก็บข้อมูลในแนวรัศมีตั้งแต่จุดกลางจนถึงผนังห้องเผาไหม้ช่วย ในกรณีตำแหน่ง R1 อุณหภูมิจะมีความใกล้เคียงกับการทดลอง แต่จะมีบริเวณ  $r/d$  เท่ากับ 0.25 ที่จะมีอุณหภูมิที่ต่ำ ซึ่งเกิดจากที่บริเวณนั้นเป็นบริเวณที่ลมทุติยภูมิไหลผ่านทำให้อุณหภูมิลดลง โดยในการทดลองจริงลมทุติยภูมิที่ไวกี้จะมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิจากห้อง แต่ตัวเทอร์โมคัปเปิลที่ใช้อาจจะไม่สามารถตรวจจับ ในกรณี R2 ถึง R4 ที่บริเวณ  $r/D$  เท่ากับ 0.25 สูงกว่าการทดลองเล็กน้อย สันนิษฐานว่าเกิดจากการปลดปล่อยพลังงานของสารระเหยเป็นจำนวนมากในบริเวณนั้น และมีอิทธิพลจากการปลดปล่อยพลังงานของอนุภาคถ่านคาร์บอนที่มีขนาดเล็กทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น และในกรณี R5 การที่บริเวณ  $r/D$  เท่ากับ 0 และ 0.125 มีอุณหภูมิสูงเกิดจากการที่บริเวณนั้นเป็นบริเวณที่ใกล้กับทางออกของห้องเผาไหม้ช่วยทำให้มีอนุภาคจำนวนมากรวมตัวกันอยู่ และมีบางส่วนปลดปล่อยพลังงานออกมาด้วย จึงทำให้อุณหภูมิจากบริเวณนั้นสูงขึ้น

จากการจำลองปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ และได้ค่าที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองแล้ว จึงจะใช้ค่าพารามิเตอร์นี้ในการจำลองการเผาไหม้ของกรณีขยายหัวเผาขนาดต่าง ๆ ต่อไป โดยสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.10

**ตารางที่ 3.10** สรุปค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง

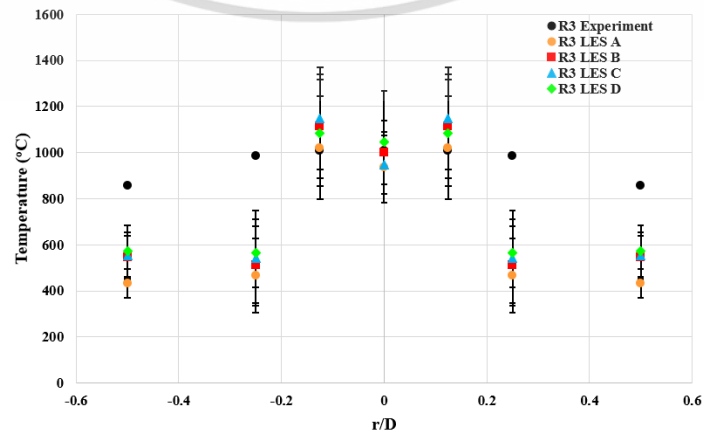
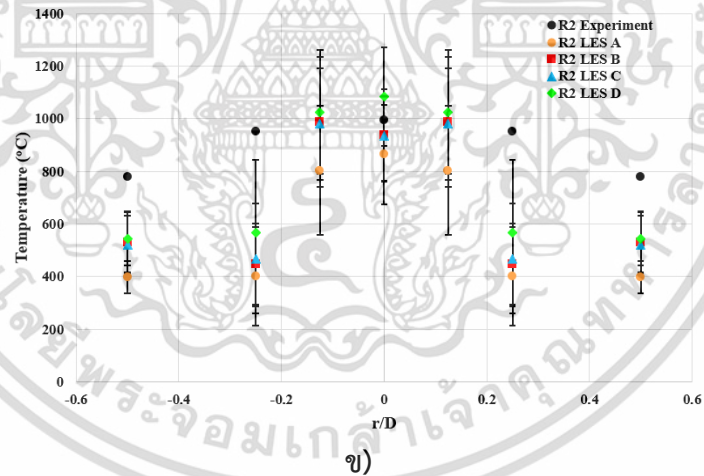
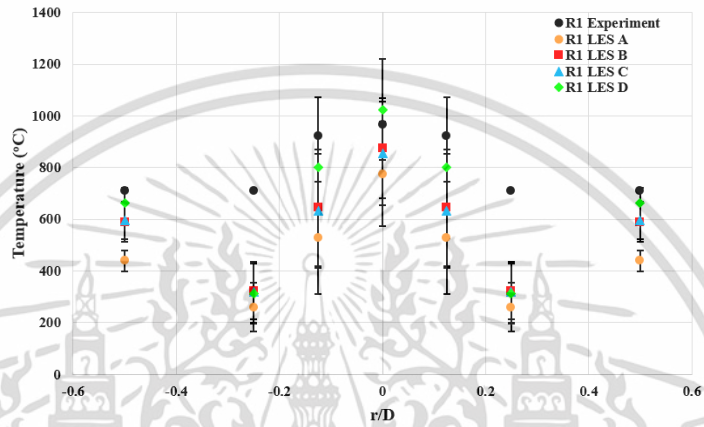
1. Pre-Exponential Factor	$3.82 \times 10^9$
2. Activation Energy	1360
3. Mass Diffusion-Limited Rate	$4.5 \times 10^{-12}$
4. Kinetics-Limited Rate Pre-Exponential Factor	0.04
5. Enthalpy of formation	$-1.169 \times 10^8$

#### 3.4.4 การทดลองใช้ LES ในการจำลอง

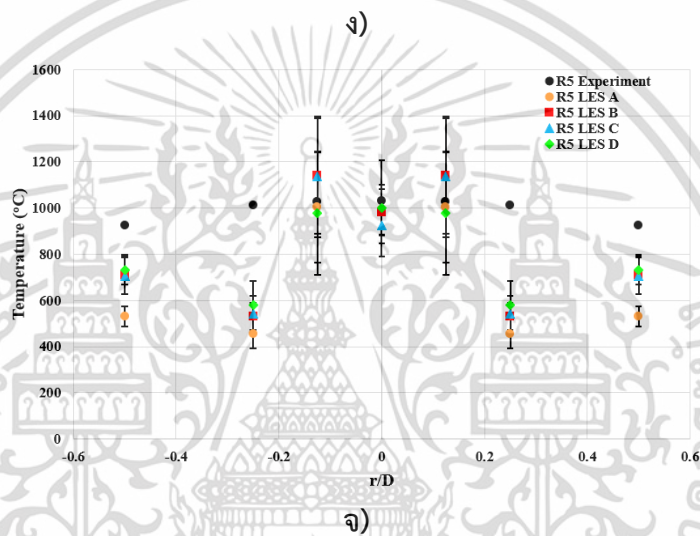
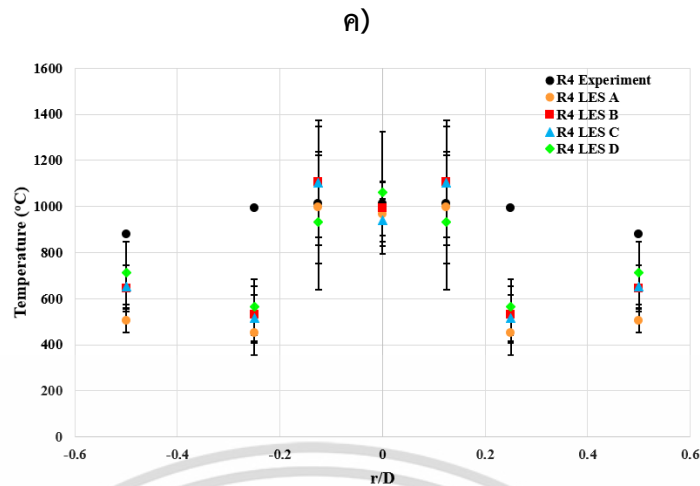
การใช้แบบจำลองแบบ Large eddy simulation (LES) จะเป็นการจำลองการไหลแบบไม่คงที่ กล่าวคือการจำลองจะขึ้นอยู่กับเวลา โดยผู้เขียนต้องการศึกษาแบบจำลองนี้ เพื่อตรวจสอบความเหมาะสมในการจำลองแบบสองมิติเปรียบเทียบกับผลการทดลอง โดยจะมีการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของ Combustion Model เพื่อทำให้อุณหภูมิที่บริเวณผนังเพิ่มขึ้น เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลอง k- $\epsilon$  ทำให้อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วยในแนวรัศมีต่างจากเดิม ซึ่งค่าพารามิเตอร์จะเป็นไปตามตารางที่ 3.11 และสามารถดูผลของอุณหภูมิตามแนวรัศมีได้ดังรูปที่ 3.12

ตารางที่ 3.11 การปรับค่า Combustion สำหรับ LES

Mass Diffusion-Limited Rate				Kinetics-Limited Rate Pre-Exponential Factor			
A	B	C	D	A	B	C	D
$4.5 \times 10^{-12}$	$1.5 \times 10^{-7}$	$1.5 \times 10^{-5}$	$1.5 \times 10^{-3}$	0.04	0.6	0.6	0.2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 อุณหภูมิตามแนวรัศมี

จากรูปที่ 3.12 ค่าการเผาไหม้ของถ่านชาร์ในแต่ละกรณี A จะเป็นค่าพารามิเตอร์เดียวกับกรณี k-ε ผลที่ได้ก็จะจะเป็นไปตามกราฟจุดสี่เหลี่ยม จะเห็นว่าตั้งแต่ R1 ถึง R3 จะมีค่าอุณหภูมิต่ำกว่าผลการทดลอง และผลในส่วนนี้จะไม่ตรงกับกรณีที่ใช้แบบจำลองแบบ k-ε ดังรูปที่ 3.11 เพราะอุณหภูมิที่ผนังในกรณีแบบจำลอง LES นั้นต่ำกว่าอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งคาดการณ์ว่าเกิดจากการที่อนุภาคถ่านชาร์ปลดปล่อยพลังงานช้าเกินไปจึงปรับเพิ่มค่า Mass Diffusion-Limited Rate และ Kinetics-Limited Rate Pre-Exponential Factor เพื่อกระตุ้นให้อนุภาคถ่านชาร์ปลดปล่อยพลังงานได้เร็วและรุนแรงขึ้น โดยปรับเพิ่มค่าพารามิเตอร์สามกรณี คือ B, C, และ D ดังตารางที่ 3.11 ผลที่ได้คือ อุณหภูมิโดยรวมเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามการปรับค่าพารามิเตอร์เพิ่มขึ้น อุณหภูมิบริเวณกลางห้องเผาไหม้มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลอง และแบบจำลอง k-ε แต่ที่บริเวณใกล้ผนัง ( $r/D$  เท่ากับ 0.25 และ 0.5) ยังมีอุณหภูมิต่ำอยู่ ซึ่งผลการจำลองในส่วนนี้จะแตกต่างจากการจำลองแบบ k-ε เพราะอิทธิพลของการปรับเพิ่มค่า Mass Diffusion-Limited Rate และ Kinetics-Limited Rate Pre-Exponential Factor ใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณี LES มีผลน้อยมาก แต่ในกรณี k-ε การปรับพารามิเตอร์ทั้งสองค่านี้มีอิทธิพลต่ออุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้เป็นอย่างมาก เพราะฉะนั้นการที่ตั้งสมมติฐานไว้ว่า หากเพิ่มค่าการตอบสนองของปฏิกิริยาทั้งสองค่าจะทำให้อุณหภูมิบริเวณผนังเพิ่มสูงขึ้นในกรณีของ LES แต่จากผลการจำลองการใช้แบบจำลอง LES ไม่ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์มากนัก ซึ่งไม่เป็นไปตามสมมติฐาน และเมื่อดูสมการของทั้งสองโมเดล จุดร่วมของทั้งสองโมเดลนี้จะอยู่ที่สมการหาค่าความหนืด เพราะทั้งกรณี k-ε และ LES เป็นโมเดลของความหนืดในการไหลแบบปั่นป่วน ซึ่งสมการในการหาค่าความหนืดของ k-ε คือสมการที่ 3.12 และสมการหาค่าความหนืดของ LES คือสมการที่ 3.15 ซึ่งเมื่อลองลึกลงไปที่สมการหาค่าความหนืดของ LES นั้นจะมีตัวแปล  $L_s$  และในการหาค่านี้จำเป็นต้องมีเทอมของปริมาตรของโมเดลการจำลอง หรือก็คือจำเป็นต้องสร้างแบบจำลองเป็น 3 มิตินั้นเอง ซึ่งในการใช้ LES มาใช้ในแบบจำลองแบบสองมิติอาจจะให้ผลการจำลองไม่เป็นไปตามความต้องการและสมมติฐานที่ตั้งไว้ ดังนั้นในกรณีการขยายหัวเผาขนาดต่าง ๆ จึงใช้แบบจำลอง k-ε ในการจำลองการเผาไหม้สองมิติต่อไป



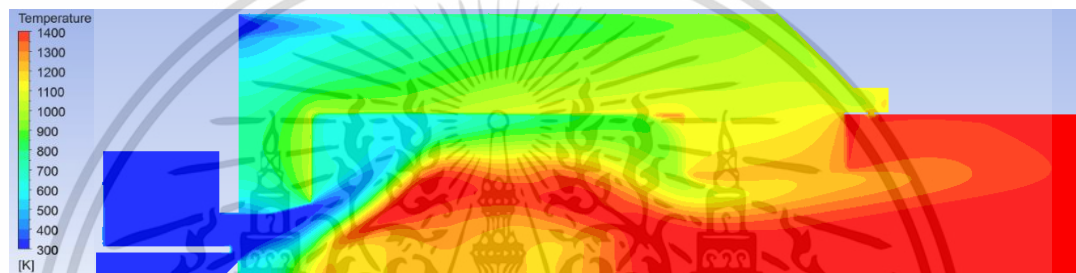
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

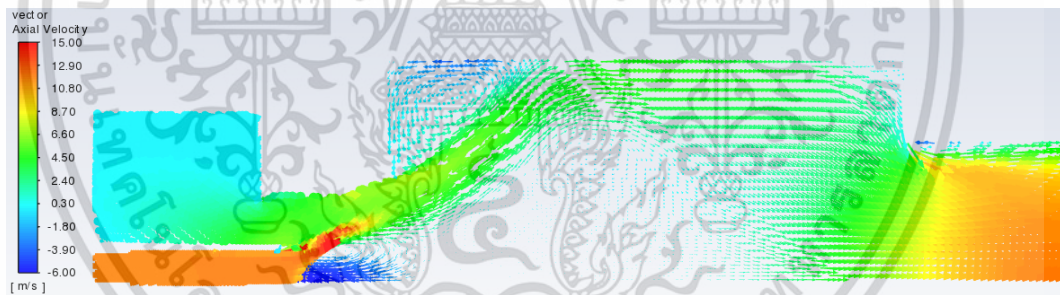
### ผลการจำลองและการอภิปรายผล

เมื่อทำการตรวจสอบความถูกต้องและตรวจสอบเงื่อนไขในการจำลองเปรียบเทียบกับผลการทดลองแล้ว จากนั้นทำการจำลองด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics; CFD) โดยใช้ Ansys Fluent ในการจำลองขนาดของท่อปฐุมภูมิ 3 ขนาดดังนี้

