

การศึกษาเปรียบเทียบอิทธิพลของตัวสร้างการหมุนควงแนวรัศมีแบบแผ่นโค้งและแผ่นเรียบ
สำหรับหัวเผาเชื้อเพลิงชนิดฝุ่น
A COMPARATIVE STUDY ON EFFECT OF CURVED AND FLAT VANE RADIAL SWIRL
GENERATOR FOR PULVERIZED BIOMASS BURNER

ภูมิภักดี แจ่มจรัส
วรินทร์ นาวงษ์
ศัทยศรณ์ รักตพงศ์ไพศาล

ปฏิญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

การศึกษาเปรียบเทียบอิทธิพลของตัวสร้างการหมุนควงแนวรัศมีแบบแผ่นโค้งและแผ่นเรียบ
สำหรับหัวเผาเชื้อเพลิงชนิดฝุ่น

A COMPARATIVE STUDY ON EFFECT OF CURVED AND FLAT VANE RADIAL SWIRL
GENERATOR FOR PULVERIZED BIOMASS BURNER

ภูมิศักดิ์ แจ่มจำรัส
วรินทร์ นาวงษ์
ศักรินทร์ รัตพงษ์ไพศาล

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

A COMPARATIVE STUDY ON EFFECT OF CURVED AND FLAT VANE RADIAL SWIRL
GENERATOR FOR PULVERIZED BIOMASS BURNER

POOMPAK CHAMCHUMRAS
WARINTORN NAWONG
SAKSORN RAKTAPONGPAISARN

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2017

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2560

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาเปรียบเทียบอิทธิพลของตัวสร้างการหมุนควงแนวรัศมีแบบแผ่นโค้งและแผ่นเรียบ
สำหรับหัวเผาเชื้อเพลิงชนิดฝุ่น

A COMPARATIVE STUDY ON EFFECT OF CURVED AND FLAT VANE RADIAL SWIRL
GENERATOR FOR PULVERIZED BIOMASS BURNER

ผู้จัดทำ

1. ภูมิภักดิ์ แจ่มจำรัส รหัสประจำตัว 57011000
2. วรินทร์ นาวงษ์ รหัสประจำตัว 57011123
3. ศักย์ศรณ์ รัตพงษ์ไพศาล รหัสประจำตัว 57011235



อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร.จากรวัตร เจริญสุข)

การศึกษาเปรียบเทียบอิทธิพลของตัวสร้างการหมุนควงแนวรัศมีแบบแผ่นโค้งแผ่นเรียบสำหรับหัวเผา
เชื้อเพลิงชีวมวลชนิดฝุ่น

นายภูมิภักดิ์ แจ่มจำรัส 57011000
นายวรินทร์ นาวงษ์ 57011123
นายศักรินทร์ รักตพงศ์ไพศาล 57011235
รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2560

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้ ทำการศึกษาอิทธิพลของตัวสร้างการหมุนควง และนำมาปรับใช้สำหรับหัวเผาไหม้เชื้อเพลิงชนิดฝุ่น (pulverized biomass burner) เพื่อให้การเผาไหม้มีความเสถียรที่กำลังความร้อนเป้าหมายสูงสุด 1 MW โดยเลือกศึกษาตัวสร้างการหมุนควงชนิดตามแนวรัศมีแบบแผ่นโค้ง (curved vane radial swirl generator) เทียบกับแบบแผ่นเรียบ (flat vane radial swirl generator) เดิมที่มีอยู่ในระบบ โดยมีแผ่นขวางกั้นช่องการไหล (bluff body) ติดตั้งในทุกการทดลอง

ในขั้นตอนการทดสอบระบบ พบปัญหาระบบลำเลียงอากาศทุติยภูมิ (Secondary Air) ไม่สามารถลำเลียงอากาศให้เพียงพอต่อความต้องการที่กำลังความร้อน 1 MW ที่มีวิจัยจึงจำเป็นต้องปรับปรุงระบบลำเลียงอากาศทุติยภูมิก่อน เพื่อให้สามารถทำการทดลองที่ต้องการได้ จากการตรวจสอบพบว่า Blower ส่งอากาศนั้นให้อัตราการไหลอากาศ $0.376 \text{ m}^3 / \text{s}$ ซึ่งเพียงพอสำหรับกำลังความร้อน 1 MW ที่ต้องใช้ $0.22 \text{ m}^3 / \text{s}$ แต่ระบบท่อลำเลียงสามารถป้อนอากาศได้แค่เพียง $0.187 \text{ m}^3 / \text{s}$ สาเหตุคือการสูญเสียเสดภายในท่อที่ค่อนข้างมากเนื่องจากความเร็วในท่อที่สูงขึ้น จึงแก้ปัญหาโดยการใช้วิธีต่อท่อแบบขนาน เพื่อเพิ่มอัตราการไหลเป็นจำนวนเท่าของท่อที่ต่อขนาน โดยที่ค่าเฮดการสูญเสีย (Head Losses) ยังมีค่าคงที่

