

การปรับปรุงสมรรถนะหัวพ่นเชื้อเพลิงผง
โดยการเพิ่มพื้นที่ช่องการไหลของอากาศปฐมภูมิ

PERFORMANCE IMPROVEMENT OF PULVERIZED BURNER
BY INCREASING PRIMARY AIRFLOW AREA



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2563

KMITL-2020-EN-M-030-016

การปรับปรุงสมรรถนะหัวพ่นเชื้อเพลิงผง
โดยการเพิ่มพื้นที่ช่องการไหลของอากาศปฐมภูมิ

PERFORMANCE IMPROVEMENT OF PULVERIZED BURNER
BY INCREASING PRIMARY AIRFLOW AREA



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2563

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ KMUTL-2020-EN-M-030-016 อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PERFORMANCE IMPROVEMENT OF PULVERIZED BURNER
BY INCREASING PRIMARY AIRFLOW AREA



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
Year 2020

KMITL-2020-EN-M-030-016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2020

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การปรับปรุงสมรรถนะหัวพ่นเชื้อเพลิงผงโดยการเพิ่มพื้นที่ ช่องการไหลของอากาศปฐมภูมิ
ชื่อนักศึกษา	นายรังสินันท์ ณ รังษี
รหัสประจำตัว	60601205
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2563
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาการปรับปรุงสมรรถนะหัวพ่นเชื้อเพลิงผงโดยการเพิ่มพื้นที่ช่องการไหลของอากาศปฐมภูมิเป็น 2.25 เท่าของหัวพ่นแบบดั้งเดิม และการเผาไหม้ชีวมวลทอร์รีไฟด์ โดยใช้ชุดทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์การเผาไหม้ กำหนดให้เงื่อนไขของการทดลองที่กำลังความร้อนเทียบเท่า 300 กิโลวัตต์ อากาศส่วนเกินทางทฤษฎี 15 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนอากาศปฐมภูมิ : อากาศทุติยภูมิ : อากาศตติยภูมิ 25 : 65 : 10 เชื้อเพลิงชีวมวลและชีวมวลทอร์รีไฟด์ที่บดผ่านตะแกรง 0.5 และ 1.0 มิลลิเมตร ผลการจำลองพบว่าการใช้หัวพ่นเชื้อเพลิงแบบใหม่ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลทำให้เกิดสนามเวกเตอร์การไหลของการเผาไหม้กระจายออกสู่ผนังเตาด้วยความเร็วสูงของการหมุนควงส่งผลให้เกิดความปั่นป่วนและคลุกเคล้ากันระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงผงที่ดีกว่า รวมถึงอัตราการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้เชื้อเพลิงดีกว่าการเผาไหม้โดยใช้หัวพ่นแบบดั้งเดิม สำหรับผลการทดลองเผาไหม้จริงพบว่าการใช้หัวพ่นเชื้อเพลิงแบบใหม่ทำให้เกิดการกระจายของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วยที่ดีกว่าการใช้หัวพ่นเชื้อเพลิงแบบดั้งเดิม โดยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่วัดได้จากการเผาไหม้ด้วยหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบเดิมกับแบบใหม่มีค่า 28.5, 106.6 PPM ตามลำดับ และออกไซด์ของไนโตรเจนที่วัดได้จากการเผาไหม้ด้วยหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบเดิมและแบบใหม่มีค่า 245.8, 214.4 PPM ตามลำดับ นอกจากนี้การศึกษากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลทอร์รีไฟด์ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงทางเลือกใหม่ในอนาคตที่มีค่าความร้อนต่อหน่วยมวลสูงกว่าชีวมวลด้วยหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบใหม่ ผลการจำลองพบว่าที่ตำแหน่งหลังวัตถุขวางการไหลมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ต่ำเนื่องจากชีวมวลทอร์รีไฟด์ใช้อากาศในการเผาไหม้มากกว่าชีวมวลทำให้เชื้อเพลิงที่มีปริมาณสารระเหยต่ำถูกปล่อยออกมาช้ากว่าชีวมวล และอัตราการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้มีค่าเพิ่มขึ้นในตำแหน่งที่ห่างจากวัตถุขวางการไหล สำหรับผลการทดลองพบว่าการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลทอร์รีไฟด์เกิดขึ้นตามแนวหมุนควงของอากาศทุติยภูมิและเริ่มมีการเผาไหม้ที่ดีในตำแหน่งที่ห่างจากวัตถุขวางการไหล โดยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และออกไซด์ของไนโตรเจนที่วัดได้จากการเผาไหม้มีค่า 64.00, 196.5 PPM ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Performance Improvement of Pulverized Burner by Increasing Primary Airflow Area
Student	Mr. Rungsinan Na Rungsri
Student ID.	60601205
Degree	Master of Engineering
Program	Mechanical Engineering
Year	2020
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Jarruwat Charoensuk

ABSTRACT

This paper was to study the improvement of pulverized burner performance by increasing the area of the primary air tube to be up to 2.25 times of previous pulverized burner and study torrefied biomass combustion by using experimental set and mathematic model as a tool for combustion analysis. This combustion was at the rate of 300 kW thermal, 15 percent excess air, the ratio of 25:65:10 for primary, secondary and tertiary air ratio respectively, the fuel size of 0.5 and 1.0 mm which was sieved. The result of simulation showed that using modified pulverized burner in combustion of biomass resulted in flow vector field of combustion which spreaded to pre-chamber wall by high speed of tangent velocity. This leads to turbulence and mixing between air and fuel better. Using pulverized burner has been made reaction rate of combustion better than previous pulverized burner. Experiment result from combustion was found that using the modified pulverized burner made the spread of temperature within pre-chamber better than using the previous pulverized burner. Gas of CO measured from the combustion using previous and modified pulverized burner were 28.5 and 106.6 PPM respectively. Oxide of Nitrogen measured from the combustion using previous and modified pulverized burner were 245.8 and 214.4 PPM respectively. Also, this study showed that torrefied biomass fuel was alternative fuel in the future, it had specific heat by mass higher than other biomasses. Simulation result was shown that position behind the Bluff body reacted at low rate of combustion because torrefied biomass required more amount of air compared to biomass. This lead to let fuel which has little amount of volatile matter release slower than biomass and the rate of combustion increased at position away from Bluff body.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The experiment result was found that torrefied biomass combustion occurred along the rotation of secondary air way and the combustion began to occur at position away from Bluff body on the fact that gas of CO and Oxide of Nitrogen measured from the combustion were 64.00 and 196.5 PPM respectively.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.จารุวัตร เจริญสุข ที่ได้ชี้แนะแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ด้วยความเอาใจใส่ จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วง

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ประสาร สถิตย์เรืองศักดิ์ รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์เจตพรหมวงศ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ชินรัช เชียรพงษ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณตวิภา เจียรระโนวชิระ และ รองศาสตราจารย์ ดร.จารุวัตร เจริญสุข ประธานและกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำเพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความถูกต้องและเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณนักศึกษาปริญญาตรี นักศึกษาปริญญาโท และนักศึกษาปริญญาเอก ผู้มีส่วนในการช่วยเหลือ ทุ่มเทร่างกาย แรงใจ และให้ความรู้ความเข้าใจ จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วง

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ทุกคนในสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่มีส่วนในการอำนวยความสะดวกในเรื่องต่างๆ

สุดท้ายขอขอบคุณบิดา มารดา ญาติพี่น้อง ที่ให้กำลังใจและความช่วยเหลือในการเรียนและการทำวิทยานิพนธ์ตลอดสองปี

หวังว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์แก่ผู้อ่าน และผู้ที่สนใจเกี่ยวกับงานวิจัยด้านนี้เป็นอย่างยิ่ง อนึ่งหากมีข้อผิดพลาดประการใด ผู้จัดทำกราบขอภัยในโอกาสนี้ด้วย

นายรังสินันท์ ณ รังษี

สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	IV
สารบัญ.....	V
สารบัญตาราง.....	XI
สารบัญรูป	XII
รายการคำย่อและสัญลักษณ์	XV
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	3
1.4 ขอบเขตการวิจัย	3
1.5 ขั้นตอนการศึกษา	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทรรศน์.....	5
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบการทดลอง.....	8
3.1 หัวเผาเชื้อเพลิง.....	8
3.1.1 หัวเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลว	8
3.1.2 หัวเผาไหม้เชื้อเพลิงก๊าซ (Gas fuel burner).....	9
3.1.3 หัวเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง (Solid fuel burner)	9
3.2 เชื้อเพลิงแข็ง.....	11
3.2.1 ประเภทและลักษณะของเชื้อเพลิงแข็ง	12
3.2.2 การวิเคราะห์คุณภาพถ่านชาร์	16
3.3 กระบวนการทอรีแฟคชั่น.....	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

3.4 การเผาไหม้ชีวมวล.....	20
3.4.1 การทำแห้งของเชื้อเพลิงแข็ง (Drying).....	20
3.4.2 การปล่อยสารระเหย (Devolatilization).....	20
3.4.3 การเผาไหม้ถ่านชาร์ (Burning of carbon)	21
3.5 ทฤษฎีสำหรับการเผาไหม้.....	23
3.5.2 อัตราส่วนสมมูล (Equivalence ratio, ϕ)	23
3.5.3 เปอร์เซ็นต์อากาศทางทฤษฎี (Percent theoretical air) และเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน (Percent excess air).....	24
3.5.4 ค่าความร้อน (Calorific value)	24
3.5.5 ค่าอ้างอิงออกซิเจน (The O ₂ Reference).....	25
3.5.6 ปัจจัยที่ทำให้เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์.....	25
3.6 การรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟ.....	25
3.6.1 การใช้วัตถุขวางการไหล (Bluff body).....	26
3.6.2 การใช้ตัวสร้างการหมุนควง (Swirl generator).....	27
3.7 การปล่อยมลพิษและการควบคุม (Pollutants Emission and Control).....	27
3.7.1 ผลกระทบของมลพิษ.....	27
3.7.2 ออกไซด์ของไนโตรเจน (NO _x).....	28
3.7.3 คาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon monoxide).....	30
3.7.4 ออกไซด์ของซัลเฟอร์ (SO _x)	31
3.7.5 ฝุ่นและเขม่า (Particulates and Soot)	31
3.8 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองคณิตศาสตร์	31
3.8.1 สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation)	32
3.8.2 สมการโมเมนตัม (Momentum Equation).....	33
3.8.3 สมการพลังงาน (Energy equation)	33

สารบัญ (ต่อ)

3.8.4	พลังงานจากปฏิกิริยาเคมี.....	34
3.8.5	แบบจำลองการไหลปั่นป่วน $k - \epsilon$ ($k - \epsilon$ Turbulence flow model).....	34
3.8.6	สมการถ่ายโอนสปีชีส์ (Species transport equations)	36
3.8.7	แบบจำลองการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้	37
3.8.8	แบบจำลองของการก่อเกิดมลพิษ (Pollutant Formation)	39
บทที่ 4	การออกแบบ และการคำนวณเกี่ยวกับการทดลอง	40
4.1	การออกแบบหัวพ่นเชื้อเพลิง	40
4.2	การคำนวณที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบ	40
4.2.1	สมการ Blockage ratio	40
4.2.2	สมการอัตราการไหลเชิงมวล.....	41
4.3	การคำนวณที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง.....	41
4.3.1	อัตราการไหลของเชื้อเพลิง	41
4.3.2	อัตราการไหลของอากาศ.....	42
บทที่ 5	ชุดอุปกรณ์การทดลองและวิธีการทดลอง	45
5.1	วิธีการจำลองเชิงตัวเลข	45
5.1.1	วิธีการจำลองเชิงตัวเลข	45
5.1.2	โครงสร้างของหัวพ่นที่ใช้ในแบบจำลอง	47
5.1.3	ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	47
5.1.4	ขอบเขตของการจำลอง (Boundary condition).....	47
5.2	ชุดอุปกรณ์และระบบทดลองการเผาไหม้	49
5.2.1	อุปกรณ์ที่ใช้เตรียมเชื้อเพลิงชนิดผง	50
5.2.2	อุปกรณ์ที่ใช้ขนถ่ายเชื้อเพลิงชนิดผง	51
5.2.3	อุปกรณ์ที่ใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงชนิดผง	53
5.2.4	อุปกรณ์ที่ใช้ในบำบัดไอเสียและบำบัดน้ำ.....	55

สารบัญ (ต่อ)

5.3	เงื่อนไขการทดลอง.....	57
5.4	การทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิง.....	57
5.5	การทดลองระบบเตรียมเชื้อเพลิงผง.....	59
บทที่ 6	ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง.....	60
6.1	ผลการเผาไหม้จากการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	60
6.1.1	การเปรียบเทียบผลจำลองของการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล ด้วยหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบดั้งเดิมและแบบใหม่.....	61
6.1.2	ศึกษาการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลทอร์รีไฟต์ด้วยหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบใหม่.....	76
6.2	ผลการเผาไหม้จากชุดทดลอง.....	81
6.2.1	การเปรียบเทียบผลการทดลองเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล ด้วยหัวพ่นแบบดั้งเดิมและแบบใหม่.....	81
6.3	เปรียบเทียบการเผาไหม้ระหว่างผลการทดลองและผลการจำลอง.....	90
6.3.1	เปรียบเทียบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลด้วยหัวพ่นแบบดั้งเดิม จากแบบจำลองเชิงตัวเลขและชุดทดลอง.....	90
6.3.2	เปรียบเทียบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลด้วยหัวพ่นแบบใหม่ จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และชุดทดลอง.....	91
6.3.3	เปรียบเทียบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลทอร์รีไฟต์ด้วยหัวพ่นแบบใหม่ จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และชุดทดลอง.....	93
6.4	ผลการทดลองระบบเตรียมเชื้อเพลิงผง.....	94
บทที่ 7	สรุปผลการทดลอง.....	97
7.1	ผลการปรับปรุงหัวพ่นเชื้อเพลิงจากการเผาไหม้ด้วยแบบจำลองเชิงตัวเลข.....	97
7.1.1	ผลจำลองสนามเวกเตอร์การไหลของก๊าซร้อน.....	97
7.1.2	ผลจำลองอุณหภูมิจากการเผาไหม้.....	98
7.1.3	ผลจำลองสัดส่วนโดยมวลของออกซิเจน.....	98
7.1.4	ผลจำลองสัดส่วนโดยมวลของสารระเหย.....	99

สารบัญ (ต่อ)

7.1.5 ผลจำลองเส้นสายธารการไหลของการเผาไหม้.....	99
7.1.6 ผลจำลองเส้นทางของอนุภาคเชื้อเพลิง.....	99
7.2 ผลจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลเทอร์ริไฟต์ด้วยแบบจำลองเชิงตัวเลข.....	99
7.2.1 ผลจำลองอุณหภูมิของการเผาไหม้.....	99
7.2.2 ผลจำลองสัดส่วนโดยมวลของออกซิเจน.....	99
7.2.3 ผลจำลองสัดส่วนโดยมวลของสารระเหย.....	100
7.2.4 ผลจำลองเส้นสายธารการไหลของการเผาไหม้.....	100
7.2.5 ผลจำลองเส้นทางของอนุภาคเชื้อเพลิง.....	100
7.3 ผลการปรับปรุงหัวพ่นเชื้อเพลิงจากการเผาไหม้จริงด้วยชุดทดลอง.....	100
7.3.1 ผลทดลองอุณหภูมิของการเผาไหม้.....	100
7.3.2 ผลเปรียบเทียบอุณหภูมิของการเผาไหม้ที่ตำแหน่ง x/D ใดๆ.....	100
7.3.3 ผลเปรียบเทียบของก๊าซไอเสียจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล ด้วยหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบดั้งเดิมและแบบใหม่.....	101
7.4 ผลการเผาไหม้จริงของเชื้อเพลิงชีวมวลเทอร์ริไฟต์ด้วยชุดทดลอง.....	101
7.4.1 ผลทดลองอุณหภูมิของการเผาไหม้.....	101
7.4.2 อุณหภูมิของการเผาไหม้ที่ตำแหน่ง x/D ใดๆ.....	101
7.4.3 ก๊าซไอเสียจากการเผาไหม้ชีวมวลเทอร์ริไฟต์ด้วยหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบใหม่.....	102
7.5 สรุปผลการศึกษาอัตราการใช้พลังงานในการเตรียมเชื้อเพลิงผง.....	102
7.6 ข้อเสนอแนะ.....	102
7.6.1 ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการจำลอง.....	102
7.6.2 ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการทดลอง.....	102
7.6.3 ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับเชื้อเพลิงชีวมวลเทอร์ริไฟต์.....	103
เอกสารอ้างอิง.....	104
ภาคผนวก.....	106

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ix
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

ภาคผนวก ก. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....	107
ประวัติผู้เขียน.....	118



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	
3.1 ตัวอย่างปริมาณออกซิเจน น้ำ และถ้าในเชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ	12
3.2 ตัวอย่างการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์โดยประมาณ และการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของ RDF และเชื้อเพลิงต่าง ๆ	15
3.3 ส่วนประกอบทางเคมีและพลังงานของเชื้อเพลิงชีวมวลและชีวมวลทอร์รีไฟต์.....	19
4.1 อัตราส่วนอากาศกับเชื้อเพลิง (kg/s) ความถี่กระแสไฟฟ้าที่เข้าสู่มอเตอร์ขนถ่าย (Hz) และอัตราการไหลของอากาศรวม (kg/s) ของเชื้อเพลิงชีวมวลและ ชีวมวลทอร์รีไฟต์.....	43
4.2 อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศปฐมภูมิ อากาศทุติยภูมิ และอากาศตติยภูมิของการเผาไหม้เชิงส่วนที่อัตราส่วน 25 : 65 : 10.....	44
5.1 ขอบเขตของระบบการจำลอง (Boundary condition).....	48
5.2 กำลังความร้อนกับกระแสไฟฟ้าที่เข้าสู่มอเตอร์ลำเลียง เชื้อเพลิงผงที่ใช้ในการบด.....	52
6.1 ขนาดและปริมาณของอนุภาคเชื้อเพลิงผงที่ได้จากการบด ผ่านตะแกรงขนาด 0.5 และ 1.0 มิลลิเมตร.....	94
6.2 อัตราการใช้พลังงานของเครื่องบดที่ใช้ในการบดเชื้อเพลิงชีวมวล เม็ดผ่านตะแกรงขนาด 0.5 และ 1.0 มิลลิเมตร.....	95
6.3 อัตราการใช้พลังงานของเครื่องบดที่ใช้ในการบดเชื้อเพลิง ชีวมวลทอร์รีไฟต์เม็ดผ่านตะแกรงขนาด 0.5 และ 1.0 มิลลิเมตร.....	95

สารบัญรูป

รูปที่

3.1 หัวเผาเชื้อเพลิงแข็งที่ใช้เป็นประเภทชนิดการไหลปั่นป่วน.....	10
3.2 กระบวนการทอรัรีแฟคชัน.....	18
3.3 เชื้อเพลิงชีวมวลทอรัรีไฟด์เม็ด (ซ้าย) , เชื้อเพลิงชีวมวลทอรัรีไฟด์ผง (ขวา).....	19
3.4 กระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล.....	18
3.5 การไหลผ่านแผ่นขวางกั้นช่องการไหล.....	22
4.1 เปรียบเทียบแบบของหัวพ่นแบบดั้งเดิม (ซ้าย) และแบบใหม่ (ขวา).....	27
5.1 โครงสร้างและแบบจำลองของชุดอุปกรณ์การเผาไหม้.....	40
5.2 จำนวนเซลล์ที่ใช้ในแบบจำลอง.....	46
5.3 หัวพ่นเชื้อเพลิงแบบดั้งเดิม (ซ้าย) และแบบใหม่ (ขวา).....	46
5.4 ขอบเขตของระบบการจำลอง.....	48
5.5 ภาพรวมของชุดทดลองเตาเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง.....	49
5.6 ถังเก็บเชื้อเพลิงอัดเม็ดและสกรูขนถ่าย (Silo and screw feed wood pellet).....	50
5.7 เครื่องบดแบบค้อนเหวี่ยง (Hammer mill grinder).....	51
5.8 พัดลมขนถ่ายเชื้อเพลิง (Blower).....	51
5.9 ไซโคลน (Cyclone).....	51
5.10 อุปกรณ์กรองดักฝุ่น (Baghouse).....	52
5.11 ถังเก็บเชื้อเพลิงชนิดผง (Hopper).....	52
5.12 หัวพ่นเชื้อเพลิงแข็งชนิดผง (Pulverized burner) และชุดใบบิดโค้ง (Swirl).....	54
5.13 ห้องเผาไหม้ช่วย (Pre-combustion chamber)	54
5.14 ห้องเผาไหม้หลัก (Main combustion chamber).....	55
5.15 ระบบบำบัดไอเสีย.....	55
5.16 พัดลมดูด (ID fan) และท่อไอเสีย (Stack).....	56
5.17 ระบบบำบัดน้ำ.....	56
5.18 แสดงตำแหน่งการวัดอุณหภูมิที่ห้องเผาไหม้ช่วย.....	58
5.19 แสดงตำแหน่งวัดอุณหภูมิห้องเผาไหม้หลัก และก๊าซไอเสียที่ทางออกห้องเผาไหม้หลัก.....	59
6.1 ผลจำลองสนามเวกเตอร์การไหลแสดงทิศทางและความเร็วของอากาศ กับก๊าซร้อนจากการเผาไหม้ชีวมวลด้วยหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบดั้งเดิม.....	61
6.2 ผลจำลองสนามเวกเตอร์การไหลแสดงทิศทางและความเร็วของอากาศกับก๊าซร้อนจากการเผา ไหม้ชีวมวลด้วยหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบใหม่.....	62

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

6.3	ผลจำลองสนามเวกเตอร์การไหลแสดงทิศทางและความเร็วของอากาศกับก๊าซร้อน ที่ตำแหน่งวัตถุขวางการไหลของการเผาไหม้ชีวมวลด้วยหัวพ่น.....	64
6.4	ภาพตัดแนวขวางแสดงสนามเวกเตอร์ที่ตำแหน่ง x/D ต่างๆ ของห้องเผาไหม้ช่วย ของการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลด้วยหัวพ่นแบบดั้งเดิม.....	65
6.5	ภาพตัดแนวขวางแสดงสนามเวกเตอร์ที่ตำแหน่ง x/D ต่างๆ ของห้องเผาไหม้ช่วย ของการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลด้วยหัวพ่นแบบใหม่.....	66
6.6	ผลจำลองอุณหภูมิจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลด้วยหัวพ่นแบบดั้งเดิม.....	68
6.7	ผลจำลองอุณหภูมิจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลด้วยหัวพ่นแบบใหม่.....	69
6.8	ผลจำลองสัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนของการเผาไหม้ชีวมวลด้วยหัวพ่นแบบดั้งเดิม.....	71
6.9	ผลจำลองสัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนของการเผาไหม้ชีวมวลด้วยหัวพ่นแบบใหม่.....	72
6.10	ผลจำลองสัดส่วนโดยมวลของสารระเหยของการเผาไหม้ชีวมวลด้วยหัวพ่นแบบดั้งเดิม.....	73
6.11	ผลจำลองสัดส่วนโดยมวลของสารระเหยของการเผาไหม้ชีวมวลด้วยหัวพ่นแบบใหม่.....	73
6.12	ผลจำลองเส้นสายธารการไหลของการเผาไหม้ชีวมวลด้วยหัวพ่นแบบดั้งเดิม.....	74
6.13	ผลจำลองเส้นสายธารการไหลของการเผาไหม้ชีวมวลด้วยหัวพ่นแบบใหม่.....	75
6.14	ผลจำลองเส้นทางของอนุภาคเชื้อเพลิงของการเผาไหม้ชีวมวลด้วยหัวพ่นแบบดั้งเดิม.....	75
6.15	ผลจำลองเส้นทางของอนุภาคเชื้อเพลิงของการเผาไหม้ชีวมวลด้วยหัวพ่นแบบใหม่.....	76
6.16	ผลจำลองอุณหภูมิจากการเผาไหม้ชีวมวลทอริไฟด์ด้วยหัวพ่นแบบใหม่.....	77
6.17	ผลจำลองสัดส่วนมวลออกซิเจนของการเผาไหม้ชีวมวลทอริไฟด์ด้วยหัวพ่นแบบใหม่.....	78
6.18	สัดส่วนโดยมวลของสารระเหยของการเผาไหม้ชีวมวลทอริไฟด์ด้วยหัวพ่นแบบใหม่.....	79
6.19	ผลจำลองเส้นสายธารการไหลของการเผาไหม้ชีวมวลทอริไฟด์ด้วยหัวพ่นแบบใหม่.....	80
6.20	ผลจำลองเส้นทางอนุภาคเชื้อเพลิงของการเผาไหม้ชีวมวลทอริไฟด์ด้วยหัวพ่นแบบใหม่.....	80
6.21	อุณหภูมิของการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลภายในห้องเผาไหม้ช่วย.....	81
6.22	อุณหภูมิของการเผาไหม้ชีวมวลด้วยหัวพ่นแบบดั้งเดิมและแบบใหม่ที่ตำแหน่ง x/D ต่างๆ.....	84
6.23	องค์ประกอบของก๊าซไอเสียจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล ด้วยหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบดั้งเดิมและแบบใหม่.....	87
6.24	อุณหภูมิของการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลทอริไฟด์ด้วยหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบใหม่.....	87
6.25	การกระจายอุณหภูมิในห้องเผาไหม้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลทอริไฟด์ ด้วยหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบใหม่ที่ตำแหน่ง x/D ต่างๆ.....	88
6.26	องค์ประกอบของก๊าซไอเสียจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลทอริไฟด์ด้วยหัวพ่นแบบใหม่.....	89

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

6.27	เปรียบเทียบอนุกรมของการเผาไหม้ชีวมวลด้วยหัวฟันแบบดั้งเดิม จากแบบจำลองเชิงตัวเลขและชุดทดลอง.....	90
6.28	เปรียบเทียบอนุกรมของการเผาไหม้ชีวมวลด้วยหัวฟันแบบใหม่ จากแบบจำลองเชิงตัวเลขและชุดทดลอง.....	91
6.29	เปรียบเทียบอนุกรมของการเผาไหม้ชีวมวลด้วยหัวฟันแบบใหม่ จากแบบจำลองเชิงตัวเลขและชุดทดลอง.....	93



รายการคำย่อและสัญลักษณ์

Φ	อัตราส่วนสมมูล (Equivalence ratio)
HHV	ค่าความร้อนสูง (Higher heating value)
NCV	ค่าความร้อนต่ำ (Lower heating value)
X_N	สัดส่วนของธาตุไนโตรเจนที่อยู่ในเชื้อเพลิงโดยน้ำหนัก
X_H	สัดส่วนของธาตุไฮโดรเจนที่อยู่ในเชื้อเพลิงโดยน้ำหนัก
X_s	สัดส่วนของธาตุกำมะถันที่อยู่ในเชื้อเพลิงโดยน้ำหนัก
X_{ash}	สัดส่วนของเถ้าที่อยู่ในเชื้อเพลิงโดยน้ำหนัก
X_o	สัดส่วนของออกซิเจนที่อยู่ในเชื้อเพลิงโดยน้ำหนัก
X_c	สัดส่วนของคาร์บอนที่อยู่ในเชื้อเพลิงโดยน้ำหนัก
d	เส้นผ่านศูนย์กลางของวัตถุขวางการไหล
D	เส้นผ่านศูนย์กลางของทางออกช่องการไหลอากาศปฐุมภูมิ
α°	มุมของวัตถุขวางช่องการไหล
$(\frac{k}{\epsilon})$	large-eddy mixing time scale
S_m	เทอมของการก่อกำเนิดความร้อนจากการถ่ายโอนมวลจากอนุภาคเชื้อเพลิง
k_{eff}	ค่าการนำความร้อนประสิทธิผล (Effective conductivity)
\vec{j}	ฟลักซ์การแพร่ของสปีชีส์ j
S_h	ความร้อนจากปฏิกิริยาเคมีและแหล่งความร้อนอื่น ๆ ที่กำหนดให้กับระบบ
h	เอนทัลปีสัมผัสของก๊าซอุดมคติ
h_j^0	เอนทัลปีของการเกิดของสปีชีส์ j
R_i	อัตราการก่อกำเนิดสุทธิของสปีชีส์ i โดยปฏิกิริยาเคมี
R_j	อัตราก่อกำเนิดโดยปริมาตร (volumetric rate of creation) ของสปีชีส์ j
G_k	การก่อกำเนิดพลังงานจลน์ปั่นป่วนเนื่องจากเกรเดียนต์ความเร็ว
G_b	การก่อกำเนิดพลังงานจลน์ปั่นป่วนเนื่องจากแรงลอยตัว
Y_M	การขยายตัวของการสูญสลาย
σ_k	Prandtl numbers ของ k
σ_ϵ	Prandtl numbers ของ ϵ
S_k	เทอมของการก่อกำเนิด
μ_t	ความหนืดปั่นป่วน (Turbulent or eddy viscosity)
S_i	อัตราการก่อกำเนิดจากการรวมกันของการแพร่และที่ถูกรกำหนดค่า
Sc_t	ตัวเลข Schmidt number ปั่นป่วน

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

$D_{i,m}$	สัมประสิทธิ์การแพร่ของมวลสำหรับสปีชีส์ i ในส่วนผสม
$D_{T,i}$	สัมประสิทธิ์การแพร่จากความร้อน
Y_p	สัดส่วนโดยมวลของสารผลิตภัณฑ์สปีชีส์ใด ๆ , P
Y_R	สัดส่วนโดยมวลของสารตั้งต้น , R
Y_{NO_x}	สัดส่วนโดยมวล
S_{NO_x}	เทอมของการก่อกำเนิดออกไซด์ของไนโตรเจน
(A/F)	ค่าอัตราส่วนอากาศกับเชื้อเพลิง



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พลังงานเป็นสิ่งสำคัญอย่างหนึ่งของมนุษย์ทั้งในอดีตและปัจจุบัน เมื่อเวลาผ่านไปพลังงานจะมีความสำคัญยิ่งขึ้นตามการพัฒนาของโลก ทำให้แหล่งพลังงานเดิมที่ใช้อยู่มีปริมาณที่ลดลง เช่น พลังงานจากปิโตรเลียม พลังงานจากก๊าซธรรมชาติ หรือพลังงานจากถ่านหิน เป็นต้น ดังนั้นการลดลงของแหล่งพลังงานดังกล่าวส่งผลทำให้เกิดการคิดค้นและพัฒนาพลังงานทางเลือกอื่นๆ โดยมุ่งเน้นการศึกษาพลังงานจากธรรมชาติซึ่งเป็นพลังงานที่สะอาดเป็นมิตรต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมควบคู่กับหลักการทางเทคโนโลยีที่นำเข้ามาใช้ในการผลิตพลังงานให้เพียงพอต่อความต้องการของมนุษย์ ได้แก่ พลังงานจากแสงอาทิตย์ พลังงานจากลมและพลังงานจากน้ำ ถึงแม้ว่าประเทศไทยเป็นประเทศที่มีธรรมชาติอุดมสมบูรณ์ แต่พลังงานจากธรรมชาติเหล่านี้ก็มีอยู่ในปริมาณที่จำกัดซึ่งไม่เพียงพอต่อความต้องการ อีกทั้งการนำเทคโนโลยีมาใช้ในการพัฒนาพลังงานยังไม่เป็นที่ยอมรับอย่างแพร่หลาย อาจด้วยเหตุผลทางด้านความปลอดภัยและกฎหมาย ทำให้เป็นข้อจำกัดในการผลิตพลังงานทางด้านนี้

ความต้องการใช้พลังงานในปัจจุบันมีจำนวนมากขึ้นทำให้มีความจำเป็นต้องหาแหล่งพลังงานทดแทนอื่นๆ เพื่อนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทนซึ่งแหล่งพลังงานทดแทนที่สามารถหาได้ง่ายและมีจำนวนมากในประเทศไทย คือ พลังงานทดแทนจากชีวมวล (Biomass) ซึ่งได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในปัจจุบันเนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศที่อุดมสมบูรณ์ มีพืชหรือต้นไม้มากมายหลายชนิดทำให้พลังงานทดแทนจากชีวมวลนี้สามารถช่วยกระตุ้นเศรษฐกิจและสร้างรายได้ให้กับเกษตรกรได้ โดยชีวมวลส่วนใหญ่เป็นไม้หรือชีวมวลเหลือทิ้งจากการเกษตร เช่น แกลบ ฟางข้าว กะลาปาล์ม เป็นต้น ซึ่งในปัจจุบันนี้การผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงชีวมวลมีหลายประเภท เช่น การเผาไหม้โดยตรง (Direct Combustion) การผลิตก๊าซชีวมวล (Gasification) หรือการหมัก (Fermentation) เป็นต้น

การเผาไหม้เชื้อเพลิงจากชีวมวลเป็นปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างเชื้อเพลิงกับออกซิเจนที่มีอยู่ในอากาศทำให้เกิดพลังงานความร้อนออกมา โดยส่วนใหญ่เชื้อเพลิงจากชีวมวลประกอบด้วยคาร์บอน ออกซิเจน ไฮโดรเจนและไนโตรเจน หรือมีซิลเฟอร์บ้างเล็กน้อยสำหรับชีวมวลบางชนิด หลังจากเกิดปฏิกิริยาเคมีทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ไนโตรเจน น้ำ (ไอรเหยในอากาศ) และอื่นๆ ขึ้นอยู่กับการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงนั้น สำหรับปัจจัยที่ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ เช่น ชนิดของเชื้อเพลิง ปริมาณอากาศที่ใช้ การสร้างความคลุกเคล้ากันระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ เวลาและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาการเผาไหม้ เป็นต้น แต่ถ้การเผาไหม้เกิดขึ้นไม่สมบูรณ์จะทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต จึงควรทำให้การเผาไหม้เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์เพื่อลดปริมาณเชื้อเพลิงที่เหลือจากการเผาไหม้และลดมลพิษในอากาศโดยการใช้อุปกรณ์ที่ช่วยทำให้เกิดปัจจัยดังที่กล่าวข้างต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับงานวิจัยก่อนหน้านี้นี้มีการศึกษาวัตถุขวางกั้นการไหล (Bluff Body) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ติดตั้งกับหัวพ่นเชื้อเพลิงโดยทำหน้าที่ลดความเร็วในแนวแกน (Axial Axis) แต่จะเพิ่มความเร็วในแนวรัศมี (Radial Axis) ของกระแสการไหลอากาศปฐุมภูมิกับเชื้อเพลิง ทำให้เชื้อเพลิงกับอากาศอยู่ในห้องเผาไหม้ให้นานยิ่งขึ้นและทำให้เกิดการไหลย้อนกลับไปในบริเวณที่มีความดันต่ำทั้งแบบภายในและภายนอกอีกด้วย [1] นอกจากนี้ยังมีการศึกษาชุดสร้างการหมุนควงตามแนวรัศมี (Radial Swirl Generator) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการสร้างความปั่นป่วนให้เชื้อเพลิงกับอากาศในห้องเผาไหม้เกิดการคลุกเคล้าและเผาไหม้ได้อย่างสมบูรณ์มากขึ้น [2]

หัวพ่นเชื้อเพลิงผ่งที่ติดตั้งวัตถุขวางการไหลเป็นอุปกรณ์ที่คาดว่าจะเพิ่มประสิทธิภาพต่อระยะเวลาของเชื้อเพลิงกับอากาศในห้องเผาไหม้ โดยอุปกรณ์ดังกล่าวทำหน้าที่ในการควบคุมกระแสการไหลของอากาศปฐุมภูมิกับเชื้อเพลิงผ่งเข้าสู่ห้องเผาไหม้ช่วยซึ่งส่งผลทางตรงต่อการเผาไหม้เชื้อเพลิง หากมีระยะเวลาของเชื้อเพลิงกับอากาศที่อยู่ในห้องเผาไหม้น้อยเกินไปอาจจะทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ สำหรับหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบดั้งเดิมที่ใช้ทำการทดลองก่อนหน้านี้นี้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่ออากาศปฐุมภูมิเป็น 56 มิลลิเมตร และวัตถุขวางการไหลรูปทรงกรวยซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงกรวยเป็น 32 และ 16 มิลลิเมตร ตามลำดับ ผลจากการทดลองพบว่าหัวพ่นแบบดั้งเดิมส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาการออกซิเดชันระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศที่ต่ำในตำแหน่งหลังวัตถุขวางการไหลและเกิดการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ต่ำอีกด้วย ซึ่งคาดว่าจะเกิดผลมาจากความเร็วของอากาศปฐุมภูมิที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้ช่วยสูงเกินไปและความเร็วของอากาศปฐุมภูมิที่ใช้ในการหมุนควงต่ำเกินไป ดังนั้นควรมีการปรับปรุงข้อเสียของการใช้หัวพ่นเชื้อเพลิงแบบดั้งเดิมให้มีสมรรถนะสูงขึ้น

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาการปรับปรุงหัวพ่นเชื้อเพลิงผ่งโดยการเพิ่มพื้นที่ช่องการไหลของอากาศปฐุมภูมิเพื่อลดความเร็วของอากาศปฐุมภูมิกับเชื้อเพลิงที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้ช่วย ซึ่งทำการออกแบบให้วัตถุขวางการไหลรูปทรงกรวยของหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบใหม่มีขนาดเป็น 1.5 เท่าของวัตถุขวางการไหลของหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบดั้งเดิม โดยกำหนดให้อัตราส่วนขวางกั้น (Blockage ratio) มีค่าคงที่ส่งผลให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวพ่นเชื้อเพลิงผ่งแบบใหม่เพิ่มขึ้น 1.5 เท่า และทำให้พื้นที่ช่องการไหลของอากาศปฐุมภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 2.25 เท่าของพื้นที่ช่องการไหลเดิม สำหรับการศึกษาใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการทดลองเผาไหม้จริงด้วยชุดทดลองในการเปรียบเทียบผลของการปรับปรุงสมรรถนะหัวพ่นเชื้อเพลิงซึ่งแต่ละการทดลองกำหนดให้เงื่อนไขของการเผาไหม้เหมือนกัน นอกจากนี้ทำการศึกษการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวลทอริไฟด์ด้วยหัวพ่นแบบใหม่ซึ่งเป็นการศึกษาเชื้อเพลิงชนิดใหม่ที่มีค่าความร้อนต่อหน่วยมวลสูงกว่าเชื้อเพลิงชีวมวลซึ่งคาดว่าจะเป็เชื้อเพลิงทางเลือกในอนาคต นอกจากนี้ทำการศึกษาอัตราการใช้พลังงานในการเตรียมเชื้อเพลิงผ่งซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลต่อต้นทุนในภาคอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 วิเคราะห์พฤติกรรมทางพลศาสตร์การไหลของก๊าซร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ด้วยหัวพ่นเชื้อเพลิงที่มีการปรับปรุงสมรรถนะสำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลและเชื้อเพลิงชีวมวลทอร์รีไฟต์ด้วยแบบจำลองเชิงตัวเลข
- 1.2.2 ศึกษาทดลองเผาไหม้เพื่อประเมินสมรรถนะหัวพ่นเชื้อเพลิงที่มีการปรับปรุงช่องการไหลของอากาศปฐุมภูมิ โดยใช้เชื้อเพลิงชีวมวลผงและเชื้อเพลิงชีวมวลทอร์รีไฟต์ผง

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

- 1.3.1 ของไหลมีการกระจายตัวของอนุภาคเชื้อเพลิงออกจากหัวพ่นเชื้อเพลิงอย่างสม่ำเสมอ
- 1.3.2 เชื้อเพลิงไหลเข้าสู่ท่ออากาศปฐุมภูมิอย่างสม่ำเสมอ
- 1.3.3 อากาศปฐุมภูมิ ทุติยภูมิและตติยภูมิมีการไหลอย่างสม่ำเสมอและมีความชื้นเท่ากัน
- 1.3.4 หัวพ่นเชื้อเพลิงแบบใหม่ทำให้พื้นที่ช่องการไหลของอากาศทุติยภูมิลดลง

1.4 ขอบเขตการวิจัย

- 1.4.1 ใช้แบบจำลองการไหลปั่นป่วน $k - \epsilon$ ชนิด Realizable
- 1.4.2 สมรรถนะของหัวพ่นเชื้อเพลิงที่พิจารณา คือ ผลของการกระจายอนุกรมิจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง
- 1.4.3 พฤติกรรมทางพลศาสตร์การไหลที่พิจารณา คือ สนามเวกเตอร์การไหล การกระจายของอนุกรมิจ สัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนและสัดส่วนโดยมวลของสารระเหย
- 1.4.4 ทดลองเผาไหม้เชื้อเพลิงเทียบเท่ากำลังความร้อน 300 กิโลวัตต์โดยใช้อากาศส่วนเกินทางทฤษฎี 15 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนอากาศปฐุมภูมิ อากาศทุติยภูมิ อากาศตติยภูมิ 25 : 65 : 10 ตามลำดับ [3] ใช้เชื้อเพลิงชีวมวลและชีวมวลทอร์รีไฟต์ที่บดผ่านตะแกรง 0.5 และ 1.0 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องบดชนิดค้อนเหวี่ยง
- 1.4.5 วิเคราะห์ก๊าซไอเสียจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงด้วยชุดทดลองและแบบจำลอง

1.5 ขั้นตอนการศึกษา

- 1.5.1 กำหนดวัตถุประสงค์และขอบเขตการวิจัย
- 1.5.2 ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 1.5.3 ศึกษาการใช้โปรแกรม Ansys Fluent เพื่อใช้ในการจำลองด้วยวิธีการเชิงตัวเลข
- 1.5.4 ทดลองและจำลองการเผาไหม้
- 1.5.5 อภิปรายผลการทดลองและผลการจำลอง
- 1.5.6 สรุปผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 การใช้หัวพันเชื้อเพลิงแบบใหม่ในการเผาไหม้ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศสูงและปล่อยมลพิษออกมาน้อยกว่าหัวพันแบบเก่า สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในวงการอุตสาหกรรมขนาดย่อมได้

1.6.2 เชื้อเพลิงชีวมวลทอร์รีไฟด์สามารถนำไปใช้ทดแทนชีวมวล

1.6.3 อัตราการใช้พลังงานในการเตรียมเชื้อเพลิงชีวมวลทอร์รีไฟด์ผงมีค่าน้อยกว่าชีวมวล ซึ่งสามารถลดต้นทุนในการสร้างพลังงานจากเชื้อเพลิงชนิดผงได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

วรรณกรรมปริทรรศน์

ในบทนี้จะกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องซึ่งเป็งานวิจัยที่กล่าวถึงการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล เ็ื่อนไขการทดลอง ขั้นตอนการทดลอง ผลการจำลองด้วยแบบจำลองเชิงตัวเลขและผลการทดลองเผาไหม้จริง เพื่อนำมาใช้เป็นแนวทางในการศึกษาสำหรับงานวิจัยนี้ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ปีที่เผยแพร่	ชื่อผู้วิจัย	เนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย
ค.ศ. 2014	ชินภัทร ฐุการ	ศึกษาและออกแบบหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่นเพื่อใช้กับหม้อกำเนิดไอน้ำชนิดท่อไฟแวนอนขนาดกำลังความร้อนสูงสุด 1 เมกะวัตต์ โดยทำการออกแบบให้หัวเผาในห้องเผาไหม้ช่วยเพื่อช่วยรักษาเสถียรภาพทางเปลวไฟโดยใช้หลักการหมุนควงด้วยชุดใบตรงที่เป็นตัวสร้างการหมุนควงตามแนวรัศมี (Radial swirl generator) ติดตั้งในกล่องอากาศทุติยภูมิ (Swirl box) ซึ่งอยู่ในช่วง 60-100 องศา จากการทดลองพบว่าที่กำลังความร้อน 300-500 กิโลวัตต์ โดยใช้เชื้อเพลิงขนาด 0.5 มิลลิเมตร และมุมใบตรงขนาด 100 องศา พบว่ามีการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ซึ่งปลดปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ในปริมาณที่สูง [2]
ค.ศ. 2017	พงศนันท์ แก่นพรม	ศึกษาและออกแบบแผ่นขวางการไหลและแผ่นปิดมาใช้กับหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่นเพื่อทำให้เปลวไฟมีความเสถียรภาพ โดยศึกษาที่กำลังความร้อนเทียบเท่า 300 กิโลวัตต์ อากาศส่วนเกิน 15 เปอร์เซ็นต์ สัดส่วนอากาศ 15, 65 และ 20 ตามลำดับ ขนาดเชื้อเพลิง 1 มิลลิเมตร จากการจำลองและทดลองพบว่ากรณีติดตั้งแผ่นขวางการไหลทำให้อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้สูงกว่ากรณีติดตั้งแผ่นปิดและกรณีพื้นฐานที่ไม่มีติดตั้งแผ่นกั้นและแผ่นปิด รวมถึงมีการปล่อยสารระเหยในสัดส่วนที่สูงกว่าและมีสัดส่วนออกซิเจนที่ต่ำกว่าอีกด้วย นอกจากนี้อนุภาคของเชื้อเพลิงเกิดการกระจายไปยังผนังห้องเผาไหม้ช่วยด้วยความเร็วต่ำและเป็นบริเวณกว้างของห้องเผาไหม้ ซึ่งสามารถรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟของการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลได้ [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สแกนไว้สำหรับการใช้งาน ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค.ศ. 2018	ฉัตรเฉลิม และคณะ	<p>ศึกษาผลกระทบรูปร่างของชุดอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวนโดยการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลผงที่กำลังความร้อนเทียบเท่า 300 กิโลวัตต์ อากาศส่วนเกิน 15 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนอากาศระหว่างอากาศปฐมภูมิ ทุติยภูมิและตติยภูมิ 25, 65 และ 10 ตามลำดับ สำหรับการทดลองเป็นการเปรียบเทียบการเผาไหม้ที่เงื่อนไขเดียวกัน ใช้ชุดสร้างการไหลหมุนวนชนิดใบตรงและใบโค้ง จากการทดลองพบว่าอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวนชนิดใบโค้งสร้างการไหลหมุนวนที่รุนแรงกว่าอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวนชนิดใบตรงและมีอุณหภูมิที่สูงกว่าภายในห้องเผาไหม้ช่วยซึ่งทำให้เกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ 379 ppm และไนโตรเจนออกไซด์ 296 ppm เทียบที่ออกซิเจนร้อยละ 7 [3]</p>
ค.ศ. 2017	Xiaohan Ren และคณะ	<ul style="list-style-type: none"> - เชื้อเพลิงชีวมวลทอร์รีไฟต์มีอัตราส่วนสมมูลของสูงกว่าเชื้อเพลิงชีวมวล - ความหนาแน่นรวมของเชื้อเพลิงชีวมวลทอร์รีไฟต์สูงกว่าเชื้อเพลิงชีวมวล - ชีวมวลทอร์รีไฟต์ปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ออกมามากกว่าชีวมวล แต่มีค่าต่ำกว่าคาร์บอนไดออกไซด์จากถ่านหิน - ออกซิเจนที่วัดได้จากการเผาไหม้ชีวมวลทอร์รีไฟต์ต่ำกว่าการเผาไหม้ชีวมวล - ชีวมวลทอร์รีไฟต์ปล่อยซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ออกมาน้อยกว่าชีวมวลดิบและมีค่าต่ำกว่าถ่านหิน เป็นผลมาจากซัลเฟอร์ถูกปล่อยออกมาในระหว่างกระบวนการทอร์รีแฟคชัน นั่นคือ กระบวนการทอร์รีแฟคชันช่วยลดการปล่อยซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้ - ชีวมวลทอร์รีไฟต์บางชนิดปล่อยออกไซด์ของไนโตรเจนออกมาสูงกว่า บางชนิดปล่อยออกไซด์ต่ำกว่า เนื่องจากองค์ประกอบของชีวมวลแต่ละชนิดแตกต่างกัน [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค.ศ. 2018	Jale Yanik และคณะ	<ul style="list-style-type: none"> - ซิวมวลทอร์รีไฟต์ปล่อยซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ออกมาน้อยกว่าซิวมวลทั้ง ๆ ที่มีปริมาณซัลเฟอร์มากกว่า เนื่องจากกระบวนการทอร์รีแฟคชันทำให้มีการปล่อยซัลเฟอร์ออกมาในขั้นตอนการปล่อยสารระเหย - ซิวมวลทอร์รีไฟต์ปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ (NO) ออกมาสูงกว่าซิวมวล แม้มีปริมาณไนโตรเจนต่ำกว่า [5]
ค.ศ. 2018	Maryam Manouchehrinejad และคณะ	<ul style="list-style-type: none"> - ซิวมวลเม็ดมี้อตราการใช้พลังงานในการเตรียมเชื้อเพลิงผ่งต่ำกว่าซิวมวลที่มีลักษณะเป็นชิ้น - ซิวมวลทอร์รีไฟต์มี้อตราการใช้พลังงานในการเตรียมเชื้อเพลิงผ่งต่ำกว่าซิวมวล - ซิวมวลที่ถูกบดผ่านตะแกรงช่องใหญ่กว่าทำให้อตราการใช้พลังงานในการเตรียมเชื้อเพลิงผ่งต่ำกว่า - อุณหภูมิทอร์รีแฟคชันสูงขึ้น ทำให้อตราการใช้พลังงานในการเตรียมเชื้อเพลิงผ่งต่ำลง [6]
ค.ศ. 2018	Zhiwen และคณะ	<ul style="list-style-type: none"> - เชื้อเพลิงซิวมวลทอร์รีไฟต์จะมีความเป็นเนื้อเดียวกัน ปริมาณความชื้นต่ำ ค่าความร้อนและพลังงานต่อหน่วยมวลสูง ความสามารถในการถูกบดดีขึ้น ความสามารถในการดูดซับน้ำลดลงและข้อสำคัญ คือ เก็บรักษาง่าย ต้นทุนการขนส่งลดลงและอายุการใช้งานมากขึ้น [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

บทนี้กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงสมรรถนะหัวพ่นเชื้อเพลิงโดยการเพิ่มพื้นที่ช่องการไหลของอากาศปฐมภูมิ เช่น หัวเผาเชื้อเพลิง เชื้อเพลิงแข็ง การเผาไหม้ชีวมวล ทฤษฎีการเผาไหม้ และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองเชิงตัวเลข เป็นต้น

3.1 หัวเผาเชื้อเพลิง

หัวเผาเชื้อเพลิงเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของการเผาไหม้เชื้อเพลิงจึงจำเป็นต้องให้ความสำคัญกับหัวเผาเป็นลำดับต้น ๆ ซึ่งทำหน้าที่ลำเลียงเชื้อเพลิงเข้าไปผสมกับอากาศจากนั้นทำการจุดติดไฟทำให้เกิดการเผาไหม้และให้พลังงานความร้อนออกมา สำหรับหม้อน้ำที่ใช้เชื้อเพลิงแข็งในการเผาไหม้โดยทั่วไปจะไม่มีการใช้หัวเผาแต่จะใช้เป็นห้องเผาไหม้แทน หากเป็นกรณีที่ใช้ถ่านหินซึ่งเป็นเชื้อเพลิงแข็งสามารถใช้หัวเผ่าถ่านหินได้ โดยทั่วไปหัวเผาสามารถแบ่งประเภทตามชนิดของเชื้อเพลิงได้ 3 ประเภทหลัก ๆ ได้แก่ หัวเผาเชื้อเพลิงเหลว หัวเผาเชื้อเพลิงก๊าซและหัวเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง

3.1.1 หัวเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลว [8]

หัวเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลว มีขั้นตอนการทำงานที่สำคัญอยู่ 2 ขั้นตอน คือการทำให้เป็นแผ่นบาง (Filming) ซึ่งเป็นขั้นตอนทำให้น้ำมันก่อตัวเป็นแผ่นฟิล์มบางๆ และการแตกตัว (Disintegration) กล่าวคือขั้นตอนทำให้น้ำมันบางที่เกิดจากในขั้นตอนแรกแตกกระจายเป็นอนุภาคเล็ก ๆ (Oil droplet) โดยอาศัยความไม่เสถียรที่มีอยู่ในตัวของแผ่นน้ำมันบางเองหรือโดยใช้ของไหลอื่นมาทำให้แตกตัวซึ่งสามารถแบ่งได้ 3 ลักษณะ คือ

1. หัวเผาแบบพ่นฝอยโดยใช้ความดันน้ำมัน (Pressure atomized burner)

หัวเผาลักษณะนี้อาศัยความดันของน้ำมันเพื่อฉีดเป็นฝอย ซึ่งเหมาะสำหรับหม้อน้ำขนาดใหญ่ เช่น เรือเดินสมุทรและเครื่องจักรผลิตไฟฟ้า สามารถแบ่งตามลักษณะการไหลของน้ำมันผ่านหัวฉีดได้เป็น 2 แบบ คือ หัวฉีดแบบไม่มีน้ำมันไหลกลับ (Non-oil return or Non-recirculation nozzle) และหัวฉีดแบบมีน้ำมันไหลกลับ (Oil return or Recirculation nozzle)

2. หัวเผาแบบพ่นฝอยโดยใช้ไอน้ำหรืออากาศ (Steam or Air atomized burner)

หัวเผาลักษณะนี้อาศัยลมหรือน้ำเพื่อฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงให้เป็นฝอย มีหลักการทำงานคือน้ำมันไหลผ่านในท่อขนาดเล็กที่เรียงตัวกันอยู่ด้านในท่อใหญ่ซึ่งมีอากาศหรือไอน้ำภายใต้ความดันสูงไหลผ่านในท่อด้านนอก และที่ปลายท่อทั้งสองด้าน น้ำมัน อากาศ หรือน้ำจะถูกเป่าให้อนุภาคชนกันจึงทำให้เกิดการแตกตัวของน้ำมันเป็นฝอยเล็ก ๆ ซึ่งสแบ่งได้เป็น 3 แบบ คือ หัวเผาความดันต่ำ

(1.08 บาร์) หัวเผาความดันปานกลาง (1.25 - 2.00 บาร์) และหัวเผาความดันสูง (2.00 - 4.45 บาร์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. หัวเผาแบบใช้แรงเหวี่ยงของถ้วยหมุน (Rotary cup burner)

หัวเผาลักษณะนี้อาศัยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางเพื่อกระจายน้ำมันให้เป็นฝอยมีหลักการการทำงานคือน้ำมันที่ถูกลำเลียงเข้าไปด้านในของกรวยที่กำลังหมุนรอบแกนด้วยความเร็วรอบ 3,500 - 4,000 รอบต่อนาที ทำให้น้ำมันที่เข้าไปนั้นถูกเหวี่ยงจนแผ่ออกเป็นแผ่นบางและถูกสับตัดออกจากถ้วย ทำให้เป็นฝอยละเอียด จนระเหยเป็นไอและติดไฟทันทีซึ่งเหมาะใช้กับน้ำมันที่มีความหนืดสูง เช่น น้ำมันเตา เป็นต้น

3.1.2 หัวเผาไหม้เชื้อเพลิงก๊าซ (Gas fuel burner) [8]

หัวเผาไหม้เชื้อเพลิงก๊าซเป็นหัวเผาที่ออกแบบมาสำหรับใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงก๊าซสามารถแบ่งหัวเผาเชื้อเพลิงก๊าซตามขั้นตอนการผสมเชื้อเพลิงก๊าซกับอากาศเป็น 2 ลักษณะ คือ

1. หัวเผาเชื้อเพลิงก๊าซแบบผสมเชื้อเพลิงกับอากาศก่อนลำเลียงเข้าห้องเผาไหม้ (Premixed gas burner) หัวเผาลักษณะนี้มีห้องผสมระหว่างเชื้อเพลิงก๊าซกับอากาศก่อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้หรือหัวเผา

2. หัวเผาเชื้อเพลิงก๊าซแบบผสมกันภายในหัวเผา (Non-premixed gas burner) หัวเผาลักษณะนี้ไม่มีห้องผสมระหว่างเชื้อเพลิงก๊าซกับอากาศก่อนที่จะเข้าห้องเผาไหม้ แต่เป็นการลำเลียงเชื้อเพลิงก๊าซและอากาศเข้าพร้อมกันที่บริเวณด้านหน้าหัวเผา ทำให้เชื้อเพลิงและอากาศจะผสมกันและเกิดการสันดาปขึ้นบริเวณหน้าหัวเผา

3.1.3 หัวเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง (Solid fuel burner) [9]

หัวเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง เป็นหัวเผาหรือห้องเผาไหม้ที่ออกแบบมาสำหรับใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง โดยเชื้อเพลิงแข็งที่มีความสำคัญในการสร้างความร้อนและพลังงาน คือ ถ่านหิน เนื่องจากมีปริมาณมากและสามารถนำมาใช้ได้อีกหลายทศวรรษ นอกจากถ่านหินแล้วยังมีเชื้อเพลิงแข็งที่สามารถสร้างพลังงานได้อีก เช่น ไม้ ฟางข้าว กากอ้อย ทะลายปาล์ม เศษไม้ และมูลสัตว์ เป็นต้น ซึ่งในปัจจุบันขนาดของเชื้อเพลิงแข็งที่ใช้อยู่มีขนาดตั้งแต่ถ่านหินที่เป็นผงไปจนถึงเชื้อเพลิงสับหรือเชื้อเพลิงท่อนแต่สำหรับงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาโดยการใช้หัวเผาเชื้อเพลิงแข็งชนิดผงเท่านั้น

การเผาไหม้ถ่านหินชนิดผงเป็นการเผาไหม้แบบแขวนลอย ซึ่งมีการใช้งานกันอย่างกว้างขวางในโรงงานไฟฟ้าถ่านหิน โดยระบบนี้ถ่านหินจะถูกนำไปบดละเอียดจนเป็นผง และใช้อากาศในการลำเลียงเข้าสู่หัวเผาหรือห้องเผาไหม้ (Burner) เมื่ออนุภาคเข้าสู่ห้องเผาไหม้และถูกทำให้ร้อนจากเปลวไฟภายใน ทำให้เกิดการปล่อยสารระเหยออกมาจากอนุภาคเหล่านั้น จนเหลือเป็นอนุภาคถ่านคาร์บอนที่มีขนาดเล็กกว่าเดิม ซึ่งอนุภาคที่เหลืออยู่มีลักษณะเป็นรูพรุนคล้ายฟองน้ำ สารระเหยที่ออกมาจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ ทำให้เกิดการติดไฟและการเผาไหม้ในที่สุด ในส่วนของอนุภาคถ่านคาร์บอนที่เหลือจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศเช่นกัน ทำให้เกิดการคายความร้อนออกมา โดยผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นจะอยู่รอบๆ อนุภาคและไหลปนปนรวมอยู่ระหว่างอากาศกับอนุภาคเชื้อเพลิง

1. คุณสมบัติของหัวเผาถ่านหิน

การเผาไหม้ถ่านหินที่มีลักษณะเป็นผงจะมีประสิทธิภาพดีหรือไม่ ขึ้นอยู่กับการทำงานของหัวเผาโดยหัวเผาที่ดีต้องมีความสามารถในการผสมหรือคลุกเคล้าอนุภาคของเชื้อเพลิงกับอากาศได้เป็นอย่างดี ซึ่งหัวเผาถ่านหินผงที่ดีควรมีลักษณะดังต่อไปนี้

1.1) สามารถแบ่งการไหลของอากาศออกเป็นสองส่วนได้ คือ อากาศปฐมภูมิ ซึ่งมีหน้าที่ในการลำเลียงเชื้อเพลิงผงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ และอากาศทุติยภูมิ ซึ่งทำหน้าที่ในการจุดติดไฟและเผาไหม้เชื้อเพลิง

1.2) สามารถสร้างการไหลแบบปั่นป่วนได้ เพื่อทำให้เกิดการคลุกเคล้ากันระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศได้เป็นอย่างดี

1.3) สามารถป้องกันเปลวไฟย้อนกลับเข้าสู่หัวเผาได้

1.4) สามารถควบคุมอัตราการไหลของอากาศทุติยภูมิได้ เนื่องจากอากาศนี้เป็นส่วนสำคัญที่จะทำให้เกิดการไหม้ ถ้าหากมีอัตราการไหลมากเกินไปทำให้อุณหภูมิไม่ถึงจุดติดไฟ

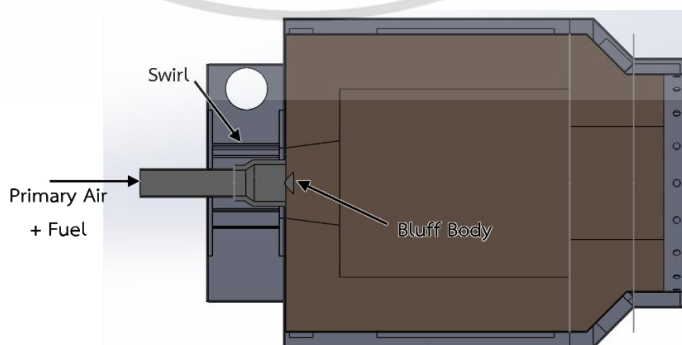
2. ลักษณะของหัวเผาถ่านหิน

หัวเผาถ่านหินชนิดผงสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ตามลักษณะรูปร่างคือ หัวเผาชนิดหน้าตัดกลมและหัวเผาชนิดหน้าตัดสี่เหลี่ยม นอกจากนี้ยังสามารถแบ่งออกได้อีก 2 ประเภท ตามลักษณะวิธีการผสมของอากาศปฐมภูมิ เชื้อเพลิง และอากาศทุติยภูมิ ดังนี้

2.1) หัวเผาชนิดการไหลตรง ซึ่งอากาศปฐมภูมิ เชื้อเพลิง และอากาศทุติยภูมิ ผสมกันภายนอกหัวเผาก่อนที่จะลำเลียงเข้าสู่ห้องเผาไหม้

2.2) หัวเผาชนิดการไหลปั่นป่วน ซึ่งอากาศปฐมภูมิ เชื้อเพลิง และอากาศทุติยภูมิ ผสมกันภายในหัวเผาก่อนที่จะลำเลียงเข้าสู่ห้องเผาไหม้

สำหรับงานวิจัยนี้หัวเผาเชื้อเพลิงแข็งที่ใช้เป็นประเภทชนิดการไหลปั่นป่วน กล่าวคืออากาศปฐมภูมิกับเชื้อเพลิงจะไหลตรงผ่านท่ออากาศปฐมภูมิจากนั้นจะถูกกระจายออกด้านข้างด้วยตัวเบี่ยง เมื่อเกิดการรวมกับอากาศทุติยภูมิจะมีการไหลวนรอบรอบๆ ท่ออากาศปฐมภูมิ ทำให้เชื้อเพลิงกับอากาศเกิดการผสมและคลุกเคล้าด้วยความปั่นป่วนภายในห้องเผาไหม้



รูปที่ 3.1 หัวเผาเชื้อเพลิงแข็งที่ใช้เป็นประเภทชนิดการไหลปั่นป่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้โดยไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 เชื้อเพลิงแข็ง [2]

เชื้อเพลิง หมายถึง สารที่สามารถเผาไหม้ได้โดยง่ายเมื่อทำปฏิกิริยากับอากาศ (ออกซิเจน) ทำให้ได้ความร้อนออกมา เชื้อเพลิงสามารถแบ่งออกตามสภาพทางกายภาพได้ 3 ประเภท คือ

1. เชื้อเพลิงก๊าซ
2. เชื้อเพลิงเหลว
3. เชื้อเพลิงแข็ง (สำหรับงานวิจัยกล่าวถึงเชื้อเพลิงแข็งเท่านั้น)

เชื้อเพลิงแข็งที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ ได้แก่ ไม้ ซิ่วมวล พืด ถ่านหิน ขยะจากที่อยู่อาศัย และจากอุตสาหกรรมบางประเภทก็จัดว่าเป็นเชื้อเพลิงแข็งเช่นเดียวกัน องค์ประกอบของเชื้อเพลิงแข็งนอกจากจะประกอบด้วยคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นส่วนมากแล้ว ยังประกอบด้วยออกซิเจน ไนโตรเจน กำมะถัน น้ำและเถ้าอีกด้วย ตัวอย่างเช่น ไม้มีออกซิเจนอยู่ถึง 45% (โดยมวลและไม่รวมน้ำกับเถ้า) ในขณะที่ถ่านหินแอนทราไซต์มีอยู่เพียง 2% เท่านั้นดังแสดงในตารางที่ 3.1

หากพิจารณาอนุภาคของถ่านหินผงที่ล้าเลียงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ เมื่ออนุภาคดังกล่าวอยู่ภายใต้ กระแสก๊าซร้อน ทำให้ความร้อนเกิดการถ่ายเทโดยการพาและการแผ่รังสีไปยังอนุภาคเชื้อเพลิง ต่อด้วยการนำความร้อนเข้าสู่ภายในอนุภาค สำหรับถ่านหินความชื้นจะระเหยออกมาจากอนุภาคอย่างรวดเร็วก่อนที่สารระเหยจะถูกปลดปล่อยออกมาตามลำดับ โดยระยะเวลาในการปล่อยความชื้นออกจากอนุภาค คือ เวลาที่ใช้ในการทำให้อุณหภูมิถึงจุดระเหยน้ำ รวมกับเวลาที่ใช้ระเหยความชื้นออกจากอนุภาคเชื้อเพลิง

ความชื้นในเชื้อเพลิงแข็งปรากฏอยู่สองรูปแบบ รูปแบบแรกเป็นน้ำอิสระแทรกตัวอยู่ระหว่างผนังเซลล์ของไม้ หรือในรูพรุนเล็ก ๆ ของถ่านหิน ซึ่งน้ำจะถูกดูดซับเข้าไปโดยอิทธิพลของความตึงผิว และรูปแบบที่สองเป็นน้ำที่ถูกดูดกลืนไว้อย่างเชิงกายภาพ ความชื้นในเชื้อเพลิงแข็งมีผลกระทบโดยตรงต่ออัตราการเผาไหม้และประสิทธิภาพโดยรวมของการเผาไหม้

เถ้าในเชื้อเพลิงแข็งคือสารอนินทรีย์ที่เหลืออยู่หลังจากที่เชื้อเพลิงเผาไหม้หมดแล้ว ไม่มีเถ้า น้อยมากในขณะที่มีสูงถึง 10% หรือมากกว่า คุณลักษณะของเถ้ามีความสำคัญอย่างมากในการออกแบบอุปกรณ์เผาไหม้และอุปกรณ์การถ่ายโอนความร้อนเพื่อหาทางลดปัญหาจากการเกิดเป็น สแลก (Slag fouling) การกัดกร่อน (Erosion) และการผุกร่อน (Corrosion) ลงได้

องค์ประกอบของเชื้อเพลิงแข็งถูกรายงานในลักษณะตามที่ได้รับมา (As-received basis) หรือในลักษณะหลักอ้างอิงแห้ง (Dry basis) หรือในลักษณะหลักอ้างอิงแห้งและไม่คิดเถ้า (Dry, ash-free basis) ดังนั้น การระบุองค์ประกอบของเชื้อเพลิงแข็งต้องระบุเงื่อนไขให้ถูกต้องเพราะเกี่ยวข้องกับการคำนวณหาค่าความร้อนทางสูงและทางต่ำโดยตรง ทำให้ช่วยพิจารณาได้อย่างถูกต้องว่าความร้อนแฝงของน้ำที่เกี่ยวข้องในการปฏิกิริยาการเผาไหม้เป็นอิสระ (Free water) หรือน้ำที่ถูกดูดกลืน (Bound water) หรือน้ำที่เกิดจากไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างปริมาณออกซิเจน น้ำ และเถ้าในเชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ [2]

เชื้อเพลิง	ออกซิเจน, % (หลักอ้างอิงแห้งและไม่คิดเถ้า)	ความชื้น, % (ไม่คิดเถ้า)	เถ้า, % (หลักอ้างอิงแห้ง)
ไม้	45	15 - 50	0.1 - 1.0
ฟีด	35	90	0.1 - 10
ถ่านหินลิกไนต์	25	30	> 5
ถ่านหินบิทูมินัส	5	5	> 5
ถ่านหินแอนทราไซต์	2	4	> 5
เชื้อเพลิงจากขยะ	40	24	10 - 15

3.2.1 ประเภทและลักษณะของเชื้อเพลิงแข็ง

เชื้อเพลิงชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงแข็งชนิดหนึ่ง ซึ่งชีวมวลหมายถึงสิ่งมีชีวิต หรือ สารอินทรีย์ที่สามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานได้ โดยรวมถึงวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรต่าง ๆ เช่น ฟาง ข้าว แกลบ กากอ้อย ทะลายปาล์ม เศษไม้ และมูลสัตว์ เป็นต้น เชื้อเพลิงชีวมวลส่วนใหญ่จะมีองค์ประกอบเป็นเซลลูโลส ($C_6H_{10}O_5$) และลิกนิน ($C_{40}H_{44}O_6$) ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเท่านั้น จากข้อมูลผลผลิตทางการเกษตรของสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตรในปีเพาะปลูก พ.ศ. 2549-2550 พบว่า

ประเภทชีวมวล	ชีวมวล	ข้อมูลผลผลิตทางการเกษตร
ชีวมวลจากข้าว	แกลบ	ปริมาณการผลิตข้าวทั้งประเทศเท่ากับ 28.61 ล้านตัน และคิดเป็นปริมาณแกลบเท่ากับ 3.95 ล้านตัน โดยมีการนำแกลบเหล่านี้มาใช้งานคิดเป็นปริมาณรวม 0.86 ล้านตัน หากนำปริมาณแกลบคงเหลือดังกล่าวมาหักด้วยปริมาณการสูญเสียของแกลบที่เกิดจากการขัดสี การฟุ้งกระจายทั้งในระหว่างกระบวนการต่าง ๆ และการขนส่ง ดังนั้นปริมาณแกลบคงเหลือที่สามารถนำมาใช้งานได้จะมีค่าสุทธิเท่ากับ 3.09 ล้านตัน คิดเป็นค่าพลังงานความร้อนเทียบเท่า 843 พันตันน้ำเทียบเท่ามันดิบและมีประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 320 เมกะวัตต์
	ฟางข้าว	ปริมาณฟางข้าวเท่ากับ 34.04 ล้านตัน เมื่อนำมาคิดปริมาณที่เก็บรวบรวมได้ (ฟางข้าวมีประสิทธิภาพในการเก็บรวบรวม 10%) ปริมาณฟางข้าวคงเหลือที่สามารถนำมาใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเท่านั้น ไม่สามารถเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

		งานได้จะมีค่าสุทธิเท่ากับ 340 ล้านตัน คิดเป็นค่าพลังงานความร้อนเท่ากับ 926.10 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบและคิดเป็นประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 47.31 เมกะวัตต์
ชีวมวลจากข้าวโพด	ชังข้าวโพด	ปริมาณการผลิตข้าวโพดทั้งประเทศเท่ากับ 4.40 ล้านตัน และคิดเป็นปริมาณชังข้าวโพดเท่ากับ 0.84 ล้านตัน โดยมีการนำชีวมวลเหล่านี้มาใช้ในภาคต่าง ๆ คิดเป็นปริมาณรวม 74,000 ตัน ทำให้ปริมาณชีวมวลคงเหลือมีค่าเท่ากับ 0.43 ล้านตัน คิดเป็นค่าพลังงานความร้อนเท่ากับ 124.6 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบและคิดเป็นประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 47.31 เมกะวัตต์
ชีวมวลจากอ้อย	ยอดและใบอ้อย	ปริมาณการผลิตอ้อยทั้งประเทศเท่ากับ 70 ล้านตัน คิดเป็นชีวมวลประเภทยอดและใบอ้อยเท่ากับ 16.8 ล้านตัน เมื่อนำมาคิดประสิทธิภาพในการเก็บรวบรวม (40%) จะมีชีวมวลคงเหลือสุทธิ 6.72 ล้านตัน คิดเป็นค่าพลังงานความร้อนเท่ากับ 1,935.7 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบและคิดเป็นประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 735 เมกะวัตต์
	กากอ้อย	ปริมาณกากอ้อยเท่ากับ 21 ล้านตัน ชีวมวลประเภทนี้มีการนำไปใช้อย่างกว้างขวางในภาคอุตสาหกรรม โดยปัจจุบันได้ถูกแปรไปเป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตพลังงานความร้อนในโรงงานผลิตน้ำตาลและบางโรงงานเป็นหลัก
	เหง้ามันสำปะหลัง	ผลผลิตเหง้ามันสำปะหลังสามารถประเมินปริมาณเหง้ามันได้เท่ากับ 1.76 ล้านตัน เมื่อนำปริมาณชีวมวลคงเหลือดังกล่าวมาคิดประสิทธิภาพในการเก็บรวบรวม (40%) จะมีปริมาณชีวมวลสุทธิเท่ากับ 0.7 ล้านตัน คิดเป็นค่าพลังงานความร้อนเทียบเท่า 131 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบและคิดเป็นประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 50 เมกะวัตต์
ชีวมวลจากปาล์มน้ำมัน	ทางใบและก้านปาล์ม	ปริมาณการผลิตปาล์มน้ำมันทั้งประเทศเท่ากับ 8.75 ล้านตัน และคิดเป็นปริมาณทางใบและก้านเท่ากับ 2.36 ล้านตัน เมื่อคิดประสิทธิภาพในการเก็บรวบรวม (65%) และการนำไปใช้ประโยชน์จะมีปริมาณชีวมวลสุทธิเท่ากับ 1.54 ล้านตัน คิดเป็นค่าพลังงานความร้อนเทียบเท่า 481 พันตัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

		เทียบเท่าน้ำมันดิบ และคิดเป็นประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 183 เมกะวัตต์
	กากใยปาล์ม	ปาล์มน้ำมันมีปริมาณกากใยปาล์มที่ได้เท่ากับ 1.31 ล้านตัน โดยชีวมวลประเภทนี้จะถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงงานอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม เมื่อหักปริมาณที่ถูกใช้งานออกจะมีชีวมวลคงเหลือสุทธิ 0.23 ล้านตัน คิดเป็นค่าพลังงานความร้อน 81.3 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบและคิดเป็นประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 31 เมกะวัตต์
	กะลาปาล์ม	ปริมาณกะลาปาล์มได้เท่ากับ 0.53 ล้านตัน โดยมีการใช้ชีวมวลประเภทนี้ในโรงงานอุตสาหกรรมเพื่อเป็นเชื้อเพลิงและคิดเป็นปริมาณรวม 18,000 ล้านตัน และใช้ในประเภทอื่น ๆ 147,000 ล้านตัน ดังนั้นจะมีชีวมวลคงเหลือสุทธิ 0.31 ล้านตัน คิดเป็นค่าพลังงานความร้อน 114 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบและคิดเป็นการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 43 เมกะวัตต์ เป็นระยะเวลา 1 ปี
	ทะลายปาล์ม	ปริมาณของทะลายปาล์มได้เท่ากับ 2.01 ล้านตัน โดยมีการนำชีวมวลประเภทนี้มาใช้ในการผลิตไฟฟ้าคิดเป็นปริมาณรวม 80,000 ตัน และใช้ในประเภทอื่น ๆ เช่น ทำปุ๋ยเพาะเห็ดคิดเป็นปริมาณ 160,000 ตัน ดังนั้นจะมีชีวมวลคงเหลือสุทธิ 1.13 ล้านตัน คิดเป็นค่าพลังงานความร้อน 385 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบและคิดเป็นการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 146 เมกะวัตต์ เป็นระยะเวลา 1 ปี
ชีวมวลจาก ไม้ยางพารา	ขี้เลื่อยและเศษ ไม้ยางพารา	ต้นยางพาราที่มีอายุเกิน 25 ปี ซึ่งครบรอบที่จะต้องทำการตัด คิดเป็นพื้นที่ยางพาราที่ถูกตัดฟัน 500,000 ไร่ต่อปี จะได้ปริมาณของไม้ยางพารา 200 ล้านตัน ซึ่งไม้ยางพาราที่ถูกตัดจะนำไปเข้ากระบวนการแปรรูปไม้เพื่อผลิตเฟอร์นิเจอร์ ดังนั้นจะมีชีวมวลที่ได้ภายหลังกระบวนการผลิตคิดเป็นเศษไม้ 3.6 ล้านตัน และขี้เลื่อย 8 ล้านตัน เมื่อหักปริมาณที่ถูกนำไปใช้ประโยชน์จะมีเศษไม้คงเหลือ 3.55 ล้านตัน คิดเป็นพลังงานความร้อน 1,862 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบและพลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 707 เมกะวัตต์ ในส่วนของขี้เลื่อยจะมีปริมาณคงเหลือ 1,037 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบและพลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 394 เมกะวัตต์ เป็นระยะเวลา 1 ปี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้ภายในเท่านั้น การนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชีวมวลจาก ไม้ยูคาลิปตัส		ไม้ยูคาลิปตัสจะถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษ เป็นส่วนใหญ่ โดยผลผลิตของไม้ยูคาลิปตัสทั้งประเทศมี ปริมาณรวม 6.8 ล้านตันต่อปี มีชีวมวลเกิดขึ้นคือไม้พิน และ เปลือกไม้ โดยพินจะถูกนำไปใช้ในการผลิตไฟฟ้า สำหรับ เปลือกไม้จะนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในการให้ความร้อน เมื่อ ประเมินจำนวนของชีวมวลคงเหลือพบว่าจะมีไม้พินคงเหลือ เท่ากับ 0.57 ล้านตัน คิดเป็นพลังงานความร้อน 167 พันตัน เทียบเท่าน้ำมันดิบและพลังงานไฟฟ้า 63.5 เมกะวัตต์ สำหรับ เปลือกไม้ยูคาลิปตัสมีปริมาณคงเหลือ 0.61 ล้านตัน คิดเป็น พลังงานความร้อน 186 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบและ พลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 70.5 เมกะวัตต์ เป็นระยะเวลา 1 ปี
----------------------------	--	---

ตารางที่ 3.2 ตัวอย่างการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์โดยประมาณและการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ ของ RDF และเชื้อเพลิงต่าง ๆ (อ้างอิงเชื้อเพลิงแห้งและไม่คิดเถ้า) [2]

องค์ประกอบ	ชนิดเชื้อเพลิง				
	ไม้	พืต	ถ่านหิน ลิกไนต์	ถ่านหิน บิทูมินัส	เชื้อเพลิงจาก ขยะ (RDF)
ผลการวิเคราะห์โดยประมาณ (% โดยน้ำหนัก)					
- สารระเหย (Volatile matter)	81	65	55	40	85
- คาร์บอนคงตัว (Fixed carbon)	19	35	45	60	15
ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (% โดยน้ำหนัก)					
- คาร์บอน (Carbon)	50	55	68	78	52
- ไฮโดรเจน (Hydrogen)	6	6	5	5	7
- ไนโตรเจน (Nitrogen)	0.1	1	1	2	0.6
- กำมะถัน (Sulfur)	0.1	0.4	1	2	0.3
- ออกซิเจน (Oxygen)	44	38	25	13	40
- ค่าความร้อนทางสูง (MJ/kg)	20	22	23	33	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 การวิเคราะห์คุณภาพถ่านชาร์ [10]

การวิเคราะห์คุณภาพถ่านหินถูกนำมาปรับใช้เพื่อวิเคราะห์คุณภาพของเชื้อเพลิงชีวมวล โดยการวิเคราะห์ที่นิยมอยู่มี 2 แบบคือ การวิเคราะห์โดยประมาณ (Proximate analysis) เป็นการให้ข้อมูลเกี่ยวกับพฤติกรรมของถ่านหินเมื่อถูกให้ความร้อนผล ซึ่งมีประโยชน์ในการเลือกถ่านหินที่จะนำไปเผาไหม้ และการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ซึ่งจะแสดงผลการวิเคราะห์อยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนัก มาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ คือ ANSI/ASTM D 3172 ผลจากการวิเคราะห์ประกอบด้วย

1. การวิเคราะห์โดยประมาณ

- ความชื้นแฝง (Inherent Moisture) หมายถึง ค่าความชื้นภายในที่อยู่ในรูเล็ก ๆ (micro pores) ภายในโครงสร้างของถ่านหินและไม้ใช้ความชื้นอิสระ ค่านี้ไม่รวมกับ ความชื้นที่เกิดจากการระเหยของสารพวกสสารธาตุ (Mineral matter) และความชื้นที่เกิดจากการสลายตัว (Decomposition moisture) ค่านี้ถูกเก็บแบบจำลองแห้งแรเป็นสัดส่วนต่อน้ำหนักถ่านหินแห้ง
- เถ้า (Ash) หมายถึง สิ่งที่เหลือจากการเผาไหม้ (Non-Combustion residue) เมื่อเชื้อเพลิงถูกเผาในบรรยากาศที่อุณหภูมิ 815°C เป็นเวลา 90 นาที เถ้านี้ได้มาจากการ เปลี่ยนแปลงทางเคมีของสสาร (Mineral) และ อินทรีย์วัตถุ (Organic matter) ค่าเถ้าบันทึกเข้าสู่แบบจำลองแห้งแรแบบ air-dry มีหน่วยเป็นอัตราส่วนของน้ำหนักถ่านหินแห้ง
- สารระเหย (Volatile Matter) หมายถึง สารที่มาจากการสลายตัวของสารอินทรีย์รวมกับ สสารธาตุที่สามารถสลายตัวได้เมื่อถูกความร้อน เช่น CO₂ มาจาก สารประกอบคาร์บอเนต (Carbonate) เป็นต้น ค่าสารระเหยเป็นอัตราส่วนของน้ำหนักถ่านหินที่ สูญเสียไปหลังจากหักค่าความชื้นของถ่านหินออกไปแล้ว เมื่ออบถ่านหินที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 7 นาที
- คาร์บอนในถ่านหิน (Fixed Carbon) เป็นสารประกอบของคาร์บอน (Carbonaceous residue) ที่ไม่รวมเถ้าหลังจากที่สารระเหยถูกไล่ออกไปแล้ว ค่าปริมาณ คาร์บอนเป็นค่าที่วัดปริมาณสารที่สามารถเผาได้ (Solid combustible material)

2. การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ

การวิเคราะห์แบบแยกธาตุเป็นการวิเคราะห์อย่างละเอียดซึ่งแสดงผลเป็นเปอร์เซ็นต์มวลขององค์ประกอบทางเคมีอยู่ในถ่าน ซึ่งประกอบไปด้วย คาร์บอน, ไฮโดรเจน, ไนโตรเจน, ออกซิเจน และซัลเฟอร์ ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะนำไปใช้ในการดุลสมการการเผาไหม้ เพื่อใช้ในการคำนวณหาปริมาณอากาศที่ต้องใช้ในการเผาไหม้และน้ำหนักของก๊าซไอเสียที่ เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการออกแบบอุปกรณ์ลำเลียงอากาศ รวมไปถึงใช้ในการ คำนวณความสูญเสียความร้อนอีกด้วย มาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์คือ ANSI/ASTM D 3176 ผลการวิเคราะห์จะประกอบด้วย

- ปริมาณคาร์บอนจะประกอบด้วยคาร์บอนที่มีอยู่ในคาร์บอนคงที่และในสารวาบไฟ เมื่อถ่านหินถูกเผาไหม้แล้วผลลัพธ์ที่ออกมาคือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยคาร์บอนจะปรากฏอยู่ 2 รูปแบบคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) สารประกอบอินทรีย์ (Organic Compound) ได้แก่ สารประกอบอะโรมาติก (Aromatic) และ สารประกอบอะลิฟาติก (Aliphatic) และสารประกอบคาร์บอนेटของธาตุต่าง ๆ

2) สารประกอบอนินทรีย์ คาร์บอนेट (Inorganic Carbonate) ได้แก่ แคลไซต์ (Calcite) และ ซิเดอไรท์ (Siderite)

- ไฮโดรเจน เกิดจากองค์ประกอบอินทรีย์สารและความชื้นในถ่านหิน สำหรับการวิเคราะห์ ไฮโดรเจนทำได้โดยการเผาถ่านหินให้ไฮโดรเจนถูกเปลี่ยนเป็นน้ำภายใต้สภาวะที่เหมาะสม ผลลัพธ์ที่ได้จะถูกดูดซับด้วยสารที่เหมาะสมแล้วนำมาคำนวณหาปริมาณไฮโดรเจนโดยการชั่งน้ำหนักของตัวดูดซับนั้น ๆ ในทางทฤษฎีน้ำที่เกิดจากกระบวนการเผาไหม้จะมีมวลเป็น 9 เท่าของไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง สำหรับคาร์บอนและไฮโดรเจนจะใช้เป็นตัวแปรในการแยกประเภทของถ่านหิน ใช้ในการคำนวณหา ค่าความร้อนและประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ

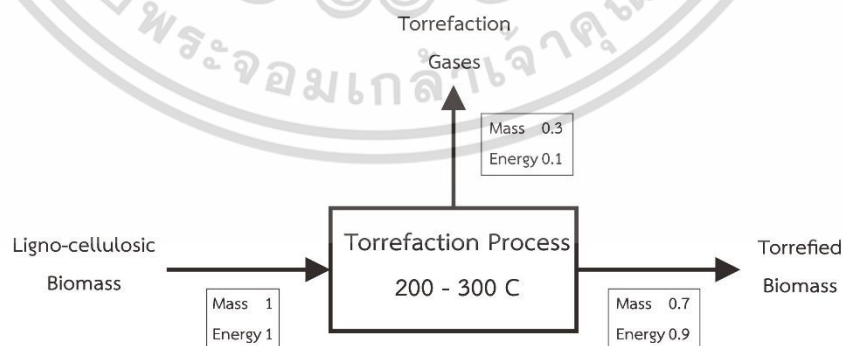
- ซัลเฟอร์ในถ่านหินเกิดได้จากทั้งอินทรีย์สารและอนินทรีย์สารซึ่งอยู่ในรูปไพไรท์ (Pyrite) มาร์คาไซต์ (Marcasite) และซัลเฟต (Sulphate) โดยทั่วไปซัลเฟอร์จะแบ่งเป็น 3 แบบคือ ไพไรท์ ซัลเฟอร์ (Pyritic sulphur), ซัลเฟตซัลเฟอร์ (Sulphate sulphur) และอินทรีย์ซัลเฟอร์ (Organic sulphur) ซึ่ง ไพไรท์ซัลเฟอร์ (FeS_2 , FeS) และซัลเฟตซัลเฟอร์นี้เราสามารถวิเคราะห์หาปริมาณได้ เมื่อนำค่าที่ได้ไปลบออกจากค่าซัลเฟอร์รวม เราจะได้ปริมาณอินทรีย์ซัลเฟอร์ในการวิเคราะห์ซัลเฟอร์ แยกออกได้เป็นการวิเคราะห์ปริมาณและการวิเคราะห์รูปแบบการรวมตัว

- ไนโตรเจน เป็นธาตุตัวเดียวที่เกิดในถ่านหินในลักษณะที่เป็นอินทรีย์สาร สารประกอบของ ไนโตรเจนจะเสถียรในลักษณะเป็น เฮเทอโรไซคลิก (Heterocyclic) และ สารประกอบไซคลิกที่ไม่ ซับซ้อน (Complex non-cyclic Compound) ส่วนมากไนโตรเจนจะเกิด จากซากพืช ซากสัตว์ และ โปรตีนของสัตว์ส่วนสารอนินทรีย์ไนโตรเจน (Inorganic nitrogen)

- ออกซิเจน เกิดจากสารประกอบอินทรีย์, สารประกอบอนินทรีย์, ความชื้น และ สสารธาตุ เช่น ดินเหนียว, สารประกอบคาร์บอนेट และซัลเฟอร์ ในสารประกอบอนินทรีย์ออกซิเจนจะรวมอยู่ใน รูปซิลิเกต (Silicates), คาร์บอนेट (Carbonates), ออกไซด์ (Oxides), สารประกอบซัลเฟต (Sulphate compound) และจากน้ำ สำหรับซิลิเกตจะอยู่ในรูปอะลูมิเนียมซิลิเกต (Aluminum silicates) ซึ่งพบในหินดินดานที่ปะปนอยู่ในถ่านหิน ส่วนคาร์บอนेटส่วนมากจะเป็นพวกแคลเซียม คาร์บอนेट (Calcium carbonate, CaCO_3) และ เหล็กคาร์บอนेट (Iron carbonate, Fe_2CO_3) สำหรับออกไซด์จะรวมถึงออกไซด์ของเหล็กและออกไซด์ของซัลเฟอร์โดยเฉพาะอย่างยิ่ง แคลเซียม ซัลเฟต (Calcium Sulphate, CaSO_4) และ เหล็กซัลเฟต (Iron sulphate, Fe_2SO_4)

3.3 กระบวนการทอรรีแฟคชัน [4]

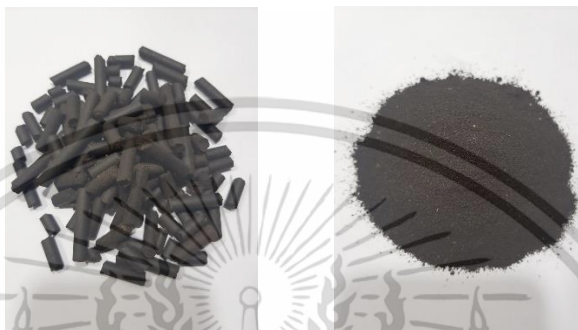
กระบวนการทอรรีแฟคชัน (หรือกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิต่ำ) เป็นการปรับสภาพทางกายภาพและทางเคมีของชีวมวลดิบให้ได้เชื้อเพลิงที่มีเสถียรภาพสูงขึ้น มีพลังงานต่อหน่วยมวลสูงขึ้น มีความสามารถในการย่อยสลายและถูกบดสูงขึ้น คุณลักษณะเหล่านี้สามารถเอาชนะข้อบกพร่องที่จำกัดหลายประการของการใช้ชีวมวลดิบเป็นแหล่งพลังงานทดแทนได้ เช่น ปริมาณความชื้นสูง พลังงานต่อหน่วยมวลต่ำ (เช่น ค่าความร้อนต่ำ) ความต้านทานต่อการกลายเป็นผงที่สูง (เป็นผงยาก เนื่องจากเป็นเส้นใย) ราคาการขนส่งที่สูงและอายุการเก็บรักษาสั้น เนื่องจากข้อเท็จจริงที่ว่าชีวมวลดิบจะดูดซับความชื้นอีกถ้าเก็บไว้เป็นระยะเวลาหนึ่ง อันเนื่องมาจากสภาพอากาศบริเวณโดยรอบเชื้อเพลิงและอาจทำให้เน่าเปื่อย ในทางตรงกันข้ามชีวมวลทอรรีไฟด์ไม่ชอบน้ำ ความสมดุลของความชื้นในการดูดซับของชีวมวลทอรรีไฟด์จะขึ้นอยู่กับความละเอียดปฏิกิริยาในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการทอรรีแฟคชัน แต่โดยทั่วไปจะต่ำมาก (ประมาณ 1% ถึง 6%) ส่งผลให้ชีวมวลทอรรีไฟด์ที่มีอายุการใช้งานยาวนานกว่าชีวมวลดิบ ความสามารถในการย่อยสลายและความสามารถในการบดอัดของชีวมวลทอรรีไฟด์ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับชีวมวล ทำให้เหมาะสำหรับการบด การลำเลียงและการเผาไหม้ในหม้อไอน้ำที่ใช้เชื้อเพลิงชนิดผงบด กระบวนการทอรรีแฟคชันของชีวมวลโดยทั่วไปจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 200-300 องศาเซลเซียสในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน โดยกระบวนการทอรรีแฟคชันจะเกิดขึ้นเมื่อมีการปล่อยสารระเหยอย่างจำกัด Poudel และคณะ [11] รายงานว่าของเสียจากอาหารได้รับการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีในระหว่างกระบวนการทอรรีแฟคชันมวลของผลิตภัณฑ์จะลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของกระบวนการทอรรีแฟคชัน ในขณะที่พลังงานของผลิตภัณฑ์ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบตั้งต้นและเงื่อนไขในระหว่างกระบวนการ Chen และคณะ [12] พบว่ากระบวนการทอรรีแฟคชันของชีวมวลที่อุณหภูมิสูงและในระยะเวลาสั้น ๆ มีประสิทธิภาพมากทำให้ชีวมวลมีค่าความร้อนเพิ่มขึ้น



รูปที่ 3.2 กระบวนการทอรรีแฟคชัน [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยเชื้อเพลิงชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอรรีแฟคชันเรียกว่า เชื้อเพลิงชีวมวลทอรรีไฟด์ ซึ่ง เป็นเชื้อเพลิงที่มีคุณสมบัติที่ดีขึ้นสามารถกล่าวโดยสรุปคือ มีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น ค่าความร้อนและพลังงานต่อหน่วยมวลสูงขึ้น ความสามารถในการถูกบดตีขึ้น ซึ่งจะทำให้ต้นทุนในการใช้พลังงานในการบดต่ำลง สามารถเก็บรักษาได้ยาวนานขึ้น ความชื้นต่ำลง เนื่องจากชีวมวลทอรรีไฟด์มีคุณสมบัติในการดูดซับความชื้นที่ต่ำกว่าชีวมวลดิบ อีกทั้งยังทำให้ต้นทุนในการขนส่งต่ำลงด้วย



รูปที่ 3.3 เชื้อเพลิงชีวมวลทอรรีไฟด์เม็ด (ซ้าย) , เชื้อเพลิงชีวมวลทอรรีไฟด์ผง (ขวา)

ตารางที่ 3.3 ส่วนประกอบทางเคมีและพลังงานของเชื้อเพลิงชีวมวลและชีวมวลทอรรีไฟด์

องค์ประกอบ	ชนิดของเชื้อเพลิงชีวมวล	
	ชีวมวล (ขี้เลื่อย)	ชีวมวลทอรรีไฟด์ (ไม้ฝู)
ผลการวิเคราะห์โดยประมาณ (% โดยน้ำหนัก)		
- สารระเหยง่าย (Volatile matter)	76.68	49.50
- คาร์บอนคงที่ (Fixed carbon)	15.23	40.22
- ความชื้น (Moisture)	5.81	5.09
- ขี้เถ้า (Ash)	2.28	5.19
ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (% โดยน้ำหนัก)		
- คาร์บอน (Carbon)	45.42	57.20
- ไฮโดรเจน (Hydrogen)	6.31	5.00
- ไนโตรเจน (Nitrogen)	0.48	0.31
- กำมะถัน (Sulfur)	0.00	0.04
- ออกซิเจน (Oxygen)	45.54	32.30
- ค่าความร้อนทางสูง (MJ/kg)	17.50	21.94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การเผาไหม้ชีวมวล [14,15,16,17]

ปัจจุบันเทคโนโลยีการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลเพื่อนำไปใช้ในการผลิตความร้อนในอุตสาหกรรมสามารถแบ่งตามหลักการได้ 3 ประเภท คือ 1. การเผาไหม้แบบเบดอยู่กับที่ (Fixed-bed combustion) 2. การเผาไหม้ฟลูอิดไธซ์เบด (Fluidized bed combustion) และ 3. การเผาไหม้ชนิดผง (Pulverized fuel combustion) สำหรับงานวิจัยนี้เป็นการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลประเภทการเผาไหม้ชนิดผงเท่านั้น สำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลผง (Pulverized biomass) นั้นจะได้รับการบดเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งจนทำให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 1 มิลลิเมตร และใช้หัวพ่นเชื้อเพลิงชีวมวลผง (Pulverized Biomass Burner) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการพ่นเชื้อเพลิงผงและอากาศเข้าไปเพื่อทำปฏิกิริยาการเผาไหม้

การเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลสามารถอธิบายได้ด้วยรูปที่ 3.3 โดยมีลำดับขั้นตอน คือ 1. การทำแห้ง (Drying) จากนั้นอนุภาคจะได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิวิกฤติที่สามารถเกิดการแยกสลายด้วยความร้อน (Pyrolysis), 2. การปล่อยสารระเหย (Devolatilization) อนุภาคเชื้อเพลิงเกิดการแยกสลายด้วยความร้อนได้สารระเหยอินทรีย์ที่เผาไหม้ได้ และถ่านชาร์ (Char) เป็นผลิตภัณฑ์, 3. การเผาไหม้ถ่านชาร์ (Char combustion) เกิดขึ้นหลังจากการแยกสลายด้วยความร้อนสิ้นสุดลง โดยที่สารระเหยจะถูกเผาไหม้พร้อม ๆ กันกับกระบวนการเผาไหม้ถ่านชาร์ โดยแต่ละช่วงต่อการสูญเสียมวลจะขึ้นอยู่กับปริมาณองค์ประกอบของเชื้อเพลิง เช่น ความชื้น สารระเหย อินทรีย์ ถ่านคงตัว และเศษเถ้า เป็นต้น ซึ่งเชื้อเพลิงที่มีอนุภาคขนาดเล็กจะมีกระบวนการทั้งสามเกิดขึ้นตามลำดับดังนี้

3.4.1 การทำแห้งของเชื้อเพลิงแข็ง (Drying)

ความชื้นมีอยู่ในเชื้อเพลิงแข็งได้ 2 รูปแบบ คือ น้ำอิสระ (Free water) อยู่ภายในช่องว่างเล็ก ๆ ในเชื้อเพลิง และน้ำยึดเหนี่ยว (Bound water) ซึ่งเป็นน้ำที่ดูดซับไว้บนโครงสร้างพื้นผิวภายในของเนื้อเชื้อเพลิง พิจารณาอนุภาคเชื้อเพลิงขนาดเล็กที่อยู่ภายใต้ก๊าซร้อน จะมีการถ่ายเทความร้อนด้วยการพา และการแผ่รังสีไปยังพื้นผิวของอนุภาคเชื้อเพลิง ส่งผลให้อุณหภูมิของอนุภาคสูงขึ้นจนถึงจุดเดือดของน้ำจนน้ำเกิดการระเหยและถูกไล่ออกมาภายนอก

3.4.2 การปล่อยสารระเหย (Devolatilization)

เมื่อการทำแห้งสิ้นสุดลง ในขณะที่อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เชื้อเพลิงจะเริ่มการย่อยสลายด้วยความร้อน ในกระบวนการนี้จะมีสารอินทรีย์ออกมาภายนอกเชื้อเพลิง กระบวนการปลดปล่อยสารระเหยนี้จึงอาจถูกเรียกว่าเป็นช่วงไพโรไลซิส (Pyrolysis) อัตราการปล่อยสารระเหยและผลิตภัณฑ์จากไพโรไลซิสจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและชนิดของเชื้อเพลิง สารระเหยที่ปล่อยออกมาจะผสมกับอากาศที่แพร่เข้ามารอบ ๆ เมื่ออุณหภูมิถึงจุดติดไฟก็จะเกิดเป็นเปลวไฟขึ้นรอบ ๆ อนุภาคเชื้อเพลิงแข็ง เปลวไฟที่เกิดขึ้นก็ให้ความร้อนไปยังเชื้อเพลิง ส่งเสริมให้การปล่อยสารระเหยดีขึ้น สำหรับเชื้อเพลิงขนาดใหญ่ ความชื้นจะถูกขับออกมาพร้อมกับสารระเหย ความชื้นนี้จะส่งผลให้อุณหภูมิของเปลวไฟที่เกิดขึ้นรอบ ๆ เชื้อเพลิงต่ำลง

อัตราการเกิดไฟโรไลซิสจะไม่ขึ้นอยู่กับขนาดของเชื้อเพลิงหากอุณหภูมิของอนุภาคเชื้อเพลิงคงที่ ค่าพลังงานกระตุ้น และค่าคงที่หน้าเอ็กโปเนนเชียลต้องหามาจากการทดลอง สำหรับเชื้อเพลิงขนาดใหญ่ จะใช้เวลามากในการรับความร้อนจนถึงอุณหภูมิการปลดปล่อยสารระเหย และกระบวนการไฟโรไลซิสจะเริ่มจากผิวนอกแล้วค่อย ๆ เคลื่อนเข้าไปด้านในของเชื้อเพลิง หากมีการให้ความร้อนต่อเชื้อเพลิงในอัตราที่สูงกว่าปกติ อัตราการปลดปล่อยสารระเหยที่ได้ อาจจะมีมากขึ้นตามไปด้วย

การจุดติดไฟของเชื้อเพลิงแข็งสามารถเกิดขึ้นได้กับการจุดติดไฟของถ่านชาร์บนผิวของเชื้อเพลิงและการจุดติดไฟของสารระเหยบนชั้นขีดขอบรอบ ๆ ผิวของเชื้อเพลิง แบบใดจะเกิดก่อนขึ้นอยู่กับอัตราการพา และการแผ่รังสีความร้อนไปยังเชื้อเพลิงแข็ง ถ้าการแผ่รังสีความร้อนมีค่าสูง ผิวของเชื้อเพลิงก็จะร้อนเร็วขึ้น แต่สารระเหยที่ปล่อยออกมาจะถูกพัดออกไปก่อนที่จะมีส่วนผสมคงที่เผาไหม้ได้เกิดขึ้น การติดไฟจึงเกิดขึ้นที่ผิวก่อน ถ้าอัตราการให้ความร้อนที่ผิวของเชื้อเพลิงต่ำ สารระเหยจะจุดติดไฟได้ก่อน เพราะสารระเหยมีอุณหภูมิจุดติดไฟต่ำกว่าถ่านชาร์ สารระเหยเหล่านี้เผาไหม้รวดเร็วและให้พลังงานความร้อนออกมามากเมื่อเทียบกับคาร์บอนคงตัว หรือถ่านชาร์ที่เหลืออยู่ หลังกระบวนการปล่อยสารระเหย โดยที่เวลาล่าช้าในการจุดติด (Ignition time delay) จะขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาค การแพร่ทางความร้อน อัตราการให้ความร้อน และอัตราการเกิดไฟโรไลซิส เป็นต้น

3.4.3 การเผาไหม้ถ่านชาร์ (Burning of carbon)

ขั้นตอนสุดท้ายของการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง คือ การเผาไหม้ถ่านชาร์ ลักษณะของถ่านชาร์จะมีความพรุน (Porous) สูงมาก ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวภายในในระดับ 100 ตารางเมตรต่อกรัม สำหรับชาร์จากถ่านหิน และ 10,000 ตารางเมตรต่อกรัม สำหรับชาร์จากไม้ เมื่อไม่มีสารระเหยปล่อยออกมาแล้ว ออกซิเจนในอากาศก็สามารถแพร่เข้าไปด้านในของถ่านชาร์ได้ การเผาไหม้ของถ่านชาร์แบบนี้เป็นกระบวนการเผาไหม้พื้นผิวสัมผัส (Surface burning) ระหว่างสองสถานะที่ไม่เหมือนกัน หรืออาจจะเรียกว่า การเผาไหม้แบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous combustion) ซึ่งมีขั้นตอนสำคัญ ดังนี้

1. การขนส่งออกซิเจนไปยังพื้นผิวของเชื้อเพลิงด้วยการพา หรือการแพร่
2. การดูดซับโมเลกุลออกซิเจนไว้บนผิวเชื้อเพลิง
3. ออกซิเจนที่ถูกดูดกลืนไว้ทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงได้สารผลิตภัณฑ์และถูกดูดกลืนไว้ที่ผิวเชื้อเพลิง
4. สารผลิตภัณฑ์ถูกปล่อยออกมาที่ผิวเชื้อเพลิง
5. สารผลิตภัณฑ์แพร่ออกจากผิวเชื้อเพลิง