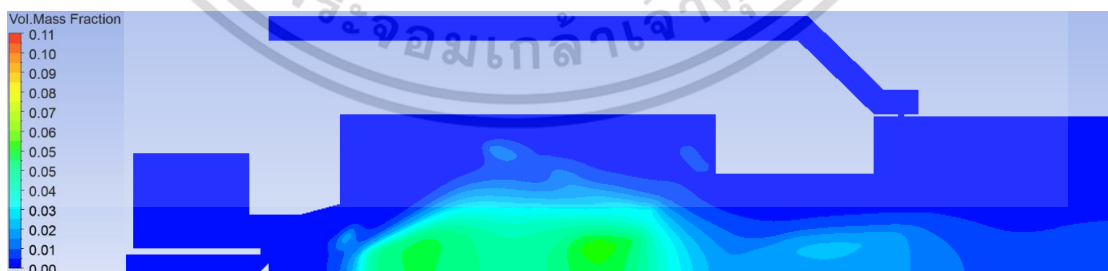
#### 4.1 ผลของท่อปฐุมภูมิขนาดดั้งเดิม (1.0 IB)



ก)

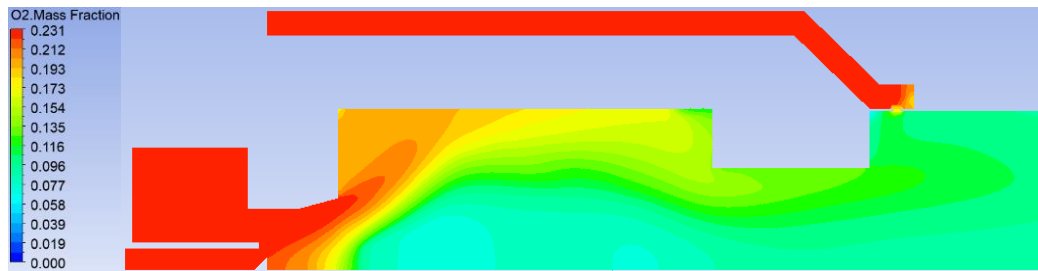


ข)

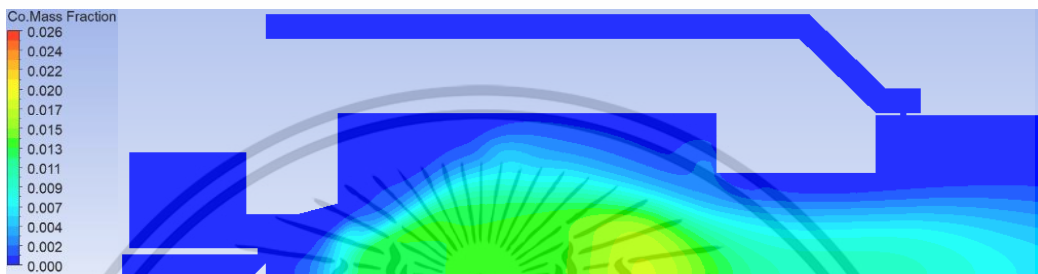


ค)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ง)



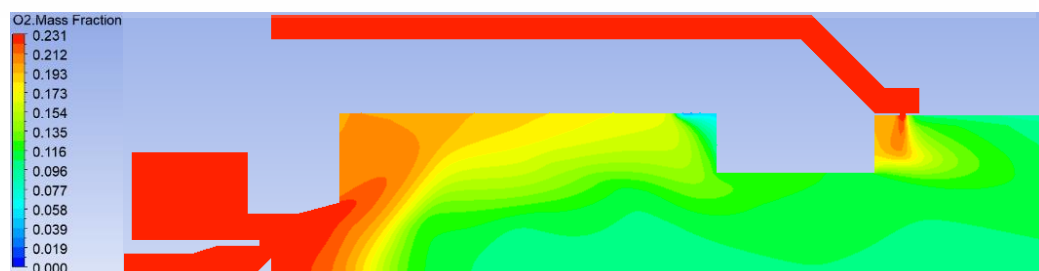
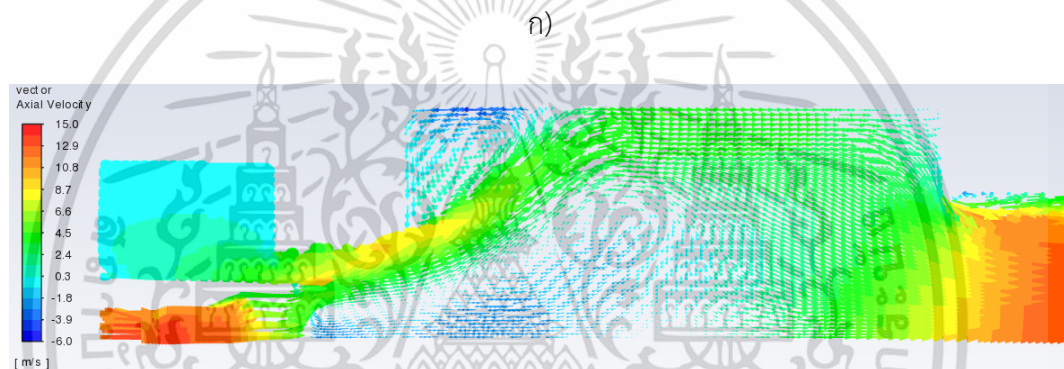
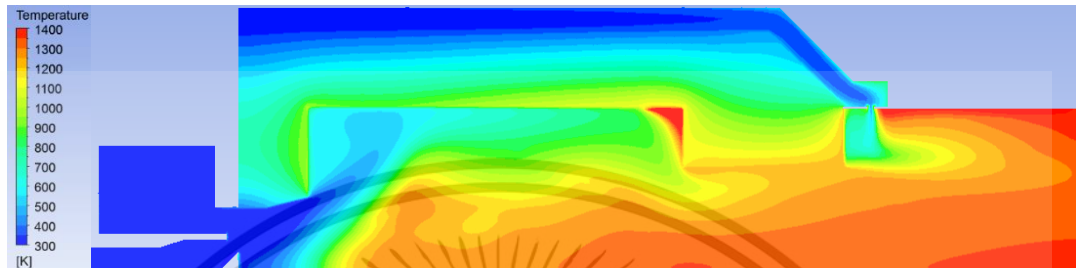
จ)

รูปที่ 4.1 ก.) การกระจายตัวของอนุภาคนิวเคลียส (ข.) ความเร็วในแนวแกน  
 ค.) การกระจายตัวของสารระเหย ง.) ปริมาณการใช้ออกซิเจน  
 จ.) การเกิด CO ในห้องเผาไหม้

จากรูปที่ 4.1 จะเห็นว่าบริเวณใกล้กับวัตถุขวางการไหล (bluff body) และบริเวณกลางห้องเผาไหม้ช่วยมีอนุภาคนิวเคลียสสูง ดังรูปที่ 4.1 ก.) เนื่องจากมีกระแสไหลย้อนกลับที่รุนแรง ดังรูปที่ 4.1 ข.) ทำให้พัดพาสารระเหยให้มารวมตัวกันบริเวณตรงกลางห้องเผาไหม้ช่วยและหลังวัตถุขวางการไหล ดังรูปที่ 4.1 ค.) เมื่อสังเกตจุดที่สารระเหยรวมตัวกันกับการกระจายตัวของอนุภาคนิวเคลียส จะเห็นว่าบริเวณรอบ ๆ ที่มีความเข้มข้นต่ำ จะมีอนุภาคนิวเคลียสที่สูงกว่าบริเวณที่มีความเข้มข้นของสารระเหยสูง เนื่องจากการใช้สารระเหยในการเผาไหม้ที่มากกว่าอนุภาคนิวเคลียสจึงสูงขึ้น ทำให้ความเข้มข้นของสารระเหยลดลง ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณออกซิเจนที่ลดลงเพราะใช้ในผสมกับสารระเหย เพื่อให้เกิดการเผาไหม้ดังรูปที่ 4.1 ง.) และในส่วนที่เกิดการเผาไหม้นี้ทำให้เกิด CO ขึ้นมากกว่าบริเวณอื่นดังรูปที่ 4.1 จ.)

#### 4.2 ผลของการขยายท่อปฐภูมิ 1.25 เท่า (1.25 SB)

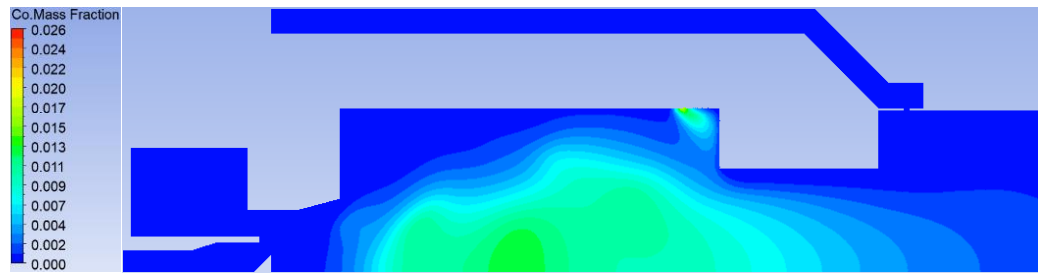
เมื่อทำการขยายท่อปฐภูมิเป็น 1.25 เท่า จะทำให้ทางออกของลมทุติยภูมิเล็กลง ความเร็วในแนวแกนของลมทุติยภูมิจะมากขึ้น อุณหภูมิบริเวณใกล้กับวัตถุวางการไหลจึงลดลงเมื่อเทียบกับท่อปฐภูมิขนาดดั้งเดิม สามารถดูได้จากรูปที่ 4.2



ค)

ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



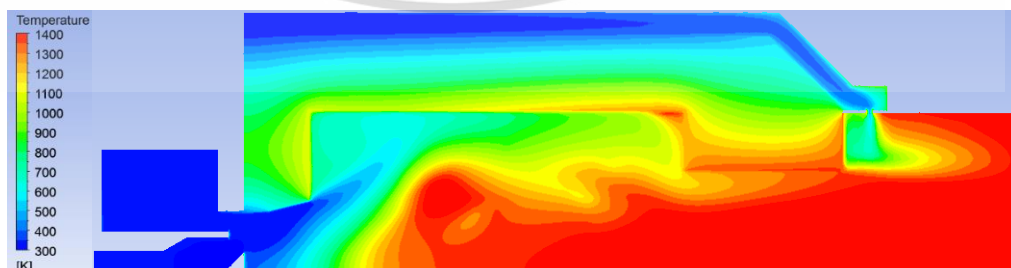
จ)

รูปที่ 4.2 ก.) การกระจายตัวของอุณหภูมิ ข.) ความเร็วในแนวแกน  
ค.) การกระจายตัวของสารระเหย ง.) ปริมาณการใช้ออกซิเจน  
จ.) การเกิด CO ในห้องเผาไหม้

จากรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าอิทธิพลของความเร็วในแนวแกนที่สูงขึ้นทำให้กระแสไหลย้อนกลับบริเวณหลังวาล์ววางการไหลมีความรุนแรงลดลง ดังรูปที่ 4.2 ข.) สารระเหยจึงถูกกระแสน้ำไหลพัดพาออกจากวาล์ววางการไหลมากขึ้น และมีบางส่วนกระจายไปยังบริเวณใกล้เคียงทางออกของห้องเผาไหม้ช่วย ดังรูปที่ 4.2 ค.) และเมื่อเปรียบเทียบบริเวณที่มีสารระเหยกับการกระจายตัวของอุณหภูมิดังรูปที่ 4.2 ก.) จะเห็นว่าบริเวณที่สารระเหยมีความเข้มข้นต่ำจะมีอุณหภูมิที่สูงกว่าบริเวณที่มีความเข้มข้นของสารระเหยสูง เนื่องจากการใช้สารระเหยไปกับการผสมกับออกซิเจนทำให้มีการเผาไหม้ที่มากกว่าบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงทำให้ความเข้มข้นลดลง ซึ่งในบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงนั้นจะสอดคล้องกับปริมาณออกซิเจนที่ลดลงดังรูปที่ 4.2 ง.) และในบริเวณที่เกิดการเผาไหม้สูงส่งผลให้เกิด CO สูงขึ้นด้วย ดังรูปที่ 4.2 จ)

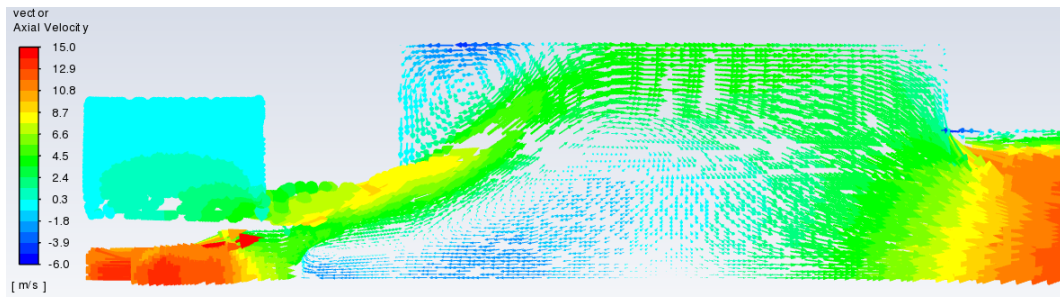
#### 4.3 ผลของการขยายท่อปฐมภูมิ 1.5 เท่า (1.5 SB)

ในส่วนของการขยายท่อปฐมภูมิ 1.5 เท่า ความเร็วในแนวแกนก็จะสูงขึ้นอีกเมื่อเทียบกับการขยาย 1.25 เท่า ทำให้อุณหภูมิบริเวณกลางห้องเผาไหม้ช่วยลดลง แต่จะมีอุณหภูมิสูงบริเวณขอบทางออกของห้องเผาไหม้ช่วย ดังรูปที่ 4.3

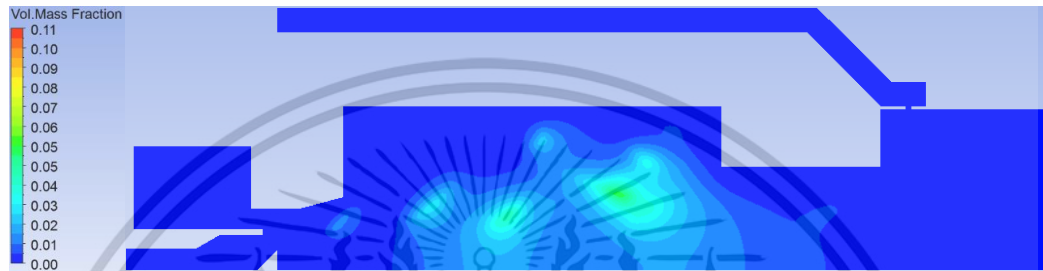


ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



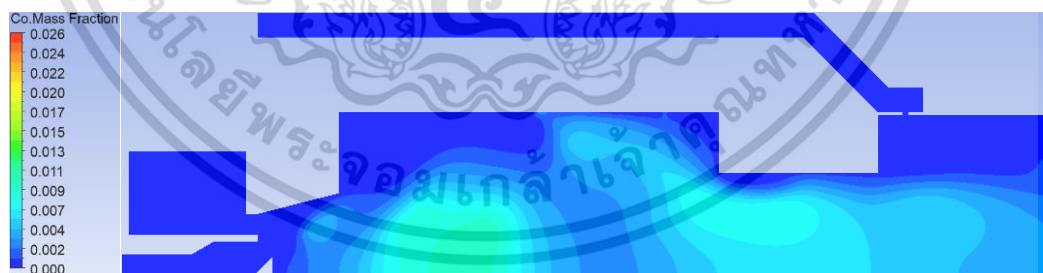
ข)