ตัวสร้างการหมุนควงแนวรัศมีแบบแผ่นโค้งที่ในการศึกษานั้น กำหนดให้มีมุมของใบบิดเป็น 46, 62 และ 80 องศา จากการคำนวณให้มีตัวเลขการหมุนควง (swirl number) เกิน 1 เพื่อใช้เปรียบเทียบกับแบบแผ่นโค้งที่มุม 100 องศา จากการทดสอบพบว่าสำหรับแบบแผ่นโค้งที่มุมใบบิด 80 องศา นั้นสามารถสร้างกระแสไหลย้อนกลับ (Recirculation) มากที่สุด อนุภาคร้อนจึงถูกดึงกลับมาในห้องเผาไหม้ช่วยได้มาก อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วยจึงมีค่าสูงที่สุดในทุกตำแหน่ง ในไอเสียมีองค์ประกอบของคาร์บอนมอนนอกไซด์อยู่ 406 ppm ซึ่งเป็นค่าต่ำที่สุด และมีองค์ประกอบของออกไซด์ของไนโตรเจนถึง 318 ppm ซึ่งเป็นค่ามากที่สุด

A COMPARATIVE STUDY ON EFFECT OF FLAT AND CURVED VANE RADIAL SWIRL
GENERATOR FOR PULVERIZED BIOMASS BURNER

Poompak Chamchumras 57011000

Warintorn Nawong 57011123

Saksorn Raktapongpaisarn 57011235

Assoc.Prof. Dr.Jaruwat Charoensuk Adviser

Year 2560

Abstract

The purpose of this study is to investigate effects of swirl generator and develop one for pulverized biomass burner operated on 1 MW thermal throughput. Curved-vane radial swirl generator was chosen to study compared with previous flat-vane. Bluff body was installed in every experiment.

In system testing phase, secondary air supply system was found to be inefficient. It cannot supply enough air to operate at 1 MW thermal throughput. So, this system must be improved before beginning the main research. By calculation, the necessary amount of secondary air is $0.22 \text{ m}^3 / \text{s}$. From measurement, it was found that secondary air blower can supply $0.376 \text{ m}^3 / \text{s}$ of air but piping system can supply only $0.187 \text{ m}^3 / \text{s}$. This was cause by high head losses due to high speed flow in piping system. With this information, researchers applied parallel piping system to reduce loses in the system.

46, 62, 80 degree of vane angles were chosen for the curved-vane radial swirl generator by calculation to compare results with 100 degree's flat-vane. Results show that 80 degree gave best temperature distribution inside pre-chamber at every point along with the lowest CO emission (406 ppm) but the highest NO_x emission in return (318 ppm). It is suggested that 80 degree of curved-vane radial swirl generator create the largest recirculation zone inside prechamber so high temperature-combusted particles were circulate backward, creating higher temperature distribution inside prechamber.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดีด้วยความกรุณา คำแนะนำและการถ่ายทอดวิชาความรู้จาก รองศาสตราจารย์ ดร. จารุวัตร เจริญสุข คณะผู้วิจัยซึ่งในความอนุเคราะห์ และความทุ่มเทในการอบรมสั่งสอน อีกทั้งขอขอบพระคุณ ดร.ภรณ์เพ็ญ ลภีรัตนากุล ที่ได้ให้คำแนะนำปรึกษา สนับสนุนการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้มาโดยตลอด คณาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สจล. และนักวิจัยประจำห้องปฏิบัติการทุกท่านที่ได้ให้คำปรึกษา คำแนะนำ คำติชมในการแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ทำให้ปริญญานิพนธ์นี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น รวมไปถึง สำนักนโยบายแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน ภายใต้โครงการพัฒนาและประเมินสมรรถนะสำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลชนิดฝุ่นเพื่อการใช้ในระยะเวลาสำหรับภาคอุตสาหกรรม ที่ได้มอบเงินทุนสนับสนุนงานดำเนินงานวิจัยนี้ และอื่นๆที่เกี่ยวข้องเรื่อยมา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และบุคคลในครอบครัวของคณะผู้วิจัยทุกคนเป็นอย่างยิ่ง ที่เฝ้าเลี้ยงดู อบรมสั่งสอน และให้ทุนสนับสนุนการศึกษาเล่าเรียน รวมทั้งเป็นกำลังใจในการแก้ปัญหา และอุปสรรคต่างๆ เสมอมา

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้คงไม่อาจสำเร็จได้ด้วยดีหากไม่มีบุคคลที่เอ่ยนามมาเหล่านี้คอยเอาใจใส่ให้ความสำคัญ และถ้าปริญญานิพนธ์ฉบับนี้มีคุณค่าและประโยชน์กับบุคคลหรือหน่วยงานใด ผู้วิจัยขอขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน ขออำนาจคุณพระศรีรัตนตรัยอวยพรให้ทุกท่านมีแต่ความสุข ความเจริญ