ขั้นตอนเหล่านี้เกิดขึ้นอย่างเป็นลำดับ ขั้นตอนไหนเกิดขึ้นช้าที่สุดจะเป็นตัวกำหนดอัตราการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงนั้น ยกตัวอย่างเช่น ถ้าอนุภาคมีขนาดเล็ก อุณหภูมิค่อนข้างต่ำ และการไหลของของไหลรอบอนุภาคเป็นไปอย่างช้า ๆ จะพบว่าขั้นตอนที่ 3 (ปฏิกิริยาการเผาไหม้) จะเกิดขึ้นช้ากว่าขั้นตอนที่ 5 (การแพร่ออกไปจากผิวเชื้อเพลิงของสารผลิตภัณฑ์) ดังนั้น อัตราการเผาไหม้จะถูกเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ควบคุมโดยอัตราจลน์ทางเคมี (Chemical kinetics หรือ Kinetically control) เป็นหลัก ซึ่งอัตราการเผาไหม้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ เอ็กโปเนนเชียล โดยไม่ขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาค และการไหลแต่อย่างใด นอกจากนี้จากการที่อัตราการแพร่สูงกว่าอัตราการเผาไหม้ ทำให้ความเข้มข้นของการเผาไหม้ที่ผิวเชื้อเพลิงไม่ได้แตกต่างจากบริเวณกระแสวิษัระที่อยู่ห่างออกไปจากผิวเชื้อเพลิงมากนัก

ในทางตรงข้ามกัน ถ้าอนุภาคมีขนาดใหญ่ มีอุณหภูมิค่อนข้างสูง และการไหลโดยรอบอนุภาคเป็นไปอย่างรวดเร็ว จะได้ว่าขั้นตอนที่ 3 (ปฏิกิริยาการเผาไหม้) จะเกิดขึ้นเร็วกว่าขั้นตอน 1. และ 5. มาก (การแพร่เข้าหาผิวเชื้อเพลิงของออกซิเจน และการแพร่ออกไปจากผิวเชื้อเพลิงของสารผลิตภัณฑ์) ดังนั้น อัตราการเผาไหม้จะถูกควบคุมโดยการแพร่ของออกซิเจนเข้าสู่ผิวของเชื้อเพลิง (Diffusionally control) เป็นหลัก ซึ่งอัตราการเผาไหม้จะขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคมากกว่าขึ้นกับอนุภาค นอกจากนี้จากการที่อัตราการเผาไหม้สูงกว่าอัตราการแพร่ จะส่งผลให้ความเข้มข้นของออกซิเจนที่ผิวเชื้อเพลิงมีค่าน้อยมากจนอาจตัดทิ้งได้ เพราะถูกนำไปใช้ในการเผาไหม้ที่ผิวเชื้อเพลิงเกือบหมดนั่นเอง



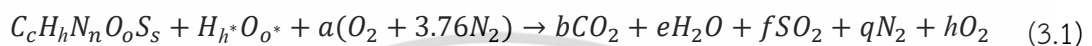
รูปที่ 3.4 กระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล [9]

กระบวนการทั้งสามที่กล่าวมาข้างต้นอาจจะมีปัจจัยหลายอย่างส่งผลต่อกระบวนการ เช่น ประเภทของเชื้อเพลิง ซึ่งมีองค์ประกอบของธาตุ อุณหภูมิ ความชื้นแตกต่างกัน เป็นต้น จึงจำเป็นต้องใช้ทฤษฎีที่เกี่ยวกับการเผาไหม้ในการออกแบบการทดลอง และสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลและหัวฟันทที่แตกต่างกัน

3.5 ทฤษฎีสำหรับการเผาไหม้

3.5.1 สตอยซิโอเมตรีของการเผาไหม้ (Combustion stoichiometry)

เมื่อทราบองค์ประกอบของธาตุที่อยู่ในเชื้อเพลิงจากการวิเคราะห์แบบแยกธาตุแล้ว จะสามารถคำนวณหาอากาศที่ทำปฏิกิริยาการเผาไหม้กับเชื้อเพลิงอย่างสมบูรณ์ทางทฤษฎี หรือเรียกว่า สตอยซิโอเมตรีของการเผาไหม้ โดยเขียนสมการการเผาไหม้เชื้อเพลิงซึ่งมวลที่สภาวะอากาศแห้งมีออกซิเจน 21% และไนโตรเจน 79% และมีความชื้นได้ดังนี้



โดยเทอมของ $H_h^* O_o^*$ เกิดจากความชื้นของเชื้อเพลิง และเมื่อ

$$a = \frac{2b + e + 2f - o - o^*}{2} \quad (3.2)$$

สามารถหาอัตราส่วนอากาศกับเชื้อเพลิงทางทฤษฎีได้ดังนี้

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

3.5.2 อัตราส่วนสมมูล (Equivalence ratio, ϕ)

อัตราส่วนอากาศกับเชื้อเพลิงทางทฤษฎีก็สามารถหาอัตราส่วนสมมูล ซึ่งเป็นตัวแปรที่ทำให้ทราบว่าอัตราส่วนผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่ใช้ห่างจากค่าทฤษฎีแค่ไหน โดยอัตราส่วนสมมูลเชื้อเพลิง (fuel equivalence ratio, ϕ_{fuel}) คำนวณได้จาก

$$\phi_{fuel} = \frac{m_{fuel}/m_{air}}{(m_{fuel}/m_{air})_{stoic}} \quad (3.4)$$

โดยที่

$\phi_{fuel} < 1$ คือ ส่วนผสมบาง (Fuel-lean mixture) อากาศกับเชื้อเพลิงที่ใช้จริงน้อยกว่าค่าทฤษฎี

$\phi_{fuel} > 1$ คือ ส่วนผสมหนา (Fuel-rich mixture) อากาศกับเชื้อเพลิงที่ใช้จริงมากกว่าค่าทฤษฎี

$\phi_{fuel} = 1$ คือส่วนผสมอากาศกับเชื้อเพลิงที่ใช้จริงเป็นไปตามทฤษฎีส่วนใหญ่นิยมใช้อัตราส่วนสมมูลเชื้อเพลิง ϕ_{fuel}

3.5.3 เปอร์เซ็นต์อากาศทางทฤษฎี (Percent theoretical air) และเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน (Percent excess air)

เปอร์เซ็นต์อากาศทางทฤษฎีเป็นปริมาณที่บ่งบอกถึงอากาศที่ใช้จริงในการเผาไหม้ คิดเป็นกี่เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอากาศทางทฤษฎีคำนวณได้จาก

$$\text{เปอร์เซ็นต์อากาศทางทฤษฎี} = \frac{100}{\phi_{fuel}} \quad (3.5)$$

เปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน คือ ปริมาณที่บอกให้ทราบว่าอากาศที่ใช้จริงเกินจากอากาศทาง ทฤษฎีที่มีค่าเท่ากับ 100 กี่เปอร์เซ็นต์ คำนวณได้จาก

$$\text{เปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน} = \frac{100}{\phi_{fuel}} - 100 \quad (3.6)$$

3.5.4 ค่าความร้อน (Calorific value)

ค่าความร้อนสามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภท คือ ค่าความร้อนสูง (Higher heating value, HHV) หรือ Gross calorific value (GCV) และค่าความร้อนต่ำ (Lower heating value, LHV) หรือ Net calorific value (NCV)

ค่าความร้อนสูง หมายถึง ความร้อนที่ปล่อยออกจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ต่อหนึ่งหน่วยมวลที่รวมค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำ (น้ำในสารผลิตภัณฑ์อยู่ในสถานะของเหลว) ซึ่งค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิงชีวมวลปกติจะอยู่ประมาณ 18-22 MJ/Kg สามารถคำนวณหาค่าความร้อนสูงจากหลักอ้างอิงแห้ง (Dry basis) จากสมการที่ (3.7) [14]

$$GCV = 0.3491 \cdot X_c + 1.1783 \cdot X_H + 0.1005 \cdot X_s - 0.0151 \cdot X_N - 0.1034 \cdot X_o - 0.1034 \cdot X_{ash} \quad (3.7)$$

โดยที่ X_i คือ สัดส่วนของธาตุที่อยู่ในเชื้อเพลิงโดยน้ำหนัก ได้แก่ คาร์บอน (C), ไฮโดรเจน (H), กำมะถัน (S), ไนโตรเจน (N), ออกซิเจน (O), และ เถ้า (Ash)

ค่าความร้อนต่ำ หมายถึง ความร้อนที่ปล่อยออกจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ต่อหนึ่งหน่วยมวลโดยไม่ รวมค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำ สามารถคำนวณหาค่าความร้อนต่ำโดยใช้หลักอ้างอิงเปียก (Wet basis) จากสมการที่ (3.8) [14]

$$NCV = GCV \left(1 - \frac{w}{100}\right) - \left(2.444 \cdot \frac{w}{100}\right) + \left(2.444 \cdot \frac{h}{100}\right) \cdot 8.936 \left(1 - \frac{w}{100}\right) \quad (3.8)$$

โดยที่ w และ h คือ สัดส่วนของความชื้นและไฮโดรเจนที่อยู่ในเชื้อเพลิงโดยน้ำหนัก ตามลำดับ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.5 ค่าอ้างอิงออกซิเจน (The O₂ Reference) [18]

การใช้อากาศส่วนเกินสำหรับกระบวนการเผาไหม้เพื่อให้มีปริมาณออกซิเจนที่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงได้อย่างสมบูรณ์ อากาศส่วนเกินถูกวัดเป็นเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของ O₂ โดยอากาศส่วนเกินนี้ทำให้ความเข้มข้นของก๊าซอื่น ๆ ที่วัดได้มีค่าลดลง

สำหรับค่าก๊าซ NO_x, CO และ SO_x ที่วัดได้โดยทั่วไปจะต้องมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของก๊าซเหล่านี้ตามผลการเจือจางของอากาศส่วนเกิน ซึ่งความเข้มข้นของก๊าซไอเสียที่ถูกต้องสามารถคิดจากความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนที่วัดได้กับค่าอ้างอิงก๊าซออกซิเจน ซึ่งส่วนใหญ่มักจะใช้ค่าอ้างอิงเท่ากับ 3 และ 6 เปอร์เซ็นต์ สำหรับงานวิจัยนี้ใช้ค่าอ้างอิงที่ 6 เปอร์เซ็นต์ออกซิเจน เมื่อใช้การอ้างอิงออกซิเจนความเข้มข้นของก๊าซจะถูกเรียกว่าไม่มีการเจือปนหรือปราศจากอากาศ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.9)

$$\text{Corrected PPM} = \text{measured PPM} \times \frac{20.9 - \text{O}_2 \text{ reference}}{20.9 - \text{O}_2 \text{ measured}} \quad (3.9)$$

3.5.6 ปัจจัยที่ทำให้เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์

1. ปริมาณอากาศที่เพียงพอต่อการเผาไหม้ : อัตราส่วนของอากาศและออกซิเจนที่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาเผาไหม้เป็นสิ่งที่สำคัญสิ่งหนึ่ง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากหัวข้อที่ผ่านมา
2. ระยะเวลาในการเผาไหม้ : ระยะเวลาเพื่อที่จะทำให้ได้การเผาไหม้ที่สมบูรณ์ต้องเพียงพอ ซึ่งหากระยะเวลาในการเผาไหม้ไม่เพียงพอจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการใช้เชื้อเพลิงต่ำ และเป็นการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงด้วย
3. อุณหภูมิของการเผาไหม้ : การเผาไหม้เชื้อเพลิงทางเป็นการเกิดปฏิกิริยาเคมี ซึ่งความเร็วของการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของการเกิดปฏิกิริยานั้น ๆ หากอุณหภูมิของการเผาไหม้มีค่าสูง ความเร็วของการเผาไหม้ก็จะมีค่าสูงตามไปด้วย
4. ความปั่นป่วนระหว่างการเผาไหม้ : ระหว่างการเผาไหม้หากมีความปั่นป่วนเกิดขึ้นจะทำให้เกิดการคลุกเคล้ากันระหว่างเชื้อเพลิงและออกซิเจน ทำให้โอกาสที่ออกซิเจนเข้าไปทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงมีมากขึ้น และส่งผลให้โอกาสเกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์มีมากขึ้นอีกด้วย

3.6 การรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟ [14,17,19]

หากปรับเปลี่ยนเงื่อนไขในการเผาไหม้ เช่น การเพิ่มอัตราการไหลของเชื้อเพลิงหรืออากาศ อาจ ส่งผลต่อความเสถียรของเปลวไฟ เช่น เกิดการเป่าดับ (Blow off) หรือเปลวไฟย้อนกลับ (Flashback) การรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟในหัวเผาจึงมีความสำคัญ สำหรับการรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟในหัวเผาเชื้อเพลิงฝุ่น ทำได้โดยวิธีการทางอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamic) โดยการหมุนวนกลับของก๊าซที่มีอุณหภูมิสูงมาผสมกับเชื้อเพลิงที่เข้ามาใหม่ในห้องเผาไหม้ เปลวไฟจะเสถียร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเวลาที่ส่วนผสมของเชื้อเพลิงกับอากาศใหม่ไหลเข้ามาในห้องเผาไหม้ ผ่านบริเวณที่เกิดกระแสไหลวน (Recirculation Zone) ยาวนานกว่าเวลาที่ใช้ในการติดไฟ ซึ่งสารระเหยส่วนใหญ่จะถูกปลดปล่อย ณ บริเวณที่เกิดกระแสไหลวน นอกจากหลักของอากาศพลศาสตร์แล้ว คุณภาพของเชื้อเพลิงก็มีส่วนสำคัญที่ทำให้เปลวไฟมีเสถียรภาพ เช่น ขนาดของอนุภาคที่ผ่านการบด ความชื้น และค่าความร้อน เป็นต้น การรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟ ความเร็วการไหลของส่วนผสม ต้องพอดีกันกับ ความเร็วของเปลวไฟ (Flame speed) และการจะใช้ความเร็วการไหลของส่วนผสมให้สูงขึ้น ความเร็วเป่าดับ (Blow-off velocity) ต้องสูงกว่าความเร็วการไหลของส่วนผสม ในหัวข้อนี้จะนำเสนอการใช้วัตถุขวางช่องการไหล (Bluff body) และตัวสร้างการหมุนควง (Swirler หรือ Swirl generator) เพื่อทำให้เกิดกระแสไหลวนซึ่งส่งผลต่อเสถียรภาพของเปลวไฟ

3.6.1 การใช้วัตถุขวางช่องการไหล (Bluff body)

เมื่อส่วนผสมไหลผ่านวัตถุขวางช่องการไหล ความเร็วของส่วนผสมจะลดลงตรงบริเวณผนังการไหลปะทะด้านหน้าทำให้เกิดความดันสูง และด้านหลังมีความดันต่ำกว่าทำให้เกิดการไหลวน นอกจากนี้บริเวณที่ไม่มีเส้นกระแส (Stream line) ทำให้เกิดความดันที่สวนทางกับกระแสการไหลที่ปลายกระแสการไหล (Downstream) สูงมาก ทำให้เกิดการแยกตัวของชั้นขอบเขต และบริเวณที่เกิดกระแสไหลวน (Recirculation Zone) จะถูกสร้างขึ้นบริเวณหลังวัตถุขวางช่องการไหล ซึ่งบริเวณนี้จะมีการถ่ายเทมวลและความร้อนที่สูงมาก สารผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้ที่มีอุณหภูมิสูงที่เกิดขึ้นรอบ ๆ บริเวณที่เกิดกระแสไหลวนจะแทรกซึมเข้าไปในกระแสไหลวนและถูกส่งมาที่ต้นกระแสการไหล (Upstream) คลุกเคล้ากับส่วนผสมใหม่ (Fresh combustible mixture) จนถึงจุดติดไฟ

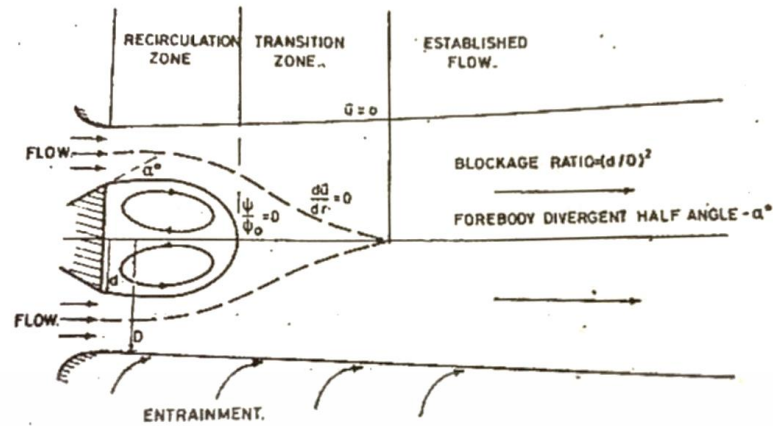
สิ่งที่ส่งผลต่อการไหลวนภายในหลังวัตถุขวางช่องการไหลขึ้นอยู่กับขนาด รูปร่าง และการไหลล้อมรอบระบบ (Surrounding flow System) ขอบเขตของบริเวณที่เกิดกระแสไหลวน จะถูกล้อมรอบด้วยเส้นความเร็วศูนย์ จากรูปที่ 3.5

$$\text{Blockage ratio} = (d/D)^2 \quad (3.10)$$

เมื่อ d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของวัตถุขวางการไหล
 D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของทางออกช่องการไหลอากาศป้อน

มุมของวัตถุขวางช่องการไหล α° ของแต่ละชนิด (Forebody divergent) จะมีค่าต่างกัน โดยมีค่าเท่ากับ 0° สำหรับวัตถุทรงกระบอก และ 180° สำหรับวัตถุรูปจาน (Disc shape) ถ้าค่า Blockage ratio ต่ำ ทำให้บริเวณที่เกิดกระแสไหลวนยาวขึ้นแต่ส่งผลต่อความกว้างเพียงเล็กน้อย ถ้าเปรียบเทียบที่ Blockage ratio เดียวกันจะพบว่าแผ่นรูปจานทำให้บริเวณที่เกิดกระแสไหลวนกว้างและยาวกว่าแผ่นรูปกรวย 45° และทรงกระบอก และแผ่นรูปจานจะสร้างกระแสนย้อนกลับ (Reverse flow) สูงสุดซึ่งส่งผลต่อความเร็วลบที่นำพาแก๊สร้อนมาคลุกเคล้ากับส่วนผสมใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 การไหลผ่านแผ่นขวางกั้นช่องการไหล [19]

3.6.2 การใช้ตัวสร้างการหมุนควง (Swirl generator)

การทำให้เกิดการหมุนควงของกระแสการไหลมีหลักการดังต่อไปนี้

1. การทำให้กระแสของของไหลพุ่งเข้าตามแนวสัมผัสในท่อทรงกระบอก
2. ใช้ใบพัด (Guide vane) เป็นตัวขวางการไหล
3. ของไหลเคลื่อนที่ไปพร้อมกับอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดการหมุน

การไหลหมุนควงมักถูกใช้ในการควบคุมเปลวไฟในห้องเผาไหม้ การไหลหมุนควงมีคุณลักษณะของการเคลื่อนที่แบบหมุนและความปั่นป่วนอิสระ เมื่อของไหลเกิดการหมุนควงจะมีองค์ประกอบความเร็วตามแนวสัมผัสที่อยู่ในความเร็วตามแนวแกนและรัศมี นอกจากนี้ผลของการหมุนควงทำให้เกิดความดันตามแนวรัศมีและตามแนวแกนที่ส่งผลกระทบต่อสนามการไหลในกรณีที่มีการหมุนควงมีความเข้มข้นสูง ความดันลบส่งผลให้เกิดกระแสนอกกลับทำให้การหมุนควงจะถูกวัดด้วยตัวเลขการหมุนควง (Swirl number) ซึ่งมีนิยามว่าเป็นอัตราส่วนระหว่างฟลักซ์ของโมเมนตัมเชิงมุม (Angular momentum) กับฟลักซ์ของโมเมนตัมตามแนวแกน (Axial momentum)

3.7 การปล่อยมลพิษและการควบคุม (Pollutants Emission and Control) [18]

การควบคุมก๊าซที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมควรมีการศึกษาขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาเพื่อที่จะหาทางควบคุมและลดปริมาณการปล่อยให้น้อยลงซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการเผาไหม้

3.7.1 ผลกระทบของมลพิษ

1. ด้านสิ่งแวดล้อม : ปัญหาการเพิ่มขึ้นหมอกควัน ทำให้ปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่องมายังพื้นดินน้อยลง ทัศนวิสัยลดลง และทำให้สภาพบรรยากาศโลกแย่ลงอีกด้วย
2. ทำให้มนุษย์มีอัตราการเจ็บป่วย และเสียชีวิตมากขึ้น
3. ส่งผลกระทบต่อสารสังเคราะห์แสงของพืชพันธุ์ พื้นป่า ท้องทุ่ง แนวปะการัง และระบบนิเวศอื่น ๆ ซึ่งเป็นแหล่งผลิตออกซิเจนที่สำคัญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.2 ออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x)

ออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) ที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอน ได้รับการพิจารณาว่าเป็นสาเหตุของการเกิดหมอกทางโฟโตเคมี หรือก๊าซโอโซนในระดับต่ำ (Ground Level ozone) โดยหมอกนี้จะเกิดจาก NO_x และ HC จากไอเสียของรถยนต์ เมื่อทำปฏิกิริยากันจนเกิดเป็นโอโซน (O₃) ส่วนใหญ่ก่อตัวในบริเวณที่มีอากาศนิ่งในเมืองที่มีการจราจรหนาแน่น โดยหมอกทางโฟโตเคมีส่งผลต่อระบบทางเดินหายใจ และทำให้เม็ดเลือดแดงที่นำออกซิเจนไปเลี้ยงสมองมีประสิทธิภาพน้อยลง เป็นต้น นอกจากนี้จะเป็นสาเหตุสำคัญของการเกิดโอโซนในระดับต่ำที่เป็นพิษแล้ว ยังเป็นตัวทำลายโอโซนที่เป็นประโยชน์ซึ่งอยู่ในระดับชั้นบรรยากาศ Stratosphere ของโลกอีกด้วย ดังสมการที่ (3.11) และ (3.12)



จากสมการสังเกตเห็นได้ว่า NO เพียง 1 โมเลกุลมีผลต่อการทำลาย O₃ อย่างต่อเนื่องโดยปฏิกิริยารีดอกซ์ เพราะ NO₂ ที่เกิดจากสมการที่ (3.11) จะถูกรีดิวซ์มาเป็น NO ตามสมการที่ (3.12) เพื่อย้อนกลับไปทำลาย O₃ ให้เป็น O₂ ต่อไปตามสมการที่ (3.11) ซึ่งเกิดเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่เช่นนี้อย่างต่อเนื่อง

ดังนั้นวิธีลดปริมาณการปล่อย NO_x สู่อากาศจึงได้กลายเป็นหัวข้อที่สำคัญที่สุดของการเผาไหม้ จึงจำเป็นต้องอาศัยความเข้าใจถึงกลไกจลนศาสตร์ของการเกิด NO_x และปฏิสัมพันธ์ระหว่างจลนศาสตร์กับพลศาสตร์ของไหลด้วยเช่นกัน สิ่งเหล่านี้จะเป็นตัวชี้นำไปสู่การค้นพบวิธีการใหม่ที่มีประสิทธิภาพในการลดปริมาณการปล่อย NO_x จากการเผาไหม้ได้ ซึ่ง NO_x ที่พบในก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้แบ่งออกเป็น 4 ประเภทหลัก ๆ คือ thermal NO_x, prompt NO_x, fuel nitrogen oxides และ N₂O

1. NO_x เกิดจาก Thermal NO_x หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Zeldovich NO_x มีสมการพื้นฐาน คือ



เมื่อ $k_1 = 1.8 \times 10^{14} \exp(-318 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1} / (RT))$

$k_2 = 9.0 \times 10^9 \exp(-27 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1} / (RT))$

$k_3 = 2.8 \times 10^{13}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจากสมการเคมีกลไกของ Zeldovich สามารถหาอัตราการเกิด NO_x ได้คือ

$$\frac{d[\text{NO}]}{dt} = k_1[\text{O}][\text{N}_2] + k_2[\text{N}][\text{O}_2] + k_3[\text{N}][\text{OH}] \quad (3.16)$$

แต่เนื่องจากอัตราการเกิดอะตอมของไนโตรเจนขณะเกิดปฏิกิริยา ในสภาวะเสมือนคงที่ คือ

$$\frac{d[\text{N}]}{dt} = k_1[\text{O}][\text{N}_2] + k_2[\text{N}][\text{O}_2] + k_3[\text{N}][\text{OH}] \approx 0 \quad (3.17)$$

$$\text{จะได้อัตราการเกิด NO คือ } \frac{d[\text{NO}]}{dt} = 2k_1[\text{O}][\text{N}_2] \quad (3.18)$$

ดังนั้น การลดปริมาณ Thermal NO_x มีเพียงสองวิธี คือ ลด $[\text{N}_2]$ และ $[\text{O}]$ หรือลด k_1 ซึ่งหมายถึงการลดอุณหภูมิในการเผาไหม้นั้นเอง

2. NO_x เกิดจาก Prompt NO_x การหาปริมาณของไนโตรเจนออกไซด์ (NO) ของเปลวไฟแบบราบเรียบจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอน พบว่าปริมาณของไนโตรเจนออกไซด์ไม่ได้มีค่าลดลงใกล้ศูนย์ เหมือนที่คาดการณ์โดยกลไกของ Zeldovich แต่พบว่ามีไนโตรเจนออกไซด์เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว (promptly) ซึ่งมีความซับซ้อนมากกว่า thermal NO_2 โดยมีปฏิกิริยาการเกิด NO ดังนี้



Prompt NO_x เกิดขึ้นในกรณีที่มีการเผาไหม้แบบส่วนผสม โดยจะเกิดขึ้นได้ง่ายกว่า Thermal NO_x เพราะปฏิกิริยาใช้พลังงานกระตุ้นที่น้อยกว่า ที่อุณหภูมิประมาณ 1000 เคลวิน ซึ่งในกรณีเชื้อเพลิงชีวมวล Prompt NO_x จะมีความสำคัญน้อยกว่าที่เกิดขึ้นในเชื้อเพลิงฟอสซิล

3. NO_x เกิดจาก Fuel NO_x สำหรับเชื้อเพลิงที่มีไนโตรเจนเป็นส่วนประกอบได้แก่เชื้อเพลิงชีวมวลและถ่านหิน เป็นต้น ซึ่งถ่านหินอาจมีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบได้ถึงร้อยละ 2 ไนโตรเจนในเชื้อเพลิงส่วนใหญ่จะเปลี่ยนไปเป็น HCN ในเปลวไฟซึ่งจะเปลี่ยนต่อไปเป็น NH หรือ NH_2 จากนั้นทำปฏิกิริยากับออกซิเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้เกิด $\text{NO} + \text{H}_2\text{O}$ หรืออาจทำปฏิกิริยากับ NO แล้วเปลี่ยนเป็น N_2 และ H_2O ดังนั้น สัดส่วนของไนโตรเจนในเชื้อเพลิงที่หลุดออกมาจากเปลวไฟและกลายเป็น NO นั้นจะเป็นอิสระต่ออัตราส่วนระหว่าง NO/O_2 ในเปลวไฟ นั่นคือหากรักษาให้สัดส่วนของออกซิเจนในก๊าซที่มีอุณหภูมิสูงในเปลวไฟให้ต่ำไว้ ก็จะทำให้ไนโตรเจนในเชื้อเพลิงเปลี่ยนไปเป็น NO น้อยลงด้วย

4. NO_x เกิดจาก N_2O สำหรับ Thermal NO_x เกิดขึ้นได้ดีที่สภาวะการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูง (>1700 เคลวิน) ขณะที่ prompt NO_x เกิดขึ้นได้ดีที่ภายใต้สภาวะการเผาไหม้แบบผสมหนา สำหรับไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดผ่าน N_2O จะเกิดได้ดีที่สภาวะการเผาไหม้แบบผสมบางและอุณหภูมิต่ำ เช่น การเผาไหม้ที่มีอุณหภูมิต่ำพอที่จะส่งผลให้เกิด thermal NO_x ทำนองเดียวกัน การเผาไหม้ที่สภาวะส่วนผสมบางยังป้องกันไม่ให้เกิดอนุมูลอิสระของ CH ซึ่งเท่ากับว่าเป็นการป้องกันการเกิด prompt NO_x โดยอัตโนมัติ โดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นตามสมการดังนี้



เมื่อความดันการเผาไหม้มีค่าสูงเท่าไร NO ที่เกิดขึ้นก็จะยิ่งมากขึ้นเท่านั้น เพราะไม่เพียงแต่มีพลังงานกระตุ้นที่ต่ำแล้ว อุณหภูมิการเผาไหม้ที่ต่ำก็ไม่ได้มีผลต่อการยับยั้งการเกิด NO เหมือนกับ thermal NO_x อีกต่อไป ดังนั้น NO ที่มาจาก N_2O เป็นสาเหตุหลักของการเผาไหม้ที่ส่วนผสมบางถูกเจือจางด้วยอากาศมาก ๆ

3.7.3 คาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon monoxide) [20]

คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) จากการเผาไหม้เกิดขึ้นจากปัจจัยหลายประการ เช่น การเผาไหม้แบบส่วนผสมหนาเกินไป การคลุกเคล้ากันไม่ดีพอ ปริมาณอากาศไม่เพียงพอ นอกจากนี้ยังมีผลจากการเผาไหม้ที่อุณหภูมิต่ำจนทำให้เกิดการแตกสลายของคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) มาเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ได้ดังสมการ



ปัจจัยที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งที่ทำให้เกิด CO คือ เวลาในการเผาไหม้น้อยเกินไป เป็นผลมาจากการระบายไอเสียออกทันที อุณหภูมิและความดันเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงจาก CO เป็น CO_2 ไม่เต็มที่ เพราะถูกจำกัดด้วยระยะเวลาอย่างรวดเร็ว

ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์สามารถควบคุมได้จากอัตราส่วนสมมูล หรือปริมาณออกซิเจนใน ปฏิกิริยาการเผาไหม้ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นก๊าซไม่มีสี ไม่มีกลิ่นและเป็นพิษต่อร่างกายอย่างมาก เมื่อได้รับเข้าไปทำให้ร่างกาย สมองและกล้ามเนื้อได้รับออกซิเจนไม่เพียงพอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยาการตอบสนองของร่างกายจะช้าลงและขาดการตัดสินใจที่ดี เมื่อได้รับเข้าไปในปริมาณมาก ๆ สามารถทำให้เสียชีวิตได้

3.7.4 ออกไซด์ของซัลเฟอร์ (SO_x)

ออกไซด์ของซัลเฟอร์ (SO_x) จากการเผาไหม้เป็นก๊าซที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและทำลายอุปกรณ์การเผาไหม้และอุปกรณ์อื่น ๆ ให้เสียหายได้ ออกไซด์ของซัลเฟอร์ประกอบด้วยซัลเฟอร์ที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในเชื้อเพลิงซึ่งเกิดปฏิกิริยาออกซิไดซ์ได้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) เป็นหลัก มีซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO₃) อยู่บ้างเล็กน้อยและมีก๊าซอื่น ๆ เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H₂S) คาร์บอนิลซัลไฟด์ (COS) โดยเรียกรวมว่า SO_x ซึ่งเชื้อเพลิงที่ใช้ เช่น น้ำมัน ถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ ไม้และสารอินทรีย์อื่น ๆ เป็นต้น จะมีซัลเฟอร์เป็นส่วนประกอบ เชื้อเพลิงไม้จะมีอยู่ในปริมาณน้อยเพียงร้อยละ 0.1 ถ่านหินเกือบทุกชนิดมีอยู่ตั้งแต่ร้อยละ 0.5-3 น้ำมันโดยทั่วไปจะมีซัลเฟอร์มากกว่าไม้แต่จะน้อยกว่าถ่านหิน เมื่อทำการเผาไหม้ไม้ซึ่งมีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบ ซัลเฟอร์ที่มีอยู่ในไม้เกือบทั้งหมดจะเปลี่ยนเป็นซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ดังสมการที่ (3.27)



ออกไซด์ของซัลเฟอร์ SO_x ที่เกิดจากการเผาไหม้สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำแล้วกลายเป็นกรดซัลฟิวริก (H₂SO₄) ซึ่งเป็นสาเหตุหลักของการเกิดฝนกรด ปฏิกิริยาการเกิดดังสมการ



3.7.5 ฝุ่นและเขม่า (Particulates and Soot)

ฝุ่นและเขม่าสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งในเปลวไฟชนิดแพร่และเปลวไฟชนิดผสมก่อน ซึ่งเกิดจากสารอินทรีย์ที่ปนอยู่ในเชื้อเพลิง เช่น ในรูปของสารละลายในเชื้อเพลิงเหลว หรือในรูปของเถ้าในเชื้อเพลิงแข็ง สารอินทรีย์จะถูกเผาไหม้แล้วกลายเป็นฝุ่นออกมาพร้อมกับก๊าซไอเสีย ฝุ่น บางชนิดมีขนาดใหญ่ และน้ำหนักมากจึงแยกตัวออกจากก๊าซไอเสียได้ง่าย เช่น เถ้าก้นเตา (Bottom ash) ของระบบการเผาไหม้ถ่านหินบดละเอียด เป็นต้น ฝุ่นบางชนิด เช่น ที่มีขนาดเล็กกว่า 10 μm จะลอยปนอยู่ในก๊าซไอเสียอย่างถาวรเรียกว่าเถ้าลอย (Fly ash) จึงต้องใช้วิธีการพิเศษเพื่อแยกออก เช่น ถุงกรอง (Bag filter), เครื่องแยกอนุภาคด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrostatic precipitator) และ ไชโคลน เป็นต้น

เขม่า (Soot) คืออนุภาคคาร์บอนที่มีส่วนของไฮโดรเจนรวมอยู่อย่างน้อย 1% โดยมวล คิดเป็นสูตรทางเคมีอย่างง่ายคือ C_8H เขม่าจึงไม่ใช่คาร์บอนบริสุทธิ์ มักเกิดในบริเวณที่มีเชื้อเพลิงอยู่อย่างเข้มข้น (Fuel-rich regions) เสมอ ซึ่งเป็นธรรมชาติของกลไกการเผาไหม้ที่ส่วนผสมของเชื้อเพลิงและออกซิไดซ์จะไม่สม่ำเสมอเท่ากันหมด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกลไกการผสมหรือความปั่นป่วนสมบัติทางเคมีและสมบัติทางกายภาพ เขม่าเกิดขึ้นได้ง่ายในเปลวไฟชนิดแพร่มากกว่าในเปลวไฟชนิดผสมก่อน ขั้นตอนการเกิดเขม่า (Soot formation) แบ่งออกได้เป็น 4 ขั้นตอนดังนี้

1. การเกิดขึ้นเป็นอนุภาค (Particle inception) ระหว่างปฏิกิริยาการเกิดเขม่าต้องมีโมเลกุลสารอนุมูลเป็นสารตั้งต้น ก่อตัวเป็นนิวเคลียส (Nucleation) นมากระดับโมเลกุล นิวเคลียสดังกล่าวมักเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีโครงสร้างเป็นวงแหวน เช่น Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) ซึ่งถือเป็นสารขั้นกลาง (Intermediates) ทำหน้าที่เป็นสารเกิดก่อนเขม่า จากนั้นอะเซทิลีน (C_2H_2) จะเข้าทำปฏิกิริยากับ สารไฮโดรคาร์บอนแบบห่วง แล้วรวมตัวกันเป็นก้อนโมเลกุลขนาดใหญ่ขึ้นจนนำไปสู่การเติบโตเป็นอนุภาคเขม่าในขั้นตอนต่อไป

2. การเติบโตของผิวรอบนอก (Surface growth) จะเกิดการขยายใหญ่ขึ้นด้วยการเกาะตัวของ สารขั้นกลางต่าง ๆ บนผิว ทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อย ๆ ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นอะเซทิลีน (C_2H_2) ที่มีมากถึง 85% ของมวลรวม

3. การเกาะรวมตัวกัน (Coagulation) อนุภาคเขม่าแต่ละก้อน เคลื่อนที่ชนกันและเกาะรวมกัน เป็นกลุ่ม เกิดเป็นอนุภาคจุลสารรูปร่างลักษณะคล้ายห่วงโซ่

4. การออกซิไดซ์เขม่า (Soot oxidation) ภายหลังจากที่เขม่าเกิดขึ้นแล้ว โดยเฉพาะเกิดขึ้นบริเวณด้านล่างของ Reaction zone ที่อยู่ตรงปลายของเปลวไฟ (Frame tip) เขม่าจะเคลื่อนที่ไปตามเส้นกระแสผ่านเข้าไปในบริเวณการเผาไหม้ที่ปลายของเปลวไฟนั้น ถ้าเขม่าถูกเผาไหม้จนหมดจะเรียกเปลวไฟนั้นว่าเปลวไฟไร้เขม่า ในขณะที่ถ้าเขม่าเผาไหม้ไม่หมดจะเกิดเปลวไฟมีเขม่า

3.8 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองคณิตศาสตร์ [21,22]

เป็นการนำเสนอข้อมูลเกี่ยวกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ ซึ่งข้อมูลเหล่านี้ได้จากการศึกษางานวิจัยก่อนหน้านี้และจากเมนู HELP ในโปรแกรม ANSYS Fluent ver.12.0

พฤติกรรมของไหลของของไหลสามารถอธิบายด้วยสมการหลัก 3 สมการ คือ สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation) สมการโมเมนตัม (Momentum Equation) และสมการพลังงาน (Energy Equation) นอกจากนี้การไหลแบบปั่นป่วนสามารถอธิบายพฤติกรรมของการไหลได้โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน ซึ่งงานวิจัยนี้สนใจแบบจำลองความปั่นป่วนชนิด Realizable k-epsilon และอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีถูกควบคุมโดย large-eddy mixing time scale ($\frac{k}{\epsilon}$) โดยที่การเผาไหม้จะเกิดขึ้นเมื่อเกิดความปั่นป่วน ($\frac{k}{\epsilon} > 0$)

3.8.1 สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation)

พิจารณาของไหลอัดตัวได้ และเป็นของไหลแบบ Newtonian

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) = S_m \quad (3.30)$$

เมื่อ $\text{div}(\rho \mathbf{u}) = \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z}$

S_m คือ เทอมของการก่อกำเนิดความร้อนจากการถ่ายโอนมวลจากอนุภาคเชื้อเพลิง

3.8.2 สมการโมเมนตัม (Momentum Equation)

พิจารณาของไหลอัดตัวได้ และเป็นของไหลแบบ Newtonian โดยมีสมการโมเมนตัมพิกัดคาร์ทีเซียน x, y, z คือ

พิกัด x

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{grad} u) + S_{Mx} \quad (3.31)$$

พิกัด y

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{grad} v) + S_{My} \quad (3.32)$$

พิกัด z

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{grad} w) + S_{Mz} \quad (3.33)$$

3.8.3 สมการพลังงาน (Energy equation)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot \left(k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\vec{\tau}_{eff} \cdot \vec{v}) \right) + S_h \quad (3.34)$$

เทอมแรกฝั่งขวามือของสมการ คือการถ่ายโอนพลังงานจากการนำ การแพร่ของสปีชีส์และการขยายตัวจากความหนืด ตามลำดับ

เมื่อ k_{eff} คือ ค่าการนำความร้อนประสิทธิผล (Effective conductivity)

\vec{J}_j คือ ฟลักซ์การแพร่ของสปีชีส์ j

S_h คือ ความร้อนจากปฏิกิริยาเคมีและแหล่งความร้อนอื่น ๆ ที่กำหนดให้กับระบบ

$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2}$ โดย h คือ เอนทัลปีสัมผัสของก๊าซอุดมคติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.8.4 พลังงานจากปฏิกิริยาเคมี

$$S_{h,rxn} = - \sum_j \frac{h_j^0}{M_j} R_j \quad (3.35)$$

เมื่อ h_j^0 คือ เอนทัลปีของการเกิดของสปีชีส์ j
 R_j คือ อัตราการกำเนิดโดยปริมาตร (volumetric rate of creation) ของสปีชีส์ j

3.8.5 แบบจำลองการไหลปั่นป่วน $k - \varepsilon$ ($k - \varepsilon$ Turbulence flow model)

1. แบบจำลองการไหลปั่นป่วน $k - \varepsilon$ ชนิด Standard (Standard $k - \varepsilon$ turbulence model)

แบบจำลองการไหลปั่นป่วน $k - \varepsilon$ ชนิด Standard เป็นแบบจำลองที่สมบูรณ้อย่างง่ายที่สุดสำหรับการไหลปั่นป่วน คือแบบจำลองของสมการสองชุด ที่สามารถแก้ปัญหาสมการการถ่ายโอนแยกกันสองแบบ เพื่อให้สามารถกำหนดความปั่นป่วนของความเร็วและ length scale อีกระจากกัน นำเสนอโดย Launder and Spalding [23] แบบจำลอง ประกอบด้วยสมการถ่ายโอนพลังงานจลน์ปั่นป่วน (k) และสมการสูญเสียพลังงานจลน์ปั่นป่วน (ε) ตั้งอยู่บนข้อสมมติฐานคือ การไหลปั่นป่วนเต็มขั้น (Fully turbulent flow) และไม่มีผลของความหนืดในระดับโมเลกุล สามารถคำนวณ k และ ε ได้จากสมการถ่ายโอนพลังงานจลน์ปั่นป่วน k ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k S_{h,rxn} = - \sum_j \frac{h_j^0}{M_j} R_j \quad (3.36)$$

อัตราสูญเสียพลังงานจลน์ปั่นป่วน ε ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^3}{k} + S_\varepsilon \quad (3.37)$$

เมื่อ

G_k คือ การกำเนิดพลังงานจลน์ปั่นป่วนเนื่องจากเกรเดียนต์ความเร็ว

G_b คือ การกำเนิดพลังงานจลน์ปั่นป่วนเนื่องจากแรงลอยตัว

Y_M คือ การขยายตัวของการสูญเสีย

$C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$ คือ ค่าคงที่

$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$ คือ Prandtl numbers ของ k และ ε ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

S_k, S_ε คือ เทอมของการก่อกำเนิด

$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$ คือ ความหนืดปั่นป่วน (Turbulent or eddy viscosity)

โดย $C_\mu =$ ค่าคงที่

จากการทดลองการไหลปั่นป่วนที่ใช้อากาศและน้ำเป็นของไหล [23] พบว่าค่าคงที่ต่าง ๆ มีค่าดังนี้

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

2. แบบจำลองการไหลปั่นป่วน $k - \varepsilon$ ชนิด Realizable (Realizable $k - \varepsilon$ turbulence model)

แบบจำลองการไหลปั่นป่วน $k - \varepsilon$ ชนิด Realizable ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีการพัฒนาจากแบบจำลองการไหลปั่นป่วน $k - \varepsilon$ มาตรฐาน ทำให้เกิดความแตกต่างจากแบบจำลองการไหลปั่นป่วน $k - \varepsilon$ มาตรฐาน 2 ประเด็น คือ วิธีการคำนวณความหนืดปั่นป่วน (Turbulent or eddy viscosity) μ_t และเปลี่ยนแปลงสมการสูญเสียของพลังงานจลน์ปั่นป่วน (ε) สามารถคำนวณ k และ ε ได้จากสมการที่ (3.38) สมการถ่ายโอนพลังงานจลน์ปั่นป่วน k ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (3.38)$$

อัตราสูญเสียพลังงานจลน์ปั่นป่วน ε ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_{1\varepsilon} S_\varepsilon - \rho C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \quad (3.39)$$

$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \eta = S \frac{k}{\varepsilon}, S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} \quad (3.40)$$

เมื่อ G_k คือ การก่อกำเนิดพลังงานจลน์ปั่นป่วนเนื่องจากเกรเดียนต์ความเร็ว

G_b คือ การก่อกำเนิดพลังงานจลน์ปั่นป่วนเนื่องจากแรงลอยตัว

Y_M คือ การขยายตัวของ การสูญเสีย

$C_{1\varepsilon}, C_2$ คือ ค่าคงที่

$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$ คือ Prandtl numbers ของ k และ ε ตามลำดับ

S_k, S_ε คือ เทอมของการก่อกำเนิด

$\rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$ คือ ความหนืดปั่นป่วน (turbulent or eddy viscosity) โดย $C_\mu =$ ไม่คงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่ง C_μ หาได้จากสมการ

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_S \frac{kU^*}{\varepsilon}} \quad (3.41)$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } A_0 &= 4.04 \\ A_S &= \sqrt{6} \cos \varphi \\ \varphi &= \frac{1}{3} \cos^{-1}(\sqrt{6}W) \\ W &= \frac{S_{ij}S_{jk}S_{ki}}{\tilde{S}^3} \\ \tilde{S} &= \sqrt{S_{ij}S_{ij}} \\ S_{ij} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial u_i} + \frac{\partial u_i}{\partial u_j} \right) \end{aligned}$$

$$U^* = \sqrt{S_{ij}S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij}\tilde{\Omega}_{ij}} \quad (3.42)$$

$$\tilde{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2\varepsilon_{ijk}\omega_k \quad (3.43)$$

$$\Omega_{ij} = \tilde{\Omega}_{ij} - \varepsilon_{ijk}\omega_k \quad (3.44)$$

การทดลองการไหลปั่นป่วนที่ใช้อากาศและน้ำเป็นของไหล [23] พบว่าค่าคงที่ต่าง ๆ มีดังนี้

$$C_{1\varepsilon} = 1.44, C_2 = 1.9, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.2$$

3.8.6 สมการถ่ายโอนสปีชีส์ (Species transport equations)

เป็นสมการอนุรักษ์ที่ใช้หาสัดส่วนมวลของแต่ละสปีชีส์ (Y_i) ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาเคมีที่ตำแหน่งต่าง ๆ ผ่านการแก้สมการการพาและการแพร่ สมการอนุรักษ์นี้มีรูปแบบทั่วไปคือ

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + R_i + S_i \quad (3.45)$$

เมื่อ

R_i = อัตราการก่อกำเนิดสุทธิของสปีชีส์ i โดยปฏิกิริยาเคมี

S_i = อัตราการก่อกำเนิดจากการรวมกันของการแพร่และที่ถูกลำหนดค่า

1. สมการการแพร่ของมวลในการไหลปั่นป่วน

$$\vec{J}_i = -\left(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sc_t}\right) \nabla Y_i - D_{T,i} \frac{\nabla T}{T} \quad (3.46)$$

เมื่อ

Sc_t = ตัวเลข Schmidt number ปั่นป่วน

$D_{i,m}$ = สัมประสิทธิ์การแพร่ของมวลสำหรับสปีชีส์ i ในส่วนผสม

$D_{T,i}$ = สัมประสิทธิ์การแพร่จากความร้อน

μ_t = ความหนืดปั่นป่วน

2. การถ่ายโอนสปีชีส์ในสมการพลังงาน

สำหรับองค์ประกอบที่หลากหลายผสมกันในการไหล การถ่ายโอนเอนทัลปีเนื่องจากการแพร่ของสปีชีส์ เขียนในรูปสมการในรูปทั่วไปคือ

$$\nabla \cdot \left[\sum_{i=1}^n h_i \vec{J}_i \right]$$

การแพร่ของสปีชีส์อาจมีผลต่อสนามเอนทัลปีอย่างมาก ซึ่งพิจารณาได้จาก Lewis number

$$Le_i = \frac{k}{\rho c_p D_{i,m}} \quad (3.47)$$

3.8.7 แบบจำลองการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้

1. แบบจำลอง eddy-dissipation

งานวิจัยนี้ได้ใช้แบบจำลอง eddy-dissipation เป็นแบบจำลองสมมติว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาถูกควบคุมโดยความปั่นป่วน ดังนั้นจึงสามารถหลีกเลี่ยงการคำนวณทางจลนศาสตร์เคมีที่ซับซ้อนของฟังก์ชัน Arrhenius ได้ เพื่อให้ผลลัพธ์การจำลองสมจริง อาจกำหนดกลไกการปลดปล่อยความร้อนแบบขั้นตอนเดียว (one step) หรือสองขั้นตอน (two step)

แบบจำลองนี้ นำเสนอโดย Magnussen และ Hjertager [21] สำหรับอัตรา ก่อกำเนิดสปีชีส์สุทธิ i เนื่องจากปฏิกิริยา r, R_{ir} หาได้จากค่าที่น้อยที่สุดของผลลัพธ์ที่คำนวณได้จากสมการที่ (3.48) หรือ (3.49) ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_{i,r} = \dot{v}_{i,r} M_{w,i} A \rho \frac{\varepsilon}{k} \min\left(\frac{Y_R}{\dot{v}_{R,r} M_{w,R}}\right) \quad (3.48)$$

$$R_{i,r} = \dot{v}_{i,r} M_{w,i} A B \rho \frac{\varepsilon}{k} \frac{\sum_p Y_p}{\sum_j^N v_{j,r} M_{w,j}} \quad (3.49)$$

เมื่อ

Y_p = สัดส่วนโดยมวลของสารผลิตภัณฑ์สปีชีส์ใด ๆ , P

Y_R = สัดส่วนโดยมวลของสารตั้งต้น , R

A , B = ค่าคงที่มีค่าเท่ากับ 4.0 และ 0.5 ตามลำดับ

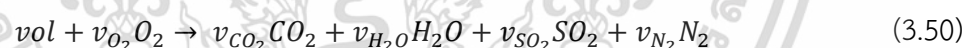
ในสมการที่ (3.48) และ (3.49) อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีถูกควบคุมโดย large-eddy mixing time scale ($\frac{k}{\varepsilon}$) การเผาไหม้จะเกิดขึ้นเมื่อเกิดความปั่นป่วน ($\frac{k}{\varepsilon} > 0$) ซึ่งเป็นปกติในกรณีเปลวไฟแบบไม่มีการผสมมาก่อน (Non-premixed flames)

2. กลไกการเกิดปฏิกิริยาเคมี (chemical mechanism)

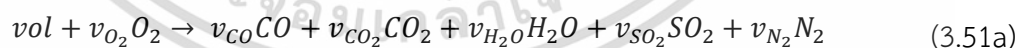
การวิเคราะห์โดยประมาณทำให้ทราบสัดส่วนโดยมวลของ สารระเหย คาร์บอนคงตัว แก๊ส และความชื้น และการวิเคราะห์แบบแยกธาตุทำให้ทราบสัดส่วนโดยมวลของธาตุ C, H, O, N และ S

การเกิดปฏิกิริยาเคมีแบบหนึ่งขั้นตอนและสองขั้นตอน ของสารระเหย (volatile) แสดง การเกิดปฏิกิริยาได้ดังนี้

แบบหนึ่งขั้นตอน



แบบสองขั้นตอน



จะเห็นว่าในปฏิกิริยาเคมีแบบสองขั้นตอน ปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารระเหยจะมี CO เป็นผลิตภัณฑ์ รวมอยู่ด้วย และในปฏิกิริยาที่สองจะเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันของ CO ที่เกิดจากผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาแรกระเหยซึ่งเป็นตัวควบคุมการเริ่มต้นปลดปล่อยสารระเหยออกมา

3.8.8 แบบจำลองของการก่อเกิดมลพิษ (Pollutant Formation)

1. สมการการถ่ายเทออกไซด์ไนโตรเจน (Equations for NO_x Transport)

อิทธิพลของเวลาที่ใช้ในกลไกเกิดของ NO_x อ้างอิงจากการเคลื่อนที่ของมวล และ เทอมของการพา ที่สามารถเขียนสมการการก่อเกิดของ NO_x ในรูปแบบปริมาตรควบคุมหยุดนิ่งดัง แสดงในสมการที่ (3.52)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_{\text{NO}_x}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_{\text{NO}_x}) = \nabla \cdot (\rho D Y_{\text{NO}_x}) + S_{\text{NO}_x} \quad (3.52)$$