ค)



ง)



จ)

รูปที่ 4.3 ก.) การกระจายตัวของอุณหภูมิ ข.) ความเร็วในแนวแกน  
 ค.) การกระจายตัวของสารระเหย ง.) ปริมาณการใช้ออกซิเจน  
 จ.) การเกิด CO ในห้องเผาไหม้

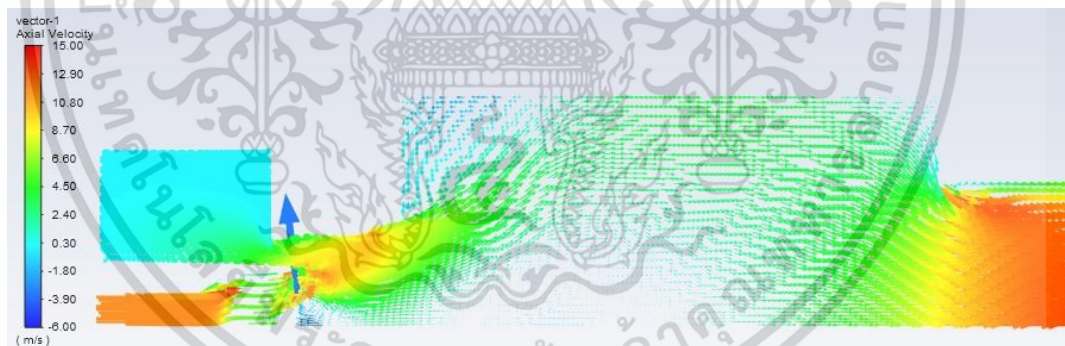
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.3 จะเห็นว่าอิทธิพลของความเร็วในแนวแกนที่สูงและมีกระแสไหลย้อนกลับที่ลดลงเมื่อเทียบกับท่อปฐมภูมิขนาดปกติดังรูปที่ 4.3 ข.) ทำให้สารระเหยถูกพัดพาออกห่างจากวัตถุ ขวางการไหลมากขึ้น และมีบางส่วนไปรวมตัวอยู่บริเวณใกล้ทางออกของห้องเผาไหม้ช่วยมากขึ้น ดังรูปที่ 4.3 ค.) ทำให้อุณหภูมิบริเวณใกล้กับวัตถุขวางการไหลจะมีอุณหภูมิลดลง ดังรูปที่ 4.3 ก.) ซึ่งการที่อุณหภูมิสูงอยู่ไกลจากหัวเผามากขึ้นนั้นหมายถึงมีการเผาไหม้บริเวณใกล้กับบริเวณหัวเผา น้อยลง ทำให้มีความเสี่ยงที่เกิดการเป่าดับบริเวณใกล้หัวเผา หรือเปลวไฟหลุดออกจากห้องเผาไหม้ ช่วยได้ และส่วนของปริมาณออกซิเจนและการเกิด CO นั้น ในบริเวณที่เกิดการเผาไหม้สูงออกซิเจน บริเวณนั้นจะมีปริมาณลดลง แต่ปริมาณการเกิด CO จะเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.3 ง.) และ 4.3 จ.)

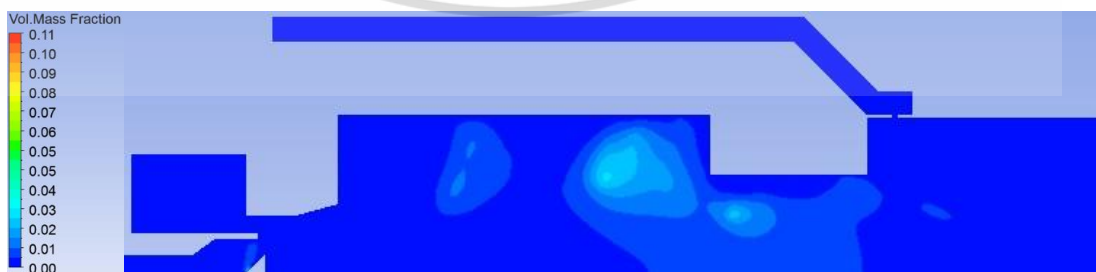
#### 4.4 ผลของการขยายท่อปฐมภูมิ 1.75 เท่า (1.75 SB)



ก)

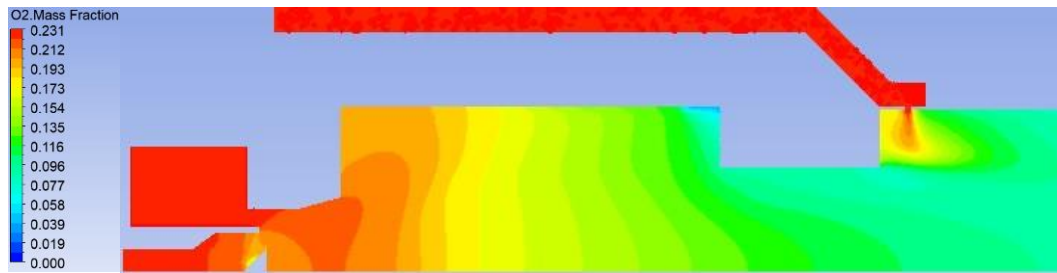


ข)

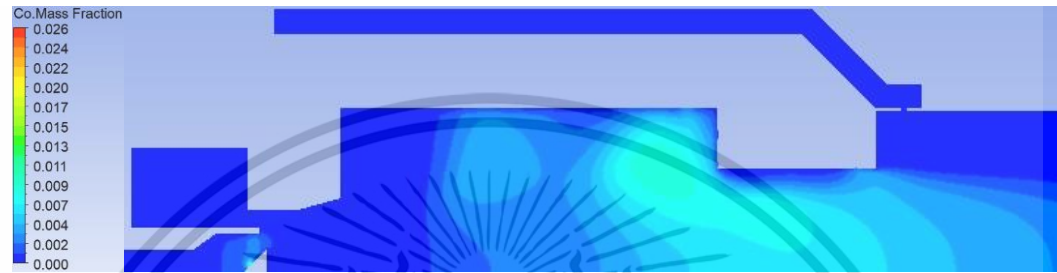


ค)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ง)



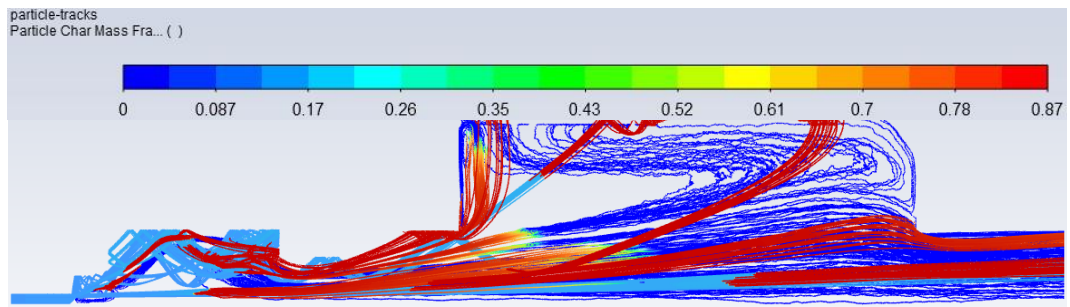
จ)

รูปที่ 4.4 ก.) การกระจายตัวของอนุหภูมิ ข.) ความเร็วในแนวแกน  
ค.) การกระจายตัวของสารระเหย ง.) ปริมาณการใช้ออกซิเจน  
จ.) การเกิด CO ในห้องเผาไหม้

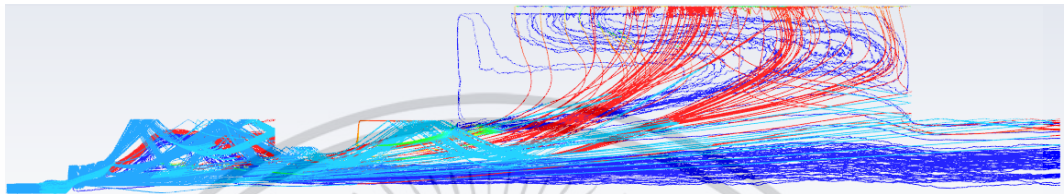
จากรูปที่ 4.4 จะเห็นว่าการขยายทางออกของทางออกของท่อปฐมภูมิเป็น 1.75 เท่า ทำให้ทางออกของลมทุติยภูมิมีขนาดเล็กลงเป็นอย่างมาก ความเร็วในแนวแกนจึงสูงขึ้น กระแสการไหลย้อนกลับลดลงเป็นอย่างมากดังรูปที่ 4.4 ข) มีผลให้อนุหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วยบริเวณใกล้กับหัวเผาตกลงอย่างมากดังรูปที่ 4.4 ก) และการที่ตัววัตถุขวางการไหลมีขนาดใหญ่ขึ้นในอัตราส่วนเดียวกับการขยายหัวเผา ทำให้วัตถุขวางการไหลมีขนาดใหญ่กว่าท่อปฐมภูมิก่อนการขยาย มีผลให้อนุภาคบางส่วนปลดปล่อยสารระเหย และเผาไหม้ในบริเวณก่อนออกจากหัวเผาดังรูปที่ 4.4 ค) 4.4 ง) และ 4.4 จ)

จากทั้ง 4 กรณีข้างต้น เมื่อดูเส้นทางเดินของอนุภาค (particle tracks) ดังรูปที่ 4.5 จะเป็นเศษส่วนมวลของอนุภาคถ่านชาร์ (Char mass fraction) โดยสีจะบ่งบอกถึงมวลของอนุภาคถ่านชาร์ที่จะปลดปล่อยพลังงานออกมา จะเริ่มจากสีแดงที่มีปริมาณมากที่สุดไปจนถึงสีน้ำเงินที่มีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งหมายถึงปลดปล่อยพลังงานหมดแล้ว

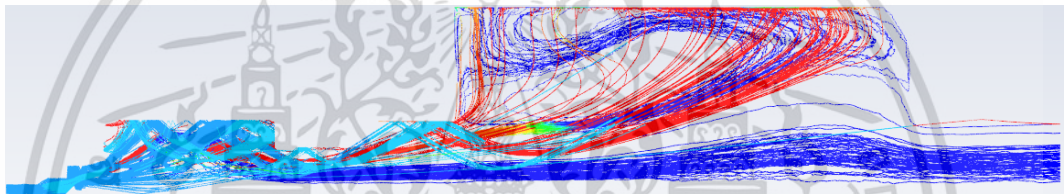
เมื่อเปรียบต่อปฐมภูมิขนาดดั้งเดิมกับการขยายต่อปฐมภูมิ จะเห็นว่าที่ขนาดดั้งเดิมการที่มีกระแสไหลย้อนกลับที่สูงทำให้มีอนุภาคปลดปล่อยพลังงานใกล้กับหัวเผามากกว่ากรณีขยายหัวเผาทำให้อุณหภูมิใกล้หัวเผาสูง แต่การกระจายตัวของอนุภาคในห้องเผาใหม่ช่วยมีน้อย และมีบางส่วนหลุดออกไปยังทางออกโดยที่ยังไม่เกิดการเผาไหม้ ดังรูปที่ 4.5 ก.) เมื่อขยายต่อปฐมภูมิเป็นขนาด 1.25 เท่า มีผลให้อิทธิพลของลมทุติยภูมิสูงขึ้น กระแสการไหลย้อนกลับลดลง ทำให้มีอนุภาคปลดปล่อยพลังงานใกล้หัวเผาน้อยลงทำให้ช่วงของอุณหภูมิสูงอยู่ห่างจากหัวเผามากขึ้น และอนุภาคส่วนใหญ่จะอยู่ที่บริเวณใกล้ทางออกห้องเผาใหม่ช่วยดังรูปที่ 4.5 ข) ทำให้บริเวณนั้นมีอุณหภูมิสูงกว่าบริเวณกลางห้องเผาใหม่ช่วยดังรูปที่ 4.2 ก) เมื่อขยายต่อปฐมภูมิเป็นขนาด 1.5 เท่า มีผลให้ความเร็วในแนวแกนสูงขึ้น และมีอนุภาคสะท้อนมาอยู่บริเวณกลางห้องเผาใหม่ช่วยมากกว่ากรณี 1.25 เท่า ดังรูปที่ 4.5 ค) ทำให้อุณหภูมิบริเวณกลางห้องเผาใหม่ช่วยสูงกว่ากรณี 1.25 เท่า แต่การที่ความเร็วในแนวแกนสูงขึ้นจึงทำให้อุณหภูมิสูงออกห่างจากหัวเผามากกว่ากรณี 1.25 เท่า ดังรูปที่ 4.3 ก) จากการขยายหัวเผาเป็น 1.25 และ 1.5 เท่า มีโอกาสที่จะทำให้เสถียรภาพในการเผาไหม้ดีขึ้น แต่เมื่อทำการขยายเป็นขนาด 1.75 เท่า แม้ว่าจะมีอนุภาคกระจายตัวอยู่ภายในห้องเผาใหม่ช่วยมากกว่ากรณีอื่นๆ ตามสมมติฐานของการขยายทางออกของหัวเผา แต่อนุภาคส่วนใหญ่จะรวมตัวกันและปลดปล่อยพลังงานที่บริเวณมุมใกล้ทางออกของห้องเผาใหม่ช่วยดังรูปที่ 4.5 ง) เนื่องจากความเร็วในแนวแกนที่สูงขึ้นและไม่มีกระแสไหลย้อนกลับดังรูปที่ 4.4 ข) ทำให้อนุภาคไม่สามารถไหลย้อนกลับมาบริเวณกลางห้องเผาใหม่ได้ ด้วยเหตุผลที่กล่าวมากรณีขยาย 1.75 เท่า จึงมีโอกาที่เปลวไฟจุดหลุดมากกว่ากรณีอื่นๆ และเมื่อขยายดูเส้นทางเดินของอนุภาคกรณี 1.75 เท่า ดังรูปที่ 4.6 จะเห็นว่ามีอนุภาคชนกับวัตถุขวางการไหลและสะท้อนอยู่ที่บริเวณหัวเผา ทำให้มีการปลดปล่อยอนุภาคผ่านขั้วบริเวณก่อนออกจากหัวเผา ซึ่งมีโอกาสที่ภายในหัวเผาจะมีอุณหภูมิสูงและเกิดความเสียหายได้ จากเหตุผลที่กล่าวมาสามารถสรุปได้ว่า การขยายหัวเผาขนาด 1.5 เท่า เหมาะสมที่สุดในกรณีการเปลี่ยนรูปร่างของปูนทนไฟ เพื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงบริเวณใกล้หัวเผา จึงได้ทำการปรับปรุงรูปร่างของปูนทนไฟบริเวณทางเข้าของห้องเผาใหม่ช่วย และทำการจำลองเพิ่มอีก 2 รูปแบบด้วยกันคือ ปรับให้เป็นรูปทรงกรวยแบบไม่มีระดับ และปรับเป็นรูปทรงสาม โดยจะทำการจำลองกับการขยายต่อปฐมภูมิ 1.5 เท่า