เมื่อ Y_{NO_x} คือ สัดส่วนโดยมวล

S_{NO_x} คือ เทอมของการก่อกำเนิดออกไซด์ของไนโตรเจน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และรูปร่างของวัตถุขวางการไหลที่ออกแบบ สำหรับงานวิจัยนี้ใช้วัตถุขวางการไหลรูปกรวยทำมุม 45 องศา ซึ่งมีลักษณะเดียวกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ [1]

การออกแบบแผ่นขวางกันช่องการไหลจำเป็นต้องใช้ค่า Blockage ratio ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ (3.10) สำหรับงานวิจัยนี้ทำการออกแบบโดยให้วัตถุขวางการไหลของหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบใหม่มีค่า Blockage ratio คงที่ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.57

เนื่องด้วยวัตถุขวางการไหลรูปทรงกรวยของหัวพ่นแบบใหม่มีความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางเป็น 1.5 เท่าของขนาดเดิม โดยความสูงของวัตถุขวางการไหลรูปทรงกรวยเพิ่มจาก 16 มิลลิเมตร เป็น 24 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นขวางการไหลเพิ่มจาก 32 มิลลิเมตร เป็น 48 มิลลิเมตร คำนวณจากสมการที่ (3.10) จะได้เส้นผ่านศูนย์กลางทางออกของอากาศปฐุมภูมิแบบใหม่มีขนาดเป็น 84 มิลลิเมตร

4.2.2 สมการอัตราการไหลเชิงมวล

$$A_{pri} = \left(\frac{\pi}{4}\right)(D^2 - d^2) \quad (4.1)$$

$$\dot{m}_{pri} = \rho A_{pri} v \quad (4.2)$$

หากคำนวณเพื่อหาพื้นที่ช่องการไหลของอากาศปฐุมภูมิที่ทางออกของหัวพ่นแบบใหม่ที่เพิ่มจากเดิม สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4.1) ซึ่งหัวพ่นแบบใหม่จะมีขนาด 3,733.7 ตารางมิลลิเมตร เพิ่มขึ้นจากเดิม 225 เปอร์เซ็นต์ หรือ 2.25 เท่า พื้นที่การไหลที่มีขนาดเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ความเร็วของอากาศปฐุมภูมิกับเชื้อเพลิงไหลเข้าสู่ห้องเผาไหม้มีค่าลดลง สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4.2)

4.3 การคำนวณที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง

4.3.1 อัตราการไหลของเชื้อเพลิง

เชื้อเพลิงที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นชีวมวลจากไม้ยางพาราและชีวมวลทอร์รีไฟด์จากไม้ไผ่ที่ได้จากการบดผ่านตะแกรงขนาด 0.5 และ 1.0 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องบดชนิดค้อนเหวี่ยง (Hammer mill) โดยอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงผงเทียบเท่ากำลังความร้อน 300 กิโลวัตต์ตามเงื่อนไขการทดลอง ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ (4.3) ดังนี้

$$\dot{m}_{fuel} = \frac{Q}{HHV} \quad (4.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เชื้อเพลิงที่ได้ผ่านการบดด้วยเครื่องบดชนิดค้อนเหวี่ยง (Hammer mill) จนทำให้ออนุภาคเชื้อเพลิงมีขนาดเล็กกว่า 1 มิลลิเมตร นำเชื้อเพลิงไปแยกขนาดอนุภาคโดยใช้เครื่องตรวจวัดขนาดอนุภาค (Sieve analysis) เพื่อหาการกระจายของขนาดเชื้อเพลิง (Size distribution) ซึ่งผลจากการแยกขนาดอนุภาค ดังแสดงในตารางที่ 6.1

จากสมการที่ (4.3) จะได้อัตราการไหลของเชื้อเพลิงชีวมวลผงและชีวมวลทอร์รีไฟด์ ผงเท่ากับ 0.017137 และ 0.013667 กิโลกรัมต่อวินาทีตามลำดับ โดยเชื้อเพลิงจะถูกลำเลียงด้วยสกรูขนถ่ายเชื้อเพลิงผงที่ถูกควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์ (Inverter) ที่ใช้ความสัมพันธ์เชิงเส้นจากการทดลองระหว่างความถี่กระแสไฟฟ้าที่เข้าสู่มอเตอร์สกรูลำเลียงเชื้อเพลิงผงกับอัตราการไหลของเชื้อเพลิงผง ดังแสดงสมการที่ (4.4) และ (4.5)

$$\text{ความถี่กระแสไฟฟ้าที่ใช้ขนถ่ายชีวมวล (Hz)} = 106.38 \dot{m}_{fuel} + 0.2872 \quad (4.4)$$

$$\text{ความถี่กระแสไฟฟ้าที่ใช้ขนถ่ายชีวมวลทอร์รีไฟด์ (Hz)} = 116.57 \dot{m}_{fuel} + 0.4338 \quad (4.5)$$

4.3.2 อัตราการไหลของอากาศ

การทดลองของงานวิจัยนี้ประกอบด้วยอากาศ 3 ส่วน โดยแต่ละส่วนทำหน้าที่แตกต่างกันซึ่งอธิบายไว้ในบทที่ 5 ก่อนอื่นต้องคำนวณหาอัตราการไหลของอากาศรวมของทั้ง 3 ส่วนจากอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงโดยใช้องค์ประกอบของธาตุในเชื้อเพลิงจากการวิเคราะห์แบบแยกธาตุจากตารางที่ 3.3 ในการคำนวณ ดังนี้

1. องค์ประกอบของธาตุในเชื้อเพลิงชีวมวล

เชื้อเพลิงชีวมวล 1 กิโลกรัม ประกอบด้วย

คาร์บอน	0.0356 กิโลโมล
ไฮโดรเจน	0.0594 กิโลโมล
ไนโตรเจน	0.0003 กิโลโมล
ออกซิเจน	0.0268 กิโลโมล
ไฮโดรเจนในความชื้น	0.0064 กิโลโมล
ออกซิเจนในความชื้น	0.0032 กิโลโมล

2. องค์ประกอบของธาตุในเชื้อเพลิงชีวมวลทอร์รีไฟด์

เชื้อเพลิงชีวมวล 1 กิโลกรัม ประกอบด้วย

คาร์บอน	0.0452 กิโลโมล
ไฮโดรเจน	0.0475 กิโลโมล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไนโตรเจน	0.0002 กิโลโมล
ออกซิเจน	0.0191 กิโลโมล
ไฮโดรเจนในความชื้น	0.0056 กิโลโมล
ออกซิเจนในความชื้น	0.0028 กิโลโมล

จากข้อมูลข้างต้น สามารถคำนวณหาจำนวนโมลของอากาศได้จากสมการที่ (3.2) เพื่อใช้ในการหาค่าอัตราส่วนอากาศกับเชื้อเพลิงตามทฤษฎีตามสมการที่ (3.3) จะได้ $(A/F)_{\text{stoic}}$ ของเชื้อเพลิงชีวมวลและชีวมวลทอร์รีไฟด์ เท่ากับ 5.53 และ 7.25 ตามลำดับ

สำหรับงานวิจัยนี้เป็นการเผาไหม้โดยใช้อากาศส่วนเกิน 15% อัตราส่วนอากาศกับเชื้อเพลิงเปลี่ยนไป ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราส่วนสมมูลเชื้อเพลิง (ϕ_{fuel}) ที่สามารถคำนวณได้จากตามสมการที่ (3.4) จะได้ $(A/F)_{\text{act}}$ ของเชื้อเพลิงชีวมวลและชีวมวลทอร์รีไฟด์ เท่ากับ 6.36 และ 8.34 ตามลำดับ ดังนั้น การเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลและชีวมวลทอร์รีไฟด์จะมีอัตราการไหลของอากาศรวมทั้งสามส่วน เท่ากับ 0.1090 และ 0.1139 กิโลกรัมต่อวินาที ตามลำดับ โดยการคำนวณตั้งแต่ต้นสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.1 ดังนี้

ตารางที่ 4.1 อัตราส่วนอากาศกับเชื้อเพลิง (kg/s) ความถี่กระแสไฟฟ้าที่เข้าสู่มอเตอร์ขนถ่าย (Hz) และอัตราการไหลของอากาศรวม (kg/s) ของเชื้อเพลิงชีวมวลและชีวมวลทอร์รีไฟด์

	เชื้อเพลิงชีวมวล (ซีเลีย)		เชื้อเพลิงชีวมวลทอร์รีไฟด์ (ไม้ไผ่)	
	ทางทฤษฎี	อากาศเกิน 15 %	ทางทฤษฎี	อากาศเกิน 15 %
1. อัตราส่วนอากาศกับเชื้อเพลิง	5.53	6.36	7.25	8.34
2. ความถี่กระแสไฟฟ้าที่เข้าสู่มอเตอร์ขนถ่าย (Hz)	$106.38 \dot{m}_{\text{fuel}} + 0.2872$		$116.57 \dot{m}_{\text{fuel}} + 0.4338$	
3. อัตราการไหลของอากาศรวม (kg/s)	-	0.1090	-	0.1139

โดยที่ \dot{m}_{fuel} คือ อัตราการไหลของเชื้อเพลิงเท่าเทียมกำลังความร้อน 200, 250 และ 300 กิโลวัตต์

จากตารางที่ 4.1 ข้อที่ 3 แสดงอัตราการไหลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ทั้งสามส่วนรวมกันของเชื้อเพลิงชีวมวลและเชื้อเพลิงชีวมวลทอร์รีไฟด์ หากต้องการทราบอัตราการไหลของอากาศแต่ละส่วนโดยใช้สัดส่วน 25 : 65 : 10 ซึ่งเป็นสัดส่วนที่ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ดีที่สุด [3] จะได้

อัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิ อากาศทุติยภูมิ และอากาศตติยภูมิ ดังแสดงในตารางที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศปฐมภูมิ อากาศทุติยภูมิ และอากาศตติยภูมิของการเผาไหม้เชิงส่วนที่อัตราส่วน 25 : 65 : 10

กำลังความร้อน (kW)	อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศแต่ละส่วน (kg/s)					
	การเผาไหม้ชีวมวล (ขี้เลื่อย)			การเผาไหม้ชีวมวลทอร์รีไฟต์ (ไม้ไผ่)		
	ปฐมภูมิ	ทุติยภูมิ	ตติยภูมิ	ปฐมภูมิ	ทุติยภูมิ	ตติยภูมิ
200	0.018	0.047	0.007	0.019	0.049	0.008
250	0.022	0.059	0.009	0.023	0.062	0.009
300	0.027	0.071	0.010	0.028	0.074	0.011



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การจำลองเชิงตัวเลขและการทดลองเผาไหม้

บทนี้เป็นการกล่าวถึงวิธีการจำลองเชิงตัวเลข ชุดอุปกรณ์การทดลอง รวมไปถึงเงื่อนไขการทดลองและขั้นตอนการทดลองของเตาเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งซึ่งข้อมูลเหล่านี้ได้จากการศึกษางานวิจัยก่อนหน้าและการศึกษาด้วยตัวของผู้วิจัยเอง

5.1 วิธีการจำลองเชิงตัวเลข

การจำลองเชิงตัวเลขของงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม ANSYS Fluent ver.12.0 [20] ด้วยระบบพิกัดคาร์ทีเซียน x, y, z ซึ่งทำการศึกษาคาร์บูเรชันที่ค่าลิ่งความร้อน 300 กิโลวัตต์ อากาศส่วนเกินทางทฤษฎี 15 เปอร์เซ็นต์ และสัดส่วนของอากาศปฐมภูมิ : อากาศทุติยภูมิ : อากาศตติยภูมิ คือ 25 : 65 : 10 ตามลำดับ สำหรับกรณีต่างๆ ที่จะทำการศึกษาในงานวิจัยนี้ แบ่งเป็น 3 กรณีดังนี้

1. การจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลด้วยหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบดั้งเดิม
2. การจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลด้วยหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบใหม่
3. การจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลทอร์รี่ไฟด์ด้วยหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบใหม่

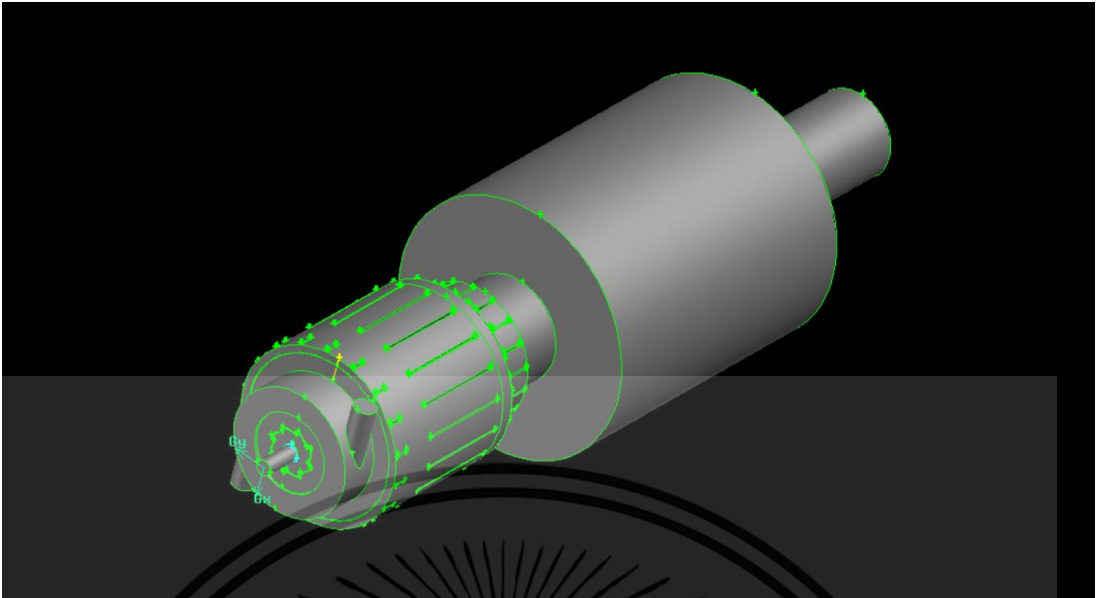
5.1.1 โครงสร้างของระบบที่ใช้จำลอง

ระบบที่ใช้จำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลประกอบด้วยหัวพ่นเชื้อเพลิงแข็งชนิดผง ห้องเผาไหม้ช่วย อากาศปฐมภูมิ อากาศทุติยภูมิ อากาศตติยภูมิ ห้องเผาไหม้หลักและท่อทางออก ดังแสดงในกรอบเส้นประรูปที่ 5.5 โดยระบบนี้จะมีขนาดเท่ากับชุดอุปกรณ์ที่ใช้ทดลองในการเผาไหม้เชื้อเพลิงจริง ดังแสดงการเปรียบเทียบในรูปที่ 5.1



(ก) โครงสร้างจากอุปกรณ์จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) โครงสร้างจากแบบจำลอง

รูปที่ 5.1 โครงสร้างและแบบจำลองของชุดอุปกรณ์การเผาไหม้

แบบจำลองของงานวิจัยนี้ใช้โครงสร้างเซลล์เป็นรูปทรง Polyhedra ซึ่งแบ่งตามการทดลองเป็น 2 กรณี คือ การจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลด้วยหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบดั้งเดิม และด้วยหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบใหม่ โดยใช้จำนวน 1,392,231 และ 1,780,314 เซลล์ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 5.2 สำหรับเชื้อเพลิงภายในแบบจำลองเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลและชีวมวลทอร์รีไฟด์ที่บดผ่านตะแกรง 0.5 และ 1.0 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องบดชนิดค้อนเหวี่ยง โดยขนาดเชื้อเพลิงที่ได้นำไปคำนวณกระจายของอนุภาคดังแสดงในตารางที่ 6.1 เพื่อนำมาใช้ในการจำลองการเผาไหม้ต่อไป

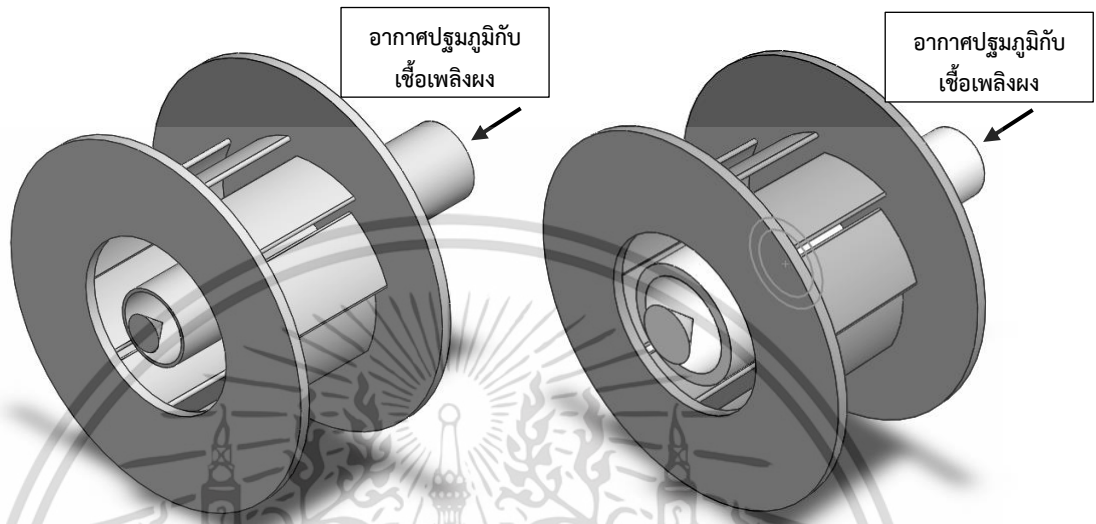


รูปที่ 5.2 จำนวนเซลล์ที่ใช้ในแบบจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.2 โครงสร้างของหัวพ่นที่ใช้ในแบบจำลอง

หัวพ่นเชื้อเพลิงที่ใช้จำลองแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ หัวพ่นแบบดั้งเดิมและแบบใหม่ ซึ่งมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางและขนาดของแผ่นขวางกั้นช่องการไหลที่ช่องทางออกอากาศปฐมภูมิกับเชื้อเพลิงแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 หัวพ่นเชื้อเพลิงแบบดั้งเดิม (ซ้าย) และแบบใหม่ (ขวา)

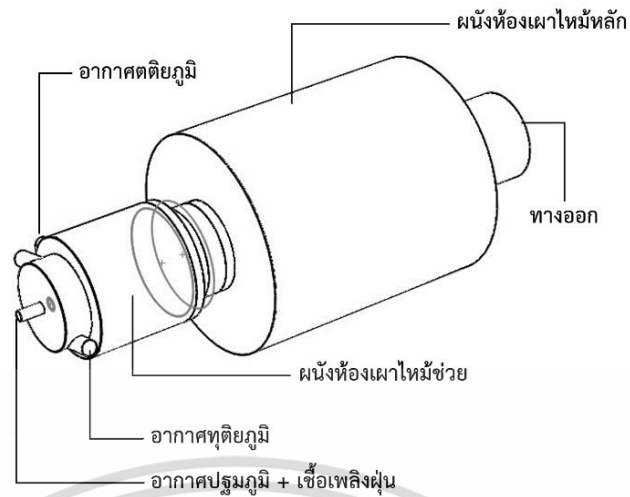
5.1.3 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงด้วยหัวพ่นที่สมรรถนะแตกต่างกัน ซึ่งทำการจำลองที่สภาวะคงตัว (Steady state) ภายใต้ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก 9.81 เมตรต่อวินาที² ในทิศทาง $-y$ และกำหนดให้อุณหภูมิของเชื้อเพลิงเริ่มต้นที่ 30 องศาเซลเซียส (303 เคลวิน) โดยที่องค์ประกอบของเชื้อเพลิง ค่าความร้อน และการกระจายขนาดของอนุภาค แสดงดังตารางที่ 3.3 และ 6.1

5.1.4 ขอบเขตของการจำลอง (Boundary condition)

ขอบเขตของระบบการจำลองดังแสดงในรูปที่ 5.4 เป็นการจำลองเพื่อสมมติให้ผนังห้องของห้องเผาไหม้ช่วย (Pre-chamber wall) เป็นผนังแบบ Adiabatic ซึ่งประกอบด้วยตัวแปรที่กำหนดให้กับระบบดังนี้ต่อไป

1. อัตราการไหลเชิงมวลและอุณหภูมิของเชื้อเพลิง
2. อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศทั้งสามส่วน
3. อุณหภูมิที่ผนังของเตาเผา (furnace wall)
4. ความดันที่ท่อทางออก



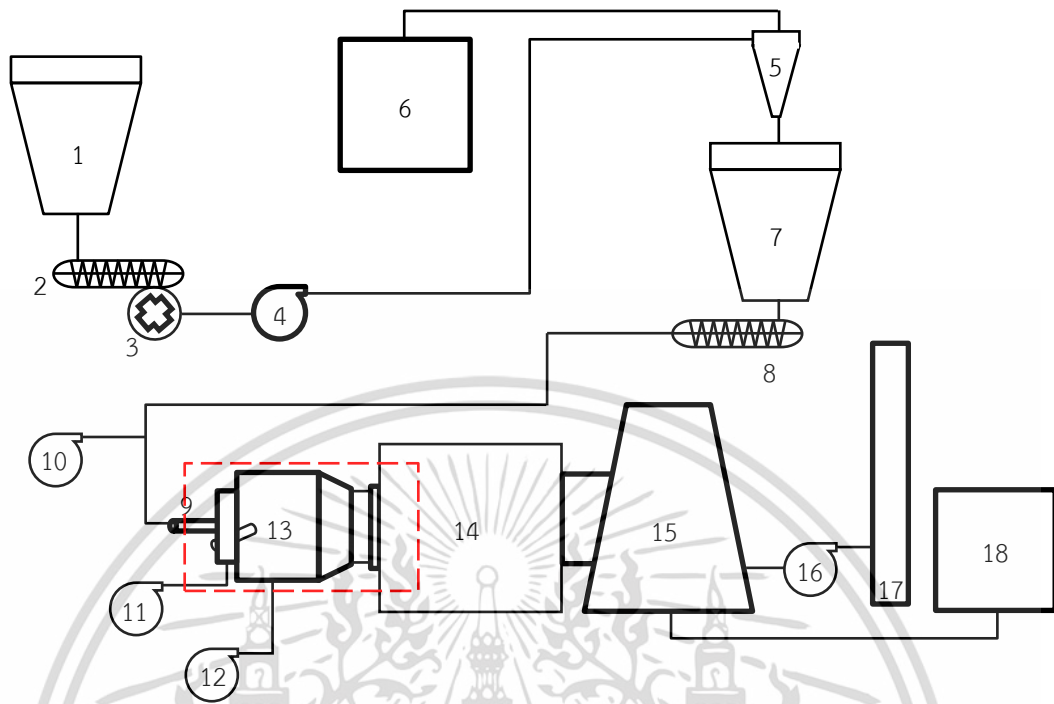
รูปที่ 5.4 ขอบเขตของระบบการจำลอง

ตารางที่ 5.1 ขอบเขตของระบบการจำลอง (Boundary condition)

ตัวแปรที่กำหนดให้กับระบบ	เชื้อเพลิงชีวมวล (ขี้เลื่อย)	เชื้อเพลิงชีวมวลทอร์รีไฟต์ (ไม้ไผ่)
1. อัตราการไหลของเชื้อเพลิงเทียบเท่า กำลัง 300 กิโลวัตต์ (kg/s)	0.0171	0.0137
2. อัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิ (kg/s)	0.0273	0.0285
3. อัตราการไหลของอากาศทุติยภูมิ (kg/s)	0.0709	0.0741
4. อัตราการไหลของอากาศตติยภูมิ (kg/s)	0.0109	0.0114
5. อุณหภูมิผนังเตา (Furnace wall) (K)	873	873
6. อุณหภูมิเริ่มต้นของเชื้อเพลิง (K)	303	303
7. ความดันที่ทางออก (Pa)	-1500	-1500

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ชุดอุปกรณ์และระบบทดลองการเผาไหม้



รูปที่ 5.5 ภาพรวมของชุดทดลองเตาเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง

จากรูปที่ 5.5 ชุดอุปกรณ์ทดสอบการเผาไหม้มีส่วนประกอบดังต่อไปนี้

หมายเลข 1 คือ ถังเก็บเชื้อเพลิงเม็ด ดังแสดงในรูปที่ 5.6

หมายเลข 2 คือ สกรูขนถ่ายเชื้อเพลิงเม็ดเข้าสู่เครื่องบด ดังแสดงในรูปที่ 5.6

หมายเลข 3 คือ เครื่องบดเชื้อเพลิงเม็ดชนิดค้อนเหวี่ยง ดังแสดงในรูปที่ 5.7

หมายเลข 4 คือ พัดลมขนถ่ายเชื้อเพลิงผง ดังแสดงในรูปที่ 5.8

หมายเลข 5 คือ ไซโคลนคัดแยกเชื้อเพลิงออกจากอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 5.9

หมายเลข 6 คือ อุปกรณ์กรองดักฝุ่น ดังแสดงในรูปที่ 5.10

หมายเลข 7 คือ ถังเก็บเชื้อเพลิงชนิดผง ดังแสดงในรูปที่ 5.11

หมายเลข 8 คือ สกรูขนถ่ายเชื้อเพลิงผงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ ดังแสดงในรูปที่ 5.11

หมายเลข 9 คือ ชุดหัวพ่นเชื้อเพลิงแข็งชนิดผง ดังแสดงในรูปที่ 5.12

หมายเลข 10 คือ พัดลมอากาศปฐมภูมิ (Primary air fan)

หมายเลข 11 คือ พัดลมอากาศทุติยภูมิ (Secondary air fan)

หมายเลข 12 คือ พัดลมอากาศตติยภูมิ (Tertiary air fan)

หมายเลข 13 คือ ห้องเผาไหม้ช่วย (Pre combustion chamber) ดังแสดงใน

รูปที่ 5.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเลข 14 คือ ห้องเผาไหม้หลัก (Main combustion chamber) ดังแสดงในรูปที่ 5.14

หมายเลข 15 คือ ระบบบำบัดไอเสีย ดังแสดงในรูปที่ 5.15

หมายเลข 16 คือ พัดลมดูด (ID fan) ดังแสดงในรูปที่ 5.16

หมายเลข 17 คือ ท่อไอเสีย (Stack) ดังแสดงในรูปที่ 5.16

หมายเลข 18 คือ ระบบบำบัดน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 5.17

5.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้เตรียมเชื้อเพลิงชนิดผง

1. ถังเก็บเชื้อเพลิงเม็ดและสกรูขนถ่าย ทำหน้าที่เก็บและขนถ่ายเชื้อเพลิงอัดเม็ดเข้าสู่เครื่องบดชนิดค้อนเหวี่ยง เพื่อนำไปใช้ในการบดเตรียมเชื้อเพลิงชนิดผง ดังแสดงในรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 ถังเก็บเชื้อเพลิงอัดเม็ดและสกรูขนถ่าย (Silo and screw feed wood pellet)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

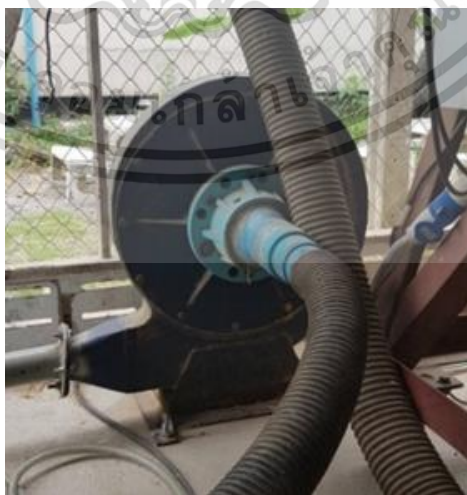
2. เครื่องบดเชื้อเพลิงเม็ดชนิดค้อนเหวี่ยง (Hammer mill grinder) ทำหน้าที่บดเชื้อเพลิงอัดเม็ดให้กลายเป็นเชื้อเพลิงชนิดผง ซึ่งใช้มอเตอร์ขนาด 22 กิโลวัตต์ มีใบมีดทั้งหมด 24 ใบ ขนาดเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดผงสามารถควบคุมได้โดยการให้ผ่านตะแกรงขนาดรูต่าง ๆ ตามที่ต้องการ ทำให้อัตราการบดขึ้นอยู่กับตะแกรงขนาดของรูที่ใช้ ดังแสดงในรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 เครื่องบดแบบค้อนเหวี่ยง (Hammer mill grinder)

5.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ขนถ่ายเชื้อเพลิงชนิดผง

1. พัดลมขนถ่ายเชื้อเพลิง (Blower) ทำหน้าที่ขนถ่ายเชื้อเพลิงชนิดผงจากเครื่องบดไปยังถังเก็บเชื้อเพลิงชนิดผง ซึ่งใช้มอเตอร์ขนาด 1.5 กิโลวัตต์ และ 2.0 แรงม้า ดังแสดงในรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.8 พัดลมขนถ่ายเชื้อเพลิง (Blower)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ไซโคลน (Cyclone) ทำหน้าที่คัดแยกขนาดของเชื้อเพลิงออกจากอากาศที่ใช้ลำเลียงอยู่ โดยประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับความเร็วลมขาเข้าไซโคลน ดังแสดงในรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.9 ไซโคลน (Cyclone)

3. อุปกรณ์กรองดักฝุ่น (Baghouse) ทำหน้าที่แยกเชื้อเพลิงชนิดผงละเอียดที่ไม่สามารถแยกได้ด้วยไซโคลนออกจากอากาศที่ใช้ในการขนถ่ายเพื่อไม่ให้ออกสู่อากาศภายนอก ดังแสดงในรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.10 อุปกรณ์กรองดักฝุ่น (Baghouse)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ถังเก็บเชื้อเพลิงชนิดผง (Hopper) และสกรูขนถ่ายทำหน้าที่เก็บและขนถ่ายเชื้อเพลิงชนิดผงไว้สำหรับการทดลองเผาไหม้ ดังแสดงได้ดังรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.11 ถังเก็บเชื้อเพลิงชนิดผง (Hopper)

5.2.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงชนิดผง

1. พัดลมอากาศปฐมภูมิ (Primary air fan) มีหน้าที่ลำเลียงเชื้อเพลิงชนิดผงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ช่วย
2. พัดลมอากาศทุติยภูมิ (Secondary air fan) มีหน้าที่ลำเลียงอากาศที่ใช้เข้าทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงชนิดผง โดยจะเกิดการไหลแบบหมุนควงผ่านชุดสร้างการหมุนควงตามแนวรัศมีเข้าสู่ห้องเผาไหม้ช่วย
3. พัดลมอากาศตติยภูมิ (Tertiary air fan) มีหน้าที่ลำเลียงอากาศที่เหลือเข้าทำปฏิกิริยากับการเผาไหม้เชื้อเพลิงจากห้องเผาไหม้ช่วย
4. หัวพ่นเชื้อเพลิงแข็งชนิดผง (Pilot burner) มีหน้าที่ลำเลียงอากาศปฐมภูมิที่มีเชื้อเพลิงแข็งชนิดผงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ช่วย ดังแสดงได้ดังรูปที่ 5.12
5. ชุดใบบิดโค้ง (Swirl) มีหน้าที่สร้างกระแสการหมุนควงให้กับอากาศทุติยภูมิที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้ช่วย ดังแสดงได้ดังรูปที่ 5.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.12 หัวพ่นเชื้อเพลิงแข็งชนิดผง (Pulverized burner) และชุดใบบิดโค้ง (Swirl)

6. ห้องเผาไหม้ช่วย (Pre-chamber) มีหน้าที่รักษาเสถียรภาพเปลวไฟการไหม้เนื่องจากเชื้อเพลิงแข็งชนิดผงจะเกิดการเผาไหม้ยากกว่าเชื้อเพลิงแบบของเหลวหรือก๊าซ ดังแสดงได้ดังรูปที่ 5.13



รูปที่ 5.13 ห้องเผาไหม้ช่วย (Pre-combustion chamber)

7. ห้องเผาไหม้หลัก (Main combustion chamber) มีหน้าที่เผาไหม้เชื้อเพลิงที่เหลือจากห้องเผาไหม้ช่วย โดยการเผาไหม้ส่วนใหญ่อยู่ภายในห้องนี้ ดังแสดงได้ดังรูปที่ 5.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้ โดยห้ามมิให้เผยแพร่ไปยังบุคคลอื่นโดยไม่ได้รับอนุญาต การค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.14 ห้องเผาไหม้หลัก (Main combustion chamber)

5.2.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในบำบัดไอเสียและบำบัดน้ำ

1. ระบบบำบัดไอเสีย มีหน้าที่ลดอุณหภูมิไอเสียและดักฝุ่นที่ออกจากห้องเผาไหม้หลัก ซึ่งเป็นการรวมระบบลดอุณหภูมิไอเสีย (Evaporative) และระบบกำจัดฝุ่นแบบเปียก (Wet scrubber) เข้าไว้ด้วยกัน ดังแสดงได้ดังรูปที่ 5.15



รูปที่ 5.15 ระบบบำบัดไอเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. พัดลมดูด (ID fan) และท่อไอเสีย (Stack) มีหน้าที่ทำให้ระบบมีความดันลบตลอดเวลา และดูดอากาศหลังจากการผ่านการบำบัดไอเสียออกสู่ปล่องไอเสีย ดังแสดงได้ดังรูปที่ 5.16



รูปที่ 5.16 พัดลมดูด (ID fan) และท่อไอเสีย (Stack)

3. ระบบบำบัดน้ำ มีหน้าที่ดูดน้ำจากอ่างของระบบกำจัดฝุ่นแบบเปียก (Wet scrubber) เพื่อทำการบำบัดน้ำและนำกลับไปใช้ใหม่ ดังแสดงได้ดังรูปที่ 5.17



รูปที่ 5.17 ระบบบำบัดน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 เงื่อนไขการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของการปรับปรุงสมรรถนะหัวเผาโดยการเพิ่มพื้นที่ช่องการไหลของอากาศปฐมภูมิ ซึ่งทำการเผาไหม้เชื้อเพลิงเทียบเท่ากับกำลังความร้อน 300 กิโลวัตต์ อากาศส่วนเกิน 15 เปอร์เซ็นต์ สัดส่วนอากาศปฐมภูมิ ทุติยภูมิ และตติยภูมิ 25, 65 และ 10 ตามลำดับนอกจากนี้ทำการศึกษาการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลทอร์รีไฟด์ด้วยหัวพ่นแบบใหม่ ภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน

ตารางที่ 5.2 กำลังความร้อนกับกระแสไฟฟ้าที่เข้าสู่มอเตอร์ลำเลียงเชื้อเพลิงผงที่ใช้ในการป้อน

กำลังความร้อน (kW)	กระแสไฟฟ้าที่เข้าสู่มอเตอร์สกรูขนถ่าย (Hz)	
	ชีวมวล (ขี้เลื่อย)	ชีวมวลทอร์รีไฟด์ (ไม้ไผ่)
200	0.93	0.63
250	1.23	0.89
300	1.54	1.16

5.4 การทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิง

การทดลองเป็นออกเป็น 3 กรณี คือ การเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลด้วยหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบดั้งเดิม การเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลด้วยหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบใหม่ และการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลทอร์รีไฟด์ด้วยหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบใหม่ โดยการทดลองมีขั้นตอนหลักๆ ดังต่อไปนี้

5.4.1 การเตรียมระบบและเครื่องมือก่อนการทดลองการเผาไหม้

เป็นขั้นตอนที่สำคัญสำหรับการทดลองเพื่อป้องกันการเกิดข้อผิดพลาดระหว่างการทดลอง อย่างเช่น ความผิดพลาดของผลการทดลองที่ได้ อันตรายที่อาจเกิดขึ้นขณะทำการทดลอง เป็นต้น ดังนั้นระบบที่ควรมีการเตรียมให้เป็นอย่างดี อันได้แก่

- ระบบลำเลียงอากาศทั้งสามส่วน เป็นระบบที่ต้องทำงาน
- ระบบควบคุมก๊าซและการจุดไฟ เป็นระบบที่ต้องมีความพร้อมเปิดปิดอยู่เสมอ
- ระบบบำบัด เป็นระบบที่เกี่ยวข้องกับน้ำเพื่อใช้ในการไหลเวียนหล่อเย็นและบำบัด
- ระบบพัดลมดูด ID ซึ่งจะเป็นการสร้างความปลอดภัยให้กับระบบ

5.4.2 การอุ่นห้องเผาไหม้ช่วย

เป็นขั้นตอนที่ต้องทำเพื่อให้ห้องเผาไหม้ช่วยมีอุณหภูมิสูงกว่าภายนอกและพร้อมทำการเผาไหม้ ซึ่งในการทดลองควบคุมการไหลของก๊าซ LPG อยู่ที่ 8 ลิตรต่อนาที พร้อมกับเปิดระบบจุดไฟโดยใช้หัวเทียนจุดไฟ (Ignitor) จากนั้นปล่อยก๊าซไหลผ่านหัวเทียนจุดไฟ จะเกิดประกายไฟขึ้นในห้องเผาไหม้ ระยะเวลาในการอุ่นขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมภายนอกหรืออุณหภูมิ

ภายในห้องเผาไหม้ช่วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

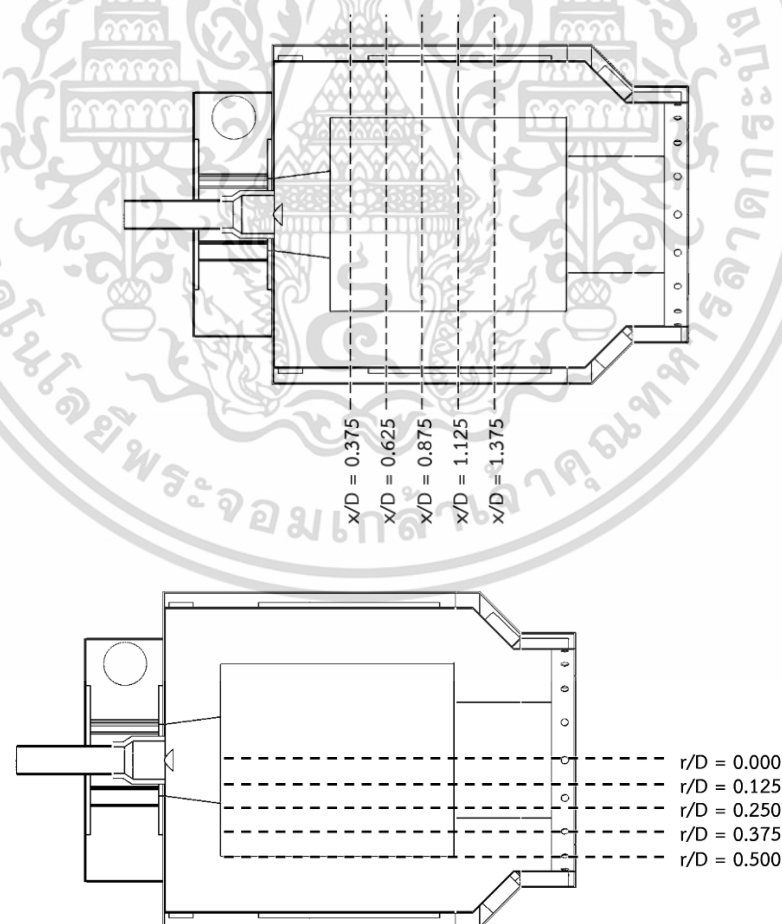
5.4.3 การอุ่นห้องเผาไหม้ช่วยด้วยก๊าซ LPG ร่วมกับเชื้อเพลิงชีวมวลผง

เป็นขั้นตอนที่จะช่วยให้ประหยัดแก๊สในการอุ่นห้องเผาไหม้เพียงอย่างเดียว โดยเชื้อเพลิงกับอากาศปฐมนุญมีไหลผ่านเปลวไฟที่เกิดจากก๊าซ LPG ทำให้เกิดเป็นสะเก็ดไฟและอนุกรมุมิภายในห้องเผาไหม้ช่วยเพิ่มขึ้น สารระเหยที่ถูกปล่อยออกมามีความเข้มข้นสูง เปลวไฟในห้องเผาไหม้จึงเริ่มติด สำหรับขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่เตรียมสำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงเพียงอย่างเดียว และจากนั้นจะเริ่มใช้อากาศทั้งสามส่วนช่วยในการเผาไหม้ เมื่ออนุกรมุมิของการเผาไหม้มีค่าคงที่ทำการเพิ่มกำลังความร้อนโดยเพิ่มอัตราการไหลของอากาศทั้งสามส่วนและป้อนเชื้อเพลิงผงด้วยกระแสไฟฟ้าเข้าสู่มอเตอร์ขนถ่ายเชื้อเพลิงผงดังตารางที่ 4.3 และ 5.1 ตามลำดับ

5.4.4 การหยุดจ่ายก๊าซ LPG เพื่อใช้เชื้อเพลิงชีวมวลผงเพียงอย่างเดียว

เมื่อเพิ่มอัตราการไหลตามตารางที่ 4.3 จนเทียบเท่ากับกำลังความร้อน 300 กิโลวัตต์ และทำการหยุดจ่ายก๊าซเมื่อผนังห้องเผาไหม้มีอนุกรมุมิถึง 500 องศาเซลเซียส เหลือเพียงเชื้อเพลิงชีวมวลผงกับอากาศเท่านั้นที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้ รอจนกว่าอนุกรมุมิของการเผาไหม้เชื้อเพลิงมีค่าคงที่จึงทำการบันทึกผลอนุกรมุมิ และแก๊สไอเสีย

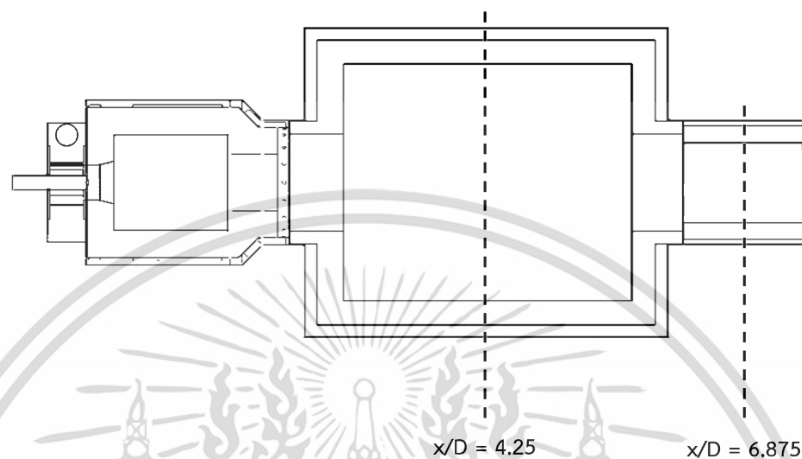
5.4.5 การบันทึกผลการทดลอง โดยการวัดอนุกรมุมิและแก๊สไอเสีย



รูปที่ 5.18 แสดงตำแหน่งการวัดอนุกรมุมิที่ห้องเผาไหม้ช่วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.18 แสดงตำแหน่งการวัดอุณหภูมิตามแนวแกนจำนวน 5 จุด ที่ตำแหน่ง x/D ต่างๆ เมื่อ x คือ ระยะตามแนวแกน, D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของห้องเผาไหม้ช่วย (0.4 เมตร) และการวัดอุณหภูมิตามแนวรัศมีจำนวน 5 จุด ที่ตำแหน่ง r/D ภายในห้องเผาไหม้ช่วย เมื่อ r คือ ตำแหน่งตามแนวรัศมีภายใน



รูปที่ 5.19 แสดงตำแหน่งวัดอุณหภูมิห้องเผาไหม้หลัก และก๊าซไอเสียที่ทางออกห้องเผาไหม้หลัก

รูปที่ 5.19 แสดงตำแหน่งการวัดอุณหภูมิห้องเผาไหม้หลักที่ตำแหน่ง $x/D = 4.250$ และการวัดก๊าซไอเสียที่ทางออกห้องเผาไหม้หลักที่ตำแหน่ง $x/D = 6.875$ เมื่อ x คือ ระยะตามแนวแกนถึงตำแหน่งที่วัดค่า และ D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของห้องเผาไหม้ช่วย (0.4 เมตร)

5.5 การทดลองระบบเตรียมเชื้อเพลิงผง

การทำอัตราการใช้พลังงานในการเตรียมเชื้อเพลิงชนิดผง มีขั้นตอนการทดลองดังนี้

5.5.1 ใส่เชื้อเพลิงเม็ดลงไปในถังเก็บเชื้อเพลิงเม็ด

5.5.2 ปรับความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่เข้าสู่มอเตอร์ของสกรูขนถ่ายเชื้อเพลิงเม็ด โดยเริ่มทดลองที่ความถี่ 1 Hz

5.5.3 เปิดสวิตช์มอเตอร์และอินเวอร์เตอร์ของสกรูขนถ่าย เพื่อให้เชื้อเพลิงเม็ดเข้าไปสู่เครื่องบดชนิดค้อนเหวี่ยง โดยจับเวลา 3 นาที แล้วค่อยปิดสวิตช์

5.5.4 ชั่งน้ำหนักเชื้อเพลิงผงและบันทึกค่าที่ได้จากการบด

5.5.5 ทดลองซ้ำข้อ 5.5.2 - 5.5.4 โดยการเพิ่มความถี่ขึ้นทีละ 1 Hz แล้วทำการบันทึกค่าทำการทดลองเรื่อย ๆ จนความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่เข้าสู่มอเตอร์ของสกรูขนถ่ายเป็น 5 Hz

บทที่ 6

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

บทนี้เป็นการกล่าวถึงผลการเผาไหม้เชื้อเพลิงด้วยหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบดั้งเดิมและแบบใหม่จากการใช้แบบจำลองเชิงตัวเลข และการเผาไหม้จริง ซึ่งผลการทดลองถูกนำเสนอ 3 หัวข้อหลัก ๆ คือ ผลการเผาไหม้จากแบบจำลองเชิงตัวเลข ผลการเผาไหม้จริงจากชุดทดลอง และผลการศึกษ้อัตราการใช้พลังงานในการเตรียมเชื้อเพลิง ซึ่งมียละเอียดดังต่อไปนี้

6.1 ผลการเผาไหม้จากการใช้แบบจำลองเชิงตัวเลข

การทดลองการเผาไหม้โดยใช้แบบจำลองเชิงตัวเลขของงานวิจัยนี้ เป็นการทดลองเพื่อศึกษาและอธิบายพฤติกรรมของการเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้โดยมีเงื่อนไขการจำลองดังนี้

- กำลังความร้อนเทียบเท่า 300 กิโลวัตต์
- อากาศส่วนเกินทางทฤษฎี 15 เปอร์เซ็นต์
- อัตราส่วนอากาศปฐมภูมิ : อากาศทฤษฎีภูมิ : อากาศตติยภูมิ เป็น 25 : 65 : 10

ตามลำดับ

- ให้อนุภาคเชื้อเพลิงชีวมวลผงและชีวมวลทอร์รีไฟด์ผงที่มีขนาด 0.5 และ 1.0 มิลลิเมตร

ผลการจำลองถูกแบ่งออกเป็น 2 กรณีดังนี้

- การเปรียบเทียบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลด้วยหัวพ่นแบบดั้งเดิมและแบบใหม่
- การเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลทอร์รีไฟด์ด้วยหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบใหม่

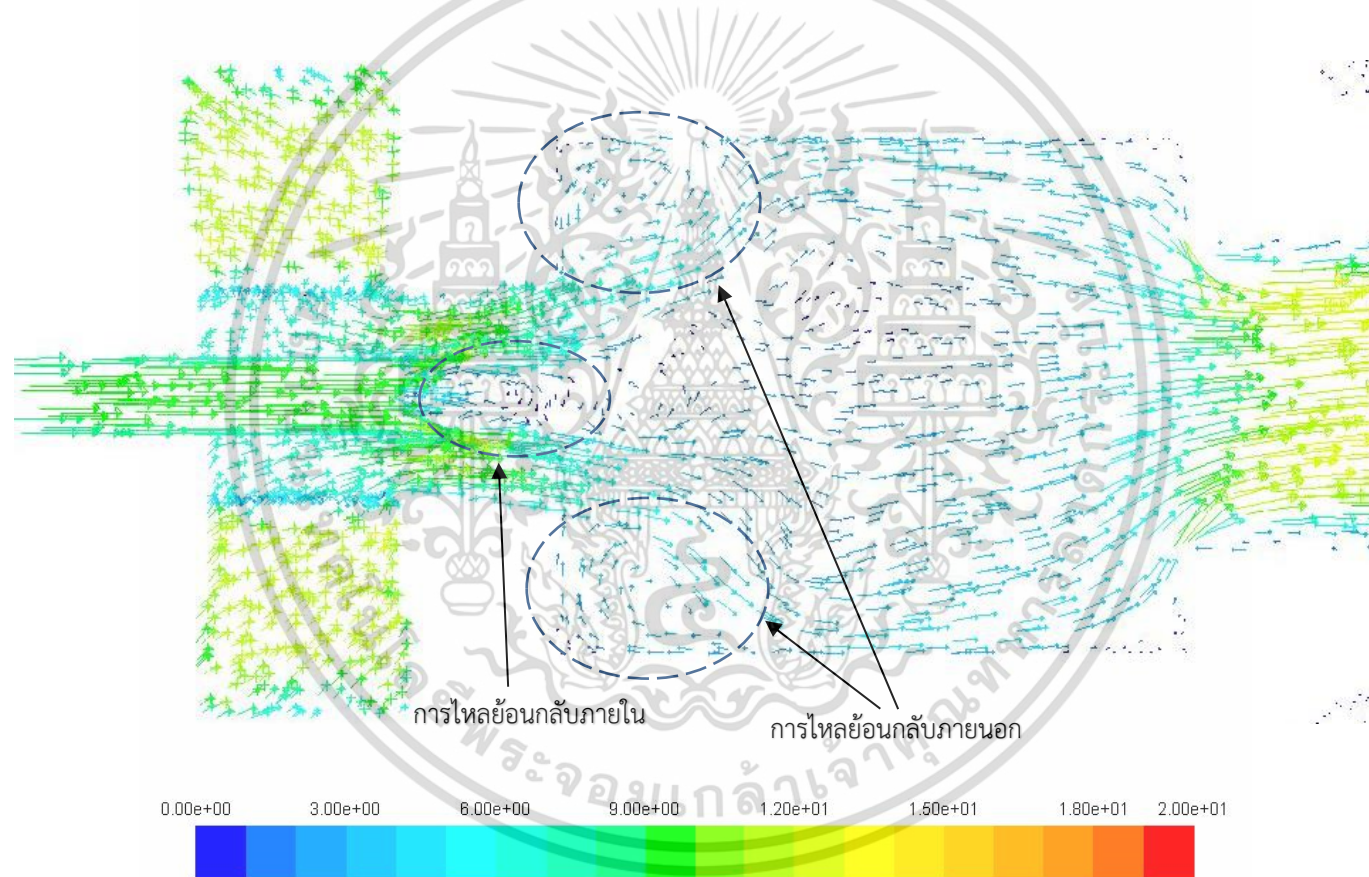
โดยผลการจำลองถูกนำเสนอในรูปแบบต่าง ๆ ดังนี้

- ผลจำลองสนามเวกเตอร์การไหลของอากาศกับก๊าซร้อน (ภาพตัดแนวยาว)
- ผลจำลองสนามเวกเตอร์การไหลของอากาศกับก๊าซร้อน (ภาพตัดแนวขวาง)
- ผลจำลองอุณหภูมิจากการเผาไหม้
- ผลจำลองสัดส่วนโดยมวลของออกซิเจน
- ผลจำลองสัดส่วนโดยมวลของสารระเหย
- ผลจำลองเส้นสายธารการไหลของการเผาไหม้
- ผลจำลองเส้นทางของอนุภาคเชื้อเพลิง

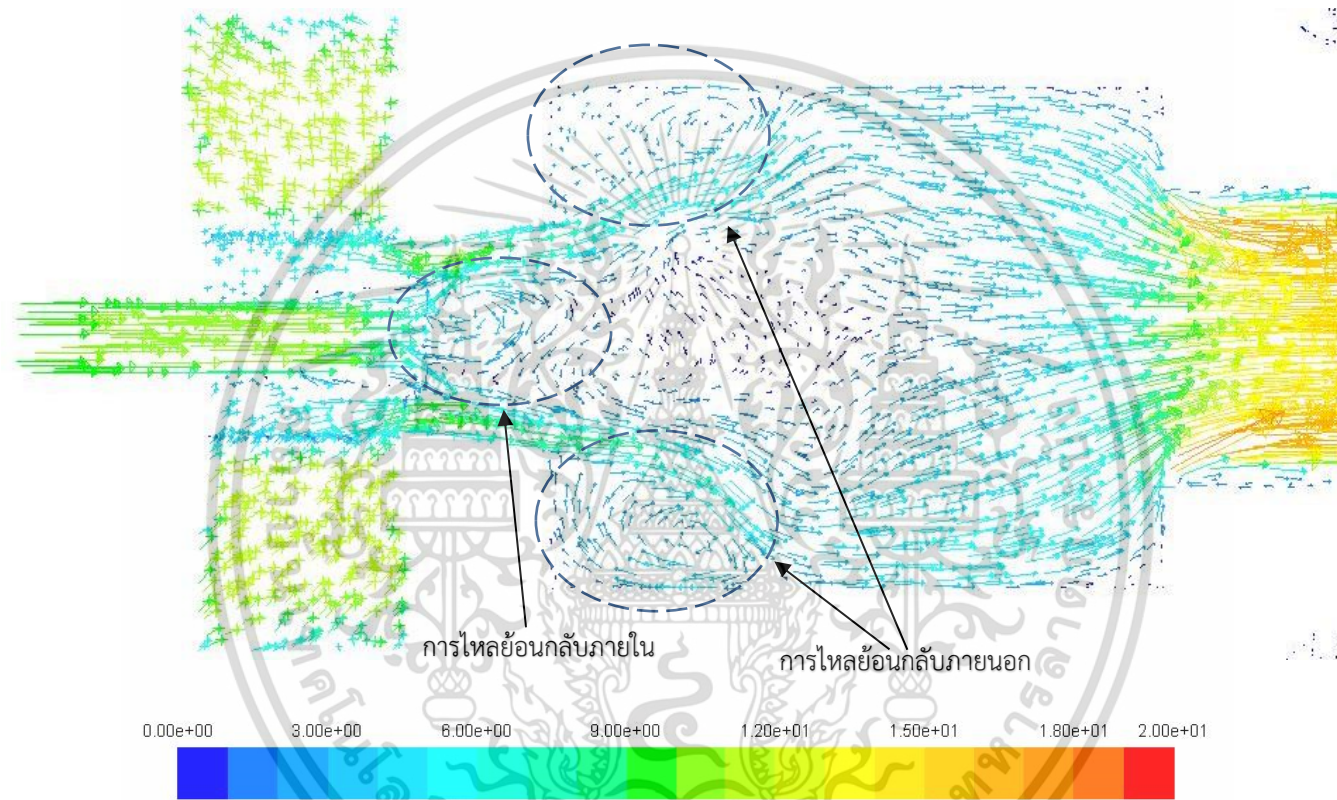
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.1.1 การเปรียบเทียบผลจำลองของการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลด้วยหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบดั้งเดิมและแบบใหม่

1. ผลจำลองสนามเวกเตอร์การไหลของอากาศกับก๊าซร้อน (ภาพตัดแนวยาว)



รูปที่ 6.1 ผลจำลองสนามเวกเตอร์การไหลแสดงทิศทางและความเร็วของอากาศกับก๊าซร้อนจากการเผาไหม้ชีวมวลด้วยหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบดั้งเดิม

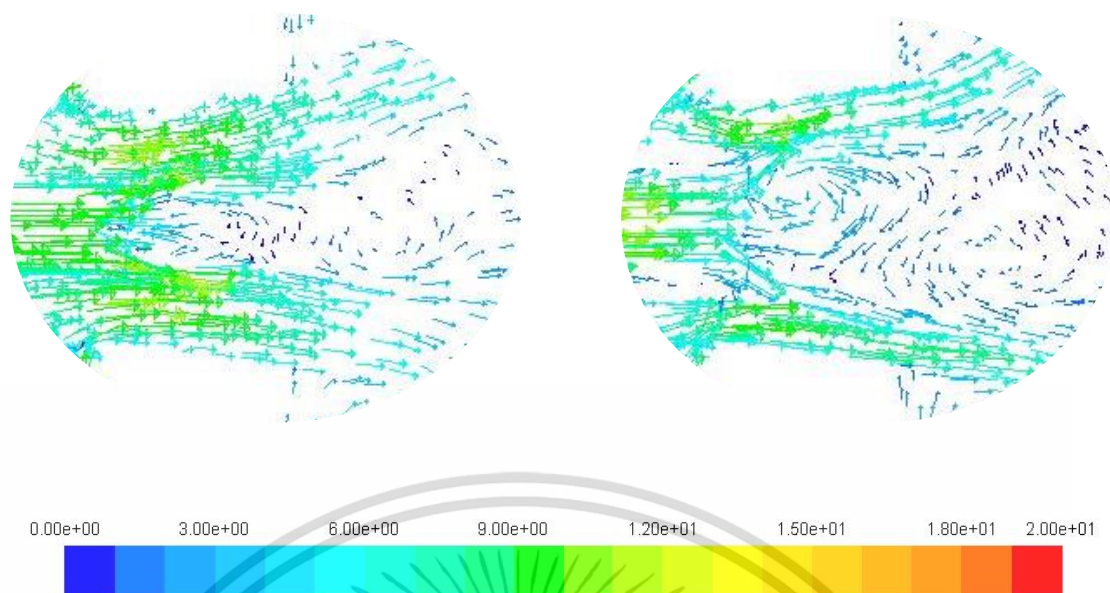


รูปที่ 6.2 ผลจำลองสนามเวกเตอร์การไหลแสดงทิศทางและความเร็วของอากาศกับก๊าซร้อนจากการเผาไหม้ชีวมวลด้วยหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบใหม่

จากรูปที่ 6.1 และ 6.2 แสดงผลการจำลองสนามเวกเตอร์การไหลของอากาศกับก๊าซร้อนจากการเผาไหม้ชีวมวลตั้งแต่ทางเข้าของท่ออากาศปฐมภูมิจนถึงทางออกของห้องเผาไหม้ช่วย โดยรูปที่ 6.1 และ 6.2 เป็นผลการจำลองจากการใช้หัวพ่นเชื้อเพลิงแบบดั้งเดิมและแบบใหม่ ตามลำดับ ซึ่งพบว่ากระแสการไหลของอากาศปฐมภูมิที่ใช้ลำเลียงเชื้อเพลิงชีวมวลผงไหลออกจากหัวพ่นเชื้อเพลิงด้วยทิศทางและความเร็วที่แตกต่างกันสังเกตได้จากทิศทาง ความยาวและสีของเวกเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 6.3 ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากวัตถุขวางการไหลทำหน้าที่ลดความเร็วในแนวแกน (Axial axis) และเพิ่มความเร็วในแนวรัศมี (Radial axis) ทำให้ลักษณะของกระแสการไหลถูกเบี่ยงและกระจายไปยังผนังเตาเผาไหม้แตกต่างกัน ผลการจำลองพบว่าการเผาไหม้โดยใช้หัวพ่นเชื้อเพลิงแบบใหม่ซึ่งเป็นหัวพ่นที่ปรับปรุงให้วัตถุขวางการไหลมีขนาดเป็น 1.5 เท่าของขนาดดั้งเดิม ทำให้กระแสการไหลอากาศปฐมภูมิกับเชื้อเพลิงผ่านวัตถุขวางการไหลเข้าสู่ห้องเผาไหม้ช่วยด้วยความเร็วสูงสุดประมาณ 6.3 เมตรต่อวินาที ซึ่งลดลงจากการใช้หัวพ่นเชื้อเพลิงแบบดั้งเดิมที่มีความเร็วสูงสุดประมาณ 7.6 เมตรต่อวินาที และเนื่องจากผลกระทบของการปรับปรุงหัวพ่นเชื้อเพลิงยังส่งผลให้ความเร็วสูงสุดของอากาศทุติยภูมิที่ใช้ในการสร้างกระแสหมุนควงผ่านชุดใบบิดโค้ง (Swirl) มีค่าประมาณ 10.2 เมตรต่อวินาที ซึ่งเดิมมีความเร็วสูงสุดประมาณ 9.4 เมตรต่อวินาที เมื่อเชื้อเพลิงพบกับอากาศใหม่ไหลเข้าสู่ห้องเผาไหม้ช่วยด้วยความเร็วของการหมุนควงมากขึ้นและมีทิศทางกระจายออกไปยังผนังห้องเผาไหม้มากขึ้นจะถูกกระแสไหลวนของก๊าซร้อนที่มีอุณหภูมิสูงเข้ามาทำการเผาไหม้ในบริเวณที่เกิดกระแสไหลวน (Recirculation Zone) ซึ่งการใช้หัวพ่นเชื้อเพลิงแบบใหม่ทำให้เกิดกระแสไหลวนที่ดีและกว้างกว่าการใช้หัวพ่นเชื้อเพลิงแบบดั้งเดิม แสดงในรูปที่ 6.3 ทำให้มีระยะเวลาในการติดไฟที่นานกว่าอีกด้วย

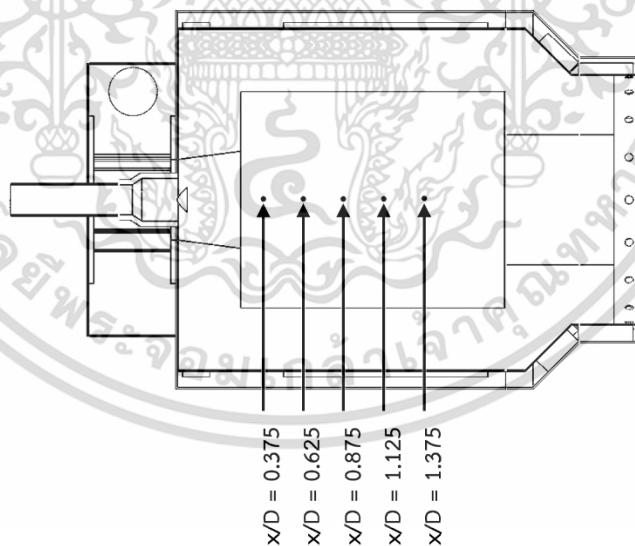
เนื่องจากการใช้หัวพ่นเชื้อเพลิงแบบใหม่ซึ่งมีขนาดของวัตถุขวางการไหลเพิ่มขึ้นจากเดิม 1.5 เท่า บริเวณความดันต่ำด้านหลังวัตถุขวางการไหลจึงมีขนาดเพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดกระแสไหลย้อนกลับภายใน (Internal circulation) ของก๊าซร้อนที่ดีกว่าการใช้หัวพ่นแบบดั้งเดิม ซึ่งบริเวณดังกล่าวนี้จะมีการถ่ายเทมวลและความร้อนที่สูงมากทำให้เกิดอุณหภูมิถึงจุดติดไฟ สารผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงที่เกิดขึ้นรอบ ๆ บริเวณนั้น นอกจากนี้ยังเกิดกระแสไหลย้อนกลับภายนอก (External circulation) บริเวณมุมของห้องเผาไหม้ที่เกิดจากการไหลปั่นป่วนด้วยการหมุนควงของอากาศทุติยภูมิที่กระจายออกสู่ผนังห้องเผาไหม้ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดการไหลย้อนกลับ (Reverse flow) ซึ่งตำแหน่งดังกล่าวจะทำให้กระแสไหลวนเข้าสู่เชื้อเพลิงกับอากาศใหม่ที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้อีกด้วย โดยปัจจัยเหล่านี้ไม่ว่าจะเป็นการปั่นป่วนและการไหลย้อนกลับภายนอกที่เกิดการหมุนควงของอากาศทุติยภูมิ และการไหลย้อนกลับภายในที่เกิดจากความดันต่ำหลังวัตถุขวางการไหลเป็นส่วนสำคัญต่อการเผาไหม้ซึ่งจะช่วยให้เชื้อเพลิงกับอากาศเกิดการคลุกเคล้าและเกิดปฏิกิริยาความร้อนต่อไป จากนั้นกระแสการไหลของก๊าซร้อนจะมีความเร็วที่ลดลงเนื่องจากการแลกเปลี่ยนโมเมนตัมระหว่างก๊าซร้อนภายในห้องเผาไหม้ช่วย และจะมีความเร็วเพิ่มขึ้นอีกครั้งในตำแหน่งทางออกของห้องเผาไหม้ช่วยไปยังห้องเผาไหม้หลักซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดเล็กกลงและจะเข้าสู่ห้องเผาไหม้หลักต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

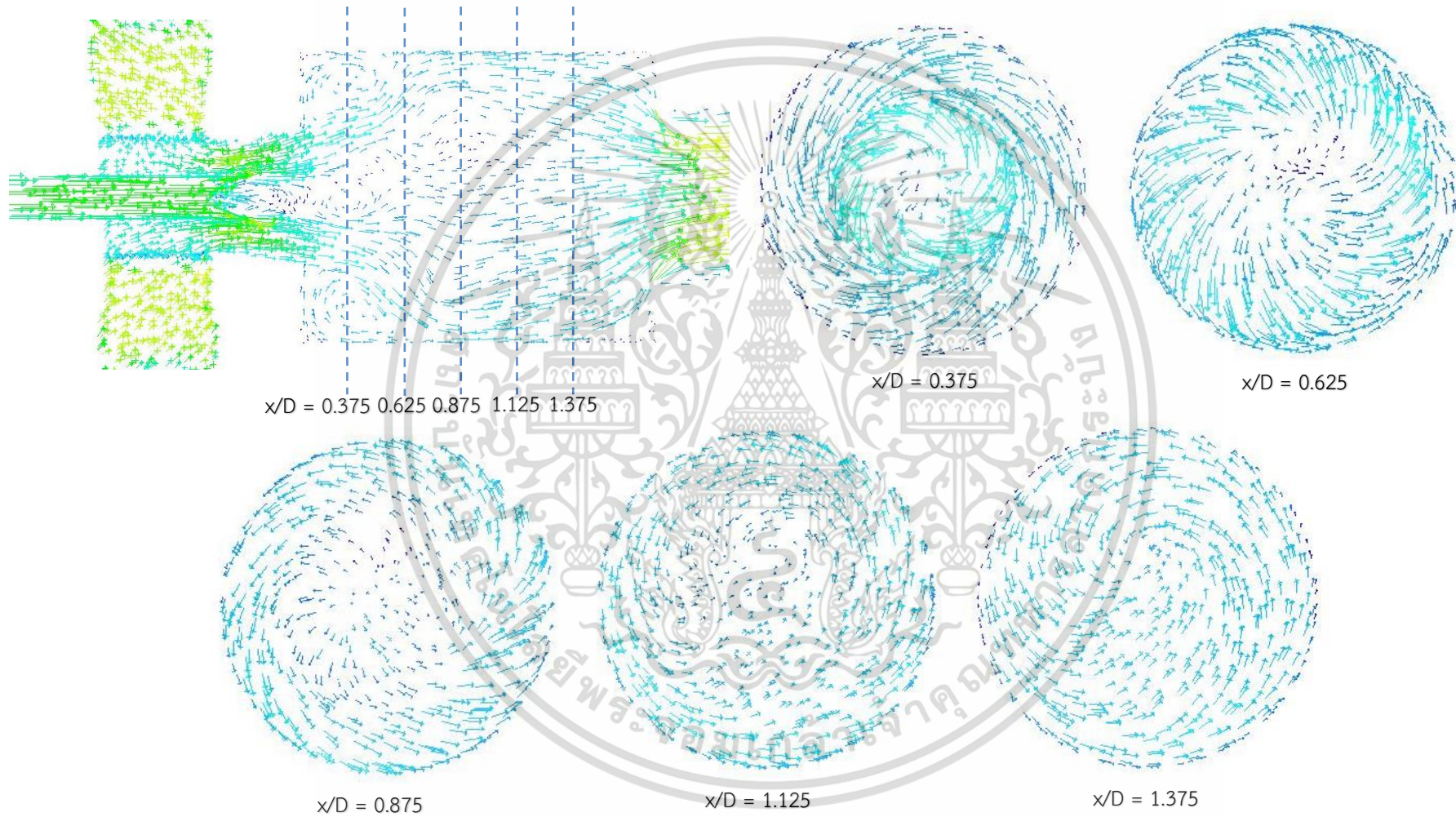


รูปที่ 6.3 ผลจำลองสนามเวกเตอร์การไหลแสดงทิศทางและความเร็วของอากาศกับก๊าซร้อนที่ตำแหน่งวัตถุขวางการไหลของการเผาไหม้ชีวมวลด้วยหัวพ่นแบบดั้งเดิม (ซ้าย) และแบบใหม่ (ขวา)

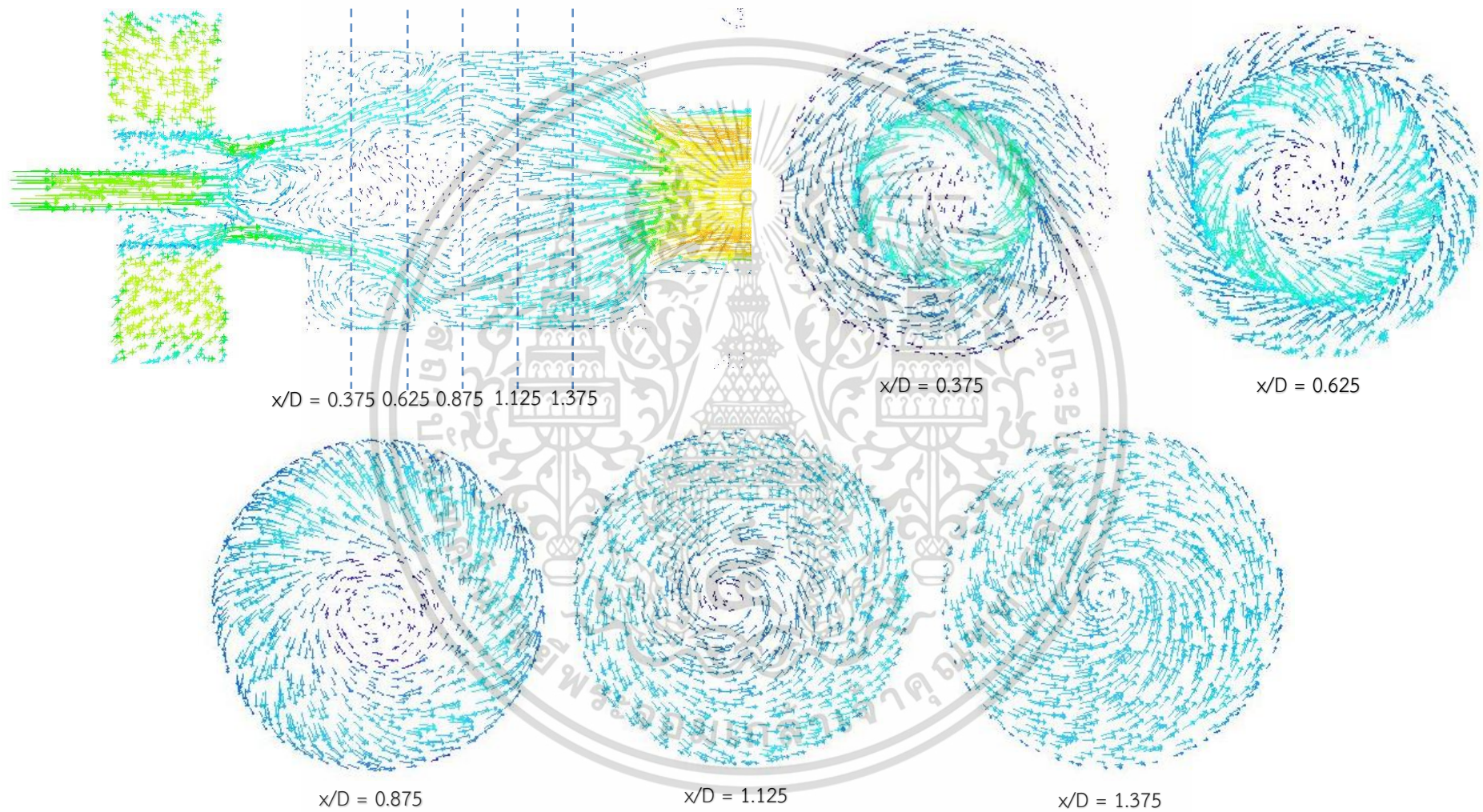
2. ผลจำลองสนามเวกเตอร์การไหลของก๊าซร้อน (ภาพตัดแนวขวาง)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.4 ภาพตัดแนวขวางแสดงสนามเวกเตอร์ที่ตำแหน่ง x/D ต่าง ๆ ของห้องเผาไหม้ช่วยของการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลด้วยหัวพ่นแบบดั้งเดิม



รูปที่ 6.5 ภาพตัดแนวขวางแสดงสนามเวกเตอร์ที่ตำแหน่ง x/D ต่าง ๆ ของห้องเผาไหม้ช่วยของการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลด้วยหัวพ่นแบบใหม่

รูปที่ 6.4 และ 6.5 แสดงผลจำลองการหมุนควงภายในห้องเผาไหม้ช่วยด้วยหัวพ่นแบบดั้งเดิมและแบบใหม่ตามลำดับ โดยใช้ภาพตัดแนวขวางที่ตำแหน่ง x/D ต่าง ๆ ดังนี้ 0.375, 0.625, 0.875, 1.125 และ 1.375 ตามลำดับ จากการจำลองและเปรียบเทียบที่ตำแหน่งต่าง ๆ พบว่า

(ก) กระแสการไหลของก๊าซร้อนที่ตำแหน่ง $x/D = 0.375$ ซึ่งเป็นตำแหน่งที่อยู่ใกล้ทางออกของอากาศปฐมภูมิ อากาศทุติยภูมิมากที่สุด ทำให้โมเมนตัมจากการหมุนควงของอากาศทุติยภูมิมีอิทธิพลต่อกระแสการไหลของก๊าซร้อนภายในห้องเผาไหม้ช่วยมากที่สุดด้วย ซึ่งผลจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงด้วยหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบใหม่ทำให้เกิดความเร็วสูงสุดที่มีค่ามากกว่า และมีความหนาแน่นของกระแสการไหลมากกว่าการเผาไหม้ด้วยหัวพ่นแบบดั้งเดิม เนื่องจากการปรับปรุงหัวพ่นเชื้อเพลิงโดยการเพิ่มพื้นที่ช่องการไหลของอากาศปฐมภูมิจะส่งผลกระทบต่อพื้นที่ช่องการไหลของอากาศทุติยภูมิ นั่นคือช่องการไหลของอากาศทุติยภูมิที่มีขนาดเล็กลง ทำให้ความเร็วที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้มีค่าเพิ่มขึ้น จึงทำให้กลุ่มของกระแสการไหลที่มีความหนาแน่นและความเร็วสูงที่สุดมากกว่าการใช้หัวพ่นแบบดั้งเดิม นอกจากนี้ความเร็วที่ใช้ในการหมุนควงที่สูงขึ้นยังทำให้เกิดการเหนี่ยวนำกระแสการไหลก๊าซร้อนบริเวณผนังห้องเผาไหม้เข้าสู่ศูนย์กลางของการหมุนควงที่มากกว่าอีกด้วยดังแสดงในรูปที่ 6.4 และ 6.5

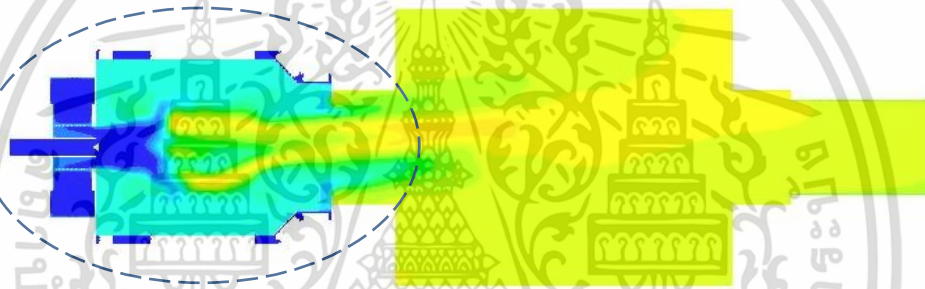
(ข) กระแสการไหลของก๊าซร้อนที่ตำแหน่ง $x/D = 0.625$ โมเมนตัมที่เกิดจากการหมุนควงของอากาศทุติยภูมิ เนื่องจากที่ระยะห่างจากหัวพ่นเชื้อเพลิงที่มากขึ้นทำให้อิทธิพลของอากาศทุติยภูมิที่ใช้ในการหมุนควงมีค่าลดลง นอกจากนี้กลุ่มของกระแสการไหลมีการกระจายออกไปยังผนังห้องเผาไหม้อีกด้วย ผลจำลองการเผาไหม้ด้วยหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบใหม่ยังคงทำให้กระแสการไหลของก๊าซร้อนมีความเร็วสูงสุดของการหมุนควงที่มีความหนาแน่นมากกว่าการใช้หัวพ่นแบบดั้งเดิม ดังแสดงในรูปที่ 6.4 และ 6.5

(ค) กระแสการไหลของก๊าซร้อนที่ตำแหน่ง $x/D = 0.875$ เป็นตำแหน่งที่ห่างจากทางออกของอากาศปฐมภูมิและอากาศทุติยภูมิมากกว่าตำแหน่งก่อนหน้าทำให้โมเมนตัมที่เกิดจากการหมุนควงของอากาศทุติยภูมิมีผลต่อกระแสการไหลของก๊าซร้อนภายในห้องเผาไหม้น้อยลง ส่งผลให้ความเร็วสูงสุดมีค่าลดลงจากตำแหน่งก่อนหน้าและเริ่มมีการขยายตัวไปชนกับผนังห้องเผาไหม้ ผลจำลองการเผาไหม้ด้วยหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบใหม่ยังคงทำให้กระแสการไหลของก๊าซร้อนมีความเร็วสูงสุดของการหมุนควงที่มีความหนาแน่นมากกว่าการใช้หัวพ่นแบบดั้งเดิม ดังแสดงในรูปที่ 6.4 และ 6.5

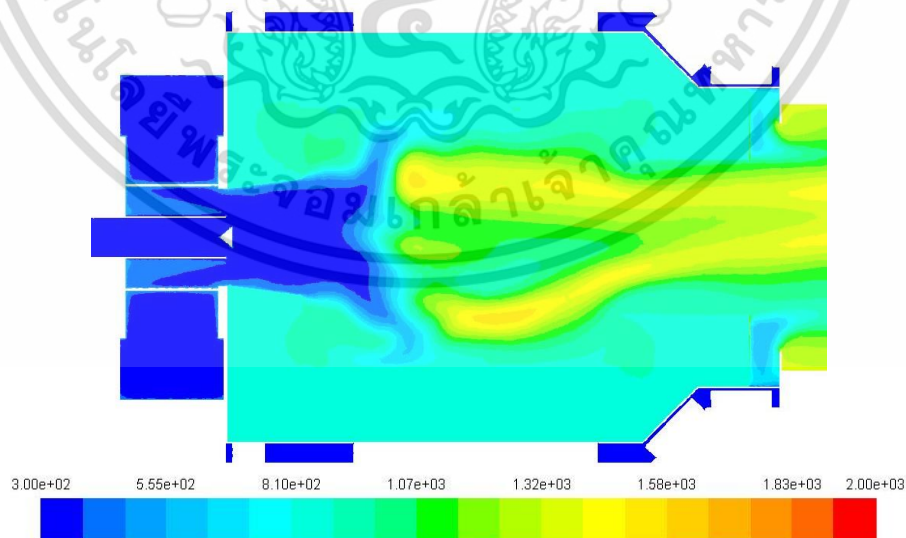
(ง) กระแสการไหลของก๊าซร้อนที่ตำแหน่ง $x/D = 1.125$ เป็นตำแหน่งโมเมนตัมของการหมุนควงมีค่าสูงขึ้นกว่าตำแหน่งก่อนหน้า หลังจากกระแสการไหลชนกับผนังห้องเผาไหม้และมีทิศทางเข้าสู่ศูนย์กลางของห้องเผาไหม้ โดยผลจำลองการเผาไหม้ด้วยหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบใหม่ยังทำให้กระแสการไหลของก๊าซร้อนมีความเร็วสูงสุดของการหมุนควงที่มีความหนาแน่นมากกว่าการใช้หัวพ่นแบบดั้งเดิม ดังแสดงในรูปที่ 6.4 และ 6.5

(จ) กระแสการไหลของก๊าซร้อนที่ตำแหน่ง $x/D = 1.375$ ซึ่งเป็นตำแหน่งที่อยู่ห่างจากทางออกของอากาศปฐมภูมิและอากาศทุติยภูมิมากที่สุด แต่อยู่ใกล้ทางออกห้องเผาไหม้ช่วยมากที่สุด ซึ่งเป็นช่องการไหลที่มีขนาดเล็ก (Nozzle area) ก่อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้หลัก ทำให้โมเมนตัมที่เกิดจากการหมุนควงของอากาศทุติยภูมิที่ทิศทางเข้าสู่ศูนย์กลางและหมุนด้วยความเร็วสูงที่สุดมากกว่าตำแหน่งก่อนหน้า โดยผลจำลองการเผาไหม้ด้วยหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบใหม่ยังทำให้กระแสการไหลของก๊าซร้อนมีความเร็วสูงสุดของการหมุนควงที่มีความหนาแน่นมากกว่าการใช้หัวพ่นแบบดั้งเดิม โดยโมเมนตัมของการหมุนควงที่เพิ่มขึ้นมีสาเหตุมาจากกระแสการไหลเกิดความหนาแน่นสูงเมื่อผ่านพื้นที่หน้าตัดที่เล็กทำให้จำเป็นต้องลดความหนาแน่นโดยการหาทางออกหลักตามสมการ $\dot{m}_{\text{nozzle}} = \rho A_{\text{nozzle}} v$ ดังแสดงในรูปที่ 6.4 และ 6.5

3. ผลจำลองอุณหภูมิจากการเผาไหม้



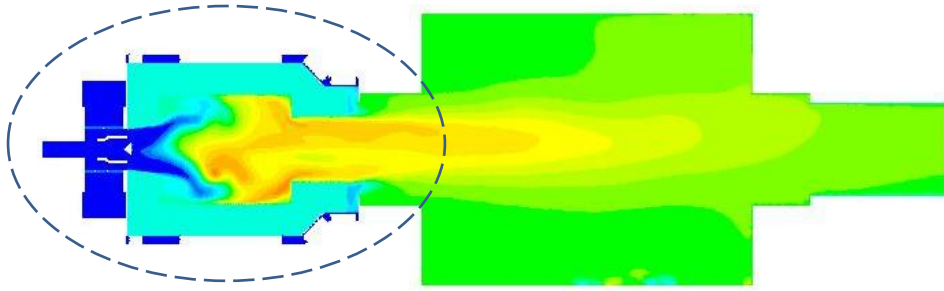
(ก) ผลจำลองอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วยและห้องเผาไหม้หลัก (เคลวิน)



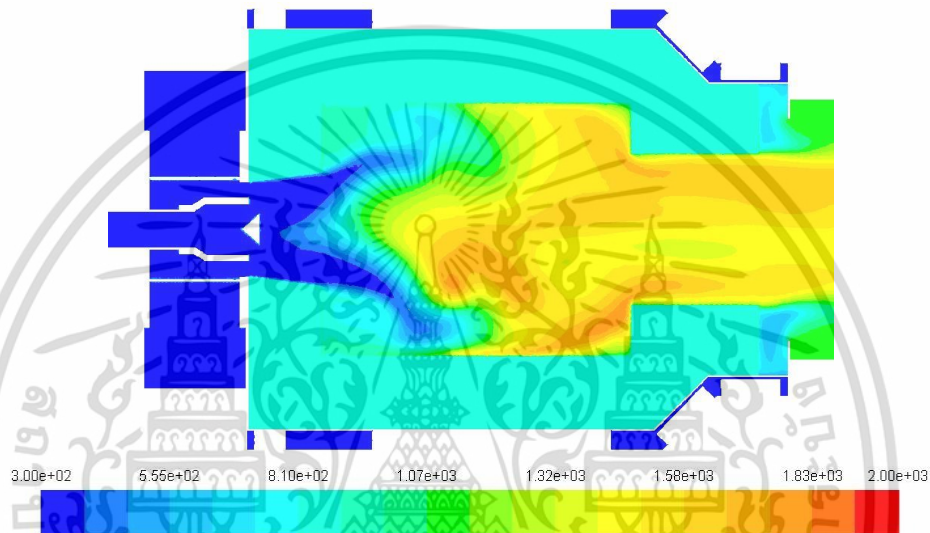
(ข) ผลจำลองอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วย (เคลวิน)

รูปที่ 6.6 ผลจำลองอุณหภูมิจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลด้วยหัวพ่นแบบดั้งเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ในการนำเอกสารนี้ไปใช้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ผลจำลองอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วยและห้องเผาไหม้หลัก (เคลวิน)



(ข) ผลจำลองอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วย (เคลวิน)

รูปที่ 6.7 ผลจำลองอุณหภูมิจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลด้วยหัวพ่นแบบใหม่

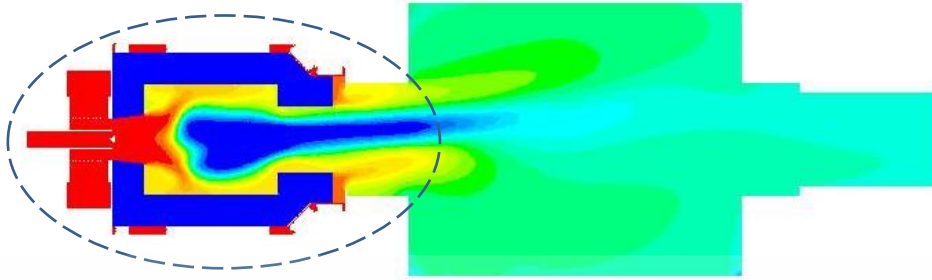
จากรูปที่ 6.6 และ 6.7 แสดงผลจำลองเชิงตัวเลขของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วยและห้องเผาไหม้หลักจากการเผาไหม้ชีวมวลด้วยหัวพ่นแบบใหม่ โดยการศึกษาจะนำเสนอผลจำลองภายในห้องเผาช่วยซึ่งมีสอดคล้องกับผลจำลองสนามการไหลในหัวข้อก่อนหน้านี้ เนื่องด้วยผลอุณหภูมิที่เกิดขึ้นนั้นเกิดจากการทำปฏิกิริยาการเผาไหม้ระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศทำให้ผลการจำลองการกระจายของอุณหภูมิบ่งบอกถึงตำแหน่งที่มีการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง และเมื่อเชื้อเพลิงกับอากาศไหลเข้าสู่ห้องเผาไหม้ช่วย เชื้อเพลิงอยู่ภายใต้กระแสการไหลของก๊าซร้อนทำให้การถ่ายเทความร้อนด้วยการพาและการแผ่รังสีไปยังพื้นผิวของเชื้อเพลิงส่งผลให้อุณหภูมิสูงขึ้นจนถึงจุดเดือดของน้ำจนน้ำเกิดการระเหยและถูกขับออกมาภายนอก จากนั้นอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เชื้อเพลิงจะถูกสลายด้วยความร้อนและปล่อยสารระเหยออกมาผสมกับอากาศที่อยู่รอบ ๆ เมื่ออุณหภูมิถึงจุดติดไฟจะเกิดเป็นเปลวไฟขึ้นรอบ ๆ เชื้อเพลิง เปลวไฟที่เกิดขึ้นก็ให้ความร้อนไปยังเชื้อเพลิงส่งเสริมให้การ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

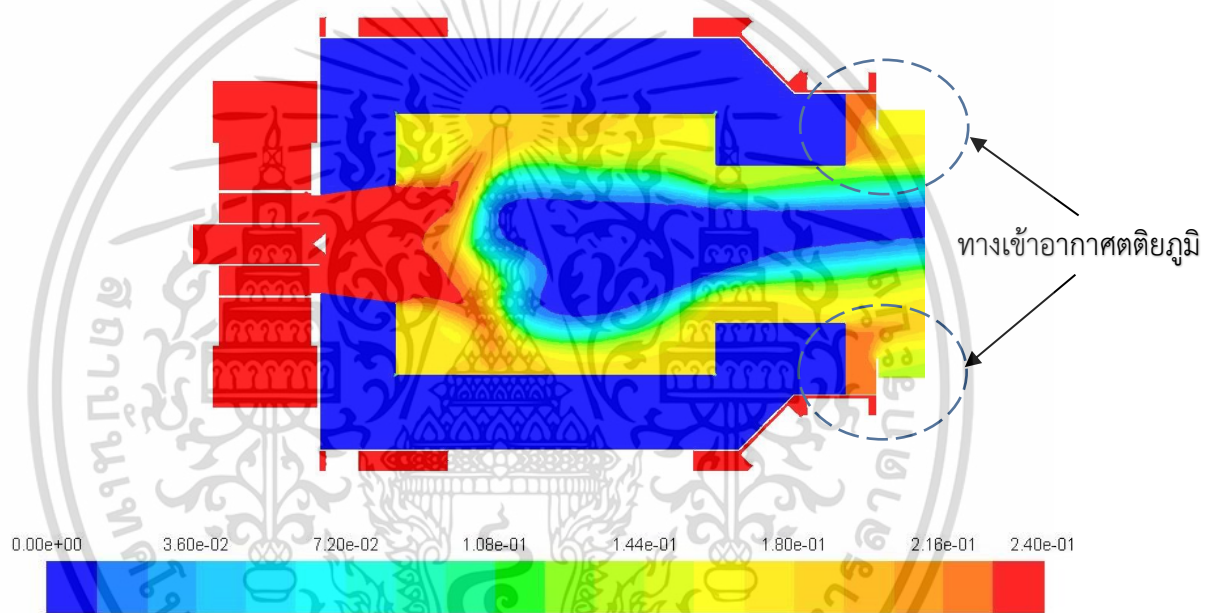
ปล่อยสารระเหยและเกิดการเผาไหม้ดีขึ้น จากนั้นจะเป็นการเผาไหม้ผ่านซาร์จนกระทั่งเหลือเป็นซีเถ้า จากผลจำลองของอุณหภูมิ พบว่าการเผาไหม้บริเวณหลังวัตถุขวางการไหลของหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบใหม่ในตำแหน่ง $x/D = 0.375$ ทำให้เกิดอุณหภูมิและการกระจายที่สูงกว่าเนื่องจากกระแสการไหลของก๊าซร้อนบริเวณนั้นเกิดความปั่นป่วนจากการหมุนควงของกระแสการไหลที่สูงกว่าการใช้หัวพ่นแบบดั้งเดิมดังแสดงการเปรียบเทียบในรูปที่ 6.6 สำหรับการเผาไหม้ด้วยการใช้หัวพ่นแบบเก่าจะเกิดขึ้นในตำแหน่งห่างจากหัวพ่นเป็นระยะหนึ่งก่อนเป็นผลมาจากกระแสการไหลที่ความเร็วในแนวแกนมีค่าสูง และเกิดการกระจายตัวด้วยความเร็วในแนวสัมผัสที่มีค่าต่ำตามผลจำลองสนามเวกเตอร์การไหลในรูปที่ 6.1 แต่หากสังเกตบริเวณห่างจากวัตถุขวางการไหลของการใช้หัวพ่นเชื้อเพลิงแบบใหม่ซึ่งเกิดการกระจายได้ดีกว่า ซึ่งมีทิศทางเข้าสู่ผนังห้องเผาไหม้ตามทิศทางการกระจายของสนามเวกเตอร์การไหล เนื่องจากความเร็วในแนวแกนมีค่าต่ำแต่ความเร็วในแนวสัมผัสมีค่าสูงดังแสดงในรูปที่ 6.2 และสำหรับผลการจำลองการเผาไหม้โดยรวม พบว่า การเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลด้วยหัวพ่นแบบใหม่มีอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ 1970 เคลวิน ดังแสดงในรูปที่ 6.6 ส่วนหัวพ่นแบบดั้งเดิมมีอุณหภูมิอยู่ที่ 1930 เคลวิน ดังแสดงในรูปที่ 6.7 โดยค่าอุณหภูมิของหัวพ่นแบบใหม่สูงกว่าเล็กน้อย แต่การใช้หัวพ่นแบบใหม่ทำให้เกิดการกระจายอุณหภูมิที่ดีกว่าทั้งในห้องเผาไหม้ช่วยและห้องเผาไหม้หลัก อีกทั้งส่งผลให้เชื้อเพลิงเกิดการเผาไหม้ตั้งแต่หลังวัตถุขวางการไหลเป็นต้นมา

หากพิจารณาดำเนินที่อากาศตติยภูมิเข้าสู่ห้องเผาไหม้ในตำแหน่งหลังจาก $x/D = 1.375$ พบว่า อุณหภูมิของการเผาไหม้จากตำแหน่งที่อากาศเข้าด้านบนมีค่าสูงกว่าทางเข้าด้านล่าง เนื่องจากอนุภาคเชื้อเพลิงที่มีขนาดเล็กซึ่งมีน้ำหนักเบา เกิดการลอยขึ้นด้านบนและทำการเผาไหม้ได้ดีกว่าอนุภาคเชื้อเพลิงที่มีขนาดใหญ่ซึ่งตกลงมาด้านล่างของห้องเผาไหม้ตามแรงโน้มถ่วงของโลก หากเปรียบเทียบอุณหภูมิในตำแหน่งเดียวกันแต่เกิดจากการใช้หัวพ่นที่แตกต่างกัน พบว่าอุณหภูมิจากการใช้หัวพ่นแบบเชื้อเพลิงแบบดั้งเดิมมีค่าสูงกว่าการใช้หัวพ่นเชื้อเพลิงแบบใหม่ เนื่องจากการเผาไหม้อนุภาคเชื้อเพลิงด้วยหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบใหม่ทำให้อนุภาคเชื้อเพลิงมีการเผาไหม้ที่ดีทำให้เหลืออนุภาคซาร์น้อยกว่า ส่งผลต่ออุณหภูมิในตำแหน่งที่อากาศตติยภูมิเข้ามาทำการเผาไหม้กับเชื้อเพลิงที่เหลือจากห้องเผาไหม้ช่วยอีกครั้งมีค่าต่ำ ซึ่งสามารถศึกษาได้จากผลจำลองสัดส่วนมวลออกซิเจนในหัวข้อต่อไป

4. ผลจำลองสัดส่วนโดยมวลของออกซิเจน

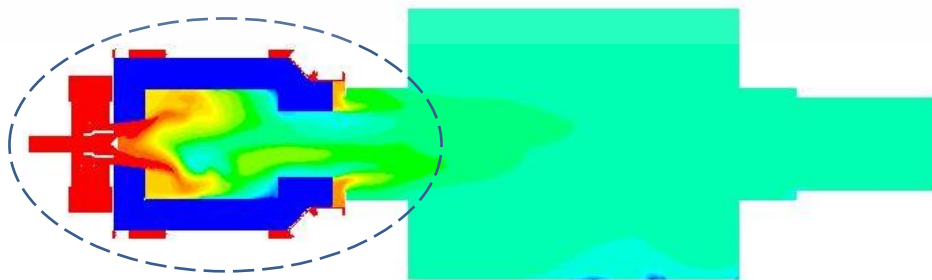


(ก) ผลจำลองสัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนภายในห้องเผาไหม้ช่วยและห้องเผาไหม้หลัก



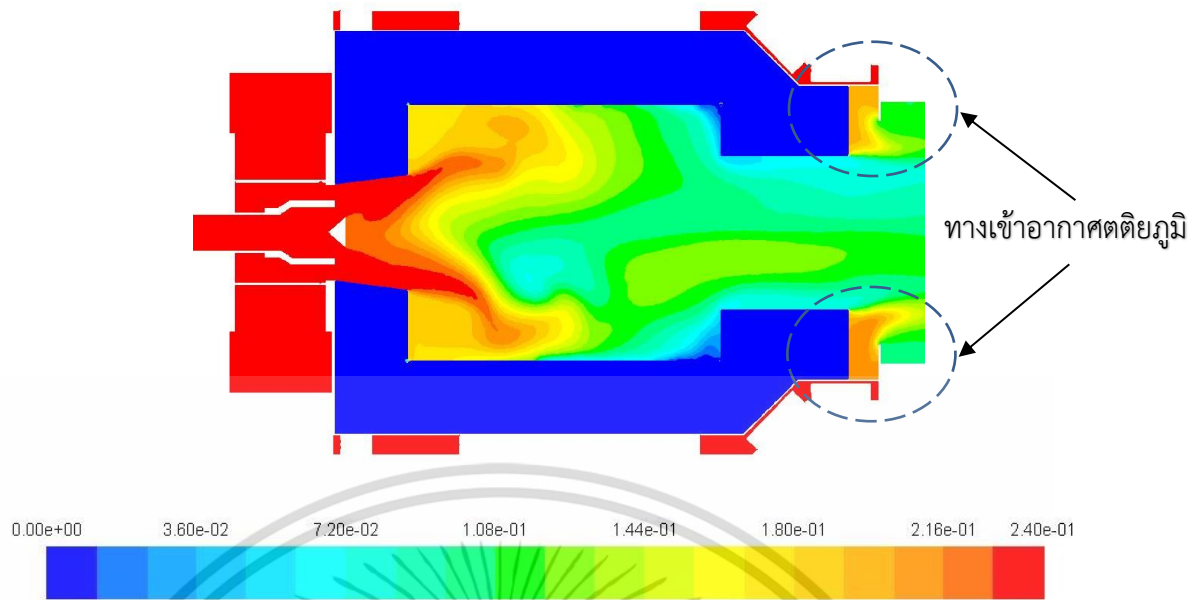
(ข) ผลจำลองสัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนภายในห้องเผาไหม้ช่วย

รูปที่ 6.8 ผลจำลองสัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนของการเผาไหม้ชีวมวลด้วยหัวพ่นแบบดั้งเดิม



(ค) ผลจำลองสัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนภายในห้องเผาไหม้ช่วยและห้องเผาไหม้หลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



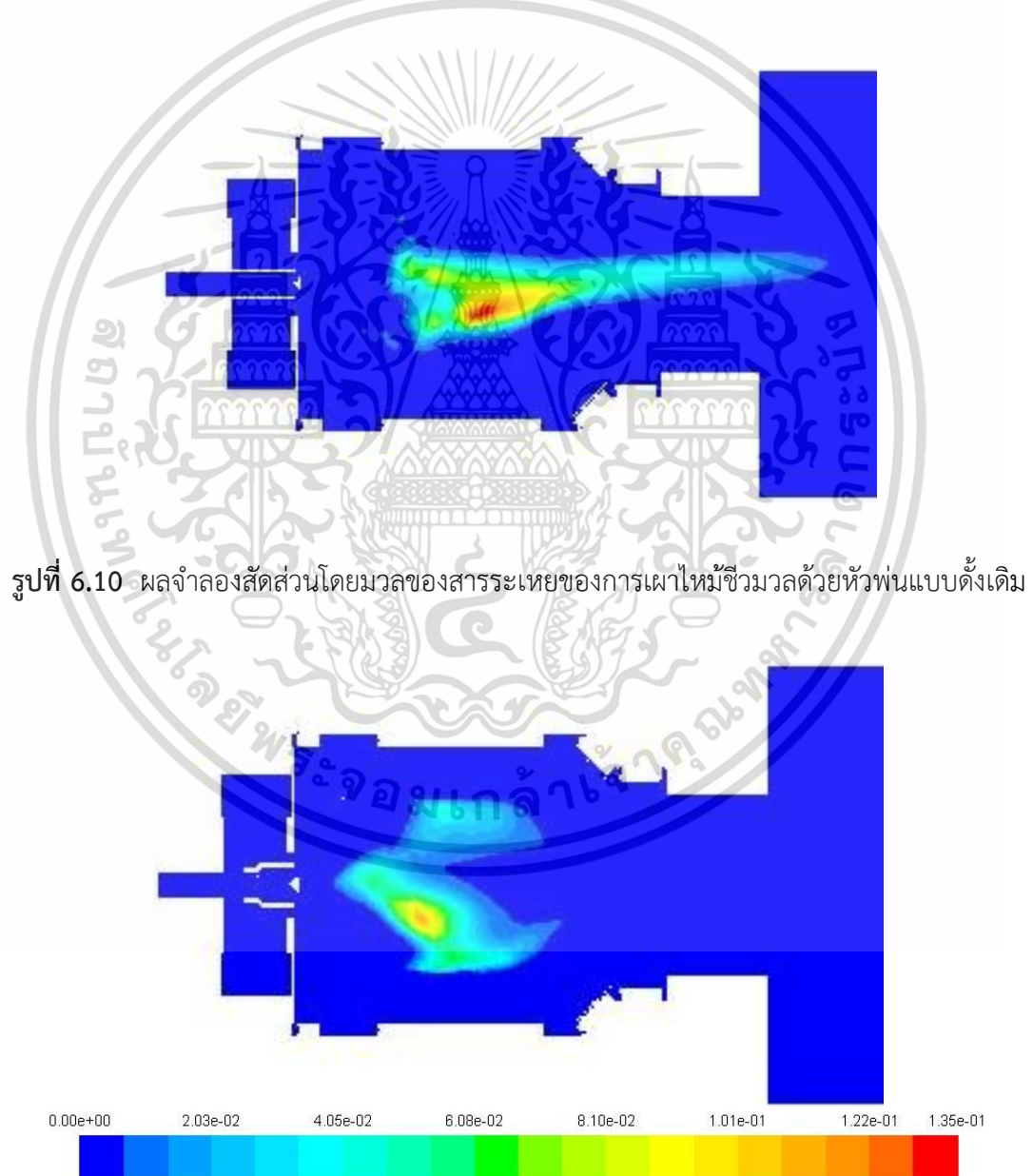
(ข) ผลจำลองสัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนภายในห้องเผาไหม้ช่วย