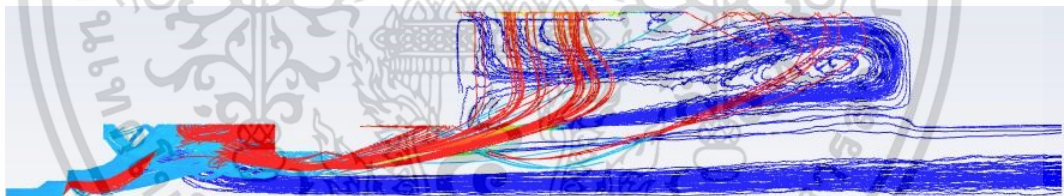
ก)



ข)

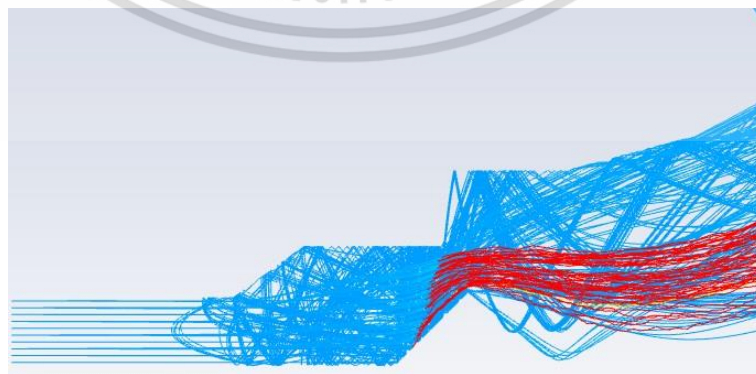


ค)



ง)

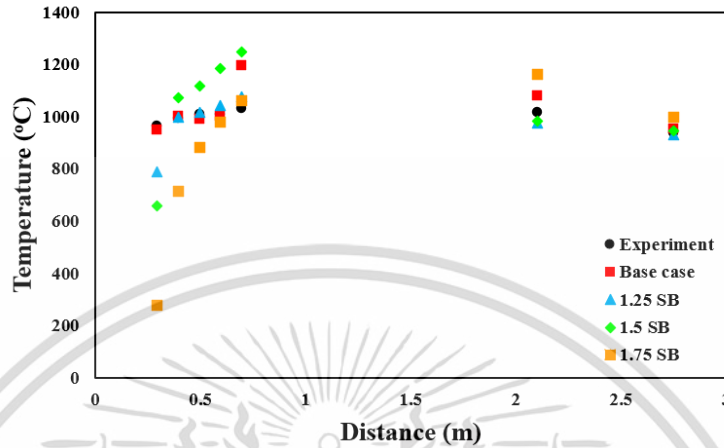
รูปที่ 4.5 เส้นทางเดินอนุภาค ก.) 1.0 IB ข.) 1.25 SB ค.) 1.5 SB ง) 1.75 SB



รูปที่ 4.6 ภาพขยายบริเวณทางออกท่อปฐมภูมิกรณีขยาย 1.75 เท่า

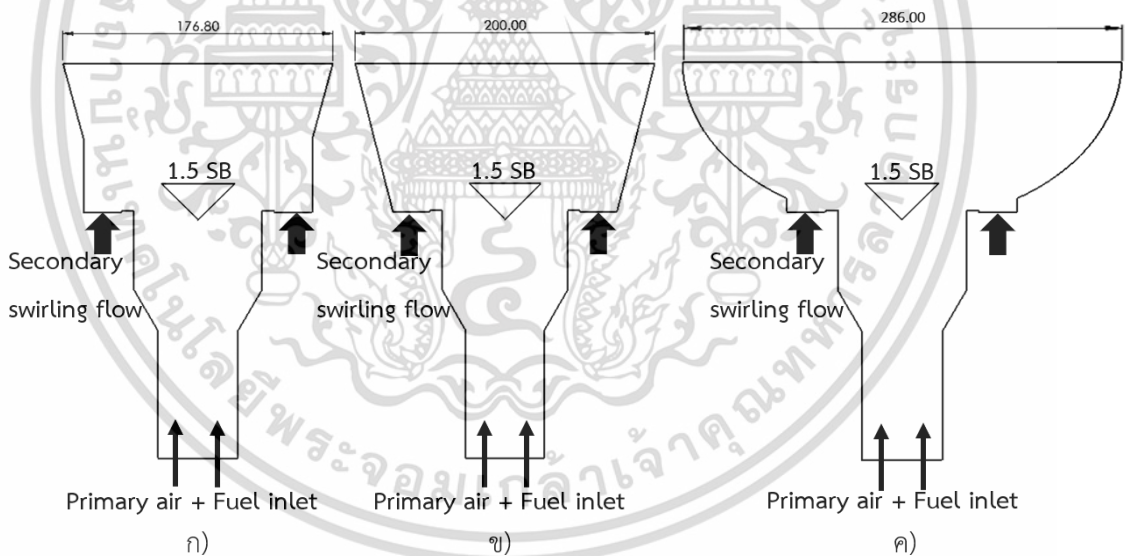
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการจำลองทั้ง 4 กรณี สามารถพล็อตกราฟอุณหภูมิตามแนวแกนได้ดังรูปที่ 4.7 จากรูปจะเห็นว่ากรณีขยาย 1.5 เท่า มีอุณหภูมิในแนวแกนภายในห้องเผาไหม้ช่วยสูงที่สุดซึ่งจะสอดคล้องกับการที่มีการกระจายตัวของอนุภาคที่สูงกว่ากรณีอื่น ๆ



รูปที่ 4.7 อุณหภูมิตามแนวแกนของหัวเผาแต่ละกรณี

4.5 การปรับปรุงรูปร่างของปუნทไฟ

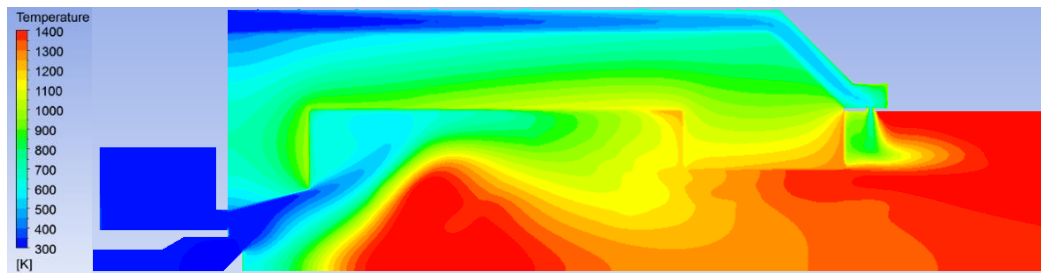


รูปที่ 4.8 ก.) รูปทรงปუნทไฟเดิม ข) รูปทรงกรวยแบบไม่มีระดับ ค.) รูปทรงสาม

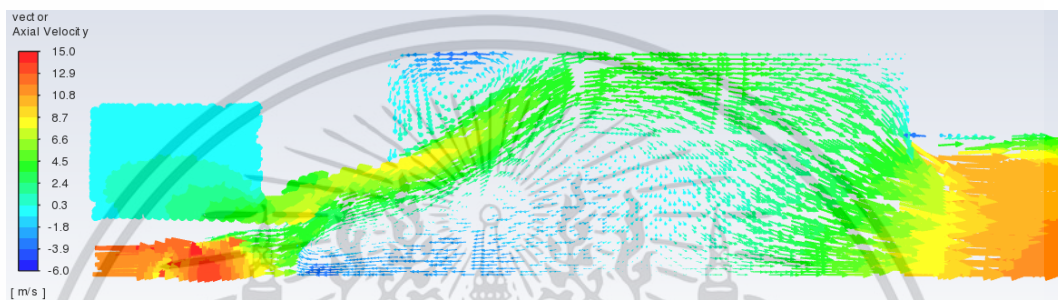
จากรูปที่ 4.8 เป็นการปรับปรุงรูปทรงของปუნทไฟเพื่อทำการจำลอง โดยทำการปรับให้ไม่มีระดับ ดังรูปที่ 4.8 ข.) ทำให้กระแสการไหลไม่เป็นเส้นตรงมากเกินไป ซึ่งมีโอกาสเกิดกระแสไหลย้อนกลับมากขึ้น และปรับเป็นทรงสาม ดังรูปที่ 4.8 ค.) มีโอกาสที่กระแสการไหลจะวิ่งไปตามเส้นโค้งของทรงสาม ทำให้ความรุนแรงของกระแสการไหลในแนวแกนลดลง โดยจะทำการจำลองทั้ง 2 กรณีนี้ภายใต้เงื่อนไขเดิม ซึ่งผลการจำลองเป็นดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

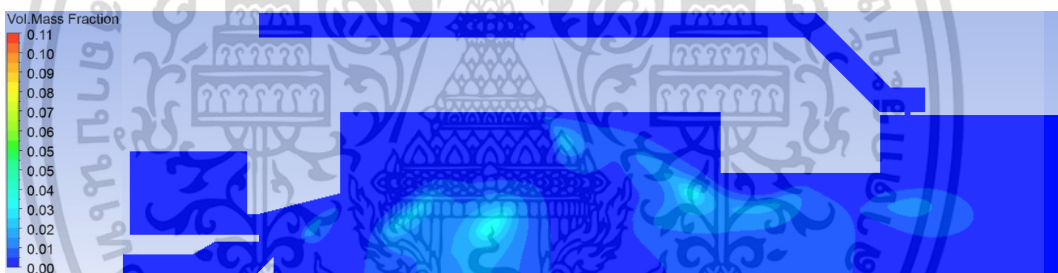
#### 4.5.1 การปรับปรุงรูปร่างของป้อนทไฟเป็นทรงกรวยแบบไม่มีระดับ



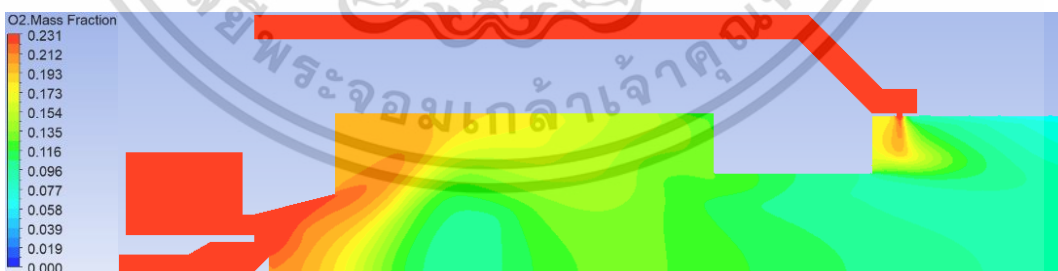
ก)



ข)

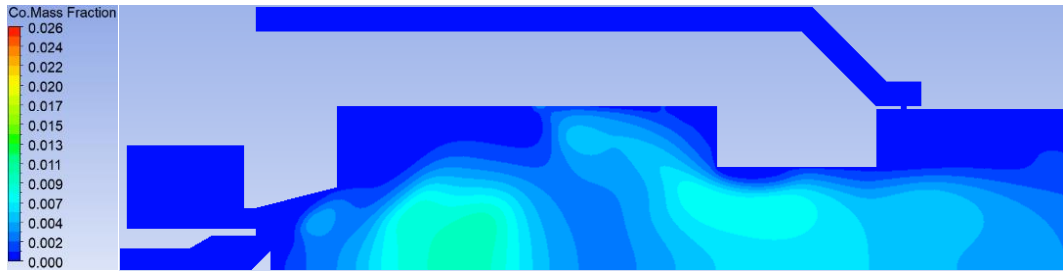


ค)

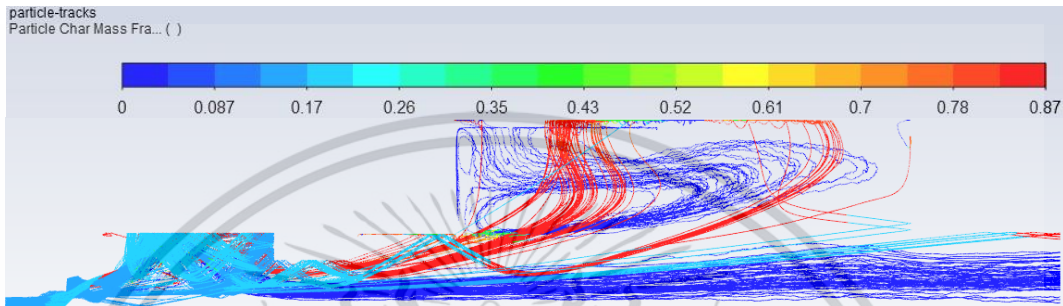


ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



จ)

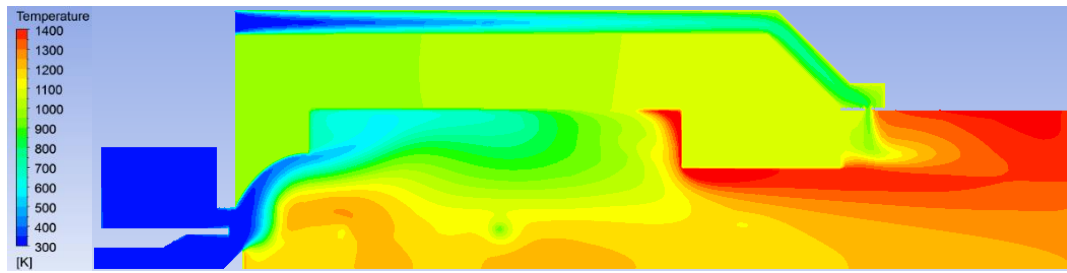


ข)

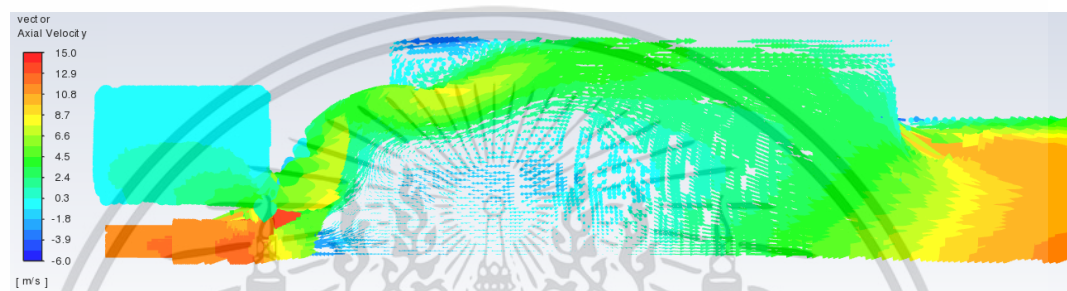
รูปที่ 4.9 ก.) การกระจายตัวของอนุภาคนิวเคลียส ข.) ความเร็วในแนวแกน  
 ค.) การกระจายตัวของสารระเหย ง.) ปริมาณการใช้ออกซิเจน  
 จ.) การเกิด CO ในห้องเผาไหม้ ฉ.) เส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค

จากรูปที่ 4.9 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเปลี่ยนเป็นทรงกรวยแบบไม่มีระดับ ทำให้การกระจายตัวของอนุภาคนิวเคลียสภายในห้องเผาไหม้ช่วยดีขึ้น และอนุภาคนิวเคลียสที่ติดกับวัตถุขวางการไหลสูงขึ้นดังรูปที่ 4.9 ก.) เกิดจากการไหลแนวเส้นตรงลดลงเนื่องจากไม่มีระดับที่เป็นเส้นตรง และเกิดการกระแสไหลย้อนกลับมากขึ้น ดังรูปที่ 4.9 ข.) ทำให้พัดพาสารระเหยกระจายตัวในห้องเผาไหม้ช่วยมากขึ้น และมีการใช้สารระเหยผสมกับออกซิเจนในการเผาไหม้ทำให้ความเข้มข้นของสารระเหยและออกซิเจนลดลงดังรูปที่ 4.9 ค.) และ 4.9 ง.) การเกิด CO จะมีมากในบริเวณที่เกิดการเผาไหม้ทำให้มีอนุภาคนิวเคลียสสูง ในกรณีนี้จะอยู่บริเวณกลางห้องเผาไหม้ช่วย และบริเวณใกล้กับทางออกห้องเผาไหม้ช่วย ดังรูปที่ 4.9 จ.) และเมื่อดูเส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคดังรูปที่ 4.9 ฉ.) จะเห็นว่าข้อดีของการขยายหัวเผายังคงอยู่เนื่องจากมีอนุภาคนิวเคลียสกระจายตัวอยู่ในห้องเผาไหม้ช่วยจำนวนมากร่วมกับการเผาไหม้บริเวณใกล้กับหัวเผาดีขึ้น ส่งผลให้มีเสถียรภาพในการเผาไหม้มากขึ้น เนื่องจากการปรับรูปร่างปูนทนไฟให้ผลไปในทางที่ดี ผู้เขียนวิทยานิพนธ์จึงทำการจำลองเพิ่มเติมโดยการเปลี่ยนรูปร่างปูนทนไฟเป็นทรงสามเหลี่ยม ซึ่งเกิดจากสมมติฐานที่ว่าหากเปลี่ยนลักษณะทางออกให้เป็นเส้นโค้งจะส่งผลให้เกิดกระแสการไหลย้อนกลับที่ดีขึ้น โดยผลการจำลองจะเป็นไปตามหัวข้อ 4.5.2

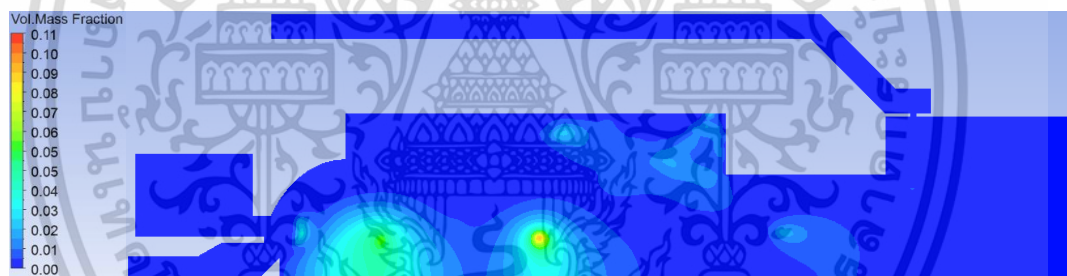
#### 4.5.2 การปรับปรุงรูปร่างของป้อนทไฟเป็นทรงชาม (Bowl Shape)



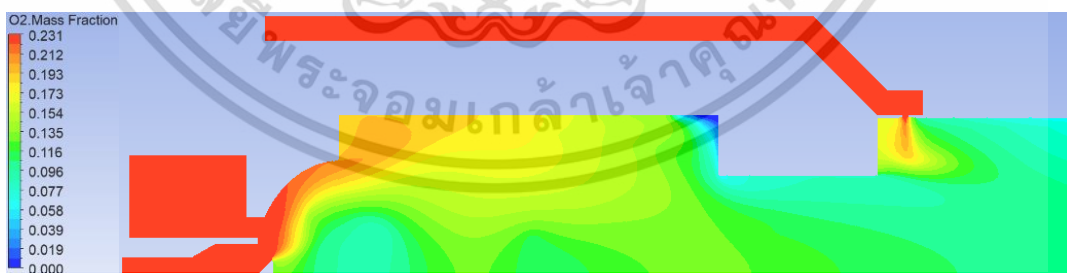
ก)



ข)

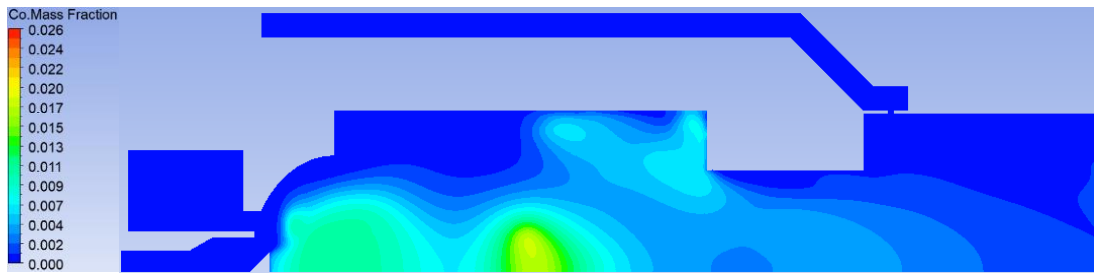


ค)

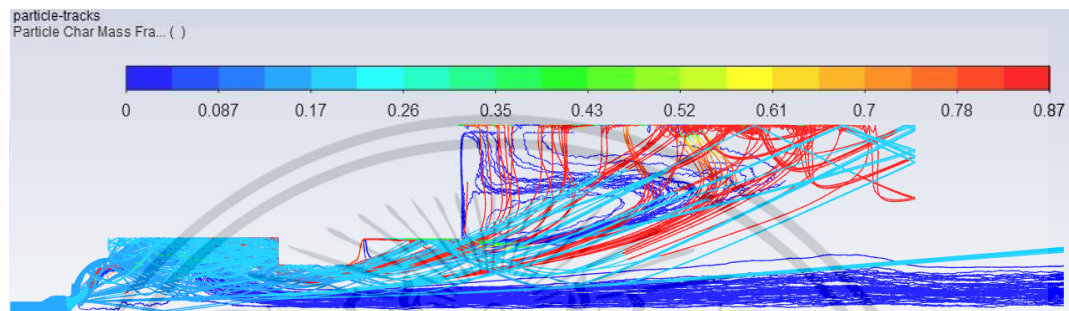


ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



จ)

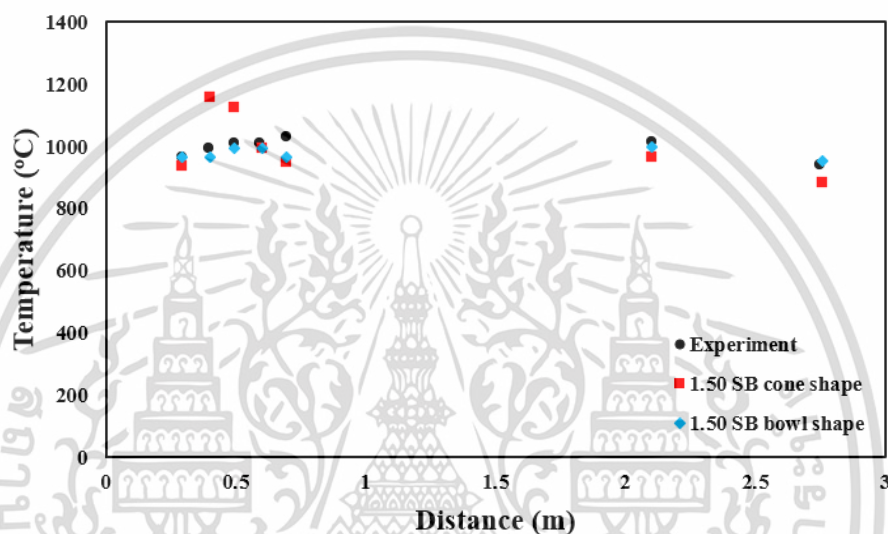


ฉ)

รูปที่ 4.10 ก.) การกระจายตัวของอุณหภูมิ ข.) ความเร็วในแนวแกน  
ค.) การกระจายตัวของสารระเหย ง.) ปริมาณการใช้ออกซิเจน  
จ.) การเกิด CO ในห้องเผาไหม้ ฉ.) เส้นทางเดินอนุภาค

จากรูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วยที่เข้าใกล้วัตถุ ขวางการไหลมากขึ้น ดังรูปที่ 4.10 ก.) เกิดจากความเร็วในแนวแกนลดลง เนื่องจากกระแสของความเร็วไหลไปตามเส้นโค้งของรูปทรงสามเหลี่ยมทางเข้าห้องเผาไหม้ช่วย ดังรูปที่ 4.10 ข.) เมื่อความเร็วในแนวแกนลดลงทำให้อิทธิพลในการพัดพาสารระเหยตามแนวลดลงตามไปด้วย และเพิ่มกระแสไหลย้อนกลับให้มีบริเวณกว้างขึ้น สารระเหยส่วนใหญ่จึงรวมตัวอยู่ภายในห้องเผาไหม้ช่วย บริเวณใกล้กับวัตถุขวางการไหล ดังรูปที่ 4.10 ค.) ทำให้อุณหภูมิบริเวณนั้นสูงขึ้น และการที่อุณหภูมิสูงใกล้กับหัวเผาจะทำให้โอกาสที่เปลวไฟจะหลุดออกจากห้องเผาไหม้ช่วยลดลง ในส่วนของปริมาณออกซิเจน บริเวณที่มีอุณหภูมิสูงจะมีการใช้ออกซิเจนไปกับการเผาไหม้ ทำให้ปริมาณออกซิเจนลดลง ดังรูปที่ 4.10 ง.) และในส่วนที่มีการเผาไหม้สูงนั้นจะส่งผลให้เกิด CO มากขึ้นด้วย ดังรูปที่ 4.10 จ.) เมื่อสังเกตเส้นทางเดินอนุภาค ดังรูปที่ 4.10 ฉ.) การปรับปรุงปูนทนไฟมาเป็นทรงสามเหลี่ยม จะทำให้อนุภาคกระจายภายในห้องเผาไหม้ช่วยมากกว่าปูนทนไฟทรงโค่น ซึ่งในส่วนนี้จะทำให้มีเสถียรภาพในการเผาไหม้มากขึ้น

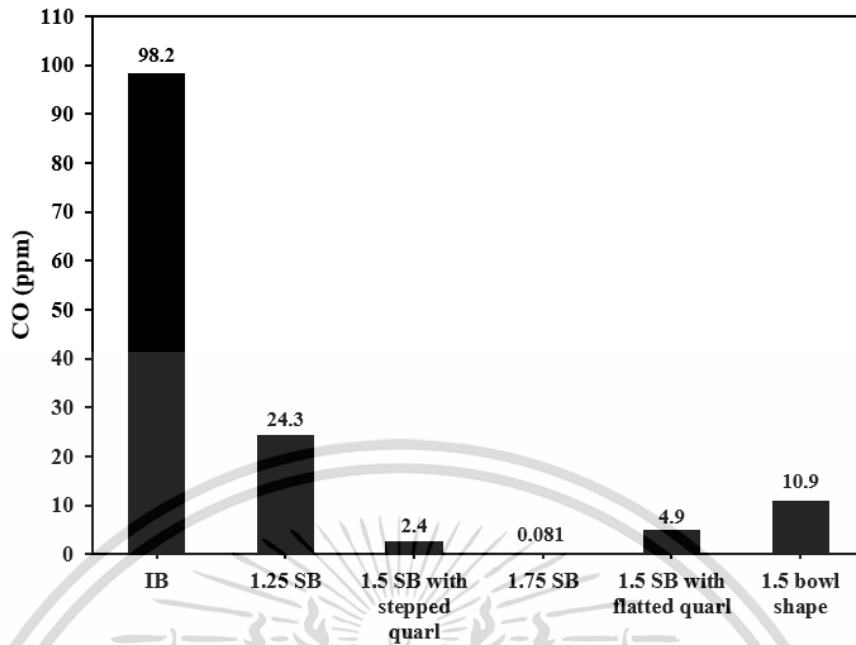
ในการจำลองการเปลี่ยนรูปทรงปูนทนไฟสามารถพล็อตกราฟอุณหภูมิตามแนวแกนได้ดังรูปที่ 4.11 จากรูปจะเห็นว่า การปรับรูปทรงทั้งสองกรณีมีแนวโน้มที่เสถียรภาพการเผาไหม้ดีขึ้นกว่ากรณีรูปร่างปูนทนไฟเดิม สืบเนื่องจากอุณหภูมิตามแนวแกนที่สูงขึ้น มีอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับการทดลองกรณีพื้นฐาน และยังคงข้อดีของกรณีขยาย 1.5 เท่า ไว้ได้คือมีอนุภาคกระจายตัวอยู่ในห้องเผาไหม้ช่วยมากขึ้น และจากการที่มีกระแสไหลย้อนกลับของกรณีทรงขามที่กว้างขึ้นดังรูปที่ 4.10 ฉ) ทำให้ตั้งอุณหภูมิเข้ามาใกล้กับหัวเผาได้ดีกว่าทรงกรวย จึงเกิดการเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้ช่วยได้ดีขึ้น ส่งผลให้เกิดอุณหภูมิสูงบริเวณหลังวัตถุการไหลดังรูปที่ 4.10 ก)



รูปที่ 4.11 อุณหภูมิตามแนวแกนกรณีปรับรูปทรงปูนทนไฟ

#### 4.6 การปลดปล่อย CO

การปลดปล่อย CO จากการเผาไหม้ของหัวเผาทั้งสี่รูปแบบมีความแตกต่างกัน เกิดจากสมรรถนะการเผาไหม้ที่ต่างกันของแต่ละหัวเผา หากเกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์และอุณหภูมิไม่หลุดออกจากรูปร่างปูนทนไฟโดยที่ยังเผาไหม้ไม่หมด CO ที่เกิดขึ้นก็จะมีค่าน้อย โดยค่าการปลดปล่อย CO ในหน่วย ppm ของแต่ละหัวเผา คือ 98.2, 24.3, 2.4, 0.081, 4.9 และ 10.9 ตามลำดับการจำลองสามารถสรุปเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.12 การปลดปล่อย CO