รูปที่ 6.9 ผลจำลองสัดส่วนโดยมวลออกซิเจนของการเผาไหม้ชีวมวลด้วยหัวพ่นแบบใหม่

รูปที่ 6.8 และ 6.9 แสดงผลจำลองสัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนจากการเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้ ซึ่งผลจำลองพบว่าการเผาไหม้เชื้อเพลิงด้วยหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบใหม่ซึ่งทำให้เกิดกระแสการไหลย้อนภายในในบริเวณวัตถุขวางการไหลที่ดีกว่าการใช้หัวพ่นเชื้อเพลิงแบบดั้งเดิม เนื่องจากวัตถุขวางกั้นการไหลที่มีขนาดใหญ่ขึ้นทำให้บริเวณที่มีความดันต่ำใหญ่ขึ้นกว่าเดิม ซึ่งเป็นผลให้เกิดอัตราการเผาไหม้ที่ดีบริเวณหลังวัตถุขวางการไหล สัดส่วนมวลของออกซิเจนในบริเวณนั้นจึงมีค่าต่ำกว่า หากพิจารณาโดยรวมจะพบว่า การใช้หัวพ่นเชื้อเพลิงแบบใหม่ทำให้เชื้อเพลิงกับอากาศเกิดการคลุกเคล้ากันได้ดี ทำให้สัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนภายในห้องเผาไหม้ช่วยมีค่าต่ำแต่ยังคงเหลืออยู่ แสดงให้เห็นว่าการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันผสมเชื้อเพลิงกับอากาศและมีปริมาณเพียงพอต่อการเผาไหม้เชื้อเพลิง ซึ่งแตกต่างจากการใช้หัวพ่นเชื้อเพลิงแบบดั้งเดิมที่ตำแหน่งบริเวณกลางห้องเผาไหม้มีสัดส่วนมวลออกซิเจนเป็นศูนย์ซึ่งบ่งบอกถึงอากาศไม่เพียงพอต่อการเผาไหม้ เนื่องจากการใช้หัวพ่นเชื้อเพลิงแบบดั้งเดิมทำให้การคลุกเคล้าระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศที่ไม่ดีเท่ากับการใช้หัวพ่นเชื้อเพลิงแบบใหม่ ส่งผลให้เชื้อเพลิงที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้เริ่มมีการเผาไหม้ช้ากว่าและเกิดการเผาไหม้ไม่หมด ทำให้การเผาไหม้ต้องอาศัยอากาศตติยภูมิช่วยในการเผาไหม้อีกครั้ง เป็นผลให้สัดส่วนออกซิเจนที่พบบริเวณทางเข้าอากาศตติยภูมิจากการเผาไหม้ด้วยหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบเก่ามีค่าต่ำกว่าการใช้หัวพ่นแบบใหม่

สำหรับอากาศตติยภูมิเป็นอากาศที่ทำให้เกิดการเผาไหม้กับอนุภาคเชื้อเพลิงที่เหลือจากการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ช่วย และเนื่องมาจากอนุภาคเชื้อเพลิงที่อยู่ในห้องเผาไหม้มีขนาดที่ไม่เท่ากัน ดังแสดงในตารางที่ 4.3 จากผลจำลองพบว่าสัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนตำแหน่งที่อากาศตติยภูมิเข้ามาทางด้านบนมีค่าต่ำกว่าทางเข้าด้านล่าง ซึ่งมีสาเหตุมาจากอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ตกสู่ด้านล่างของเตา ส่วนอนุภาคที่มีขนาดเล็กสามารถลอยขึ้นไปบนผนังเตาได้ โดยขนาดของอนุภาคมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาของการเผาไหม้ จึงทำให้อนุภาคที่มีขนาดเล็กจะเผาไหม้ได้เร็วกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ [22]

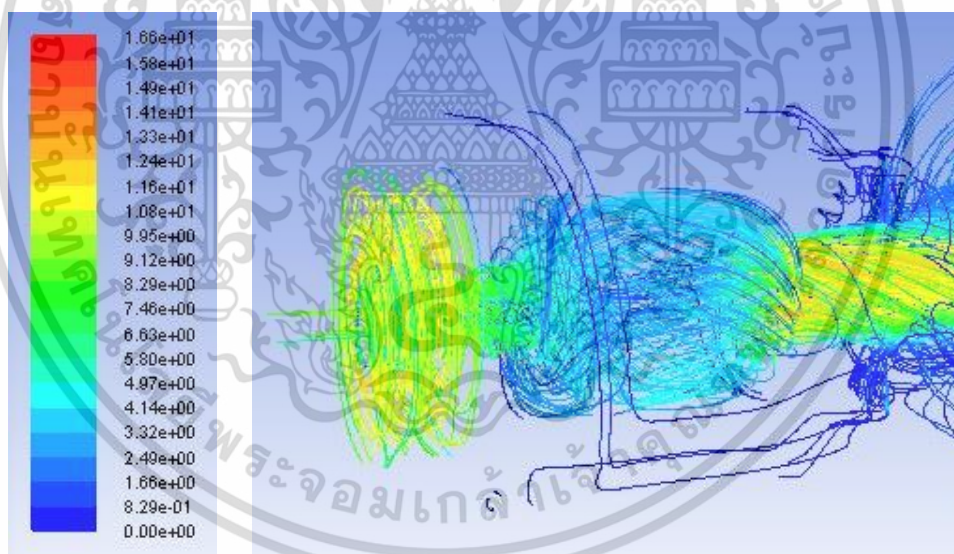
5. ผลจำลองสัดส่วนโดยมวลของสารระเหย



รูปที่ 6.11 ผลจำลองสัดส่วนโดยมวลของสารระเหยของการเผาไหม้ชีวมวลด้วยหัวพ่นแบบใหม่ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

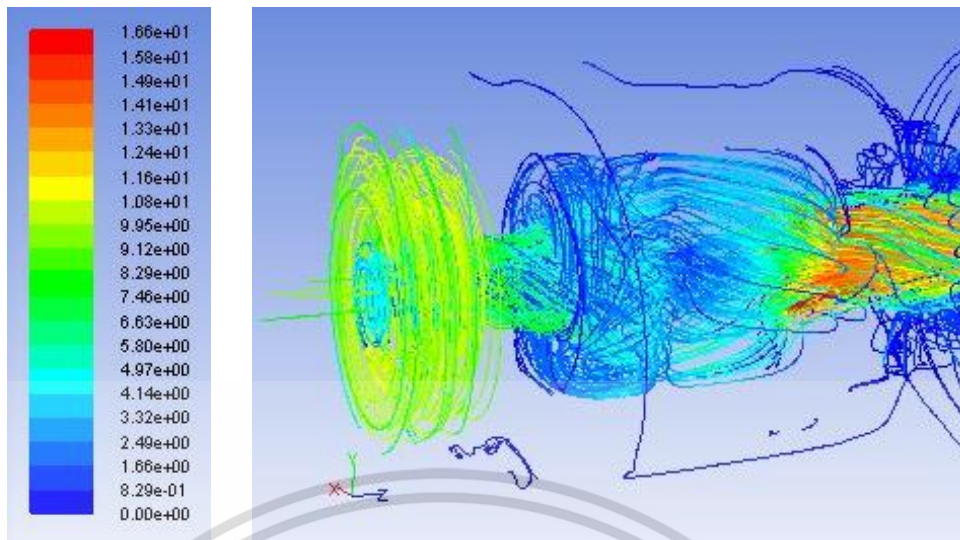
จากรูปที่ 6.10 และ 6.11 แสดงสัดส่วนมวลของสารระเหยที่เกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้ช่วยซึ่งอนุภาคเชื้อเพลิงได้ปล่อยออกมา ผลจำลองพบว่าหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบใหม่ซึ่งทำให้อากาศภายในห้องเผาไหม้เกิดความปั่นป่วนและการไหลย้อนกลับภายในที่บริเวณหลังหัวพ่นการไหลได้ดีกว่าหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบดั้งเดิมสอดคล้องกับสนามเวกเตอร์การไหลดังแสดงในรูปที่ 6.1 และ 6.2 โดยอนุภาคเชื้อเพลิงจะได้รับความร้อนจากการพาและการแผ่รังสีความร้อนจากก๊าซร้อนในห้องเผาไหม้ได้ดีกว่าส่งผลทำให้เกิดการปล่อยสารระเหยออกมาตั้งแต่บริเวณนั้น สำหรับการปล่อยสารระเหยจากการใช้หัวพ่นเชื้อเพลิงแบบใหม่มีลักษณะกระจายออกไปยังผนังห้องเผาไหม้ซึ่งเป็นผลมาจากการคลุกเคล้าที่ดีระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศที่ใช้ในการหมุนควงซึ่งมีโมเมนตัมของการหมุนควงที่ดีกว่าการใช้หัวพ่นแบบเดิม ซึ่งมีการปล่อยสารระเหยออกมาในลักษณะเป็นแนวยาวไปทางห้องเผาไหม้ นอกจากนี้ผลของการปล่อยสารระเหยออกมาจากอนุภาคเชื้อเพลิงสอดคล้องกับผลจำลองอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้ กล่าวคือ ตำแหน่งที่มีอุณหภูมิสูงจะมีสัดส่วนโดยมวลของสารระเหยสูงด้วย

6. ผลจำลองเส้นสายธารการไหลของการเผาไหม้



รูปที่ 6.12 ผลจำลองเส้นสายธารการไหลของการเผาไหม้ซึ่งมวลด้วยหัวพ่นแบบดั้งเดิม

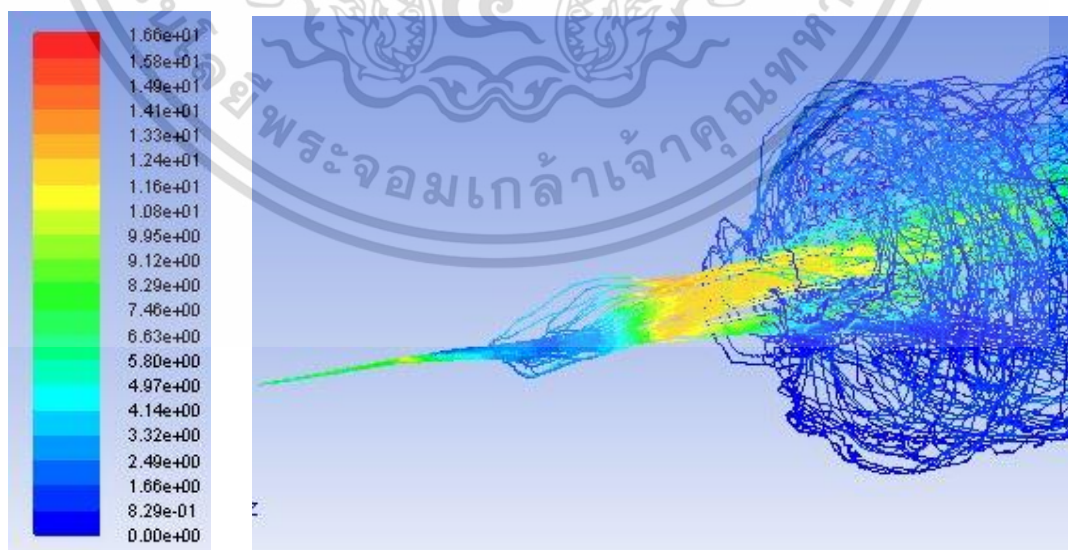
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.13 ผลจำลองเส้นสายธารการไหลของการเผาไหม้ชีวมวลด้วยหัวพ่นแบบใหม่

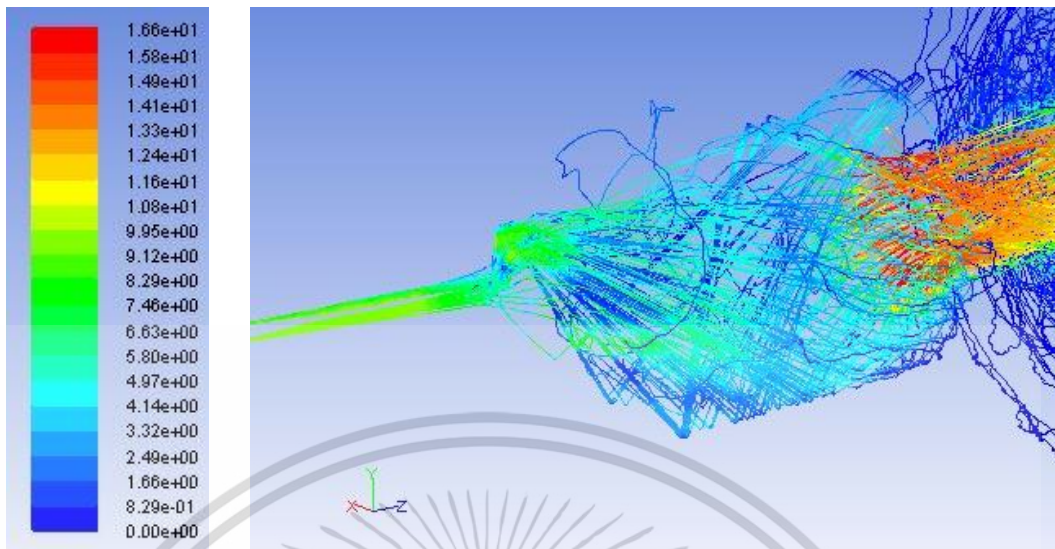
จากรูปที่ 6.12 และ 6.13 แสดงผลจำลองเส้นสายธารการไหลของการเผาไหม้ชีวมวลด้วยหัวพ่นแบบดั้งเดิมและแบบใหม่ ผลจำลองพบว่าการใช้หัวพ่นเชื้อเพลิงแบบใหม่ทำให้เกิดการไหลที่มีความปั่นป่วนมากกว่า สังเกตได้จากการเคลื่อนที่และสีของเส้นกระแสและสีของเส้น ซึ่งเป็นผลกระทบจากการปรับปรุงหัวพ่นเชื้อเพลิงที่ทำให้อากาศทุกยูนิตมีความเร็วของการหมุนควงที่มากขึ้นและยังทำให้เกิดความปั่นป่วนภายในห้องเผาไหม้ที่ดีกว่าการใช้หัวพ่นเชื้อเพลิงแบบดั้งเดิม

7. ผลจำลองเส้นทางของอนุภาคเชื้อเพลิง



รูปที่ 6.14 ผลจำลองเส้นทางของอนุภาคเชื้อเพลิงของการเผาไหม้ชีวมวลด้วยหัวพ่นแบบดั้งเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

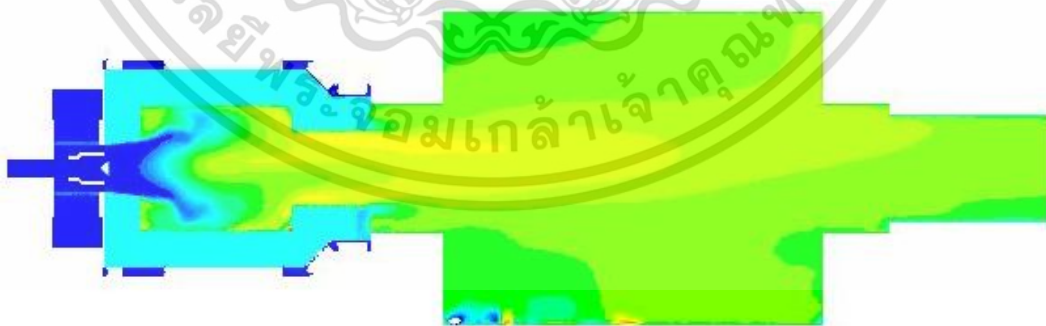


รูปที่ 6.15 ผลจำลองเส้นทางของอนุภาคเชื้อเพลิงของการเผาไหม้ชีวมวลด้วยหัวพ่นแบบใหม่

จากรูปที่ 6.14 และ 6.15 แสดงผลจำลองเส้นทางอนุภาคของการเผาไหม้ชีวมวลด้วยหัวพ่นแบบดั้งเดิมและแบบใหม่ ผลจำลองพบว่าการใช้หัวพ่นเชื้อเพลิงแบบใหม่ทำให้อนุภาคของเชื้อเพลิงเกิดการเคลื่อนที่กระจายไปยังผนังห้องเผาไหม้เป็นผลมาวตฤขวางการไหลที่มีขนาดใหญ่ขึ้นอีกทั้งยังทำให้อนุภาคเกิดความปั่นป่วนภายในห้องเผาไหม้ที่ดีกว่าการใช้หัวพ่นเชื้อเพลิงแบบดั้งเดิม

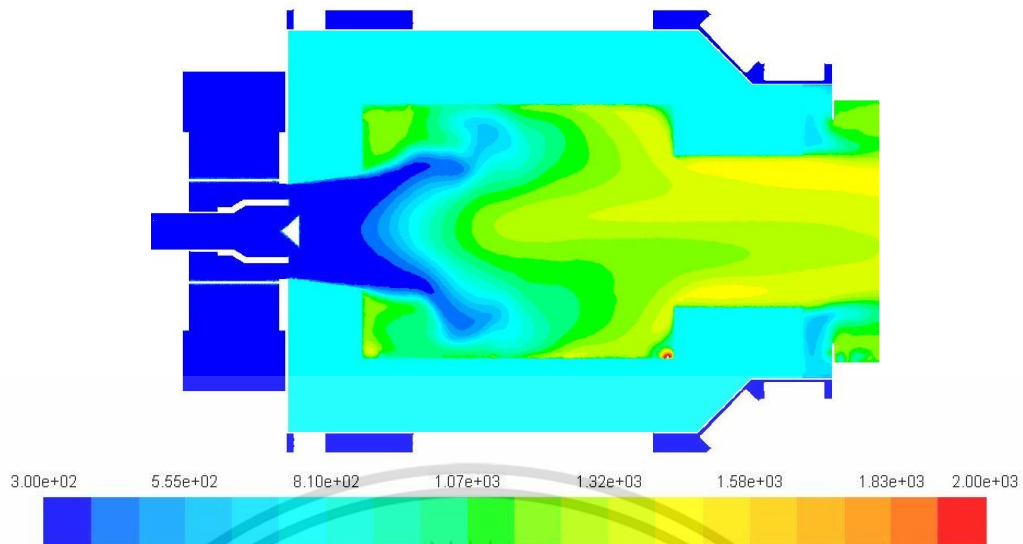
6.2.2 ศึกษาการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลทอร์รีไฟต์ด้วยหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบใหม่

1. ผลจำลองอุณหภูมิจากการเผาไหม้



(ก) ผลจำลองอุณหภูมิจากการเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้ช่วยและห้องเผาไหม้หลัก (เคลวิน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

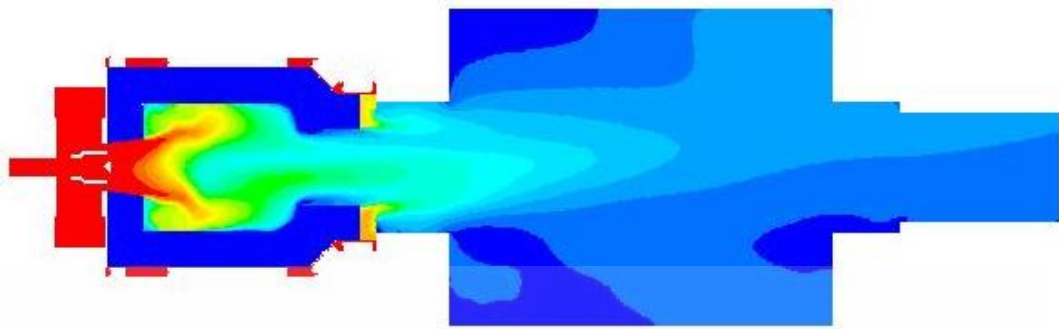


(ข) ผลจำลองอุณหภูมิจากการเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้ช่วย (เคลวิน)

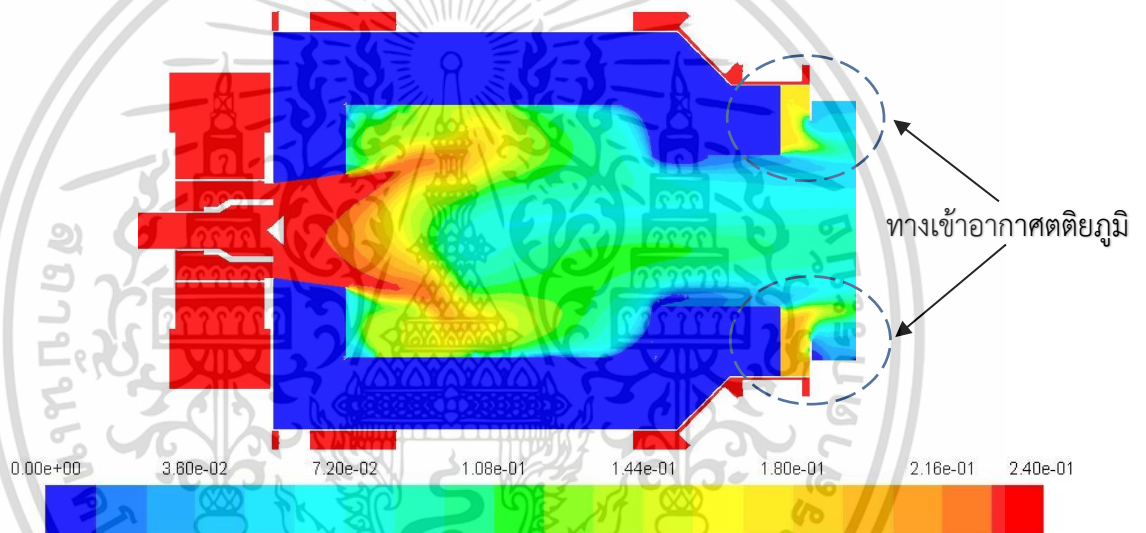
รูปที่ 6.16 ผลจำลองอุณหภูมิจากการเผาไหม้ชีวมวลทอร์รีไฟต์ด้วยหัวพ่นแบบใหม่

รูปที่ 6.16 แสดงผลจำลองอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วยและห้องเผาไหม้หลักของการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลทอร์รีไฟต์ด้วยหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบใหม่โดยใช้เงื่อนไขการจำลองที่กำลังความร้อนเทียบเท่า 300 กิโลวัตต์ อากาศส่วนเกิน 15 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนอากาศผสม : อากาศหตุติภูมิ : อากาศหตุติภูมิเป็น 25 : 65 : 10 ตามลำดับ เช่นเดียวกับการเผาไหม้ด้วยชุดทดลอง ทำให้ผลการจำลองสนามเวกเตอร์การไหลนี้เหมือนกันผลจำลองสนามการไหลของการใช้หัวพ่นเชื้อเพลิงแบบใหม่ ดังแสดงในรูปที่ 6.2 ผลจำลองอุณหภูมิจากการเผาไหม้ชีวมวลทอร์รีไฟต์พบว่า การเผาไหม้ส่วนใหญ่เกิดขึ้นในตำแหน่งห่างออกไปจากหัวพ่นที่ $x/D = 0.875$ เมื่อเทียบกับการเผาไหม้ชีวมวลด้วยหัวพ่นเชื้อเพลิงลักษณะเดียวกันจะเห็นว่าตำแหน่งที่มีการเผาไหม้ส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่ $x/D = 0.375$ ซึ่งใกล้หัวพ่นเชื้อเพลิงมากกว่า ซึ่งอาจเป็นผลมาจากอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงของการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลทอร์รีไฟต์มีค่ามากกว่าชีวมวลทำให้อากาศที่ใช้ในการเผาไหม้มีปริมาณมากขึ้น ทำให้การเผาไหม้ด้วยเชื้อเพลิงชนิดนี้เกิดความล่าช้าในการจุดติดไฟ โดยอุณหภูมิของการเผาไหม้เชื้อเพลิงชนิดนี้ที่ตำแหน่งกลางห้องเผาไหม้ช่วยประมาณ 1,400 เคลวิน ซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่าการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลที่ตำแหน่งเดียวกันซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 1,600 เคลวิน โดยอุณหภูมิที่แตกต่างกันนี้เป็นผลจากองค์ประกอบของเชื้อเพลิงที่แตกต่างกัน ดังตารางที่ 3.3

2. ผลจำลองสัดส่วนโดยมวลของออกซิเจน



(ก) ผลจำลองสัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนภายในห้องเผาไหม้ช่วยและห้องเผาไหม้หลัก



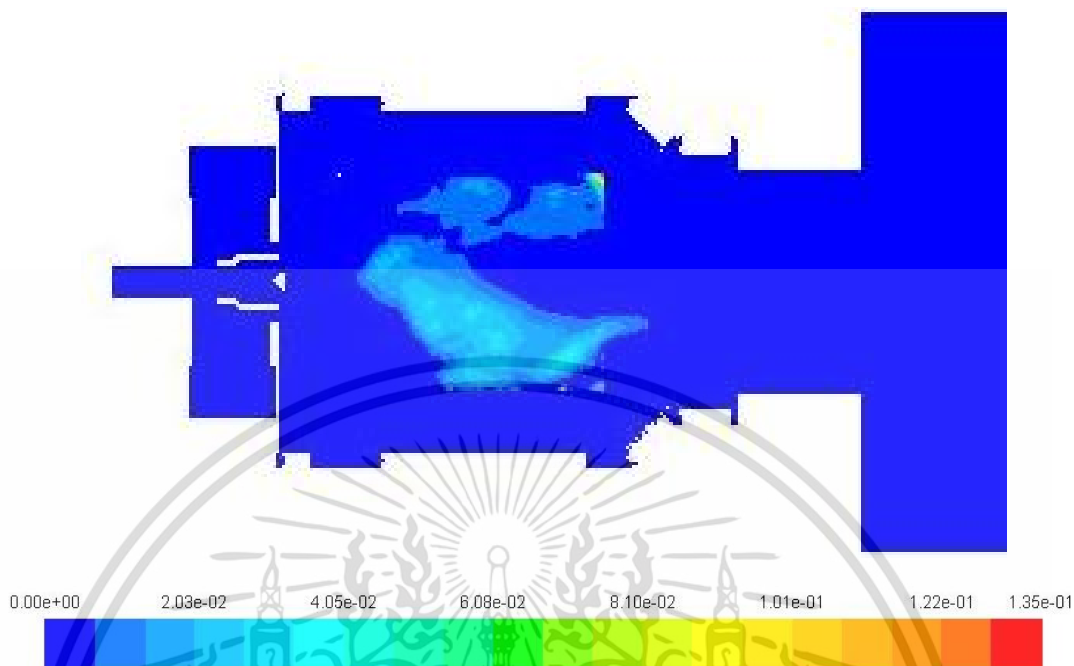
(ข) ผลจำลองสัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนภายในห้องเผาไหม้ช่วย

รูปที่ 6.17 ผลจำลองสัดส่วนมวลออกซิเจนของการเผาไหม้ชีวมวลทอร์รีไฟต์ด้วยหัวพ่นแบบใหม่

รูปที่ 6.17 แสดงผลจำลองสัดส่วนโดยมวลออกซิเจนภายในห้องเผาไหม้ช่วยและห้องเผาไหม้หลักของการเผาไหม้ชีวมวลทอร์รีไฟต์ด้วยหัวพ่นแบบใหม่ ผลจำลองพบว่าโดยภาพรวมของห้องเผาไหม้ช่วยมีสัดส่วนมวลออกซิเจนที่ไม่เท่ากับศูนย์นั่นคือมีปริมาณออกซิเจนเพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลทอร์รีไฟต์และหากพิจารณาในตำแหน่งหลังหัวพ่นเชื้อเพลิงจะพบสัดส่วนมวลออกซิเจนที่มีค่าสูงทำให้อัตราการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงในตำแหน่งดังกล่าวต่ำและเมื่อพิจารณาในตำแหน่งที่ห่างจากหัวพ่นจะพบว่าสัดส่วนมวลออกซิเจนค่อย ๆ ต่ำลงนั่นหมายถึงมีการเผาไหม้เกิดขึ้นเมื่อทำการเปรียบเทียบกับผลของอุณหภูมิต่ำ (รูปที่ 6.16) พบว่ามีความสอดคล้องกันและหากพิจารณาตำแหน่งอากาศตติยภูมิเข้ามาในห้องเผาไหม้พบว่ามีความคล้ายคลึงกับการเผาไหม้ชีวมวล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

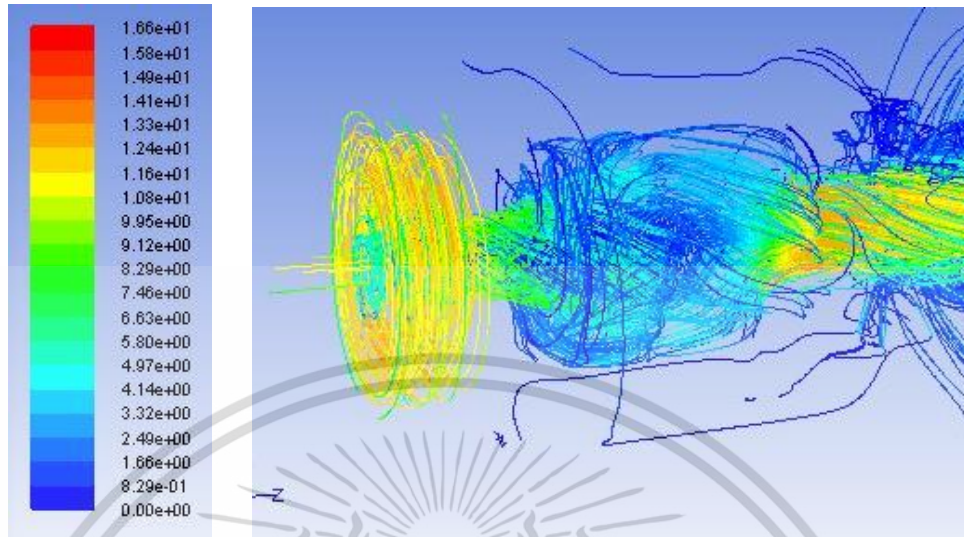
3. ผลจำลองสัดส่วนโดยมวลของสารระเหย



รูปที่ 6.18 สัดส่วนโดยมวลของสารระเหยของการเผาไหม้ซีมวลทอรรีไฟด์ด้วยหัวฟันแบบใหม่

รูปที่ 6.18 แสดงสัดส่วนโดยมวลของสารระเหยของการเผาไหม้เชื้อเพลิงซีมวลทอรรีไฟด์ด้วยหัวฟันเชื้อเพลิงแบบใหม่ที่อนุภาคเชื้อเพลิงปล่อยออกมา ผลจำลองพบว่าเชื้อเพลิงซีมวลทอรรีไฟด์ปล่อยสารระเหยออกมาในลักษณะเดียวกับการปล่อยสารระเหยของซีมวลแต่เริ่มปล่อยในตำแหน่งที่ห่างจากหัวฟันเชื้อเพลิงมากกว่า โดยเชื้อเพลิงซีมวลเริ่มมีการปล่อยสารระเหยที่ตำแหน่ง $x/D = 0.375$ แต่เชื้อเพลิงซีมวลทอรรีไฟด์เริ่มมีการปล่อยสารระเหยที่ตำแหน่ง $x/D = 0.625$ ซึ่งเป็นผลมาจากอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ใช้สำหรับเผาไหม้เชื้อเพลิงซีมวลทอรรีไฟด์มีค่ามากกว่าซีมวล ปริมาณอากาศที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้จึงเพิ่มขึ้นตามไปด้วยส่งผลให้การปล่อยสารระเหยของเชื้อเพลิงซีมวลทอรรีไฟด์เกิดขึ้นช้ากว่าซีมวล นอกจากนี้ยังเป็นผลมาจากองค์ประกอบของซีมวลทอรรีไฟด์ที่มีสารระเหยน้อยกว่าซีมวลดังตารางที่ 3.3 (สารระเหยซีมวลร้อยละ 76.68 ,ซีมวลทอรรีไฟด์ร้อยละ 49.50)

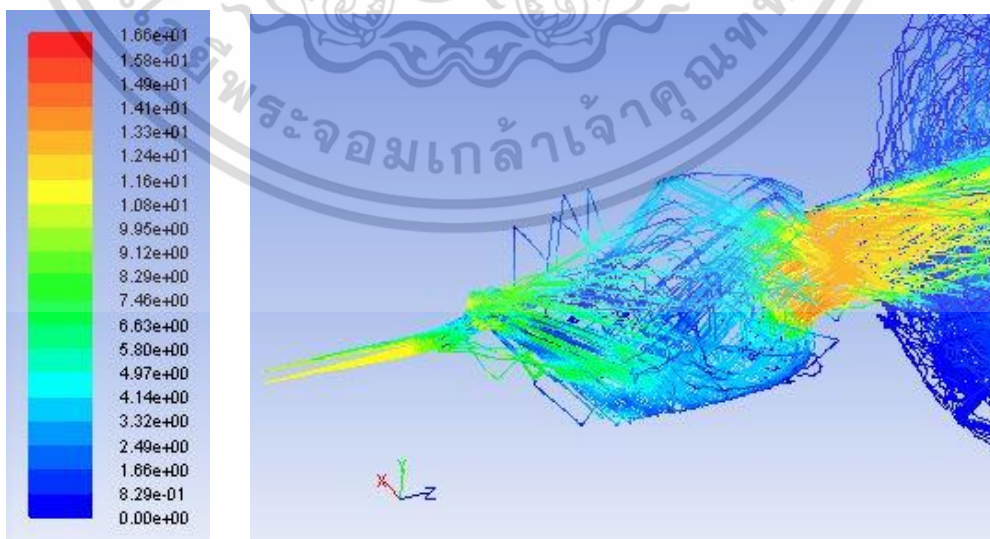
4. ผลจำลองเส้นกระแสของการเผาไหม้



รูปที่ 6.19 ผลจำลองเส้นสายธารการไหลของการเผาไหม้ชีวมวลทอร์รีไฟต์ด้วยหัวพ่นแบบใหม่

จากรูปที่ 6.19 แสดงผลจำลองเส้นสายธารการไหลของการเผาไหม้ชีวมวลทอร์รีไฟต์ด้วยหัวพ่นแบบใหม่ซึ่งผลจำลองมีลักษณะเดียวกับเส้นกระแสจากการเผาไหม้ชีวมวลด้วยหัวพ่นลักษณะเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 6.13 แต่มีความเร็วของการหมุนควงที่สูงกว่ากรณีของชีวมวล โดยความเร็วที่เพิ่มสูงขึ้นเป็นผลจากอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงของการเผาไหม้เชื้อเพลิงชนิดนี้มีค่าสูงกว่าชีวมวล

5. ผลจำลองเส้นทางของอนุภาคเชื้อเพลิง



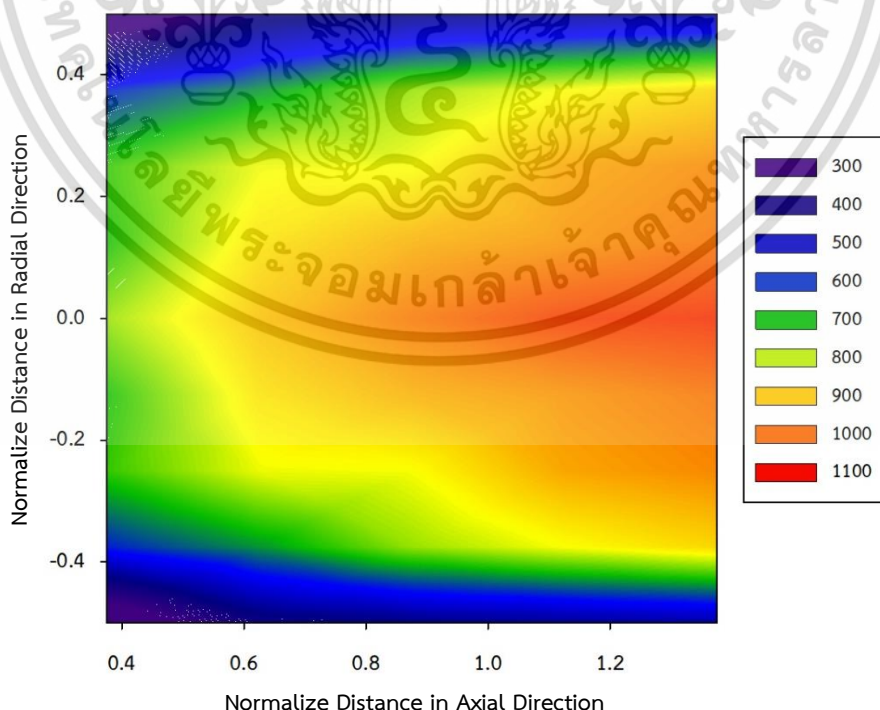
รูปที่ 6.20 ผลจำลองเส้นทางของอนุภาคเชื้อเพลิงของการเผาไหม้ชีวมวลทอร์รีไฟต์ด้วยหัวพ่นแบบใหม่ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6.20 แสดงผลจำลองเส้นทางของอนุภาคเชื้อเพลิงของการเผาไหม้ชีวมวลทอร์รีไฟต์ด้วยหัวพ่นแบบใหม่ โดยผลจำลองมีลักษณะคล้ายกับเส้นทางของอนุภาคเชื้อเพลิงของการเผาไหม้ชีวมวลด้วยหัวพ่นลักษณะเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 6.15 แต่ด้วยความเร็วที่เพิ่มขึ้นของอากาศปฐุมภูมิและอากาศทุติยภูมิซึ่งเป็นผลกระทบจากอัตราส่วนอากาศกับเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้ชีวมวลทอร์รีไฟต์ทำให้อนุภาคเชื้อเพลิงชีวมวลทอร์รีไฟต์ซึ่งมีน้ำหนักเบากว่าชีวมวลเกิดการกระจายภายในห้องเผาไหม้ที่ดีกว่า

6.2 ผลการเผาไหม้จากชุดทดลอง

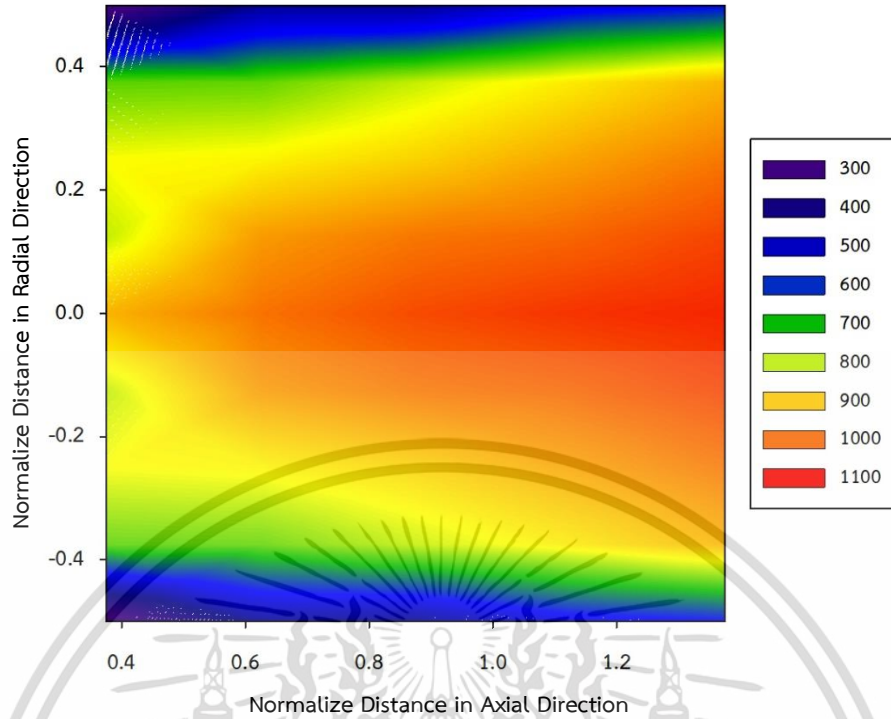
การทดลองการเผาไหม้ด้วยชุดทดลองของงานวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาสมรรถนะการทำงานของหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบดั้งเดิมและแบบใหม่โดยการเพิ่มพื้นที่ช่องการไหลของอากาศปฐุมภูมิ โดยศึกษาที่กำลังความร้อนเทียบเท่า 300 กิโลวัตต์ อากาศส่วนเกิน 15 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนอากาศปฐุมภูมิ : อากาศทุติยภูมิ : อากาศตติยภูมิ เป็น 25 : 65 : 10 ตามตารางที่ 4.2 ผลการทดลองถูกแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ การเปรียบเทียบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลด้วยหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบดั้งเดิมและแบบใหม่ และการศึกษาการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลทอร์รีไฟต์ด้วยหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบใหม่ ซึ่งมีผลการทดลองดังต่อไปนี้

6.2.1 การเปรียบเทียบผลการทดลองเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลด้วยหัวพ่นแบบดั้งเดิมและแบบใหม่



(ก) อุณหภูมิของการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลด้วยหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบดั้งเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) อุณหภูมิของการเผาไหม้เชื้อเพลิงด้วยหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบใหม่

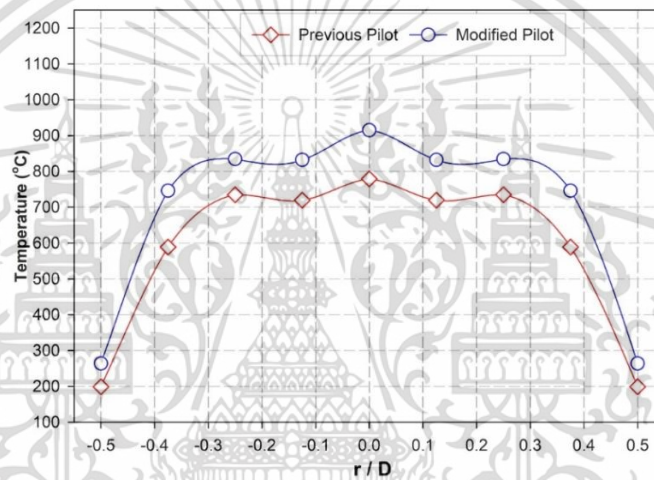
รูปที่ 6.21 อุณหภูมิของการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลภายในห้องเผาไหม้ช่วย

หัวพ่นเชื้อเพลิงแบบดั้งเดิมซึ่งมีขนาดและลักษณะดังแสดงในรูปที่ 4.1 และ 5.12 ตามลำดับ อากาศปฐมภูมิกับเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ด้วยความเร็วสูง แต่อากาศทุติยภูมิที่ผ่านชุดไบพิดโค้งมีความเร็วต่ำดังแสดงด้วยผลจำลองสนามเวกเตอร์การไหลรูปที่ 6.3 ทำให้กระแสการไหลเกิดการไหลย้อนกลับและการหมุนควงของอากาศทุติยภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วยไม่ดี อีกทั้งยังส่งผลให้เกิดการคลุกเคล้าระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศไม่ดีด้วย ซึ่งสอดคล้องกับผลจำลองสนามเวกเตอร์การไหลดังรูปที่ 6.1, 6.4 และ 6.5 เป็นผลทำให้เกิดอัตราการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่ต่ำด้วยและหากสังเกตจากรูปที่ 6.21(ก) ณ ตำแหน่ง $x/D = 0.375$ (บริเวณหน้าหัวพ่น) อัตราการเกิดการเผาไหม้มีค่าต่ำและการเผาไหม้ส่วนใหญ่เกิดขึ้นในตำแหน่งที่ห่างไกลจากหัวพ่นเชื้อเพลิง (ณ ตำแหน่ง $x/D = 0.875, 1.125, 1.375$) ซึ่งสอดคล้องกับผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิดังแสดงในรูปที่ 6.6

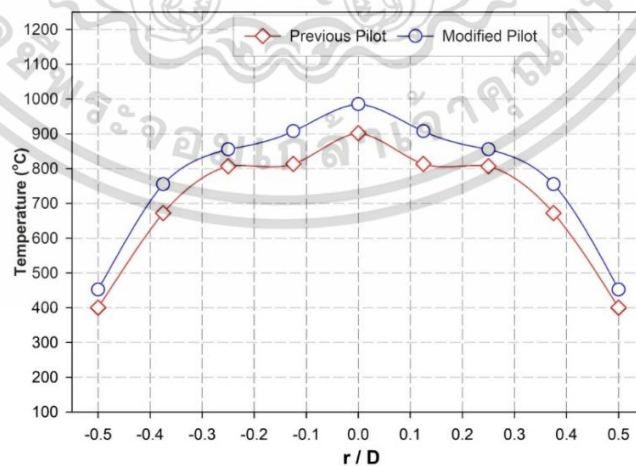
สำหรับหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบใหม่ซึ่งมีขนาดและลักษณะดังแสดงในรูปที่ 4.1 และ 5.12 ตามลำดับ อากาศปฐมภูมิกับเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ด้วยความเร็วที่ต่ำกว่า แต่อากาศทุติยภูมิที่ผ่านชุดไบพิดโค้งมีความเร็วสูงกว่าการใช้หัวพ่นแบบดั้งเดิมดังแสดงด้วยการเปรียบเทียบผลจำลองสนามเวกเตอร์การไหลที่ตำแหน่งวัตถุขวางการไหลในรูปที่ 6.3 ทำให้กระแสการไหลที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้ช่วยเกิดการไหลย้อนกลับที่ดีกว่าและเกิดการหมุนควงของอากาศทุติยภูมิที่มีความรุนแรงมากกว่าเมื่อเทียบกับหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบดั้งเดิม ซึ่งสอดคล้องกับผลการจำลองสนามการไหลดังรูปที่ 6.2, 6.4 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ 6.5 ส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่มีค่าสูงกว่าและทำให้เกิดการเผาไหม้ตั้งแต่บริเวณหน้าหัวพ่นอีกด้วย หากสังเกตจากรูปที่ 6.21(ข) อัตราการเกิดการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงมีค่าสูงตั้งแต่ตำแหน่ง $x/D = 0.375$ (บริเวณหน้าหัวพ่น) เป็นต้นไป ทำให้อุณหภูมิของการเผาไหม้มีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับการเผาไหม้ด้วยหัวพ่นแบบดั้งเดิมและยังก่อให้เกิดการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอีกด้วย ซึ่งสอดคล้องกับผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิดังรูปที่ 6.7

หากเปรียบเทียบอุณหภูมิของการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลด้วยหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบดั้งเดิมและแบบใหม่ที่ตำแหน่ง x/D ต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 6.22 โดยที่แกน x เป็นตำแหน่งที่วัดอุณหภูมิตามแนวรัศมีของห้องเผาไหม้ และแกน y เป็นอุณหภูมิที่วัดได้ มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส ผลการทดลองพบว่า

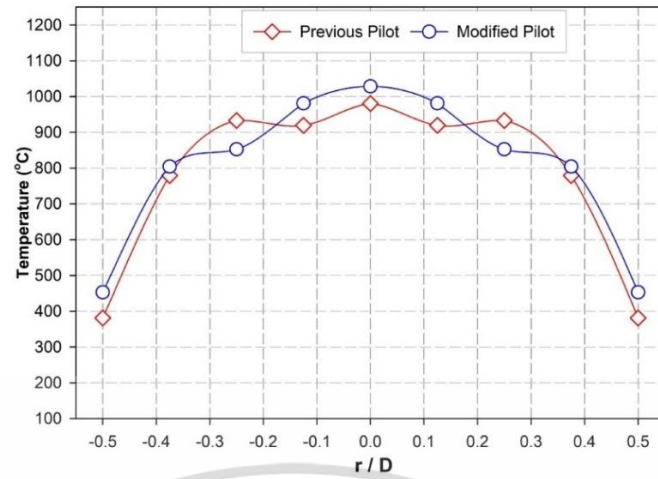
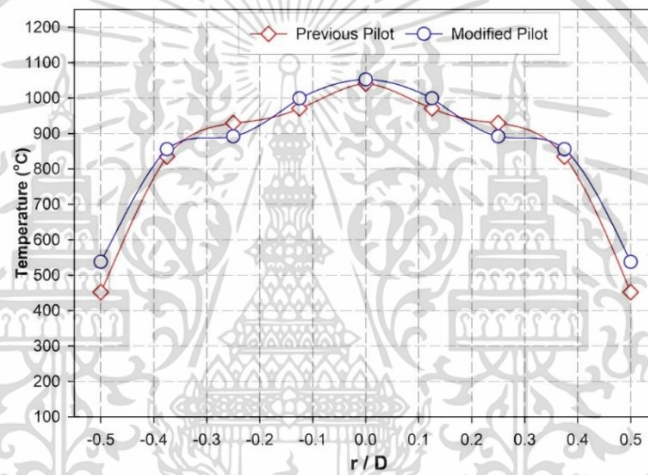
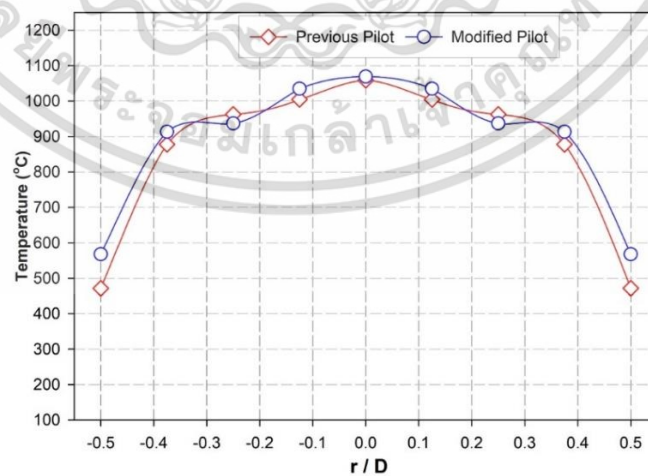


(ก) ตำแหน่ง $x/D = 0.375$



(ข) ตำแหน่ง $x/D = 0.625$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ค) ตำแหน่ง $x/D = 0.875$ (ง) ตำแหน่ง $x/D = 1.125$ (จ) ตำแหน่ง $x/D = 1.375$

รูปที่ 6.22 อุณหภูมิของการเผาไหม้ที่บริเวณหัวพ่นแบบดั้งเดิมและแบบใหม่ที่ตำแหน่ง x/D ต่าง ๆ เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์เพื่อการวิจัยเท่านั้น เมื่อเผยแพร่เห็นประโยชน์ด้านการศึกษา ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 6.22 พบว่า ผลอุณหภูมิจากการทดลองการเผาไหม้ชีวมวลด้วยหัวพ่นแบบดั้งเดิม และแบบใหม่ที่ตำแหน่งกลางเตาและผนังเตาในทุกตำแหน่ง x/D มีแนวโน้มที่มีลักษณะเดียวกัน คือ ตำแหน่งที่มีอุณหภูมิสูงที่สุดคือตำแหน่ง $r/D = 0$ หรือตำแหน่งกลางห้องเผาไหม้ และตำแหน่งที่มีอุณหภูมิต่ำที่สุดคือตำแหน่ง $r/D = 0.5$ หรือตำแหน่งผนังห้องเผาไหม้ โดยแนวโน้มเกิดขึ้นเนื่องจากเชื้อเพลิงได้ปลดปล่อยสารระเหยออกมาตั้งแต่บริเวณกลางเตาดังแสดงในรูปที่ 6.10 และ 6.11 ทำให้เกิดการเผาไหม้ตั้งแต่บริเวณกลางเตา ส่วนบริเวณผนังเตายังไม่ได้เกิดการเผาไหม้แต่มีอุณหภูมิเกิดขึ้นเนื่องจากการอุ่นเตาและถ่ายเทความร้อนด้วยการพาความร้อนจากบริเวณกลางเตา โดยอุณหภูมิจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามตำแหน่ง x/D กล่าวคือเมื่อระยะเวลาในการเผาไหม้มากขึ้น อุณหภูมิของการเผาไหม้จะดีขึ้นตามไปด้วย

การเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วย ณ ตำแหน่ง $x/D = 0.375$ รูปที่ 6.22(ก) พบว่า อุณหภูมิของการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลด้วยหัวพ่นแบบใหม่สูงกว่าในทุกตำแหน่ง r/D ของห้องเผาไหม้ช่วยและที่ตำแหน่ง $r/D = 0.125$ พบว่าเป็นตำแหน่งที่มีอุณหภูมิลดลง เนื่องจากในระหว่างการเผาไหม้เชื้อเพลิงกับอากาศในห้องเผาไหม้ช่วยมีอากาศทุติยภูมิที่มีอุณหภูมิต่ำเข้ามาทำให้เกิดการหมุนวนและการไหลย้อนกลับอยู่ตลอดเวลา ซึ่งอากาศส่วนนี้ทำให้อุณหภูมิของการเผาไหม้ลดลงที่ แสดงให้เห็นว่าอากาศทุติยภูมิมีอิทธิพลต่อการเผาไหม้เป็นอย่างยิ่ง

การเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วย ณ ตำแหน่ง $x/D = 0.625$ รูปที่ 6.22(ข) พบว่า อุณหภูมิของการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลด้วยหัวพ่นแบบใหม่ยังคงสูงกว่าในทุกตำแหน่ง r/D ของห้องเผาไหม้ช่วยและยังพบว่าที่ตำแหน่ง $r/D = 0.125$ อุณหภูมิมีแนวโน้มสูงขึ้น เนื่องจากตำแหน่ง x/D มีระยะห่างจากหัวพ่นเป็นระยะหนึ่งแล้ว อากาศทุติยภูมิที่มีอุณหภูมิต่ำจึงเข้ามามีอิทธิพลต่อการเผาไหม้น้อยลง

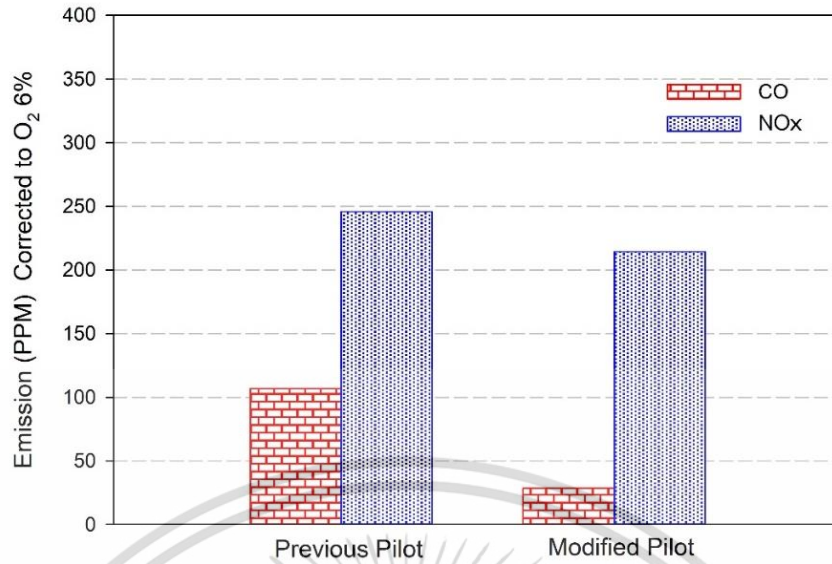
การเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วย ณ ตำแหน่ง $x/D = 0.875$ รูปที่ 6.22(ค) พบว่า อุณหภูมิของการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลด้วยหัวพ่นหลังปรับปรุงยังคงสูงกว่าในเกือบทุกตำแหน่ง r/D ของห้องเผาไหม้ช่วย ยกเว้นที่ $r/D = 0.250$ เนื่องจากการเผาไหม้ชีวมวลด้วยหัวพ่นแบบดั้งเดิมเริ่มมีการเผาไหม้อย่างเห็นได้ชัดและเช่นเดียวกันที่ตำแหน่ง $r/D = 0.125$ อุณหภูมิยังคงมีแนวโน้มสูงขึ้นไปอีก ทำให้ทราบว่าที่ระยะห่างจากหัวพ่นมากขึ้น อิทธิพลของอากาศทุติยภูมิที่เข้ามาในห้องเผาไหม้น้อยลงไปด้วย

การเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วย ณ ตำแหน่ง $x/D = 1.125$ รูปที่ 6.22(ง) พบว่า อุณหภูมิของการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลมีลักษณะเช่นเดียวกับตำแหน่ง $x/D = 0.875$ และที่ตำแหน่ง $r/D = 0.125$ อุณหภูมิก็ยังคงยังมีแนวโน้มสูงขึ้นไปอีกเช่นกัน เป็นการยืนยันว่าระยะห่างจากหัวพ่นมากเท่าไร ทำให้อิทธิพลของอากาศทุติยภูมิที่เข้ามาในห้องเผาไหม้ลดลง

การเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วย ณ ตำแหน่ง $x/D = 1.375$ รูปที่ 6.22(จ) พบว่า อุณหภูมิของการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลเช่นเดียวกับตำแหน่งก่อน $x/D = 1.125$ แสดงให้เห็นว่าเกิดการเผาไหม้ที่คงตัว

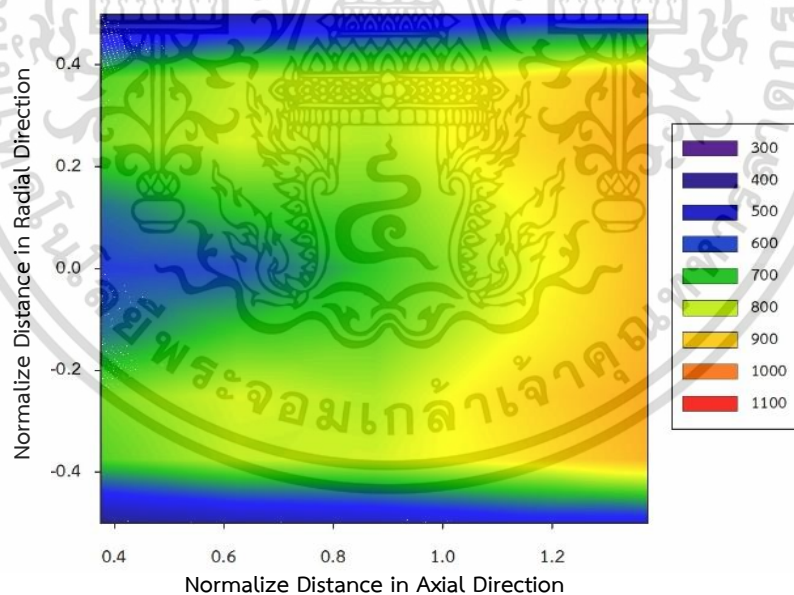
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลทำให้เกิดก๊าซไอเสียต่าง ๆ สำหรับงานวิจัยนี้จะพิจารณาเฉพาะ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์กับออกไซด์ของไนโตรเจนเท่านั้น เนื่องจากเครื่องมือที่ใช้ในการวัดก๊าซไอเสีย สามารถวัดได้แค่ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์กับออกไซด์ของไนโตรเจน โดยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ส่วนใหญ่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนไม่สมบูรณ์ซึ่งมีปริมาณออกซิเจนไม่เพียงพอต่อการเผาไหม้ ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้เพียงบางส่วน โดยเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ไม่หมดจะถูกเผาไหม้ด้วยเปลวไฟที่ได้จากการเผาไหม้ส่งผลให้เกิดเป็นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ซึ่งเป็นมลพิษที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้น แต่ถ้ามีการเผาไหม้สมบูรณ์เชื้อเพลิงจะถูกเผาไหม้หมดและปริมาณของออกซิเจนเพียงพอสำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิง สำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงด้วยหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบใหม่ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ต่ำกว่าการใช้หัวพ่นเชื้อเพลิงแบบดั้งเดิม เนื่องจากทำให้เกิดการคลุกเคล้าระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศที่ดีกว่าและเกิดความปั่นป่วนภายในห้องเผาไหม้ที่มากกว่าส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศที่ดีกว่าการใช้หัวพ่นแบบดั้งเดิม จากรูปที่ 6.23 ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์อยู่ที่ 106.6 PPM สำหรับหัวพ่นแบบดั้งเดิม และ 28.5 PPM สำหรับหัวพ่นแบบใหม่ ดังแสดงในรูปที่ 6.23 โดยปริมาณที่ได้คิดจากการอ้างอิงออกซิเจน 6 เปอร์เซ็นต์เท่ากัน คำนวณได้จากสมการที่ 3.15 ผลที่ได้มีปริมาณต่ำกว่ามาตรฐานที่กรมควบคุมมลพิษกำหนดให้อุตสาหกรรมปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์สู่อากาศได้ไม่เกิน 690 PPM นอกจากนี้ยังมีการพิจารณาออกไซด์ของไนโตรเจนซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้จาก 3 รูปแบบ คือ ออกไซด์ของไนโตรเจนที่เกิดจาก Thermal NO_x ซึ่งขึ้นอยู่กับความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 1,300 องศาเซลเซียส แต่การทดลองเผาไหม้ทั้งสองกรณีมีอุณหภูมิแค่ 1,100 องศาเซลเซียส ทำให้ผลการพิจารณาในส่วนของ Thermal NO_x สำหรับออกไซด์ของไนโตรเจนที่เกิดจาก Prompt NO_x ซึ่งส่วนใหญ่เกิดขึ้นน้อยมากและเกิดจากการเผาไหม้แบบส่วนผสมหรือมีปริมาณออกซิเจนไม่เพียงพอต่อการเผาไหม้ นอกจากนี้ออกไซด์ของไนโตรเจนที่เกิดจาก Fuel NO_x ซึ่งมีสัดส่วนที่ทำให้เกิดออกไซด์ของไนโตรเจนมากที่สุด เกิดขึ้นเนื่องจากเชื้อเพลิงที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบเมื่อได้รับอิทธิพลจากอากาศที่มีความเข้มข้นสูงของออกซิเจนในการเผาไหม้ โดยการใช้หัวพ่นเชื้อเพลิงแบบใหม่ในการเผาไหม้เกิดการไหลย้อนกลับภายในและการเผาไหม้ที่ดีกว่าทำให้ปริมาณออกซิเจนมีค่าลดลงซึ่งส่งผลให้ออกไซด์ของไนโตรเจนลดลงตามไปด้วย โดยมีค่าอยู่ที่ 245.8 PPM สำหรับหัวพ่นแบบดั้งเดิม และ 214.4 PPM สำหรับหัวพ่นแบบใหม่ โดยปริมาณที่ได้คิดจากการอ้างอิงออกซิเจน 6 เปอร์เซ็นต์เท่ากัน คำนวณได้จากสมการที่ 3.15 ดังแสดงในรูปที่ 6.23 ซึ่งค่าที่ได้สูงกว่าค่าที่กรมควบคุมมลพิษกำหนดให้อุตสาหกรรมปล่อย NO_x สู่อากาศได้ไม่เกิน 200 PPM



รูปที่ 6.23 องค์ประกอบของก๊าซไอเสียจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลด้วยหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบดั้งเดิมและแบบใหม่

6.2.2 ผลการทดลองเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลทอร์รีไฟต์ด้วยหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบใหม่

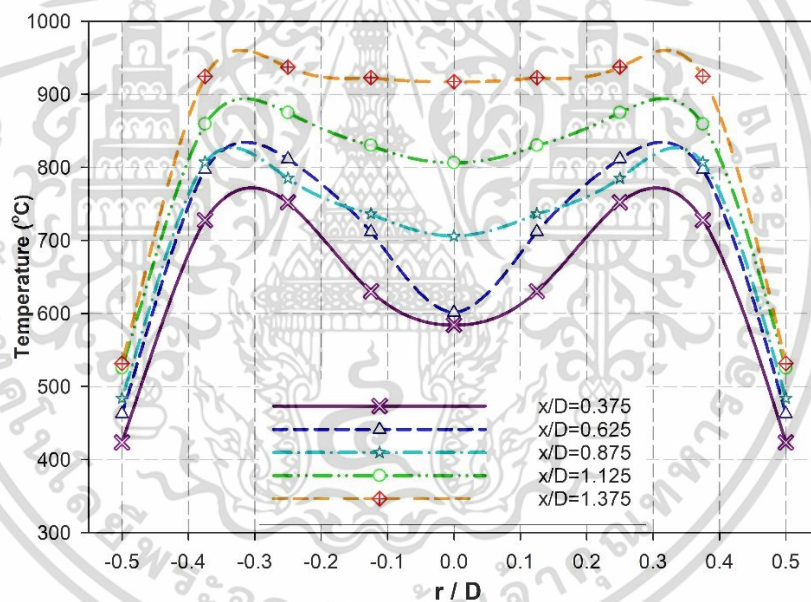


รูปที่ 6.24 อุณหภูมิของการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลทอร์รีไฟต์ด้วยหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 6.24 แสดงผลการทดลองโดยใช้หัวพ่นเชื้อเพลิงแบบใหม่ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลทอร์รีไฟต์ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงที่น่าสนใจเนื่องจากมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับถ่านหิน สำหรับการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงแบบใหม่ทำให้เกิดการการหมุนควงของลมทุติยภูมิและเกิดการไหลย้อนกลับที่ดีกว่าตามผลจำลองสนามการไหลในรูปที่ 6.2 ซึ่งจะเป็นผลดีต่อการเผาไหม้ แต่สำหรับผลการเผาไหม้ชีวมวลทอร์รีไฟต์ด้วยชุดทดลองในรูปที่ 6.24 พบว่าอุณหภูมิของการเผาไหม้เกิดขึ้นตามแนวการหมุนควงของอากาศทุติยภูมิ ซึ่งเป็นผลมาจากอากาศส่วนนี้ทำให้เชื้อเพลิงที่มีปริมาณสารระเหยที่ต่ำ (จากตารางที่ 3.3) และปล่อยสารระเหยออกมาช้ากว่าเชื้อเพลิงชีวมวล (เปรียบเทียบจากสัดส่วนโดยมวลของสารระเหยจากรูปที่ 6.11 กับ 6.14) เกิดการติดไฟ และอุณหภูมิในตำแหน่งกึ่งกลางมีค่าต่ำในช่วงแรกเนื่องจากผลของการไหลย้อนกลับภายในบริเวณหลังวัตถุขวางการไหลแต่จะมีค่าสูงขึ้นที่ตำแหน่งระยะห่างจากวัตถุขวางการไหลที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นอิทธิพลของการไหลย้อนกลับภายในห้องเผาไหม้

หากแสดงอุณหภูมิของการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลทอร์รีไฟต์ด้วยหัวพ่นแบบใหม่ ณ ตำแหน่ง x/D ต่าง ๆ ด้วยรูปที่ 6.25 พบว่า



รูปที่ 6.25 การกระจายอุณหภูมิในห้องเผาไหม้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลทอร์รีไฟต์ด้วยหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบใหม่ที่ตำแหน่ง x/D ต่าง ๆ

จากรูปที่ 6.25 ผลอุณหภูมิจากการทดลองการเผาไหม้ชีวมวลทอร์รีไฟต์ด้วยหัวพ่นแบบใหม่ภายในห้องเผาไหม้ช่วย พบว่าอุณหภูมิที่ตำแหน่ง $r/D = 0.5$ หรือตำแหน่งผนังห้องเผาไหม้มีค่าต่ำที่สุดซึ่งเป็นผลมาจากการไหลย้อนกลับภายนอกของอากาศใหม่ที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้ นอกจากนี้ตำแหน่งกึ่งกลางห้องเผาไหม้มีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิตามแนวการหมุนควงของอากาศทุติยภูมิซึ่งเป็นผลมาจากการไหลย้อนกลับภายในมายังบริเวณหลังวัตถุขวางการไหล แต่จะมีอุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อย ๆ ตามมีอัตราการเกิดการเผาไหม้ที่เพิ่มขึ้นจนมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับตำแหน่งที่มีอุณหภูมิสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเฉพาะเท่านั้น เมื่อผู้ใช้งานเห็นประโยชน์อันดีด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับด้านมลพิษจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลทอร์รีไฟด์สามารถพิจารณาได้จากการเปรียบเทียบกับองค์ประกอบของก๊าซไอเสียจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลด้วยหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบใหม่ ซึ่งจากรูปที่ 6.26 พบว่า ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ซึ่งเกิดได้จากปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์และปริมาณออกไซด์ของไนโตรเจนที่เกิดขึ้นจาก Fuel NO_x เนื่องด้วยเหตุผลที่อธิบายไว้ในหัวข้อ 6.2.1 เกี่ยวกับมลพิษจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลด้วยหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบใหม่ โดยที่ Fuel NO_x ซึ่งมีสัดส่วนที่ทำให้เกิดออกไซด์ของไนโตรเจนมากที่สุด เกิดขึ้นเนื่องจากเชื้อเพลิงที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบเมื่อได้รับอิทธิพลจากอากาศที่มีความเข้มข้นสูงของออกซิเจนในการเผาไหม้จากการเผาไหม้และจากการคำนวณปริมาณมลพิษด้วยสมการที่ 3.15 โดยอ้างอิงออกซิเจน 6 เปอร์เซ็นต์เท่ากัน จะได้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ 64.0 PPM ซึ่งมีความมากกว่าการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลด้วยหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบเดียวกัน เป็นผลมาจากปริมาณคาร์บอนคงที่ที่มากขึ้นจากระบวนการทอร์รีแฟชัน ทำให้ปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ผ่านขาร์น้อยลงและออกไซด์ของไนโตรเจน 196.5 PPM ซึ่งผลที่วัดค่าได้มีปริมาณต่ำกว่ามาตรฐานที่กรมควบคุมมลพิษกำหนดให้อุตสาหกรรมปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และออกไซด์ของไนโตรเจนสู่อากาศได้ไม่เกิน 690 PPM และ 200 PPM ตามลำดับ

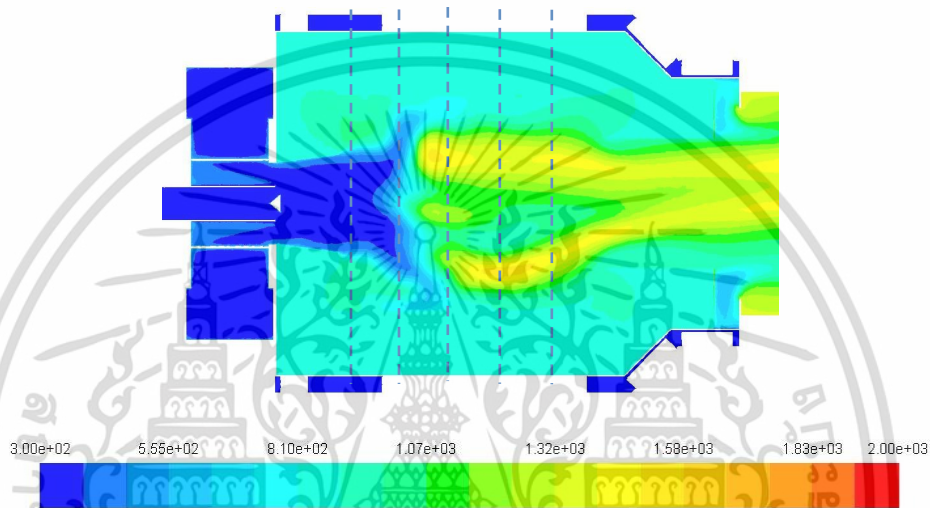


รูปที่ 6.26 องค์ประกอบของก๊าซไอเสียจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลทอร์รีไฟด์ด้วยหัวพ่นแบบใหม่

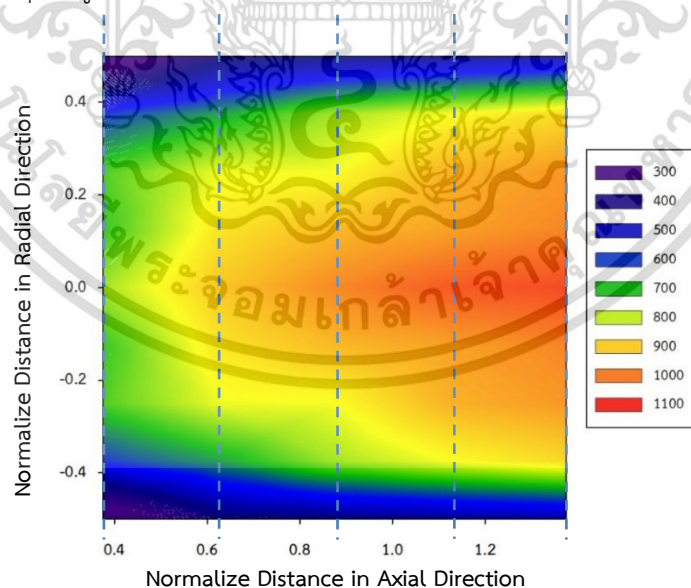
6.3 เปรียบเทียบการเผาไหม้ระหว่างผลการทดลองและผลการจำลอง

การเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลและชีวมวลทอร์รีไฟด์จากการเผาไหม้ด้วยหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบดั้งเดิมและแบบใหม่ทำให้เกิดพฤติกรรมการเผาไหม้และลักษณะของกระแสการไหลที่แตกต่างกัน สำหรับหัวข้อนี้เป็นการเปรียบเทียบผลการเผาไหม้จากชุดทดลองและแบบจำลองเชิง ซึ่งสามารถแบ่งผลการเปรียบเทียบได้ 3 กรณี ดังนี้

6.3.1 เปรียบเทียบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลด้วยหัวพ่นแบบดั้งเดิมจากแบบจำลองเชิงตัวเลขและชุดทดลอง



(ก) ผลจำลองอุณหภูมิจากการเผาไหม้ด้วยแบบจำลองเชิงตัวเลขภายในห้องเผาไหม้ช่วย (เคลวิน)



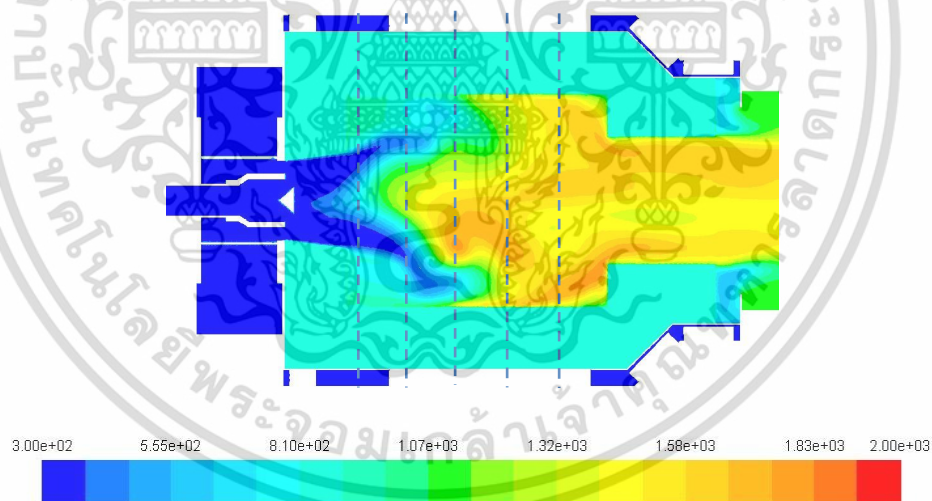
(ข) ผลทดลองอุณหภูมิจากการเผาไหม้ด้วยชุดทดลองภายในห้องเผาไหม้ช่วย (องศาเซลเซียส)

รูปที่ 6.27 เปรียบเทียบอุณหภูมิของการเผาไหม้ชีวมวลด้วยหัวพ่นแบบดั้งเดิม

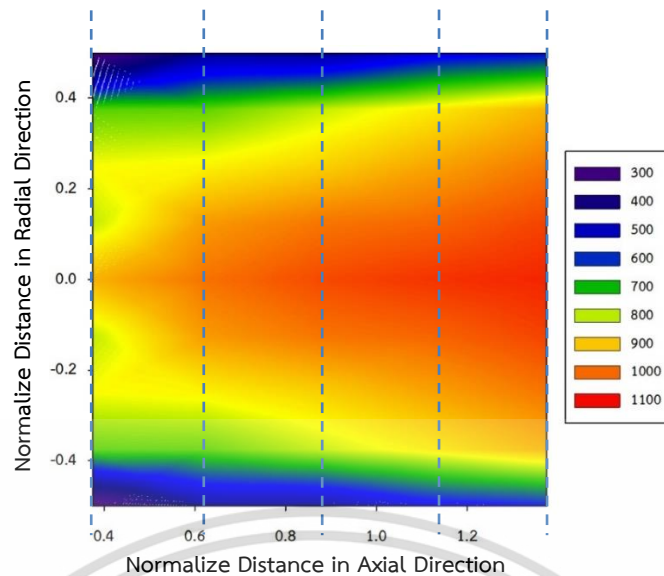
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่เผยแพร่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6.27 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิของการเผาไหม้ชีวมวลด้วยหัวพ่นแบบดั้งเดิมจากแบบจำลองและชุดทดลอง ซึ่งพบว่า การกระจายอุณหภูมิจากการทดลองทั้งสองแบบมีลักษณะที่แตกต่างกัน โดยผลจากแบบจำลองรูปที่ 6.27(ก) ตำแหน่งที่มีอุณหภูมิสูงหรือมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้สูงเกิดขึ้นในตำแหน่งที่อากาศหุติยภูมิเกิดการหมุนควงด้วยความเร็วต่ำทำให้เชื้อเพลิงได้รับความร้อนที่อยู่ภายในและมีระยะเวลาในการเผาไหม้มากกว่าในตำแหน่งศูนย์กลางของห้องเผาไหม้ที่เชื้อเพลิงเกิดการเคลื่อนที่ในแนวแกนด้วยความเร็วสูงทำให้เชื้อเพลิงในตำแหน่งนั้นเกิดอัตราการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่ต่ำเป็นผลมาจากความเร็วแนวแกนที่สูงทำให้อากาศเกิดการเคลื่อนที่ออกจากห้องเผาไหม้ช่วยอย่างรวดเร็ว ในขณะที่ผลจากการทดลองรูปที่ 6.27(ข) ตำแหน่งที่มีอุณหภูมิสูงอยู่ในตำแหน่งที่ศูนย์กลางของห้องเผาไหม้ช่วยซึ่งเป็นผลมาจากการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นในตำแหน่งแนวการหมุนควงของอากาศหุติยภูมิเกิดกระแสการไหลย้อนกลับภายในทำให้ความร้อนถูกพาเข้าไปยังศูนย์กลางห้องเผาไหม้จึงมีอัตราการเผาไหม้ที่ดีซึ่งต่างจากผลจำลองที่การเผาไหม้ส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่แนวการหมุนควงของอากาศหุติยภูมิและมีการไหลย้อนกลับที่น้อยดังแสดงในรูปที่ 6.1

6.3.2 เปรียบเทียบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลด้วยหัวพ่นแบบใหม่จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และชุดทดลอง



(ก) ผลจำลองอุณหภูมิจากการเผาไหม้ด้วยแบบจำลองเชิงตัวเลขภายในห้องเผาไหม้ช่วย (เคลวิน)

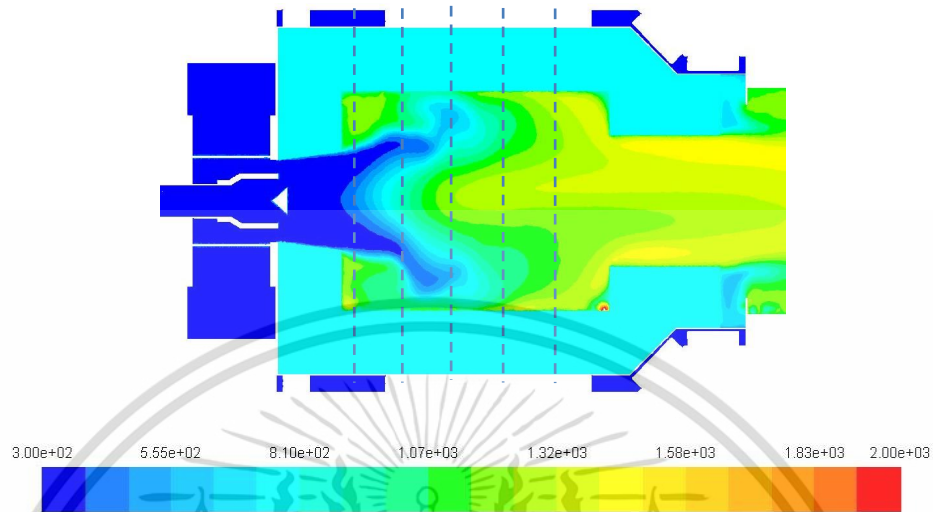


(ข) ผลอุณหภูมิจากการเผาไหม้ด้วยชุดทดลองภายในห้องเผาไหม้ช่วย (องศาเซลเซียส)

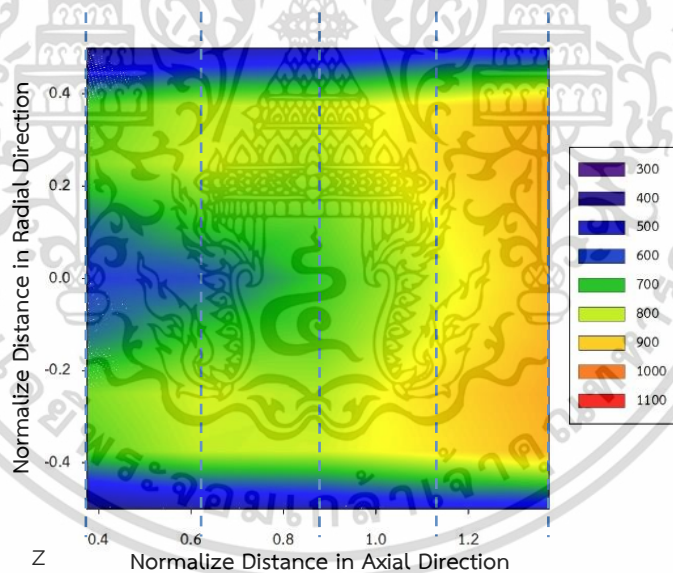
รูปที่ 6.28 เปรียบเทียบอุณหภูมิของการเผาไหม้ชีวมวลด้วยหัวพ่นแบบใหม่ จากแบบจำลองเชิงตัวเลขและชุดทดลอง

รูปที่ 6.28 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิของการเผาไหม้ชีวมวลด้วยหัวพ่นแบบใหม่จากแบบจำลองและชุดทดลอง ซึ่งพบว่า การกระจายอุณหภูมิจากการทดลองทั้งสองแบบมีลักษณะที่คล้ายกัน โดยผลจากแบบจำลองรูปที่ 6.28(ก) ตำแหน่งที่มีอุณหภูมิสูงหรือมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้สูงเกิดขึ้นที่ศูนย์กลางของห้องเผาไหม้ช่วยซึ่งเป็นตำแหน่งที่อากาศปฐมภูมิเกิดการไหลด้วยความเร็วต่ำทำให้เชื้อเพลิงได้รับความร้อนที่อยู่ภายในและมีระยะเวลาในการเผาไหม้มากกว่าในตำแหน่งที่อากาศทุติยภูมิเกิดการหมุนควงด้วยความเร็วสูงทำให้เชื้อเพลิงในตำแหน่งนั้นเกิดอัตราการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่ต่ำเป็นผลมาจากความเร็วแนวสัมผัสที่สูงทำให้อากาศเกิดการหมุนควงอย่างรวดเร็ว ในขณะที่ผลจากการทดลองรูปที่ 6.28(ข) ตำแหน่งที่มีอุณหภูมิสูงอยู่ในตำแหน่งที่ศูนย์กลางของห้องเผาไหม้ช่วยเช่นเดียวกันและมีการกระจายของอุณหภูมิที่มีลักษณะเดียวกันอีกด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ของการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลด้วยหัวพ่นแบบใหม่เริ่มเกิดขึ้นตั้งแต่ผ่านหัวพ่นเข้ามาในห้องเผาไหม้ช่วยซึ่งแสดงให้เห็นทั้งในผลการทดลองและผลการจำลองดังแสดงในรูปที่ 6.28

6.3.3 เปรียบเทียบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลทอริไฟด์ด้วยหัวพ่นแบบใหม่จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และชุดทดลอง



(ก) ผลจำลองอุณหภูมิจากการเผาไหม้ด้วยแบบจำลองเชิงตัวเลขภายในห้องเผาไหม้ช่วย (เคลวิน)



(ข) ผลอุณหภูมิจากการเผาไหม้ด้วยชุดทดลองภายในห้องเผาไหม้ช่วย (องศาเซลเซียส)

รูปที่ 6.29 เปรียบเทียบอุณหภูมิของการเผาไหม้ชีวมวลด้วยหัวพ่นแบบใหม่จากแบบจำลองเชิงตัวเลขและชุดทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6.29 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิของการเผาไหม้ชีวมวลเทอร์รี่ไฟต์ด้วยหัวพ่นแบบใหม่จากแบบจำลองและชุดทดลอง ซึ่งพบว่า การกระจายอุณหภูมิจากการทดลองทั้งสองแบบมีลักษณะที่แตกต่างกัน โดยผลจากแบบจำลองรูปที่ 6.29(ก) ตำแหน่งที่มีอุณหภูมิสูงหรือมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้สูงเกิดขึ้นที่ห่างจากหัวพ่นเชื้อเพลิง ซึ่งเป็นผลมาจากการปล่อยสารระเหยและอุณหภูมิจุดติดไฟของเชื้อเพลิงชีวมวลเทอร์รี่ไฟต์ สำหรับลักษณะของกระแสการไหลของการเผาไหม้จะเหมือนกับการเผาไหม้ชีวมวลด้วยหัวพ่นแบบใหม่แต่การเผาไหม้จะเกิดขึ้นในตำแหน่งที่ต่างกัน ในขณะที่ผลจากการทดลองรูปที่ 6.29(ข) ตำแหน่งที่มีอุณหภูมิสูงอยู่ในตำแหน่งที่ห่างจากหัวพ่นเชื้อเพลิงเช่นเดียวกันแต่มีการกระจายของอุณหภูมิที่มีแตกต่างกันซึ่งการเผาไหม้ด้วยชุดทดลองการเผาไหม้เกิดขึ้นในแนวการหมุนควงของอากาศทุติยภูมิและไหลย้อนกลับเข้าสู่ภายในศูนย์กลางของห้องเผาไหม้ช่วยทำให้ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 6.2

6.4 ผลการทดลองระบบเตรียมเชื้อเพลิงผง

ระบบเตรียมเชื้อเพลิงผงเป็นระบบหนึ่งที่มีความสำคัญสำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิง เนื่องจากเป็นระบบทำหน้าที่ลดขนาดของเชื้อเพลิงให้มีขนาดเล็กลงเพื่อเพิ่มพื้นที่การเผาไหม้ให้กับอนุภาคเชื้อเพลิงและช่วยให้เกิดการเผาไหม้ที่ดีโดยเชื้อเพลิงที่ได้จากการลดขนาดจะส่งผลโดยตรงต่อสมรรถนะการเผาไหม้ของหัวเผา หากเชื้อเพลิงมีขนาดใหญ่ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่ดี และอาจก่อให้เกิดเถ้าหรือก๊าซไอเสียที่เป็นอันตรายได้ ดังนั้นการลดขนาดของอนุภาคของเชื้อเพลิงจะส่งผลให้เกิดการเผาไหม้ที่ดี แต่การลดขนาดของเชื้อเพลิงนี้จำเป็นต้องใช้เครื่องบดเชื้อเพลิงซึ่งทำให้มีค่าใช้จ่ายในด้านการพลังงานเข้ามาเกี่ยวข้องอีกด้วย สำหรับการทดลองของงานวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาขนาดและปริมาณของอนุภาคเชื้อเพลิงผงที่ได้จากการบดผ่านตะแกรงขนาด 0.5, 1.0 มิลลิเมตร และอัตราการใช้พลังงานของเครื่องบดที่ส่งผลต่อต้นทุนของการเผาไหม้เชื้อเพลิงผง โดยมีผลการทดลองดังนี้

ตารางที่ 6.1 ขนาดและปริมาณของอนุภาคเชื้อเพลิงผงที่ได้จากการบดผ่านตะแกรงขนาด 0.5 และ 1.0 มิลลิเมตร

ขนาดของอนุภาค(ไมโครเมตร)	จำนวนอนุภาคเชื้อเพลิงผง (เปอร์เซ็นต์)	
	เชื้อเพลิงชีวมวล	เชื้อเพลิงชีวมวลเทอร์รี่ไฟต์
≥ 425	0.67	3.40
≥ 300	6.62	13.37
≥ 150	20.16	19.53
≥ 75	45.27	39.14
≤ 75	27.28	24.56
รวม	100	100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.2 อัตราการใช้พลังงานของเครื่องบดที่ใช้ในการบดเชื้อเพลิงชีวมวลเม็ดผ่านตะแกรงขนาด 0.5 และ 1.0 มิลลิเมตร

ความถี่ของ กระแสไฟฟ้าที่ เข้าสู่มอเตอร์ (Hz)	อัตราการไหล ของเชื้อเพลิงเม็ด (kg/s)	ปริมาณเชื้อเพลิง ที่ได้จากการบด (kg)	อัตราพลังงานที่ ใช้ในการบด (kWh)	อัตราส่วน ปริมาณที่ได้ต่อ พลังงานที่ใช้ (kg/kWh)
1	0.019	1.638	0.339	4.832
2	0.044	1.912	0.344	5.560
3	0.068	3.225	0.397	8.133
4	0.093	5.813	0.487	11.936
5	0.118	7.672	0.569	13.476

ตารางที่ 6.3 อัตราการใช้พลังงานของเครื่องบดที่ใช้ในการบดเชื้อเพลิงชีวมวลทอร์รีไฟด์เม็ดผ่าน ตะแกรงขนาด 0.5 และ 1.0 มิลลิเมตร

ความถี่ของ กระแสไฟฟ้าที่ เข้าสู่มอเตอร์ (Hz)	อัตราการไหล ของเชื้อเพลิงเม็ด (kg/s)	ปริมาณเชื้อเพลิง ที่ได้จากการบด (kg)	อัตราพลังงานที่ ใช้ในการบด (kWh)	อัตราส่วน ปริมาณที่ได้ต่อ พลังงานที่ใช้ (kg/kWh)
1	0.022	1.750	0.283	9.665
2	0.048	2.150	0.286	11.120
3	0.068	2.256	0.290	16.265
4	0.091	3.150	0.295	23.872
5	0.113	4.120	0.300	26.951

เชื้อเพลิงชีวมวลและชีวมวลทอร์รีไฟด์เป็นเชื้อเพลิงที่มีองค์ประกอบแตกต่างกัน เนื่องจากชีวมวลทอร์รีไฟด์เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอร์รีแฟคชันซึ่งทำให้คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีเปลี่ยนแปลงส่งผลให้อัตราการใช้พลังงานในการเตรียมเชื้อเพลิงแตกต่างกัน ผลจากการทดลองและเปรียบเทียบ พบว่าอัตราการใช้พลังงานในการบดชีวมวลทอร์รีไฟด์มีค่าต่ำกว่าชีวมวลที่ทุกความถี่ ดังแสดงในตารางที่ 6.2 และ 6.3 สำหรับการบดชีวมวลทอร์รีไฟด์จะมีอัตราการใช้พลังงานใกล้เคียงกันแสดงให้เห็นว่าไม่ว่าเชื้อเพลิงชีวมวลทอร์รีไฟด์เข้ามาในเครื่องบดเท่าไรก็ตามเชื้อเพลิงชนิดนี้ก็จะถูกบดเป็นผงได้ง่าย หากต้องการเชื้อเพลิงในปริมาณที่มากขึ้นก็สามารถเพิ่มอัตราการไหลของเชื้อเพลิงเข้าสู่เครื่องบดได้โดยไม่ต้องคำนึงถึงอัตราการใช้พลังงานมากนัก และเนื่องจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชีวมวลส่วนใหญ่เป็นพืชซึ่งมีองค์ประกอบหลักเป็นเฮมิเซลลูโลสทำให้มีความต้านทานต่อการสลายตัวที่สูงแต่สำหรับชีวมวลทอร์รีไฟต์ที่ผ่านกระบวนการทอร์รีแฟคชันทำให้องค์ประกอบส่วนนี้เกิดการแตกสลายไปด้วยความร้อน สำหรับขนาดของอนุภาคเชื้อเพลิงผงที่ได้จากการบดผ่านตะแกรง 0.5 และ 1.0 มิลลิเมตรด้วยเครื่องบดชนิดค้อนเหวี่ยง มีขนาดและปริมาณดังแสดงตารางที่ 6.1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

บทนี้เป็นการกล่าวถึงการสรุปผลการเผาไหม้เชื้อเพลิงด้วยหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบดั้งเดิมและแบบใหม่เพื่อทดสอบสมรรถนะหัวพ่นที่ทำการปรับปรุงด้วยการเพิ่มพื้นที่ช่องการไหลอากาศปฐมภูมิโดยใช้ชุดทดลองและแบบจำลองเชิงตัวเลข ซึ่งการสรุปผลการปรับปรุงหัวพ่นเชื้อเพลิงถูกนำเสนอเป็น 2 กรณี คือ สรุปผลการปรับปรุงหัวพ่นจากการเผาไหม้ด้วยแบบจำลองเชิงตัวเลขและสรุปผลการปรับปรุงหัวพ่นจากการเผาไหม้จริงด้วยชุดทดลอง นอกจากนี้มีการสรุปผลการศึกษาเชื้อเพลิงชีวมวลทอรรีไฟด์และการเผาไหม้เพื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงไฮโดรเจนในปัจจุบัน ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

7.1 สรุปผลการปรับปรุงหัวพ่นเชื้อเพลิงจากการเผาไหม้ด้วยแบบจำลองเชิงตัวเลข

การทดลองด้วยแบบจำลองเชิงตัวเลขโดยใช้โปรแกรม ANSYS Fluent ver.12.0 เป็นงานวิจัยเพื่อศึกษาพฤติกรรมของการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลและชีวมวลทอรรีไฟด์ด้วยหัวพ่นแบบดั้งเดิมและแบบใหม่ภายในห้องเผาไหม้ช่วย ซึ่งแบ่งการสรุปออกเป็นหัวข้อย่อยๆ ได้ดังนี้

7.1.1 ผลจำลองสนามเวกเตอร์การไหลของก๊าซร้อน

จากผลจำลองสนามเวกเตอร์การไหลของการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลด้วยหัวพ่นแบบดั้งเดิมและแบบใหม่สามารถอธิบายได้เป็น 2 ลักษณะ ดังนี้

1. ผลจำลองสนามเวกเตอร์การไหลของก๊าซร้อนตามแนวยาวของห้องเผาไหม้ช่วยพบว่าการใช้หัวพ่นเชื้อเพลิงแบบใหม่ทำให้กระแสการไหลของอากาศปฐมภูมิกับเชื้อเพลิงผงไหลผ่านวัตถุขวางการไหลเข้าสู่ห้องเผาไหม้ด้วยความเร็วที่ช้ากว่าและมีทิศทางกระจายไปยังผนังห้องเผาไหม้ที่มากกว่าการใช้หัวพ่นเชื้อเพลิงแบบดั้งเดิม เนื่องด้วยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและขนาดของวัตถุขวางการไหลที่มีขนาดใหญ่ขึ้นทำให้เกิดการไหลย้อนกลับภายในบริเวณหลังวัตถุขวางการไหลที่มากกว่าอีกด้วย เมื่ออากาศปฐมภูมิที่มีเชื้อเพลิงผงผสมกับอากาศทุติยภูมิที่มีความเร็วสูงซึ่งเป็นอากาศที่ใช้ในการสร้างกระแสของการหมุนควงส่งผลให้เกิดการคลุกเคล้ากันระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงสำหรับการเผาไหม้ช่วยได้เป็นอย่างดีทั้งในตำแหน่งที่เกิดการไหลย้อนกลับภายในและการไหลย้อนกลับภายนอก ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้เกิดการเผาไหม้เชื้อเพลิงทั่วห้องเผาไหม้ จากนั้นของไหลจะมีความเร็วลดลงเนื่องจากการแลกเปลี่ยนโมเมนตัมกับกระแสการไหลของก๊าซร้อนภายในห้องเผาไหม้ช่วยจากตำแหน่งที่มีความเร็วต่ำไปยังตำแหน่งที่มีความเร็วสูง และมีจะความเร็วเพิ่มขึ้นเมื่อกำลังเข้าสู่ช่องการไหลซึ่งเป็นทางเชื่อมต่อไปยังห้องเผาไหม้หลักที่มีพื้นที่ช่องการไหลเล็กลง

2. ผลจำลองสนามเวกเตอร์การไหลของก๊าซร้อนตามแนวขวางของห้องเผาไหม้ช่วยพบว่าการใช้หัวพ่นเชื้อเพลิงแบบใหม่ทำให้กระแสการไหลของอากาศทุติยภูมิที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้เกิดความเร็วสูงสุดของการหมุนควงมากกว่าหัวพ่นแบบดั้งเดิมซึ่งจะเป็นผลดีต่อการเผาไหม้ โดยตำแหน่งช่องการไหลของอากาศทุติยภูมิจะมีการหมุนควงรุนแรงที่สุด และจะค่อยๆลดความรุนแรงลงเนื่องจากการแลกเปลี่ยนโมเมนตัมกับกระแสการไหลของก๊าซร้อนภายในห้องเผาไหม้ช่วย และมีความรุนแรงเพิ่มขึ้นอีกครั้งก่อนผ่านช่องการไหลออกเพื่อเข้าสู่ห้องเผาไหม้หลัก โดยเกิดขึ้นเนื่องจากกระแสการไหลของก๊าซร้อนที่มีการหมุนควงที่รุนแรงทำให้ภายในระบบเกิดความหนาแน่นสูง ระบบจึงจำเป็นต้องลดความหนาแน่นด้วยการระบายออกไปสู่ห้องเผาไหม้หลัก

7.1.2 ผลจำลองอุณหภูมิจากการเผาไหม้

การเผาไหม้เชื้อเพลิงโดยใช้หัวพ่นแบบใหม่ทำให้บริเวณหลังวัตถุขวางการไหลเกิดการไหลย้อนกลับภายในที่มากกว่าการใช้หัวพ่นเชื้อเพลิงแบบดั้งเดิม อัตราการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ในบริเวณดังกล่าวเกิดอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอีกด้วย เนื่องด้วยหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบใหม่ยังส่งผลความเร็วของอากาศทุติยภูมิซึ่งใช้ในการสร้างการหมุนควงของกระแสการไหลสูงกว่าการใช้หัวพ่นเชื้อเพลิงแบบดั้งเดิม ทำให้เกิดการกระจายไปยังผนังห้องเผาไหม้ที่ต่ำกว่า อัตราการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้จึงเกิดการกระจายที่มากกว่า ส่วนการเผาไหม้ด้วยการใช้หัวพ่นเชื้อเพลิงแบบดั้งเดิมซึ่งอุณหภูมิส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งการหมุนควงของอากาศทุติยภูมิเป็นผลมาจากกระแสการไหลที่ความเร็วในแนวแกนที่มีค่าสูงและความเร็วของการหมุนควงที่มีค่าต่ำ ทำให้เกิดการกระจายตัวไปยังผนังห้องเผาไหม้ด้วยความเร็วต่ำ และสำหรับการเคลื่อนที่ของกระแสการไหลที่ต่างกันทำให้อุณหภูมิของการเผาไหม้เกิดขึ้นในลักษณะที่แตกต่างกันด้วย กล่าวคือหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบดั้งเดิมทำให้เกิดการเผาไหม้เป็นแนวยาวตามทิศทางการไหลของอากาศปฐมภูมิที่มีความเร็วแนวแกนสูง ส่วนหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบใหม่เกิดการเผาไหม้ตามทิศทางการหมุนควงของอากาศทุติยภูมิที่มีความเร็วสูง

7.1.3 ผลจำลองสัดส่วนโดยมวลของออกซิเจน

การจำลองการเผาไหม้ด้วยหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบใหม่ทำให้สัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนที่บริเวณหลังวัตถุขวางการไหลมีปริมาณที่น้อยกว่าการใช้หัวพ่นเชื้อเพลิงแบบดั้งเดิม เนื่องจากมีการไหลย้อนกลับภายในที่ต่ำกว่าทำให้กระแสการไหลของก๊าซร้อนไหลกลับเข้ามาทำปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศที่ต่ำกว่าอีกด้วย ซึ่งต่างกับการใช้หัวพ่นเชื้อเพลิงแบบดั้งเดิมที่เกิดการไหลย้อนกลับภายในบริเวณเดียวกันที่น้อยกว่า สำหรับภาพรวมของการเผาไหม้ของการใช้หัวพ่นเชื้อเพลิงแบบใหม่ทำให้อากาศที่ใช้ในการเผาไหม้มีปริมาณเพียงพอแต่หัวพ่นแบบดั้งเดิมทำให้มีปริมาณอากาศไม่เพียงพอ แสดงให้เห็นว่าหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบใหม่ทำให้เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์มากกว่า สอดคล้องกับผลจำลองอุณหภูมิของการเผาไหม้ นอกจากนี้ที่ตำแหน่งทางเข้าของอากาศทุติยภูมิจะเกิดการเผาไหม้กับเชื้อเพลิงที่เหลือจากการเผาไหม้อีกครั้งเพื่อทำให้อุณหภูมิของเชื้อเพลิงถูกเผาจนหมดซึ่งจะช่วยให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์มากขึ้น

7.1.4 ผลจำลองสัดส่วนโดยมวลของสารระเหย

การปล่อยสารระเหยจากการใช้หัวพ่นแบบใหม่ในการเผาไหม้จะมีลักษณะตามสนามเวกเตอร์การไหลของการเผาไหม้ ซึ่งมีลักษณะการกระจายออกบริเวณกว้างในท้องเผาไหม้ช่วยเนื่องจากอิทธิพลของอากาศหมุนควงทฤษฎีภูมิส่งผลต่อการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นภายในท้องเผาไหม้นี้ แตกต่างกับการเผาไหม้ด้วยหัวพ่นแบบเก่าที่มีปล่อยสารระเหยออกมาเป็นแนวยาวจากท้องเผาไหม้ช่วยไปยังท้องเผาไหม้หลักเนื่องจากอิทธิพลของความเร็วในแนวแกนของอากาศปฐมภูมิ

7.1.5 ผลจำลองเส้นสายธารการไหลของการเผาไหม้

เส้นสายธารการไหลของการเผาไหม้ชีวมวลด้วยหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบใหม่ทำให้เกิดการไหลที่มีความปั่นป่วนมากกว่าการใช้หัวพ่นเชื้อเพลิงแบบดั้งเดิม ซึ่งเป็นผลกระทบจากการปรับปรุงหัวพ่นเชื้อเพลิงที่ทำให้อากาศทฤษฎีภูมิมีความเร็วของการหมุนควงที่มากขึ้นและยังทำให้เกิดความปั่นป่วนภายในท้องเผาไหม้ที่ดีกว่าการใช้หัวพ่นเชื้อเพลิงแบบดั้งเดิม

7.1.6 ผลจำลองเส้นทางของอนุภาคเชื้อเพลิง

เส้นทางอนุภาคของการเผาไหม้ชีวมวลด้วยหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบใหม่ทำให้อนุภาคของเชื้อเพลิงเกิดการเคลื่อนที่กระจายไปยังผนังท้องเผาไหม้ซึ่งเป็นผลมาว่าตฤฆวารการไหลที่มีขนาดใหญ่ขึ้นอีกทั้งยังทำให้อนุภาคเกิดความปั่นป่วนภายในท้องเผาไหม้ที่ดีกว่าการใช้หัวพ่นเชื้อเพลิงแบบดั้งเดิม

7.2 ผลจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลทอรรีไฟต์ด้วยแบบจำลองเชิงตัวเลข

การจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลทอรรีไฟต์ด้วยหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบใหม่ เป็นการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของชนิดเชื้อเพลิงต่อการเผาไหม้ ซึ่งแบ่งการสรุปออกเป็นหัวข้อย่อยๆ ได้ดังนี้

7.2.1 ผลจำลองอุณหภูมิของการเผาไหม้

การเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลทอรรีไฟต์ด้วยหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบใหม่ทำให้อุณหภูมิส่วนใหญ่เกิดขึ้นในตำแหน่งห่างออกไปจากหัวพ่นที่ $x/D = 0.875$ เมื่อเทียบกับการเผาไหม้ชีวมวลด้วยหัวพ่นเชื้อเพลิงลักษณะเดียวกันจะเห็นว่าตำแหน่งที่มีการเผาไหม้ส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่ $x/D = 0.375$ ซึ่งใกล้หัวพ่นเชื้อเพลิงมากกว่า ซึ่งอาจเป็นผลมาจากอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงของการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลทอรรีไฟต์มีค่ามากกว่าชีวมวลทำให้อากาศที่ใช้ในการเผาไหม้มีปริมาณมากขึ้น ทำให้การเผาไหม้ด้วยเชื้อเพลิงชนิดนี้เกิดความล่าช้าในการจุดติดไฟ