จากรูปที่ 4.12 จะเห็นว่า การขยายท่อป้อนลมสามารถช่วยลดการปล่อย CO ลงได้ เนื่องจากอนุภาคกระจายตัวและเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้ช่วยมากขึ้น โดยสาเหตุที่ค่า CO ลดลงเกิดจากการเผาไหม้ของอนุภาคถ่านชาร์หมด และในกรณีขยาย 1.75 เท่า มีค่า CO น้อยมาก เกิดจากการที่อนุภาคกระจายตัวในห้องเผาไหม้ช่วยได้มากกว่ากรณีอื่นทำให้เผาไหม้ของอนุภาคถ่านชาร์หมดได้มากกว่ากรณีอื่น แต่การเผาไหม้ของอนุภาคส่วนใหญ่จะเกิดที่บริเวณมุมก่อนที่จะออกจากห้องเผาไหม้ช่วย สังเกตได้จากเส้นทางเดินของอนุภาคดังรูปที่ 4.5 ง) ส่งผลให้การกระจายตัวของอนุภาคบริเวณกลางห้องเผาไหม้ช่วยไม่ดี และมีอุณหภูมิสูงบริเวณใกล้ทางออกของห้องเผาไหม้ช่วยดังรูปที่ 4.4 ก) และเมื่อพิจารณาในกรณีหัวขยาย 1.5 เท่า ก่อนทำการเปลี่ยนรูปทรงของปูนทนไฟที่ทางเข้าห้องเผาไหม้ช่วย การที่เกิด CO ต่ำกว่ากรณีเปลี่ยนรูปทรงปูนทนไฟเกิดจากการไหลย้อนกลับที่ต่ำ ทำให้อนุภาคบางส่วนเกิดการเผาไหม้ที่มุมทางออกของห้องเผาไหม้ช่วยได้อนุภาคจึงมีเวลาที่จะสลายตัวก่อนออกจากห้องเผาไหม้ช่วยมากขึ้นและเผาไหม้หมดก่อนที่จะออกจากห้องเผาไหม้หลัก และเมื่อเปลี่ยนรูปทรงปูนทนไฟที่ทางเข้าห้องเผาไหม้ช่วย จากการที่มีกระแสไหลย้อนกลับที่รุนแรงขึ้นทำให้อนุภาคที่กระจายตัวรวมกันที่บริเวณมุมทางออกลดลง ส่งผลให้อนุภาคกระจายตัวอยู่ใกล้กับวัตถุวางการไหลมากขึ้น และเกิดการเผาไหม้บริเวณกลางห้องเผาไหม้ช่วยมากขึ้น สังเกตได้จากการกระจายตัวของอนุภาคดังรูปที่ 4.9 ก) และ รูปที่ 4.10 ก) แต่ก็มีอนุภาคขนาดใหญ่บางส่วนที่ยังเผาไหม้ไม่หมดและหลุดออกจากห้องเผาไหม้หลักไป ดังรูปที่ 4.9 ฉ) และ 4.10 ฉ) ค่า CO จึงเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามก็ยังมีค่าน้อยกว่าแบบดั้งเดิมและหัวขยาย 1.25 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผลการจำลองและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการจำลอง

จากการทดลองพบว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิของท่อปฐมภูมิแบบดั้งเดิมจะให้อุณหภูมิที่บริเวณทางออกของหัวเผาสูง เมื่อพิจารณาร่วมกับผลการจำลองพบว่ามีการไหลย้อนกลับรุนแรง พัดพาสารระเหยที่ปลดปล่อยออกจากอนุภาครวมที่บริเวณตรงกลางห้องเผาไหม้ช่วย ซึ่งสามารถช่วยยืนยันผลการทดลองเป็นอย่างดี

ในกรณีการขยายท่อปฐมภูมิ 1.25, 1.5 และ 1.75 เท่า บริเวณทางเข้าของอากาศทุติยภูมิมีขนาดเล็กลง ความเร็วตามแนวแกนจึงสูงขึ้น ทิศทางการหมุนควงจึงลดลง ทำให้อธิพลของแรงหนีศูนย์กลางลดลง มวลอากาศถูกดึงไปใกล้หัวเผาน้อยลง กระแสการไหลย้อนกลับจึงลดความรุนแรงลง ทำให้อุณหภูมิใกล้กับหัวเผาลดลง ซึ่งการที่อุณหภูมิสูงอยู่ห่างจากหัวเผามากขึ้นนั้นหมายถึงมีการเผาไหม้บริเวณใกล้กับบริเวณหัวเผาน้อยลง ทำให้มีความเสี่ยงที่เกิดการเป่าดับบริเวณใกล้หัวเผาได้ โดยเฉพาะกรณี 1.75 เท่า เมื่อเปรียบเทียบเส้นทางการเดินของอนุภาค การขยายท่อปฐมภูมิเป็น 1.25 และ 1.5 เท่า ทำให้วัตถุขวางการไหลมีขนาดเพิ่มขึ้น อนุภาคจึงชนกับวัตถุขวางการไหลมากขึ้น การกระจายตัวของอนุภาคภายในห้องเผาไหม้ช่วยจึงมากขึ้น ทำให้เกิดโอกาสในการปลดปล่อยสารระเหยมากขึ้น โอกาสที่อนุภาคจะหลุดจากห้องเผาไหม้หลักโดยเผาไหม้ไม่หมดลดลง แต่การขยายเป็น 1.75 เท่า อธิพลของความเร็วในแนวแกนที่สูงกว่ากรณีอื่น ๆ นั้น ส่งผลให้อนุภาคอนุภาคส่วนใหญ่ไปรวมตัวกันที่มุมทางออกของห้องเผาไหม้ช่วย การเผาไหม้ส่วนใหญ่จึงเกิดที่บริเวณนั้น ความเสี่ยงที่เปลวไฟจะหลุดจึงมากกว่ากรณีการขยายหัวเผาขนาดอื่น ๆ และการเปลี่ยนรูปทรงปูนทนไฟที่ทางเข้าของห้องเผาไหม้ช่วยในกรณีขยาย 1.5 เท่า เป็นทรงกรวยแบบไม่มีระดับ และทรงสามเหลี่ยมทำให้การกระจายตัวของอุณหภูมิใกล้หัวเผาที่ขยาย 1.5 เท่าดีขึ้น สามารถสร้างอุณหภูมิสูงใกล้ทางออกของหัวเผาได้ใกล้เคียงหัวเผาเดิม และยังคงข้อดีของการกระจายอนุภาคในห้องเผาไหม้ไว้ได้

การปลดปล่อย CO ที่ได้จากการจำลองมีแนวโน้มลดลงเมื่อท่อปฐมภูมิขยายมากขึ้น ซึ่งท่อปฐมภูมิดั้งเดิมมี CO 98.2 ppm ท่อปฐมภูมิขยาย 1.25 เท่ามี CO 24.3 ppm ท่อปฐมภูมิขยาย 1.5 เท่ามี CO 2.4 ppm ท่อปฐมภูมิขยาย 1.75 เท่ามี CO 0.081 ppm ท่อปฐมภูมิขยาย 1.5 เท่า ทางเข้าห้องเผาไหม้ช่วยทรงกรวยแบบไม่มีระดับมี CO 4.9 ppm และท่อปฐมภูมิขยาย 1.5 เท่า ทางเข้าห้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เผาไหม้ช่วยทรงขามมี CO 10.9 ppm โดยในกรณีขยาย 1.5 เท่า การที่ CO เพิ่มขึ้นเกิดจากการเผาไหม้ไม่หมดของถ่านชาร์ที่เกิดจากอนุภาคขนาดใหญ่

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการศึกษาที่ศึกษาเพียงกำลังความร้อนที่ 300 กิโลวัตต์ ซึ่งอาจจะมีความเป็นไปได้ว่าในแต่ละกรณีของหัวเผาขนาดต่าง ๆ จะทำให้ผลที่ดีในกำลังวัตต์ที่ต่างออกไป ในการศึกษาครั้งถัดไปควรจำลองเพิ่มกำลังความร้อนของห้องเผาไหม้ เพื่อศึกษาผลที่เกิดขึ้นและนำมาเปรียบเทียบกับการศึกษาครั้งนี้

2. เนื่องจากในกรณีทางเข้าห้องเผาไหม้ช่วยทรงขามทำให้มีอนุภาคกระจายตัวมากขึ้น แต่ก็ยังมีบางส่วนที่เป็นอนุภาคขนาดใหญ่หลุดออกไปก่อนที่จะปลดปล่อยพลังงาน ในการศึกษาต่อจากนี้ควรขยายขนาดของห้องเผาไหม้ช่วย เพื่อให้อนุภาคขนาดใหญ่เกิดเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้ช่วย

3. จากบทที่ 3 ในกรณีของการจำลองแบบ LES ของการศึกษานี้ให้ผลไม่ได้ตามที่คาดหวังไว้ เนื่องจากการปรับเปลี่ยนค่าการเผาไหม้ของถ่านชาร์มีอิทธิพลต่ออุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้น้อย ซึ่งในกรณีที่ศึกษานี้เป็นการจำลองแบบสองมิติซึ่งอาจจะไม่เหมาะสมกับการจำลองทำให้อุณหภูมิกระจายตัวได้ไม่ทั่วถึง ดังนั้นในการศึกษาครั้งถัดไปควรศึกษาการจำลองรูปแบบสามมิติ คาดว่ามีความเป็นไปได้ที่จะให้ผลลัพธ์ที่ดี

## เอกสารอ้างอิง

1. สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน. ภาพรวมพลังงาน. กระทรวงพลังงาน. 2565.
2. Li, J., et al., *Co-firing based on biomass torrefaction in a pulverized coal boiler with aim of 100% fuel switching*. **Applied Energy**, 2012. 99: p. 344-354.
3. Li, J., et al., *Flame characteristics of pulverized torrefied-biomass combusted with high-temperature air*. **Combustion and Flame**, 2013. 160(11): p. 2585-2594.
4. Panahi, A., et al., *On the particle sizing of torrefied biomass for co-firing with pulverized coal*. **Combustion and Flame**, 2018. 194: p. 72-84.
5. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. คู่มือการพัฒนาและการลงทุนผลิตพลังงานทดแทน. กระทรวงพลังงาน. 2552.
6. Archan, G., et al., *Experimental evaluation of primary measures for NOX and dust emission reduction in a novel 200 kW multi-fuel biomass boiler*. **Renewable Energy**, 2021. 170: p. 1186-1196.
7. Wang, X., et al., *Experimental investigation on biomass co-firing in a 300MW pulverized coal-fired utility furnace in China*. **Proceedings of the Combustion Institute**, 2011. 33(2): p. 2725-2733.
8. ราชภัฏ ไชยโย. การประเมินทางด้านเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมการทดแทนเชื้อเพลิงถ่านหินผงด้วยชีวมวลแบบทอรีแฟคชัน บดละเอียดในเตาเผาขนาด 320 กิโลวัตต์ โดยใช้วิธีการศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 2565.
9. Chen, W.-H., et al., *An evaluation on improvement of pulverized biomass property for solid fuel through torrefaction*. **Applied Energy**, 2011. 88(11): p. 3636-3644.
10. Pérez-Jeldres, R., et al., *A modeling approach to co-firing biomass/coal blends in pulverized coal utility boilers: Synergistic effects and emissions profiles*. **Energy**, 2017. 120: p. 663-674.
11. Aziz, M., D. Budianto, and T. Oda *Computational Fluid Dynamic Analysis of Co-Firing of Palm Kernel Shell and Coal*. **Energies**, 2016. 9, DOI: 10.3390/en9030137.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12. Mandø, M., et al., *Pulverized straw combustion in a low-NO<sub>x</sub> multifuel burner: Modeling the transition from coal to straw*. **Fuel**, 2010. 89(10): p. 3051-3062.
13. Muto, M., H. Watanabe, and R. Kurose, *Large eddy simulation of pulverized coal combustion in multi-burner system—effect of in-furnace blending method on NO emission*. **Advanced Powder Technology**, 2019. 30(12): p. 3153-3162.
14. Franchetti, B.M., et al., *Large Eddy simulation of a pulverised coal jet flame*. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2013. 34(2): p. 2419-2426.
15. Muto, M., et al., *Large-eddy simulation of pulverized coal jet flame – Effect of oxygen concentration on NO<sub>x</sub> formation*. **Fuel**, 2015. 142: p. 152-163.
16. Sun, W., W. Zhong, and T. Echehki, *Large eddy simulation of non-premixed pulverized coal combustion in corner-fired furnace for various excess air ratios*. **Applied Mathematical Modelling**, 2019. 74: p. 694-707.
17. Wen, X., et al., *Flamelet LES of a 40 kWth pulverized torrefied biomass furnace in air and oxy-fuel atmospheres*. **Proceedings of the Combustion Institute**, 2022.
18. Zhao, C., et al., *Large eddy simulations and analysis of NO emission characteristics in a laboratory pulverized coal flame*. **Fuel**, 2020. 279: p. 118316.
19. ชินภัทร ชูระการ. การพัฒนาหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลในหม้อน้ำอุตสาหกรรม. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2558.
20. พงศนันท์ แก่นพรม. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2560.
21. ฉัตรเฉลิม แก้วชมภู. อิทธิพลของอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงแบบครีบนำร่องและวัตถุขวางการไหลต่อการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวลผงที่ 300 kW. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2563.
22. จารุวัตร เจริญสุข. **พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณและการประยุกต์ในงานวิศวกรรม**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: มีนเซอร์วิศฯพลา. 2561.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



36th  
**ME-NETT**  
**2022**

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกล  
แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 36  
19 - 22 กรกฎาคม 2565

ณ โรงแรมฮอลิเดย์อินน์ วานา นาวา หัวหิน  
จังหวัด ประจวบคีรีขันธ์

พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ME-NETT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 36  
วันที่ 19-22 กรกฎาคม พ.ศ. 2565 จังหวัดประจวบคีรีขันธ์

AEC-0007



## อิทธิพลของการขยายทางออกของท่อปฐมภูมิต่อสมรรถนะหัวเผาชีวมวล Effect of primary tube outlet expansion on performance biomass burner

พงศ์กร สิริภูมิ, ภรณ์เพ็ญ ลภวิธนากุล, ณัฏวิภา เจียรระโนวชิระ, จารุวัตร เจริญสุข\*

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
1 ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีเป้าหมายเพื่อประเมินอิทธิพลของการขยายทางออกของท่อปฐมภูมิและการปรับปรุงปูนทนไฟที่มีผลต่อการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล ณ 300 กิโลวัตต์ความร้อน ผ่านการจำลองด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ โดยมีการตรวจสอบความเป็นอิสระของกริดหรือเมชที่ใช้คำนวณ อุณหภูมิ และการปลดปล่อยไอเสียเพื่อประเมินความน่าเชื่อถือของการจำลองกับการทดสอบจริง สำหรับกรณีท่อปฐมภูมิและรูปร่างปูนทนไฟแบบดั้งเดิม จากนั้นทำการจำลองเพิ่มเติมอีก 4 รูปแบบคือ 1.ท่อปฐมภูมิขยาย 1.25 เท่า 2.ท่อปฐมภูมิขยาย 1.5 เท่า 3.ท่อปฐมภูมิขยาย 1.5 เท่า และมีการเปลี่ยนรูปร่างทางเข้าของห้องเผาไหม้ช่วยเป็นทรงชาม (bowl shape) จากการทดลองพบว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิของท่อปฐมภูมิแบบดั้งเดิมจะให้อุณหภูมิบริเวณทางออกของหัวเผาสูง โดยอุณหภูมิที่ตำแหน่ง T1 วัดได้ 800 องศาเซลเซียส เมื่อพิจารณาารวมกับผลการจำลองกรณีท่อปฐมภูมิแบบดั้งเดิม พบว่ามีกระแสการไหลย้อนกลับรุนแรง ที่ตำแหน่งที่ปลดปล่อยออกจากอนุภาคน้ำมันที่บริเวณตรงกลางห้องเผาไหม้ช่วย ช่วยยืนยันผลการทดลองเป็นอย่างดี กรณีขยายท่อปฐมภูมิ 1.25 เท่า อุณหภูมิหลังวัดตรงกลางการไหลจะต่ำลงและจะอยู่ห่างจากวัดตรงกลางการไหลมากกว่ากรณีท่อปฐมภูมิดั้งเดิม กรณีขยายท่อปฐมภูมิ 1.5 เท่า อุณหภูมิจะสูงขึ้นบริเวณทางออกของห้องเผาไหม้ช่วย เกิดการเป่าทับใกล้หัวเผา แต่การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้เพิ่มขึ้น และกรณีการเปลี่ยนรูปร่างทางเข้าของห้องเผาไหม้ช่วย ทำให้การกระจายตัวของอุณหภูมิใกล้หัวเผาลดลงขยาย 1.5 เท่าดีขึ้น สามารถสร้างอุณหภูมิสูงใกล้ทางออกของหัวเผาได้ใกล้เคียงหัวเผาเดิม และยังคงข้อดีของการกระจายตัวของอนุภาคในห้องเผาไหม้ช่วยไว้ได้ ในส่วนของการปลดปล่อย CO จะแปรตามการเผาไหม้ไม่หมดของถ่านชาร์

**คำหลัก:** ชีวมวลบด, หัวเผา, การเผาไหม้, ห้องเผาไหม้ช่วย

### Abstract

This research aims at assessing the effects of primary tube expansion and modification of the refractory quart on combustion of pulverized fuel at 300 kilowatts thermal throughput. The work was carried out by simulation with computational fluid dynamics and the experiment. The mesh independent test and model calibration were performed against measured temperature and flue gas emission of the base case as part of model validation. Based on the validated model, simulations were carried out on 4 burner configurations, having the expanded primary tube at 1) 1.25 times, 2) 1.5 times, 3) 1.5 times with cone-shape refractory quart and 4) 1.5 times with bowl-shape refractory quart. Experiment of the base case suggested high temperature at the first monitoring location, T1, being at 800 °C, where the simulation revealed strong recirculation, favoring peak temperature in the near burner zone. This observation agrees well with the experimental result. With 1.25 expanded tube, however, lower peak temperature was observed, where flame blow-off was found with 1.5 expanded tube and the peak temperature shifted to the exit zone of the pre-chamber. Nevertheless, this modification yielded greater dispersion of the char particles in the furnace section, leading to lower CO emission. Modification of the refractory quart from the original shape regained the recirculation in the near burner zone while maintaining good particle dispersion, CO emission vary in reverse proportion with the degree of char burnout.

**Keywords:** Pulverized fuel, Burner tip, Combustion, Pre-chamber

## 1 บทนำ

ในปัจจุบันการใช้เชื้อเพลิงถ่านหินก่อให้เกิดเป็นมลพิษจำนวนมากจึงมีแนวคิดที่จะใช้เชื้อเพลิงชีวมวลมาผสมเพื่อลดมลพิษที่เกิดขึ้นโดยใช้อัตราส่วนที่เหมาะสมเพื่อไม่ให้ประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าลดลง ทำให้มีการศึกษาเกี่ยวกับการเผาไหม้ร่วมระหว่างถ่านหินและชีวมวล

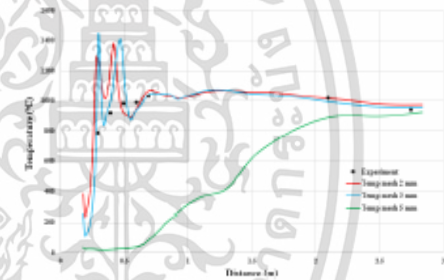
Ruben และคณะ ได้ทำการจำลองการเผาไหม้ร่วมถ่านหินและชีวมวลของหม้อน้ำขนาด 150 เมกะวัตต์ ผลที่ได้คือ CO และ SO<sub>2</sub> ลดลง และการถ่ายเทความร้อนลดลงเล็กน้อย (6%) [1] Muhammad และคณะ ทำการศึกษาการเผาไหม้ร่วมระหว่างถ่านหินและกะลาปาล์ม ของหม้อน้ำขนาด 300 เมกะวัตต์ โดยทดลองในอัตราส่วนผสมแตกต่างกันคือ 0%, 10%, 15%, 25% และ 50% ผลที่ได้คือ ที่อัตราส่วน 25% มีการเผาไหม้ดีที่สุด แต่เกิดค่า NO<sub>x</sub> มาก เงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดจึงอยู่ที่อัตราส่วน 10%-15% [2] Georg และคณะ ทำการทดลองกับหม้อไอน้ำแบบใช้เชื้อเพลิงหลายชนิดขนาด 200 กิโลวัตต์ เพื่อไม่ให้เกิดตะกรันและลดการปล่อย NO<sub>x</sub> โดยจะใช้ความเข้มข้นของออกซิเจนต่ำใน Fixed-bed และเพิ่มอากาศสองครั้งรวมถึงใช้การหมุนเวียนของก๊าซไอเสีย ผลที่ได้คือ ตะกรันลดลง การปล่อย NO<sub>x</sub> สำหรับเชื้อเพลิงชีวมวล เกษไม่ ไม้อัดแห้ง และถ่านอัดแห้ง ลดลง 39%, 40% และ 45% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับเตาเผาขนาดเล็กทั่วไป [3] จะเห็นได้ว่างานวิจัยข้างต้นมุ่งเน้นไปในเรื่องการตรวจสอบประสิทธิภาพและการเกิดมลพิษ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาเสถียรภาพของการเผาไหม้และการเกิดมลพิษ โดยเฉพาะการปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ด้วยวิธีศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) โดยมีการตรวจสอบความเป็นอิสระ ของกริดหรือเมชที่ใช้คำนวณ อุณหภูมิ และการปล่อยไอเสีย เพื่อประเมินความน่าเชื่อถือของผลจำลองกับการทดลองจริง สำหรับกรณีท่อป้อนภูมิ และรูปร่างป้อนไฟเพิ่มเติม จากนั้นในเงื่อนไขเดียวกัน จะทำการจำลองเพิ่มอีก 4 รูปแบบ คือ 1.ท่อป้อนภูมิขยาย 1.25 เท่า 2.ท่อป้อนภูมิขยาย 1.5 เท่า 3.ท่อป้อนภูมิขยาย 1.5 เท่า มีการเปลี่ยนรูปร่างป้อนไฟที่ทางเข้าของห้องเผาไหม้ช่วยเป็นทรงกรวยแบบไม่มีระดับ 4.ท่อป้อนภูมิขยาย 1.5 เท่า และเปลี่ยนรูปร่างป้อนไฟที่ทางเข้าของห้องเผาไหม้ช่วยจากทรงกรวยเป็นทรงสาม (bowl shape)

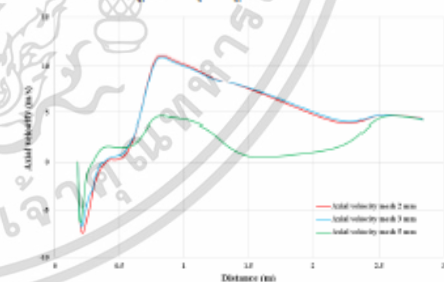
## 2 วิธีดำเนินการ

ก่อนที่จะทำการศึกษาดังกล่าว จะต้องทำการตรวจสอบความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง โดยการศึกษาผลกระทบของขนาดเมชที่เกิดขึ้นในการจำลอง และค่าพารามิเตอร์ของการจำลองที่มีผลต่อการเผาไหม้เพื่อให้เกิดการจำลองสอดคล้องกับผลการทดลอง โดยมีรายละเอียดดังนี้

**2.1 การตรวจสอบผลการจำลองกับค่าที่วัดได้จาก การทดลอง**  
ทำการเปรียบเทียบผลการจำลองขนาดของเมชที่บริเวณห้องเผาไหม้ช่วยของท่อป้อนภูมิตั้งเดิม โดยเปรียบเทียบ 3 ขนาดคือ 2 mm, 3 mm, และ 5 mm ผลที่ได้เป็นดังรูปที่ 1 และ 2



รูปที่ 1 อุณหภูมิในแนวแกน



รูปที่ 2 ความเร็วในแนวแกน

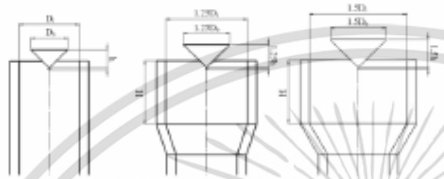
จากรูปที่ 1 และ 2 จะเห็นว่าที่เมชของห้องเผาไหม้ช่วย 5 mm ซึ่งมีความละเอียดต่ำสุดทั้งการกระจายอุณหภูมิในแนวแกนและความเร็วในแนวแกนจะมีความแตกต่างกับเมชอีกสองขนาดอย่างมาก ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าที่เมชของห้องเผาไหม้ช่วยขนาด 5 mm ไม่เหมาะสมกับการจำลอง จึงพิจารณาที่เมชขนาด 2 mm และ 3 mm ซึ่งบริเวณอุณหภูมิ T<sub>1</sub> เส้นกราฟจะตัดกันเหมือนกัน และกราฟมีความใกล้เคียงกันมาก แต่ที่เมช 2 mm จะมีกระแสไหลย้อนกลับที่รุนแรงกว่า

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 36  
วันที่ 19-22 กรกฎาคม พ.ศ. 2565 จังหวัดประจวบคีรีขันธ์

AEC-0007



บริเวณห้องเผาไหม้ช่วย จึงเลือกเมชของห้องเผาไหม้ช่วย  
ขนาด 2 mm ในการจำลองของการขยายท่อปฐุมุมขนาด  
ต่าง ๆ ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ท่อปฐุมุม

## 2.2 ข้อมูลเชื้อเพลิง

เชื้อเพลิงที่ใช้ในการจำลองคือไม้ยางพารา อนุภาคขนาด  
ใหญ่ที่สุดมีขนาด 1180  $\mu\text{m}$  ขนาดเล็กที่สุดคือ 38  $\mu\text{m}$  และ  
ขนาดโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 350  $\mu\text{m}$  โดยขนาดของเชื้อเพลิงสามารถ  
ดูได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติเชื้อเพลิง

Proximate analysis (as received)	
Volatiles %	65.25
Fixed carbon %	16.16
Ash %	2.43
Moisture %	16.16
Calorific value (MJ/kg, daf)	17.5
Ultimate analysis (wt%, daf)	
C %	46.44
H %	6.45
O %	46.56
N %	0.55

## 2.3 แบบจำลองของอนุภาคเชื้อเพลิง

อัตราการเปลี่ยนแปลงมวลของอนุภาคในระหว่าง  
กระบวนการปลดปล่อยสารระเหยสามารถคำนวณได้จาก  
สมการที่ (1)

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

โดยที่  $m_p$  คือ มวลอนุภาค (kg)

$f_{v,0}$  คือ mass fraction ของสารระเหยในอนุภาค

$f_{w,0}$  คือ mass fraction ของความชื้น

$m_{p,0}$  คือ มวลอนุภาคเริ่มต้น (kg)

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

ซึ่งค่า kinetic rate สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2) โดย  
การจำลองนี้จะกำหนดค่า pre-exponential factor (A)  
เท่ากับ  $3.82 \times 10^6$  (kg/s.m) และค่า activation energy ( $E_a$ )  
เท่ากับ  $2.72 \times 10^7$  (J/kg) ในสมการ kinetic rate

$$k = Ae^{-(E_a/RT)} \quad (2)$$

อัตราการเปลี่ยนแปลงของมวลอนุภาคในช่วงการเผาไหม้  
ผ่านสารสามารถหาได้จากสมการ (3)

$$\frac{dm_p}{dt} = -A_p p_{ox} \frac{D_0 \mathcal{R}}{D_0 + \mathcal{R}} \quad (3)$$

โดยที่  $A_p$  คือ พื้นที่ผิว ( $\text{m}^2$ )

$p_{ox}$  คือ ความดันย่อย (Pa)

$D_0$  คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของ  $\text{O}_2$  ( $\text{cm}^2/\text{s}$ ) [4]

$\mathcal{R}$  คือ อัตราจลนพลศาสตร์

ซึ่งค่า  $D_0$  จะหาได้จากสมการที่ (4) และ  $\mathcal{R}$  หาได้จากสมการที่  
(5) โดยจะกำหนดค่า mass-diffusion limited rate  
constant ( $C_1$ ) เท่ากับ  $1.5 \times 10^{-11}$  ค่า kinetics limited rate  
pre-exponential factor ( $C_2$ ) เท่ากับ 0.006 และค่า  
kinetics-limited rate activation energy ( $E_2$ ) เท่ากับ  
 $7.9 \times 10^7$  (J/kg.mol)

$$D_0 = C_1 \frac{[(T_p + T_\infty)/2]^{0.75}}{d_p} \quad (4)$$

โดยที่  $T_p$  คือ อุณหภูมิของอนุภาค (K)

$T_\infty$  คือ อุณหภูมิของบรรยากาศ (K)

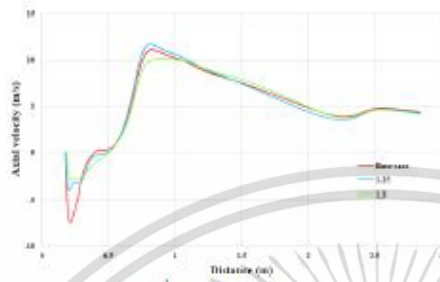
$d_p$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (m)

$$\mathcal{R} = C_2 e^{-(E_2/RT_p)} \quad (5)$$

จากการเปรียบเทียบระดับของอุณหภูมิของห้องเผาไหม้ จึง  
กำหนดให้ระดับของ standard enthalpy of formation (h)  
มีค่าเท่ากับ  $-2.807 \times 10^8$  (J/kgmol) และปรับค่า A factor  
ของ reaction-CO เป็น 13 เพื่อให้การปลดปล่อย CO  
ใกล้เคียงกับผลการทดลองกรณีท่อปฐุมุมที่ตั้งเดิม