7.2.2 ผลจำลองสัดส่วนโดยมวลของออกซิเจน

หัวพ่นเชื้อเพลิงแบบใหม่สำหรับการเผาไหม้ชีวมวลทอรรีไฟต์ทำให้สัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนที่เหลือจากการเผาไหม้มีปริมาณที่น้อยเช่นเดียวกับการเผาไหม้ชีวมวลด้วยหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบเดียวกันแสดงให้เห็นว่าหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบใหม่สนับสนุนให้เกิดการเผาไหม้ที่ดี ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับผลจำลองอุณหภูมิจากการเผาไหม้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.2.3 ผลจำลองสัดส่วนโดยมวลของสารระเหย

สารระเหยของการเผาไหม้ชีวมวลทอร์รีไฟต์ถูกปล่อยออกมาในลักษณะเดียวกับการเผาไหม้ชีวมวล แต่มีปริมาณน้อยกว่าเนื่องจากชีวมวลทอร์รีไฟต์มีปริมาณสารระเหยเป็นองค์ประกอบน้อยกว่าชีวมวลและเกิดการปล่อยออกมาช้ากว่าชีวมวลอีกด้วยซึ่งเป็นผลมาจากอัตราส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิงในการเผาไหม้เชื้อเพลิงชนิดนี้เพิ่มขึ้นทำให้ความเร็วของอัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้นด้วยซึ่งส่งผลกระทบต่อตำแหน่งที่เกิดการปล่อยสารระเหย

7.2.4 ผลจำลองเส้นสายธารการไหลของการเผาไหม้

เส้นสายธารการไหลของการเผาไหม้ชีวมวลทอร์รีไฟต์ด้วยหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบใหม่มีลักษณะเดียวกับเส้นกระแสจากการเผาไหม้ชีวมวลด้วยหัวพ่นลักษณะเดียวกันแต่มีความเร็วของการหมุนควงที่สูงกว่ากรณีของชีวมวลโดยความเร็วที่เพิ่มสูงขึ้นเป็นผลมาจากอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงของการเผาไหม้เชื้อเพลิงชนิดนี้มีค่าสูงกว่าชีวมวล

7.2.5 ผลจำลองเส้นทางของอนุภาคเชื้อเพลิง

เส้นทางของอนุภาคเชื้อเพลิงของการเผาไหม้ชีวมวลทอร์รีไฟต์ด้วยหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบใหม่มีลักษณะคล้ายกับเส้นทางของอนุภาคเชื้อเพลิงจากหัวพ่นลักษณะเดียวกัน เนื่องด้วยความเร็วที่เพิ่มขึ้นของอากาศปฐมภูมิและอากาศทุติยภูมิซึ่งเป็นผลกระทบจากอัตราส่วนอากาศกับเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้ชีวมวลทอร์รีไฟต์และขนาดอนุภาคเชื้อเพลิงชีวมวลทอร์รีไฟต์ซึ่งมีน้ำหนักเบาชีวมวลทำให้เกิดการกระจายภายในห้องเผาไหม้ที่ตึกกว่า

7.3 ผลการปรับปรุงหัวพ่นเชื้อเพลิงจากการเผาไหม้จริงด้วยชุดทดลอง

การใช้ชุดทดลองเพื่อศึกษาผลของการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลและชีวมวลทอร์รีไฟต์ด้วยหัวพ่นแบบดั้งเดิมและแบบใหม่ภายในห้องเผาไหม้ช่วย สามารถสรุปออกเป็นหัวข้อย่อยๆ ได้ดังนี้

7.3.1 ผลทดลองอุณหภูมิของการเผาไหม้

การเผาไหม้ด้วยหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบใหม่ทำให้อุณหภูมิจากการเผาไหม้สูงกว่าเนื่องจากอิทธิพลของการหมุนควงอากาศทุติยภูมิและการไหลย้อนกลับที่ตึกกว่าหัวพ่นแบบดั้งเดิม และพบว่าบริเวณหลังวัตถุขวางการไหลมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่สูงกว่าทำให้อุณหภูมิมีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับการเผาไหม้ด้วยหัวพ่นแบบดั้งเดิม อีกทั้งเกิดการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ตึกกว่าอีกด้วย

7.3.2 ผลเปรียบเทียบอุณหภูมิของการเผาไหม้ที่ตำแหน่ง x/D ใดๆ

การเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วย พบว่าอุณหภูมิของการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลด้วยหัวพ่นแบบใหม่มีค่าสูงขึ้นเรื่อยๆ ตามตำแหน่ง x/D และที่ตำแหน่ง $r/D = 0.125$ อุณหภูมิจากการเผาไหม้มีแนวโน้มสูงขึ้นเรื่อยๆ เป็นผลมาจากระยะห่างจากหัวพ่นที่มากขึ้นทำให้อิทธิพลของการหมุนควงอากาศทุติยภูมิส่งผลต่อการเผาไหม้น้อยลงไปด้วย

7.3.3 ผลเปรียบเทียบของก๊าซไอเสียจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลด้วยหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบดั้งเดิมและแบบใหม่

การเผาไหม้เชื้อเพลิงด้วยหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบใหม่ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ซึ่งเป็นก๊าซพิษในปริมาณที่ต่ำกว่าหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบดั้งเดิมโดยวัดปริมาณได้ 106.6 PPM สำหรับหัวพ่นแบบดั้งเดิม และ 28.5 PPM สำหรับหัวพ่นแบบใหม่ ผลที่ได้มีปริมาณต่ำกว่ามาตรฐานที่กรมควบคุมมลพิษกำหนดให้อุตสาหกรรมปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์สู่อากาศได้ไม่เกิน 690 PPM สำหรับออกไซด์ของไนโตรเจนจากการไหม้ที่เกิดจากการเผาไหม้จะพิจารณาเฉพาะ Fuel NO_x ซึ่งมีสัดส่วนที่ทำให้เกิดออกไซด์ของไนโตรเจนมากที่สุด โดยวัดได้ 245.8 PPM สำหรับหัวพ่นแบบดั้งเดิม และ 214.4 PPM สำหรับหัวพ่นแบบใหม่ ซึ่งค่าที่ได้สูงกว่าค่าที่กรมควบคุมมลพิษกำหนดให้อุตสาหกรรมปล่อย NO_x สู่อากาศได้ไม่เกิน 200 PPM

7.4 ผลการเผาไหม้จริงของเชื้อเพลิงชีวมวลทอร์รีไฟต์ด้วยชุดทดลอง

การทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลทอร์รีไฟต์ด้วยหัวพ่นแบบใหม่เป็นการทดลองเพื่อศึกษาเชื้อเพลิงชนิดใหม่ซึ่งคาดว่าจะเป็เชื้อเพลิงทางเลือกในอนาคตด้วยชุดทดลอง สามารถแบ่งการสรุปออกเป็นหัวข้อย่อยๆ ได้ดังนี้

7.4.1 ผลทดลองอุณหภูมิของการเผาไหม้

ผลการเผาไหม้ชีวมวลทอร์รีไฟต์ด้วยชุดทดลอง พบว่าที่ตำแหน่ง r/D ของห้องเผาไหม้อัตราการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่สังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนเกิดขึ้นที่ตำแหน่งการหมุนควงของอากาศทุติยภูมิ ซึ่งเกิดจากการกระตุ้นให้เกิดการปล่อยปริมาณสารระเหยที่มีปริมาณต่ำ ในขณะที่ตำแหน่งกึ่งกลางของห้องเผาไหม้ช่วยมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ต่ำเนื่องจากอากาศปฐมภูมิมีการไหลย้อนกลับภายในบริเวณหลังวัตถุขวางการไหลที่น้อยจึงทำให้เกิดการกระตุ้นให้ปล่อยสารระเหยออกมาช้ากว่า ส่งผลให้อุณหภูมิของการเผาไหม้เกิดขึ้นตามแนวการหมุนควงของอากาศทุติยภูมิ

7.4.2 ผลอุณหภูมิของการเผาไหม้ที่ตำแหน่ง x/D ใดๆ

การเผาไหม้ชีวมวลทอร์รีไฟต์ด้วยหัวพ่นแบบใหม่ที่ตำแหน่ง x/D = 0.375, 0.625, 0.875, 1.125, 1.375 อุณหภูมิของการเผาไหม้มีค่าต่ำสุดที่ตำแหน่งผนังห้องเผาไหม้ซึ่งเกิดจากการไหลย้อนกลับภายนอกของอากาศ ในขณะที่ตำแหน่งกึ่งกลางของห้องเผาไหม้ช่วยมีอุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อยๆ ตามอัตราการเกิดการเผาไหม้ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการถ่ายเทความร้อนและการพาความร้อนจากตำแหน่งที่มีอุณหภูมิสูงในช่วงแรก

7.4.3 ก๊าซโอเสียจากการเผาไหม้ชีวมวลทอร์รีไฟต์ด้วยหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบใหม่

การเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลทอร์รีไฟต์ด้วยหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบใหม่ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์มากกว่าการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลด้วยหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบเดียวกัน ซึ่งวัดได้ 64.0 PPM เป็นผลมาจากปริมาณคาร์บอนคงที่ที่มากขึ้นจากระบวนการทอร์รีแฟคชันทำให้ปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ผ่านขาร์น้อยลง นอกจากนี้วัดออกไซด์ของไนโตรเจนได้ 196.5 PPM ซึ่งน้อยกว่าการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล โดยผลที่วัดได้จากการทดลองมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานที่กรมควบคุมมลพิษกำหนดให้อุตสาหกรรมปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และออกไซด์ของไนโตรเจนสู่อากาศได้ไม่เกิน 690 PPM และ 200 PPM ตามลำดับ

7.5 สรุปผลการศึกษ้อัตราการใช้พลังงานในการเตรียมเชื้อเพลิงผง

การทดลองและเปรียบเทียบอัตราการใช้พลังงานจากการบดเชื้อเพลิงชีวมวลเม็ดและชีวมวลทอร์รีไฟต์เม็ด พบว่าอัตราการใช้พลังงานในการบดเชื้อเพลิงชีวมวลทอร์รีไฟต์มีค่าต่ำกว่าชีวมวลเนื่องจากชีวมวลชนิดนี้มีความต้านทานต่อการสลายที่ต่ำกว่าจึงถูกบดเป็นผงได้ง่ายเป็นผลมาจากกระบวนการทอร์รีแฟคชันซึ่งทำให้เอมิเซลลูโลสที่เป็นองค์ประกอบหลักของพืชสลายที่อุณหภูมิต่ำ นอกจากนี้ปริมาณที่เชื้อเพลิงผงที่ได้จากการบดเชื้อเพลิงชีวมวลทอร์รีไฟต์จะเพิ่มขึ้นตามความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นอีกด้วย

7.6 ข้อเสนอแนะ

หัวข้อนี้กล่าวถึงข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการจำลองและการทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลและชีวมวลทอร์รีไฟต์ด้วยหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบดั้งเดิมกับแบบใหม่ เพื่อประโยชน์ในการทำวิจัยที่เกี่ยวข้องในอนาคต

7.6.1 ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการจำลอง

1. ควรกำหนดให้มีการถ่ายเทความร้อนระหว่างผนังห้องเผาไหม้กับอิฐทนไฟเพื่อให้เกินผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำมากขึ้น
2. ควรศึกษาวัตถุขวางการไหลลักษณะอื่นๆที่มีค่า Blockage Ratio มากขึ้น ซึ่งจะให้เกิดการกระจายและการไหลย้อนกลับที่ดีขึ้น

7.6.2 ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการทดลอง

1. ควรหลีกเลี่ยงการเผาไหม้เชื้อเพลิงการทดลองเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลในช่วงที่มีความชื้นสูงเนื่องจากเชื้อเพลิงชีวมวลสามารถดูดซับความชื้นได้ดี
2. ควรดูแลตะแกรงที่ใช้ในการบดเชื้อเพลิงเม็ดให้มีประสิทธิภาพในการบดอยู่เสมอ
3. ตรวจสอบเทอร์โมคัปเปิลก่อนการใช้งานเสมอเพื่อลดความผิดพลาดของอุณหภูมิที่ได้จากการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.6.3 ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับเชื้อเพลิงชีวมวลทอร์รีไฟต์

1. ควรใช้เชื้อเพลิงชีวมวลทอร์รีไฟต์ที่เป็นชนิดเดียวกันกับชีวมวลเพื่อให้การเปรียบเทียบผลการทดลองมีความแม่นยำมากขึ้น
2. ควรศึกษาการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลทอร์รีไฟต์ที่อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงเดียวกันเพื่อให้การเปรียบเทียบผลการทดลองมีความแม่นยำมากขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Pongsanun, “หัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น EFFECT OF BLUFF BODY AND SWIRL PLATE ON PERFORMANCE OF,” 2017.
- [2] ชินภัทร ชูระการ, “การพัฒนาหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลในหม้อน้ำอุตสาหกรรม,” *วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย*, 2558.
- [3] K. Chatchalerm, L. Ponepen, and C. Jarruwat, “Effect of secondary air swirler shape on flow aerodynamic and combustion of pulverized biomass,” *9th TSME Int. Conf. Mech. Eng.*, 2018.
- [4] X. Ren, R. Sun, X. Meng, N. Vorobiev, M. Schiemann, and Y. A. Levenskiy, “Carbon, sulfur and nitrogen oxide emissions from combustion of pulverized raw and torrefied biomass,” *Fuel*, vol. 188, pp. 310–323, 2017.
- [5] Y. Jale, G. Duman, O. Karlström, and A. Brink, “NO and SO₂ emissions from combustion of raw and torrefied biomasses and their blends with lignite,” *J. Environ. Manage.*, vol. 227, no. August, pp. 155–161, 2018.
- [6] M. Manouchehrinejad, I. van Giesen, and S. Mani, “Grindability of torrefied wood chips and wood pellets,” *Fuel Process. Technol.*, vol. 182, no. August, pp. 45–55, 2018.
- [7] Z. Chen, M. Wang, E. Jiang, D. Wang, K. Zhang, and Y. Jiang, “Pyrolysis of Torrefied Biomass,” *Trends Biotechnol.*, vol. 36, p. 1287, 2018.
- [8] “Combustion Requirements.” [Online]. Available: <https://dscng.pttplc.com>.
- [9] ฐานิตย์ เมธิยานนท์, *ทฤษฎีและเทคโนโลยีการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งและชีวมวล Theory and Technology of Solid Fuels and Biomass Combustion*. 2558.
- [10] “การวิเคราะห์คุณภาพถ่าน” [Online]. Available: <http://maemohmine.egat.co.th/>.
- [11] J. Poudel, T. I. Ohm, and S. C. Oh, “A study on torrefaction of food waste,” *Fuel*, vol. 140, pp. 275–281, 2015.
- [12] W. H. Chen, M. Y. Huang, J. S. Chang, C. Y. Chen, and W. J. Lee, “An energy analysis of torrefaction for upgrading microalga residue as a solid fuel,” *Bioresour. Technol.*, vol. 185, pp. 285–293, 2015.
- [13] Mitchell, J. K. P., B Livingston, and G.D.Roc, “Torrefied biomass: A fore sighing study into the business case for pellets from torrefied biomass as a new solid fuel,” *A Present. to All Energy 07*, 2007.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




- [14] S. Loo and J. Koppe, “The handbook of biomass combustion & cofiring,” *Earthscan*, 2008.
- [15] สมรัฐ เกิดสุวรรณ, *การเผาไหม้และการควบคุมมลพิษ*. ปทุมธานี: สกายบุ๊กส์, 2549.
- [16] Stephen R. Turns, *An Introduction to Combustion Concept and Applications*, Third edit. Singapore: Mc Graw Hill, 2012.
- [17] สำเร้ง จักรใจ, *การเผาไหม้ (Combustion)*, พิมพ์ครั้งที่ ๑. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- [18] TSI, “Combustion Analysis Basics - An Overview of Measurements, Methods and Calculations Used in Combustion Analysis,” *Combust. Anal.*, p. 19, 2004.
- [19] J.M. Beer and N.A. Chigier, “Combustion aerodynamics,” *Fuel energy Sci. Ser. Univ. Sheffield. Appl. Sci.*, 1972.
- [20] นคร ทิพย์วงศ์, “พื้นฐานวิศวกรรมการเผาไหม้.”
- [21] จารุวัตร เจริญสุข, *Computational Fluid Dynamics and its Applications in Engineering Problems พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณและการประยุกต์ในงานวิศวกรรม.* .
- [22] “ANSYS FLUENT ver.12.0,” *Theory Guid.*
- [23] B. E. Launder and D.B. Spalding, “THE NUMERICAL COMPUTATION OF TURBULENT FLOWS,” *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, vol. 3, pp. 269–289, 1974.
- [24] B. F. M. and B. . Hjertager, “On mathematical models of turbulent.”
- [25] P. Aidin, T. Mahmut, S. Martin, and M. Y. A. L. Delichatsios, “On the particle sizing of torrefied biomass for co-firing with pulverized coal,” *Combust. Flame*, p. 194, 2018.




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

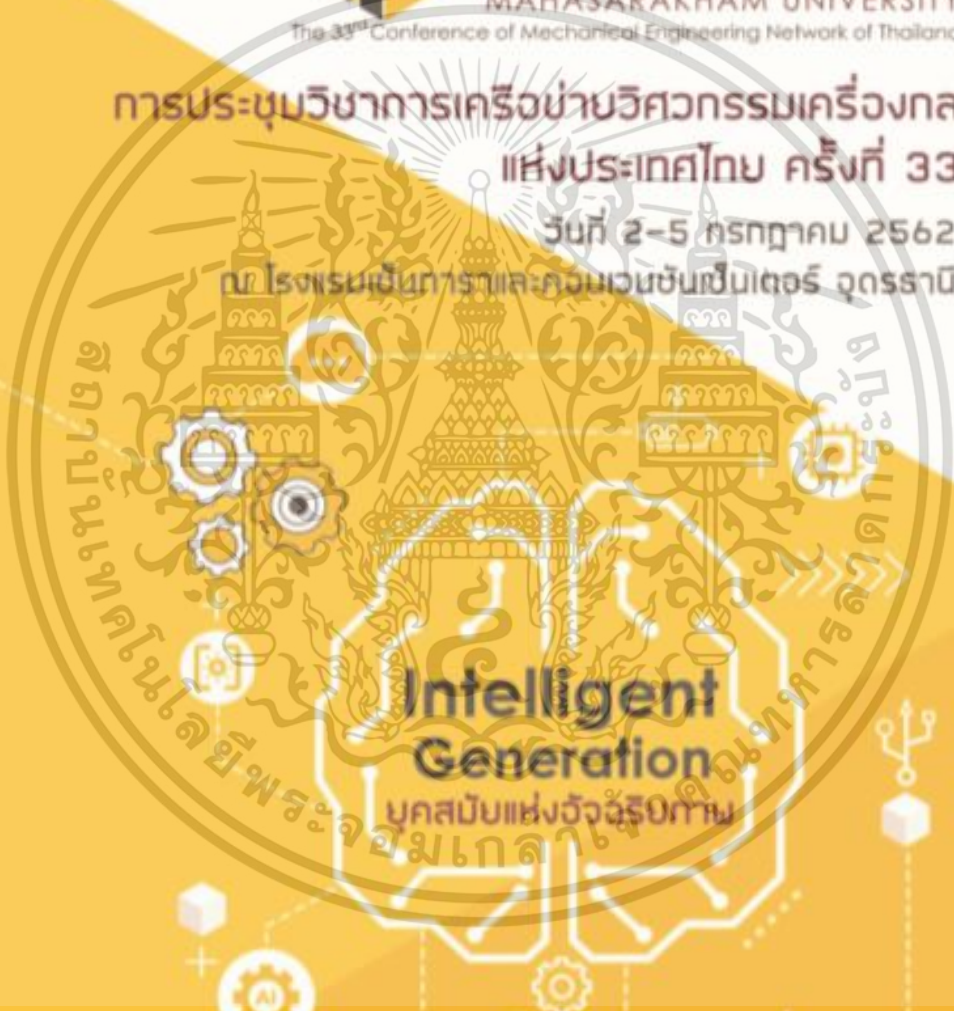


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


MENETT²⁰¹⁹
 Faculty of Engineering
 MAHASARAKHAM UNIVERSITY
 The 33rd Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกล
 แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 33
 วันที่ 2-5 กรกฎาคม 2562
 ณ โรงแรมเอ็กการาและคอนเวนชันเซ็นเตอร์ จุฑารามิ



Intelligent Generation
 บุคสมัยแห่งจิวรัฐิกถาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



สารบัญบทความฉบับเต็ม (ต่อ)

บทความ	หน้า
AEC-011	79
AEC-012	86
AEC-013	94
AEC-014	100
AEC-015	108
AEC-016	116
AEC-017	125
AEC-019	135
AEC-020	142
AEC-021	152

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การประชุมวิชาการระดับนานาชาติเรื่องเทคโนโลยีและนวัตกรรม ครั้งที่ 33
วันที่ 2-3 กรกฎาคม พ.ศ. 2562 จังหวัดสุพรรณบุรี

AEC - 012



**การปรับปรุงสมรรถนะหัวเผาเชื้อเพลิง
โดยการเพิ่มขนาดท่ออากาศปฐมภูมิ
Improvement of burner performance
by increasing the size of the primary air tube**

รังสิวิทย์ ณ รังษี, อัครเดศิม แก้วขมภู, ศีล สร้อยทอง, มณฑล ใจกุลศ, จารุวัตร เจริญสุข*

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520
*ผู้ติดต่อ: Email: jaruwat_shglemit@kmitl.ac.th, เบอร์โทรศัพท์: 02 329 8355, เบอร์โทรสาร: 02 329 8352

บทคัดย่อ

บทความนี้ทำการศึกษาการปรับปรุงสมรรถนะหัวเผาเชื้อเพลิงโดยการเพิ่มขนาดท่ออากาศปฐมภูมิ ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากผลการเผาไหม้ด้วยเชื้อเพลิงชีวมวลที่ก่อถึงความร้อน 300 กิโลวัตต์ อากาศเกิน 15% และใช้เชื้อเพลิงที่ถูกบดผ่านตะแกรงขนาดไม่เกิน 1.0 มิลลิเมตร จากการศึกษาพบว่า การเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลโดยใช้หัวเผาเชื้อเพลิงที่ปรับปรุงสมรรถนะแล้ว ทำให้เกิดการเผาไหม้และกระจายตัวทั่วห้องเผาไหม้ที่ลึกกว่า เกิดคาร์บอนมอนอกไซด์และออกไซด์ของไนโตรเจนน้อยกว่าการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลโดยใช้หัวเผาเชื้อเพลิงที่ยังไม่ปรับปรุงสมรรถนะ นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาก่อนเผาไหม้โดยใช้ชีวมวลทอร์ริไฟด์แทนชีวมวล และใช้หัวเผาเชื้อเพลิงที่ถูกปรับปรุงสมรรถนะแล้วภายใต้เงื่อนไขการทดลองเดียวกันกับการศึกษาข้างต้น และจากการศึกษาพบว่า การเผาไหม้ชีวมวลทอร์ริไฟด์เกิดการเผาไหม้และกระจายตัวที่ลึกกว่า และมีก่อให้เกิดคาร์บอนมอนอกไซด์มากกว่า แต่เกิดออกไซด์ของไนโตรเจนที่น้อยกว่า

คำหลัก: หัวเผาเชื้อเพลิง, ชีวมวลทอร์ริไฟด์, กระบวนการทอร์ริฟิเคชัน

Abstract

This paper studied the improvement of burner performance by increasing the size of the primary air tube. This combustion were at 300 kW thermal and 15 percent excess air with biomass fuel. The biomass fuel were sieved to a size cut of up to 1.0 mm. Results showed that the combustion of biomass after improvement had burned and distributed throughout internal combustion chamber. The combustion also released less oxygen and oxide of nitrogen than the previous version of burner. In addition, the study were carried out on the combustion of torrefied biomass by using a modified primary air tube under the same experimental condition. Results showed that the combustion of torrefied biomass had longer ignition delay. It also contributes to more emission on carbon monoxide but less emission in oxides of nitrogen.

Keywords: Burner, Torrefied Biomass, Torrefaction process

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



1. บทนำ

ความต้องการใช้พลังงานในปัจจุบันมีเยอะมากขึ้น ทำให้มีความจำเป็นต้องหาแหล่งพลังงานทดแทนอื่นๆ เพื่อนำมาใช้เป็นพลังงานสำรอง ซึ่งแหล่งพลังงานทดแทนที่สามารถหาได้ง่ายและมีมากมาย คือ พลังงานทดแทนจากชีวมวล (Biomass) ซึ่งได้รับความนิยมในปัจจุบัน และเนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศที่อุดมสมบูรณ์ต่อการเติบโตของพืชหรือต้นไม้มากมายหลายชนิด ทำให้พลังงานทดแทนชีวมวลนี้สามารถชดเชยระดับเศรษฐกิจและสร้างรายได้ให้กับเกษตรกรได้ ซึ่งในปัจจุบันนี้กระบวนการสร้างพลังงานทดแทนจากชีวมวลมีมากมายหลายแบบ ตัวอย่างเช่น การเผาไหม้โดยตรง (Direct Combustion) การเผาไหม้เชื้อเพลิงสองขั้นขึ้นไป (Co-firing) การผลิตก๊าซชีววมวล (Gascification) ไพโรไลซิส (Pyrolysis) เป็นต้น

การเผาไหม้มีปัจจัยมากมายหลายอย่างเพื่อที่จะทำให้การเผาไหม้ขึ้นอย่างสมบูรณ์ ยกตัวอย่างเช่น ชนิดของเชื้อเพลิง ปริมาณอากาศที่เข้า การสร้างความสมดุลความร้อนระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ เวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาการเผาไหม้ เป็นต้น โดยปัจจัยเหล่านี้จะเกิดขึ้นได้คือเมื่อมีอุปกรณ์หรือชิ้นงานที่จะช่วยทำให้เกิดขึ้นได้[1]

งานวิจัยก่อนหน้านี้มีการศึกษาการใช้วัตถุขวงทรงกรวย (Bluff Body) เพื่อทำหน้าที่ลดความเร็วในแนวแกน (Axial axis) ของอากาศป้อนที่มีเชื้อเพลิงผสมอยู่ แต่จะเพิ่มความเร็วในแนวรัศมี (Radial axis) แทน ทำให้เพิ่มระยะเวลาของเชื้อเพลิงกับอากาศให้อยู่ในห้องเผาไหม้ช่วยให้ความร้อน และทำให้เกิดการไหลย้อนกลับไปยังบริเวณที่มีความดันต่ำด้วย[2] นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์ซึ่งทำหน้าที่ในการสร้างความปั่นป่วนในห้องเผาไหม้หรือที่เรียกว่า "สวอร์เบลเลอร์ (Swirler)" เพื่อทำให้เชื้อเพลิงกับอากาศเกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์[3] ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้เป็นองค์ประกอบอย่างหนึ่งที่ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์

นอกจากนี้ยังมีอุปกรณ์ที่ส่งผลต่อระยะเวลาการเผาไหม้ และการควบคุมเคมีการเผาไหม้เชื้อเพลิงกับอากาศ นั่นคือหัวเผาเชื้อเพลิง ซึ่งงานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเพื่อศึกษาการปรับปรุงสมรรถนะหัวเผาเชื้อเพลิงโดยการเพิ่มขนาดท่ออากาศป้อนลม ซึ่งทำให้มีการเพิ่มขึ้นที่การไหลของอากาศป้อนลมเป็นสองเท่า โดยการศึกษาสามารถศึกษาได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลด้วยหัวเผาเชื้อเพลิงก่อนปรับปรุงและหลังปรับปรุงสมรรถนะแล้ว และยังสามารถนำหัวเผาที่ปรับปรุงสมรรถนะแล้วไปใช้เพื่อศึกษาการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลที่โรงไฟฟ้า ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงที่คาดว่าจะมีเชื้อเพลิงทางเลือกในอนาคตอันใกล้

2: ฤทธิ์ที่เกี่ยวข้อง

2.1 ชีวมวล (Biomass)

ชีวมวล หมายถึง สารอินทรีย์ที่เก็บสะสมพลังงานจากธรรมชาติและสามารถนำมาใช้ในการสร้างพลังงานได้ ยกตัวอย่างเช่น พืชข้าว แคนตาลิน กากอ้อย กากหลุม ปาล์ม เศษไม้ และมูลสัตว์ เป็นต้น ซึ่งชีวมวลส่วนใหญ่มีองค์ประกอบเป็นเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน

2.2 กระบวนการทอร์ริแฟคชัน (Torrefaction Process)

กระบวนการทอร์ริแฟคชันเป็นกระบวนการให้ความร้อนแก่ชีวมวลที่อุณหภูมิที่ต่ำ ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน ทำให้มีคุณสมบัติที่ถ่วงน้ำหนักชีวมวล โดยกระบวนการนี้ช่วยกำจัดความชื้น ลดปริมาณไฮโดรคาร์บอนเบา เพิ่มค่าความร้อนและค่าพลังงานต่อหน่วยมวล เก็บรักษาได้ยาวนานขึ้น มีความสามารถในการถูกหุงเห้ขึ้น ไม่ดูดซับน้ำ และมีความหนาแน่นสูงซึ่งทำให้ต้นทุนในการขนส่งต่ำ ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้เอื้ออำนวยต่อการขนส่งที่จำกัดหลายประเภทของการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานทดแทนได้ [4]



ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมี (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) และค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม) ของชีวมวลและชีวมวลทอร์ไฟต์

ลำดับ/แหล่งเชื้อเพลิง	ชีวมวล	ชีวมวลทอร์ไฟต์
กรณีชีวมวลที่ผสมรวมรวม (% โดยน้ำหนัก)		
- สารระเหยง่าย	76.68	49.50
- คาร์บอนคงที่	15.23	40.22
- ความชื้น	5.81	5.09
- เถ้า	2.28	5.19
กรณีชีวมวลที่ผสมรวมรวม (% โดยน้ำหนัก)		
- คาร์บอน	45.42	57.20
- ไฮโดรเจน	6.31	5.00
- ไนโตรเจน	0.48	0.34
- ออกซิเจน	0.00	0.04
- แคลเซียม	45.54	32.30
- ค่าความร้อน (MJ/kg)	17.53	21.04



ภาพที่ 1 ชุดทดลองสำหรับการเผาไหม้

อุปกรณ์ที่สำคัญสำหรับชุดทดลองนี้ มีดังนี้

- 1) ชุดหัวเผาเชื้อเพลิง
- 3) หัวเผาเชื้อเพลิงคอนปรับปรุ และติดตั้งปรับปรุ
- 3) หัวเผาไหม้ช่วย

2.4 อัตราการไหลของอากาศ (Air flow rate)

ความเร็วของอากาศปริมาตรที่ผ่านใบพัดโรตารี่ในบริเวณหัวเผาเชื้อเพลิง สามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$Q = \frac{V}{t} \times \rho$$

2.4 การเปรียบเทียบและเปลี่ยนหน่วยความเข้มข้นของมลพิษทางอากาศ (The O₂ Reference)

การเปรียบเทียบและเปลี่ยนหน่วยความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ และออกไซด์ของไนโตรเจนที่ได้จากการทดลอง โดยใช้ออกซิเจนอ้างอิงที่ 6 เปอร์เซ็นต์ (5) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$\text{Corrected PPM} = \text{Measured PPM} \times \frac{20.9 - \text{O}_2 \text{ Reference}}{20.9 - \text{O}_2 \text{ Measured}}$$

3. เื่อนโซ และขั้นตอนการทดลอง

การเปรียบเทียบหัวเผาเชื้อเพลิงก่อนปรับปรุและหลังปรับปรุ สามารถเปรียบเทียบได้จากการศึกษาการเผาไหม้ชีวมวลโดยใช้หัวเผาดังกล่าว ซึ่งชุดทดลองการเผาไหม้ในงานวิจัย มีลักษณะดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2 ค่าคงความร้อน (กิโลวัตต์) ความถี่ของมอเตอร์ ค่าเสียงเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดผง (เฮิรต์)

กำลังความร้อน (kW)	ความถี่ของมอเตอร์ทุกรอบต่อวินาที (Hz)	
	ชีวมวล	ชีวมวลทอร์ไฟต์
200	0.95	0.83
250	1.25	0.89
300	1.54	1.16

3.1 ขั้นตอนการทดลองเผาไหม้

- 1) เลือกชนิดของเชื้อเพลิง และหัวเผาที่ต้องการใช้ในการทดลอง
- 2) ป้อนเชื้อเพลิงชนิดผงที่ต้องการด้วยความเร็วของเครื่องจ่ายเชื้อเพลิงชนิดผง ตามตารางที่ 2
- 3) ป้อนปริมาณอากาศปริมาตรที่กฎวิธี และตติยภูมิเข้าสู่หัวเผาไหม้ช่วย ตามตารางที่ 3 (เชื้อเพลิงชีวมวล) หรือตามตารางที่ 4 (เชื้อเพลิงชีวมวลทอร์ไฟต์)
- 3) สังเกตดูการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกับอากาศ
- 4) หากอุณหภูมิของการเผาไหม้มีค่าสูงที่ ให้เพิ่มกำลังความร้อนโดยป้อนเชื้อเพลิงชนิดผงและเพิ่มปริมาณอากาศจนถึงกำลังความร้อนที่ 300 กิโลวัตต์
- 5) รอจนอุณหภูมิมีค่าคงที่อีกครั้ง จากนั้นบันทึกค่าอุณหภูมิ และค่าการปลดปล่อย CO, O₂ และ NO_x

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตารางที่ 3 อัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิ อากาศทุติยภูมิ และอากาศตติยภูมิของการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลและเชื้อเพลิงชีวมวลเทอร์ไรท์ ที่อัตราส่วน 25 : 65 : 10

กำลังความร้อน (kW)	อัตราส่วนที่ป้อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้ (ท/ว)					
	เชื้อเพลิงชีวมวล			เชื้อเพลิงชีวมวลเทอร์ไรท์		
	สปปฐมภูมิ	สปทุติยภูมิ	สปตติยภูมิ	สปปฐมภูมิ	สปทุติยภูมิ	สปตติยภูมิ
200	0.017	0.045	0.007	0.016	0.044	0.006
250	0.021	0.056	0.008	0.020	0.055	0.008
300	0.025	0.068	0.010	0.024	0.066	0.010

3.2 เส้นใยของการทดลอง

1) ตำแหน่งการเก็บอุณหภูมิของการเผาไหม้



ภาพที่ 2 ตำแหน่งการเก็บอุณหภูมิ

2) หัวเผาเชื้อเพลิงก่อนปรับปรุง และหลังปรับปรุง



ภาพที่ 3 หัวเผาเชื้อเพลิงก่อนปรับปรุง (ซ้าย) และหัวเผาเชื้อเพลิงหลังปรับปรุง (ขวา)

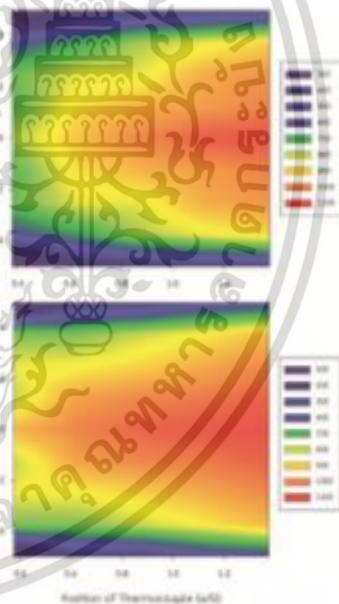
3) เมาใหม่ที่กำลังความร้อน 300 กิโลวัตต์ โดยใช้ชุดใบพัดโค้ง (Swirlar) และอัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิ อากาศทุติยภูมิ และอากาศตติยภูมิ ที่อัตราส่วน 25 : 65 : 10

4. ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

4.1 การเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล

เป็นการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของการปรับปรุงสมรรถนะหัวเผาเชื้อเพลิงโดยการเพิ่มขนาดท่ออากาศปฐมภูมิ ซึ่งใช้เชื้อเพลิงชีวมวลในการเผาไหม้

4.1.1 เปรียบเทียบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลโดยใช้หัวเผาเชื้อเพลิงก่อนปรับปรุงและหลังปรับปรุง สมรรถนะ



ภาพที่ 4 การกระจายตัวของอุณหภูมิของการเผาไหม้ชีวมวล โดยใช้หัวเผาเชื้อเพลิงก่อนปรับปรุง (บน), หลังปรับปรุง (ล่าง)

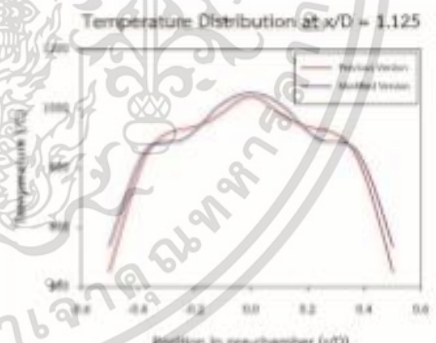
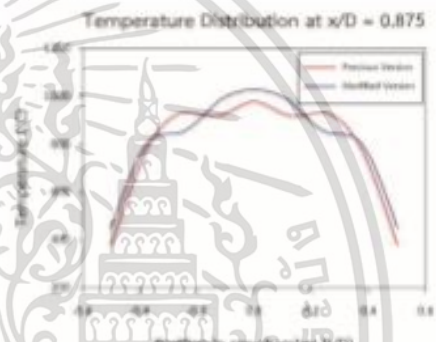
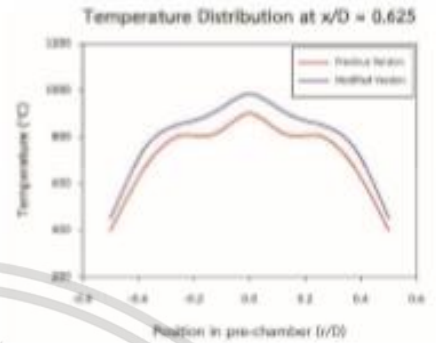
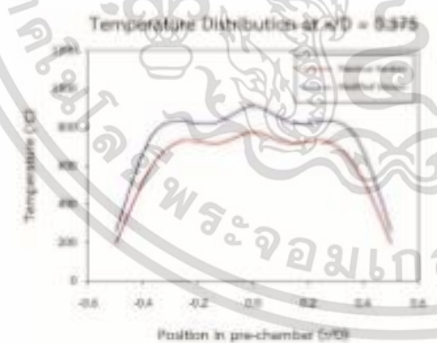
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



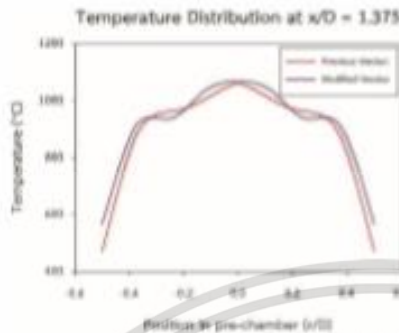
การเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลโดยใช้หัวเผาเชื้อเพลิงหลังปรับปรุง ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่เร็วกว่า สามารถสังเกตได้จากภาพที่ 4 จุดเริ่มต้นของการเผาไหม้เริ่มต้นที่ตำแหน่งที่วัดอุณหภูมิแรกเลย และยังมีกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ได้ดีกว่าการใช้หัวเผาเชื้อเพลิงก่อนปรับปรุง เนื่องจากการปรับปรุงสมรรถนะหัวเผาเชื้อเพลิงโดยการเพิ่มขนาดท่ออากาศปฐมภูมิ ทำให้ความเร็วของอากาศปฐมภูมิที่มีเชื้อเพลิงผสมอยู่ลดลง ซึ่งลดลงแนวแกนและเพิ่มในแนวรัศมีที่เกิดจากรีดขวางการไหล (Bluff body) การปรับปรุงสมรรถนะนี้ยังส่งผลให้ความเร็วของอากาศทุติยภูมิเพิ่มขึ้นอีกด้วย ซึ่งออกผลคล้ายนี้เป็นส่วนสำคัญของการเผาไหม้เนื่องจากจะทำให้เชื้อเพลิงและอากาศเกิดความปั่นป่วนและกระตุกเคลื่อนที่ภายในห้องเผาไหม้อย่างดี และท้ายที่สุดเกิดการเผาไหม้ได้ดี นอกจากนี้การปรับปรุงสมรรถนะดังกล่าวยังลดให้เกิดการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ได้นานขึ้นอีกด้วย

4.1.2 เปรียบเทียบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลโดยใช้หัวเผาเชื้อเพลิงก่อนปรับปรุงและหลังปรับปรุงสมรรถนะ ที่ตำแหน่ง x/D ต่างๆ

สามารถอธิบายและเปรียบเทียบความแตกต่างของการเผาไหม้โดยใช้หัวเผาเชื้อเพลิงก่อนปรับปรุงและหลังปรับปรุงที่ตำแหน่ง x/D ต่างๆ โดยมีผลการทดลอง ดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



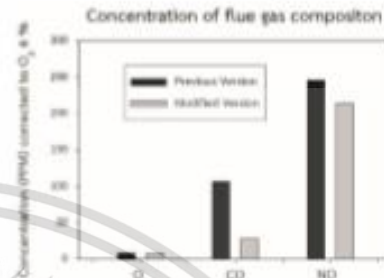
ภาพที่ 5 อุณหภูมิของการเผาไหม้โดยใช้หีวน้ำเชื้อเพลิง ก่อนปรับปรุงกับหลังปรับปรุง ที่ตำแหน่ง x/D ต่างๆ

หากพิจารณาที่ตำแหน่ง x/D ต่างๆ จะพบว่าอุณหภูมิของการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลด้วยหีวน้ำเชื้อเพลิงที่ปรับปรุงสมรรถนะแล้วมีค่าสูงกว่าเกือบทุกตำแหน่ง x/D โดยตำแหน่งที่สูงที่สุดคือตำแหน่งกลางห้องเผาไหม้นี้เอง และยังพบว่าฮีสควาร์ว้าตำแหน่งที่มีอุณหภูมิลดลงมากที่สุดน้อย เกิดขึ้นเนื่องจากอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำจากอากาศปฐมภูมิและอากาศทุติยภูมิที่เข้ามาทำให้อุณหภูมิของการเผาไหม้ลดลง แต่เมื่อเวลาผ่านไปอุณหภูมิของการเผาไหม้ที่ตำแหน่งนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และมีแนวโน้มสูงขึ้น เนื่องจากอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำจากอากาศปฐมภูมิและอากาศทุติยภูมิมีผลต่อการเผาไหม้น้อยลง เนื่องจากยิ่งไกลออกจากหีวน้ำเชื้อเพลิงเท่าไร ยิ่งทำให้ฮีสควาร์ว้าของอากาศปฐมภูมิและอากาศทุติยภูมิที่เข้ามาในห้องเผาไหม้นั้นน้อยลงไปอีกด้วย

4.1.3 เปรียบเทียบองค์ประกอบของก๊าซไอเสียจากการเผาไหม้โดยใช้หีวน้ำเชื้อเพลิงก่อนปรับปรุงและหลังปรับปรุงสมรรถนะ

การเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลโดยใช้หีวน้ำเชื้อเพลิงที่ปรับปรุงสมรรถนะแล้วจะทำให้เกิดการเผาไหม้เชื้อเพลิงได้ดีกว่าการใช้หีวน้ำเชื้อเพลิงก่อนปรับปรุง เนื่องจากเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ด้วยความเร็วต่ำ เชื้อเพลิงจึงอยู่

ในห้องเผาไหม้ได้นานขึ้น ส่งผลให้เกิดการเผาไหม้ที่ขึ้นและยังทำให้เชื้อเพลิงที่เหลือจากการถูกเผาผลาญอีกด้วย

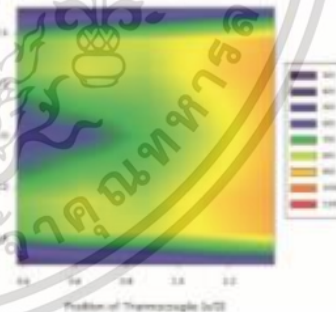


ภาพที่ 6 องค์ประกอบของก๊าซไอเสียจากการเผาไหม้

4.2 การเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลทอร์ซิโตน

เป็นการทดลองเพื่อศึกษาผลการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลทอร์ซิโตนที่มาตรฐานจะเป็นเชื้อเพลิงทางเลือกในอวกาศแทนการใช้เชื้อเพลิงชีวมวล เนื่องจากเชื้อเพลิงนี้มีคุณสมบัติที่ทนทานขึ้นซึ่งชีวมวล กล่าวคือ ให้ความร้อนใกล้เคียงถ่านหิน และปล่อยก๊าซเรือนกระจกออกมาใกล้เคียงกับชีวมวล ซึ่งการทดลองจะใช้หีวน้ำเชื้อเพลิงที่ปรับปรุงสมรรถนะแล้ว

4.2.1 การเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลทอร์ซิโตนที่ตัดด้วยหีวน้ำหลังปรับปรุงสมรรถนะ



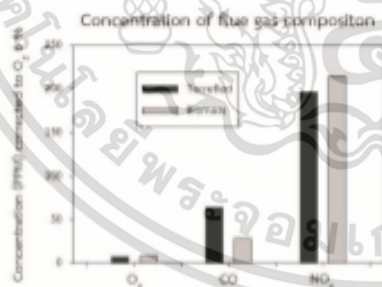
ภาพที่ 7 การกระจายตัวของอุณหภูมิของการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลทอร์ซิโตนโดยใช้หีวน้ำเชื้อเพลิงหลังการปรับปรุง



จากรูปที่ 7 การเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลทอริไฟต์ โดยการใช้หัวเผาเชื้อเพลิงที่ปรับปรุงแล้ว พบว่าการเผาไหม้ที่ตำแหน่งที่ห่างออกไปจากหัวเผาเชื้อเพลิง เมื่อเปรียบเทียบกับการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลโดยการใช้หัวเผาเชื้อเพลิงลักษณะเดียวกัน (ภาพที่ 4) เนื่องจากกระบวนการทอริไฟต์ทำให้ปริมาณสารระเหยง่าย (Volatile matter) ของมีค่าน้อยลง ซึ่งสารตัวนี้จะช่วยทำให้เกิดไฟได้ง่ายขึ้น จึงทำให้การเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลทอริไฟต์เกิดการติดไฟได้ง่ายขึ้น

4.2.2 เปรียบเทียบองค์ประกอบของก๊าซไอเสียจากการเผาไหม้ระหว่างเชื้อเพลิงชีวมวลและชีวมวลทอริไฟต์ โดยการใช้หัวเผาเชื้อเพลิงที่ปรับปรุงแล้ว

ก๊าซไอเสียจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลทอริไฟต์ แตกต่างจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล เนื่องจากกระบวนการทอริไฟต์เปลี่ยนทำให้เชื้อเพลิงชีวมวลมีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพ หรือทำให้มีคุณสมบัติของชีวมวลที่ต่างกัน ซึ่งทำให้เชื้อเพลิงใหม่ที่ได้มีคุณสมบัติของชีวมวลและค่ากันความร้อนด้วยกัน จากภาพที่ 7 พบว่า การเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลทอริไฟต์มีค่าความไม่พึงพอใจเมื่อเทียบกับชีวมวล ซึ่งคิดการเผาไหม้ที่ตำแหน่งห่างออกไปจากหัวเผาเชื้อเพลิงซึ่งมีโอกาสที่จะทำให้เกิดเผาไหม้เกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ เป็นผลให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล



รูปที่ 8 องค์ประกอบของก๊าซไอเสียจากการเผาไหม้

5. สรุปผลการทดลอง

การเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลโดยใช้หัวเผาเชื้อเพลิง หลังปรับปรุงสมรรถนะแล้ว ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ดีกว่า และอุณหภูมิสูงกว่า เกิดการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ดีกว่า และยังคงผลให้เกิดการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ได้นานขึ้นอีกด้วย เนื่องจากความเร็วของอากาศป้อนที่มีเชื้อเพลิงอยู่เข้าสู่ห้องเผาไหม้มีค่าต่ำ และยังคงผลให้ความเร็วของอากาศชุดยู่เพิ่มสูงขึ้นอีกด้วย ซึ่งทำให้เชื้อเพลิงและอากาศเกิดความปั่นป่วนและการคลุกเคล้ากันภายในห้องเผาไหม้อย่างดี และเนื่องจากอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำจากอากาศป้อนและอากาศชุดยู่ที่เข้ามา ทำให้อุณหภูมิของการเผาไหม้ลดลง ทำให้เกิดอิทธิพลของอากาศป้อนและอากาศชุดยู่ที่เข้ามาในห้องเผาไหม้จากการทดลองพบว่า เมื่อการเผาไหม้ห่างจากหัวเผาเชื้อเพลิง ยิ่งทำให้อิทธิพลของอากาศส่วนนี้มีค่าน้อยลงไปอีกด้วย นอกจากนี้การเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลโดยใช้หัวเผาเชื้อเพลิงหลังปรับปรุงสมรรถนะแล้ว ยังทำให้เชื้อเพลิงที่เหลือจากการถูกเผาไหม้ และองค์ประกอบของก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยลงอีกด้วย

เชื้อเพลิงชีวมวลทอริไฟต์คือเชื้อเพลิงชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอริไฟต์ ซึ่งกระบวนการนี้ทำให้สารระเหยง่ายมีปริมาณน้อยลง (สารระเหยง่ายจะช่วยให้เกิดการติดไฟได้ง่ายขึ้น) และจากการทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลทอริไฟต์โดยการใช้หัวเผาเชื้อเพลิงที่ปรับปรุงสมรรถนะแล้ว พบว่าอุณหภูมิของการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นในตำแหน่งที่ห่างออกไปจากหัวเผาเชื้อเพลิง เมื่อเปรียบเทียบกับการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลโดยใช้หัวเผาลักษณะเดียวกัน ทำให้การเผาไหม้เชื้อเพลิงทอริไฟต์มีโอกาสที่จะเกิดขึ้นอย่างไม่สมบูรณ์ และยังคงผลให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงขึ้นอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



6. เอกสารอ้างอิง

- [1] F. El-Mahallawy and S. El-Din Hablik 2000 Fundamental and technology of combustion (Amsterdam: ELSEVIER).
- [2] ทองศรินทร์ แก่นพรม, ผลกระทบของวิถีขวงวงการไหลและใบปิดต่อสมรรถนะการเผาไหม้หัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวล, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2560.
- [3] Chatchalern Kaewchompoo, Effect of secondary air swirler shape on flow aerodynamic and combustion of pulverized biomass, The 9th TSME International Conference on Mechanical Engineering 2018.
- [4] Xiaohan Ren, Rufi Sun, Xiaoxiao Meng, Nikita Vorobiev, Martin Schlemann, Yiannis A. Levendis, Carbon, sulfur and nitrogen oxide emissions from combustion of pulverized raw and torrefied biomass, Fuel 2017.
- [5] Combustion Analysis Basics, An Overview of Measurements, Methods and Calculations Used in Combustion Analysis, 2004.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายรังสินันท์ ณ รังษี
 วัน เดือน ปีเกิด วันที่ 31 ธันวาคม พ.ศ. 2537 จังหวัดพังงา
 ที่อยู่ 115/1 หมู่ 1 ตำบลทับปุด อำเภอทับปุด
 จังหวัดพังงา 82180 โทร.097-016-2020
 ประวัติการศึกษา 2559 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเครื่องกล (เกียรตินิยมอันดับ1)
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้