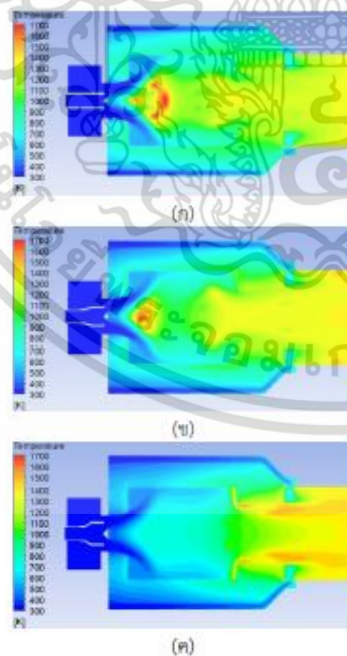
## 3 ผลการทดลองและการอภิปรายผล

เมื่อทำการตรวจสอบผลการจำลองเพื่อเลือกขนาดของ  
เมชในห้องเผาไหม้ช่วยแล้ว จากนั้นทำการจำลองท่อปฐุมุม  
ขยาย 1.25 และ 1.5 เท่า จากการจำลองจะได้ผลของ  
ความเร็วในแนวแกนดังรูปที่ 4



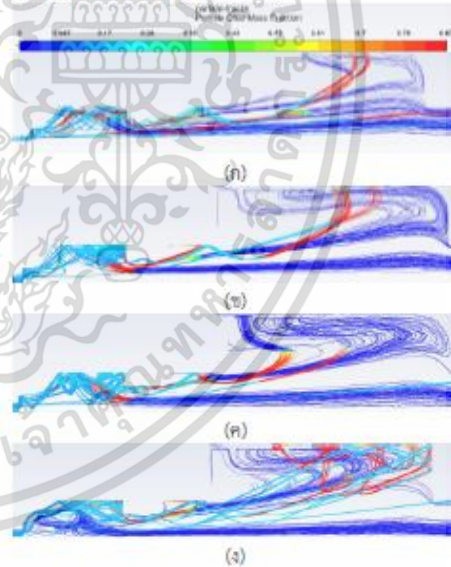
รูปที่ 4 ความเร็วแนวแกน

จากรูปที่ 4 ความเร็วของกระแสไหลย้อนกลับบริเวณหลังวัตถุขวางการไหล (bluff body) ของท่อปฐมนุ้มนิ่งเดิมจะมีมากที่สุด และจะลดลงเมื่อมีการขยายท่อปฐมนุ้มนิ่งขึ้น เนื่องจากบริเวณทางเข้าของอากาศหุดยุมมีขนาดเล็ก จึงทำให้ความเร็วตามแนวแกนสูงขึ้น ทิศทางการหมุนคงจึงลดลง มีผลให้กระแสไหลย้อนกลับลดความเร็วลง ทำให้การกระจายตัวของอนุภาคของท่อปฐมนุ้มนิ่งขยาย 1.25 เกิดอนุภาคนิ่งห่างจากหลังวัตถุขวางการไหลมากกว่าท่อปฐมนุ้มนิ่งเดิม ดังรูปที่ 5 ก) และ ข) และ 1.5 เท่า จะเกิดอนุภาคนิ่งสูงบริเวณทางออกของห้องเผาไหม้ช่วย ดังรูปที่ 5 ค)



รูปที่ 5 การกระจายตัวของอนุภาคนิ่ง ก) ท่อปฐมนุ้มนิ่งเดิม ข) ท่อปฐมนุ้มนิ่งขยาย 1.25 เท่า ค) ท่อปฐมนุ้มนิ่งขยาย 1.5 เท่า  
จากรูปที่ 5 ก) การที่อนุภาคนิ่งบริเวณหลังวัตถุขวางการไหลมีอนุภาคนิ่งสูงเกิดจากมีอนุภาคนิ่งตัวกันอยู่มาก เนื่องจากมีกระแสการไหลย้อนกลับสูงทำให้พัดพาอนุภาคนิ่งรวมทั้งบริเวณหลังวัตถุขวางการไหล ที่ท่อขยาย 1.25 เท่า กระแสการไหลย้อนกลับลดความเร็วลงอนุภาคนิ่งภายในห้องเผาไหม้ช่วยจึงต่ำลง และที่ท่อขยาย 1.5 เท่า กระแสการไหลย้อนกลับที่ต่ำมากทำให้เกิดอนุภาคนิ่งสูงบริเวณทางออกของห้องเผาไหม้ช่วย ซึ่งเรียกว่าการเป่าดับบริเวณทางออกของหัวเผา

อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบเส้นทางเดินของอนุภาค (particle tracks) ดังรูปที่ 6 การขยายท่อปฐมนุ้มนิ่งเป็น 1.25 และ 1.5 เท่า ทำให้ตัวขวางการไหลมีขนาดเพิ่มขึ้น อนุภาคนิ่งชนกับวัตถุขวางการไหลมากขึ้น การกระจายตัวของอนุภาคนิ่งภายในห้องเผาไหม้ช่วยจึงมากขึ้น ทำให้เกิดโอกาสในการปลดปล่อยสารระเหยมากขึ้น โอกาสที่อนุภาคนิ่งจะหลุดจากห้องเผาไหม้หลักโดยเผาไหม้ไม่หมดลดลง

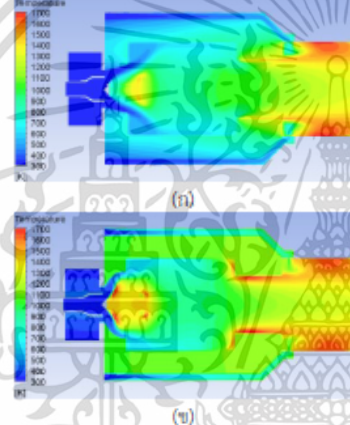


รูปที่ 6 เส้นทางเดินอนุภาค ก) ท่อปฐมนุ้มนิ่งขยาย 1.25 เท่า ข) ท่อปฐมนุ้มนิ่งขยาย 1.5 เท่า ค) ขยาย 1.5 เท่า (pre-chamber ทรงกรวยไม่มีระดับ) ง) ขยาย 1.5 เท่า (pre-chamber ทรงสามเหลี่ยม)  
จากรูปที่ 6 จะเห็นว่าที่ท่อขยาย 1.25 เท่า เส้นทางเดินอนุภาคนิ่งจะอยู่กระจายตัวอยู่ภายในห้องเผาไหม้ช่วยน้อย และมีอนุภาคนิ่งบางส่วนหลุดออกจากห้องเผาไหม้ช่วย เมื่อขยายท่อ

AEC-0007

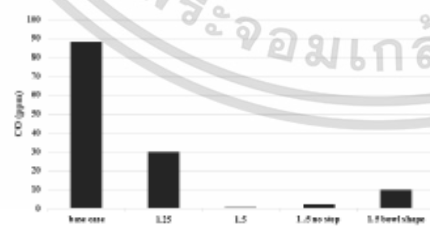


1.5 เทา ทำให้วัตถุขวางการไหลมีขนาดใหญ่ขึ้น อนุภาคจึงกระจัดกระจายอยู่ในห้องเผาไหม้ช่วยเพิ่มมากขึ้น และจะเพิ่มมากขึ้นหลังเปลี่ยนเป็นทรงกรวยแบบไม่มีระดับ และจะมีมากที่สุดในเมื่อเปลี่ยนเป็นทรงสาม เมื่ออ้างอิงจากรูปที่ 5 ค) และรูปที่ 7 ก) และ ข) จะเห็นว่า เมื่อทำการจำลองหัวเผาขยาย 1.5 เทา โดยเปลี่ยนรูปทรงทางเข้าของห้องเผาไหม้ช่วยเป็นทรงกรวยแบบไม่มีระดับ และเปลี่ยนรูปทรงทางเข้าของห้องเผาไหม้ช่วยจากทรงกรวยเป็นทรงสาม (bowl shape) ทำให้การกระจายตัวของอนุภาคน้ำมันหัวเผาที่ขยาย 1.5 เทา ดีขึ้น



รูปที่ 7 อนุภาคน้ำมัน ก) ขยาย 1.5 เทา (pre-chamber ทรงกรวยไม่มีระดับ) ข) ขยาย 1.5 เทา (pre-chamber ทรงสาม)

จากรูปที่ 7 จะเห็นว่าบริเวณใกล้กับวัตถุขวางการไหลของกรณีรูปทรงสามมีอนุภาคน้ำมันสูงกว่าทางออกรูปทรงกรวย แต่เนื่องจากทางเข้าของอากาศหตุยุมมีขนาดเล็ก ทำให้อนุภาคส่วนใหญ่ถูกแรงลมพัดพาไปรวมอยู่บริเวณทางออกของห้องเผาไหม้ช่วย อนุภาคในบริเวณนั้นจึงสูงขึ้น



รูปที่ 8 จะเห็นว่ากรวยช่วยท่อประมุขช่วยลดการปล่อย CO ลง เนื่องจากอนุภาคกระจายตัวและเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้ช่วยมากขึ้น เมื่อพิจารณาในกรณีหัวขยาย 1.5 เทา ก่อนเปลี่ยนรูปทรงของพุนทไฟที่ทางเข้าห้องเผาไหม้

ช่วย อนุภาคส่วนใหญ่ยังไม่เกิดการเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้ช่วย สังเกตได้จากการกระจายตัวของอนุภาคน้ำมันรูปที่ 5 ค) แต่มีการเผาไหม้หมดในห้องเผาไหม้หลัก จึงทำให้ค่า CO ต่ำมาก และเมื่อเปลี่ยนรูปทรงพุนทไฟที่ทางเข้าห้องเผาไหม้ช่วย ทำให้อนุภาคกระจายตัวและเกิดการเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้ช่วยดีขึ้น สังเกตได้จากการกระจายตัวของอนุภาคน้ำมันรูปที่ 7 แต่อิทธิพลของแรงเหวี่ยงที่มีต่ออนุภาคขนาดใหญ่ลดลง ทำให้อนุภาคขนาดใหญ่เผาไหม้ไม่หมดและหลุดไปที่ทางออกของห้องเผาไหม้หลัก ค่า CO จึงเพิ่มขึ้น แต่ยังมีน้อยกว่าแบบดั้งเดิมและหัวขยาย 1.25 เทา

4 สรุป

จากการทดลองพบว่ากรวยช่วยตัวของอนุภาคน้ำมันของท่อประมุขแบบดั้งเดิมจะให้อนุภาคน้ำมันที่บริเวณทางออกของหัวเผาสูง โดยอนุภาคน้ำมันที่ตำแหน่ง T1 วัดได้ 800 องศาเซลเซียส เมื่อพิจารณาาร่วมกับผลการจำลอง พบว่ามีกระแสการไหลย้อนกลับรุนแรง พัดพาสารระเหยที่ปลดปล่อยออกจากอนุภาคน้ำมันที่บริเวณตรงกลางห้องเผาไหม้ช่วย ช่วยยืนยันผลการทดลองเป็นอย่างดี

ในส่วนของกรวยช่วยท่อประมุข 1.25 และ 1.5 เทา ทำให้บริเวณทางเข้าของอากาศหตุยุมมีขนาดเล็ก จึงทำให้ความเร็วตามแนวแกนสูงขึ้น พัดพาการหมุนควงจึงลดลง ดังจะเห็นได้จากผลการจำลอง อิทธิพลของแรงหนีศูนย์กลางที่ลดลงนี้ ทำให้มวลอากาศถูกดึงไปใกล้ผนังน้อยลง มีผลให้การแผ่กระจายของอนุภาคน้ำมันลดลง ความรุนแรงของการเผาไหม้ใกล้หัวเผา อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบเส้นทางการเดินของอนุภาค การขยายท่อประมุขเป็น 1.25 และ 1.5 เทา ทำให้วัตถุขวางการไหลมีขนาดเพิ่มขึ้น อนุภาคจึงชนกับวัตถุขวางการไหลมากขึ้น การกระจายตัวของอนุภาคภายในห้องเผาไหม้ช่วยจึงมากขึ้น ทำให้เกิดโอกาสในการปลดปล่อยสารระเหยมากขึ้น โอกาสที่อนุภาคจะหลุดจากห้องเผาไหม้หลักโดยเผาไหม้ไม่หมดลดลง และการเปลี่ยนรูปทรงพุนทไฟที่ทางเข้าของห้องเผาไหม้ช่วย ทำให้การกระจายตัวของอนุภาคน้ำมันใกล้หัวเผาที่ขยาย 1.5 เทาดีขึ้น สามารถสร้างอนุภาคน้ำมันสูงใกล้ทางออกของหัวเผาได้ใกล้เคียงหัวเผาดั้งเดิม และยังคงข้อดีของการกระจายอนุภาคในห้องเผาไหม้ไว้ได้

การปลดปล่อย CO ที่ได้จากการจำลองมีแนวโน้มลดลงเมื่อท่อประมุขขยายมากขึ้น ซึ่งท่อประมุขดั้งเดิมมี CO 88.1 ppm ท่อประมุขขยาย 1.25 เทามี CO 29.8 ppm ท่อประมุขขยาย 1.5 เทามี CO 0.25 ppm ท่อประมุขขยาย 1.5 เทา ทางเข้าห้องเผาไหม้ช่วยทรงกรวยแบบไม่มีระดับมี CO 2.4 ppm และท่อประมุขขยาย 1.5 เทา ทางเข้าห้องเผาไหม้ช่วยทรงสามมี CO 9.9 ppm โดยในกรณีขยาย 1.5 เทา การ

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 36  
วันที่ 19-22 กรกฎาคม พ.ศ. 2565 จังหวัดประจวบคีรีขันธ์

AEC-0007



ที่ CO เพิ่มขึ้นเกิดจากการเผาไหม้ไม่หมดของถ่านชาร์ที่เกิดจากอนุภาคขนาดใหญ่

#### 5 กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.จาวุฒิกร เจริญสุข ที่ได้คำปรึกษา  
ระหว่างทำการจำลอง CFD และให้คำแนะนำในการแก้ปัญหา  
ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น

#### 6 เอกสารอ้างอิง

[1] Ruben Perez-Jeldres, Pablo Cornejo, Mauricio Flores, Alfredo Gordon and Ximena Garcia (2017). A modeling approach to co-firing biomass/coal blends in pulverized coal utility boilers: Synergistic effects and emissions profiles, *Energy*, vol. 120, February 2017, pp. 663 – 674.

[2] Muhammad Aziz, Dwika Budianto and Takuya Oda (2016). Computational Fluid Dynamic Analysis of Co-Firing of Palm Kernel Shell and Coal, *Energies*, vol. 9(3), February 2016, pp. 137 – 151.

[3] Georg Archan, Andres Anca-Couce, Markus Buchmayr, Christoph Hochenauer, Johann Gruber and Robert Scharler (2021). Experimental evaluation of primary measures for NO<sub>x</sub> and dust emission reduction in a novel 200 kW multi-fuel biomass boiler, *Renewable Energy*, vol. 170, June 2021, pp. 1186 – 1196.

[4] M. A. Field (1969). Rate of Combustion of Size-Graded Fractions of Char from a Low Rank Coal between 1200 K–2000 K, *Combustion and Flame*, vol. 13, June 1969, pp. 237 – 252.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายพงศกร สิริภูมิ
วัน เดือน ปีเกิด	วันที่ 13 พฤศจิกายน พ.ศ. 2540 ที่ประจวบคีรีขันธ์
ที่อยู่	10/2 หมู่ 11 ต.หนองตาแต้ม อ.ปราณบุรี จ.ประจวบคีรีขันธ์
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2562 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้