นายภูมิภักดิ์ แจ่มจำรัส

นายวรินทร์ นาวงษ์

นายศักรินทร์ รักตพงศ์ไพศาล

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา	2
1.4 ขอบเขตการวิจัย	2
1.5 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทรรศน์.....	4
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	9
3.1 เชื้อเพลิงแข็ง	10
3.2 เชื้อเพลิงชีวมวล.....	22
3.3 การเผาไหม้	14
3.3.1 สตอยชิโอเมตรีของการเผาไหม้ (Combustion Stoichiometry).....	14
3.3.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเผาไหม้.....	16
3.4 การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง.....	16
3.4.1 การทำให้แห้งของเชื้อเพลิงแข็ง (Drying).....	17
3.4.2 การปล่อยสารระเหย (Devolatilization)	17
3.4.3 การเผาไหม้ถ่านชาร์ (Burning of Carbon).....	18
3.5 การรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟ	19
3.5.1 การใช้แผ่นขวางกั้นช่องการไหล (bluff body)	20

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.5.2 การใช้ตัวสร้างการหมุนควง (swirl generator).....	21
3.6 พัดลม.....	28
3.6.1 ชนิดของพัดลม	28
3.6.2 การทำงานขงระบบของไหล	30
3.6.3 จุดทำงานเมื่อต้องการลดอัตราไหล.....	33
บทที่ 4 การออกแบบและการคำนวณ.....	34
4.1 ภาพรวมระบบเดิม	34
4.1.1 ระบบบดและลำเลียงเชื้อเพลิง.....	34
4.1.2 ระบบลำเลียง LPG	36
4.1.3 ระบบลำเลียงอากาศ.....	37
4.1.3.1 อากาศปฐมภูมิ (Primary Air).....	37
4.1.3.2 อากาศทุติยภูมิ (Secondary Air).....	38
4.1.3.3 อากาศตติยภูมิ (Tertiary Air).....	38
4.1.4 ระบบหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น	38
4.2 การทดสอบสมรรถนะของระบบ.....	43
4.2.1 การคำนวณอัตราการไหลของเชื้อเพลิงและอากาศ	44
4.2.2 การตรวจสอบสมรรถนะการป้อนอากาศทุติยภูมิ และการปรับปรุง	47
4.3 การออกแบบตัวสร้างการหมุนควงแนวรัศมีแบบแผ่นโค้ง	52
บทที่ 5 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	54
5.1 อุปกรณ์การทดลองและรายละเอียด.....	54
5.1.1 อุปกรณ์การทดลองเชิงโครงสร้าง	54
5.1.2 อุปกรณ์การทดลองเชิงการวัดและควบคุม	54
5.2 วิธีการทดลอง	61
5.2.1 การอุ่นระบบ.....	61
5.2.2 การหยุดระบบแก๊สเพื่อใช้เชื้อเพลิงชีวมวลอย่างเดียว	62
5.2.3 การปรับมุมของใบพัดขณะทำการทดลอง	62
5.2.4 การบันทึกอุณหภูมิ และองค์ประกอบแก๊สไอเสีย	62

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 6 ผลการทดลอง.....	65
6.1 ผลอุณหภูมิตามแนวรัศมีภายในห้องเผาไหม้ช่วย	65
6.1.1 ผลอุณหภูมิตามแนวรัศมีภายในห้องเผาไหม้ช่วยที่ตำแหน่ง T1 ($x/D = 0.375$)	64
6.1.2 ผลอุณหภูมิตามแนวรัศมีภายในห้องเผาไหม้ช่วยที่ตำแหน่ง T2 ($x/D = 0.625$).....	65
6.1.3 ผลอุณหภูมิตามแนวรัศมีภายในห้องเผาไหม้ช่วยที่ตำแหน่ง T1 ($x/D = 0.875$)	66
6.1.4 ผลอุณหภูมิตามแนวรัศมีภายในห้องเผาไหม้ช่วยที่ตำแหน่ง T2 ($x/D = 1.125$).....	67
6.1.5 ผลอุณหภูมิตามแนวรัศมีภายในห้องเผาไหม้ช่วยที่ตำแหน่ง T2 ($x/D = 1.375$).....	68
6.2 ผลอุณหภูมิตามแนวแกนภายในห้องเผาไหม้ช่วย.....	69
6.2.1 ผลอุณหภูมิตามแนวแกนภายในห้องเผาไหม้ช่วยที่ตำแหน่ง $r/D = 0$	69
6.2.2 ผลอุณหภูมิตามแนวแกนภายในห้องเผาไหม้ช่วยที่ตำแหน่ง $r/D = 0.125$	70
6.2.3 ผลอุณหภูมิตามแนวแกนภายในห้องเผาไหม้ช่วยที่ตำแหน่ง $r/D = 0.25$	71
6.2.4 ผลอุณหภูมิตามแนวแกนภายในห้องเผาไหม้ช่วยที่ตำแหน่ง $r/D = 0.5$	72
6.3 ลักษณะของเปลวไฟและการคลุกเคล้าของเชื้อเพลิงกับอากาศ.....	75
6.4 การปลดปล่อยแก๊สไอเสียของกรณีติดตั้งแผ่นบังค้ำการไหลแบบตรง และกรณีติดตั้งแผ่นบังค้ำการไหลแบบโค้งที่มุมต่างๆ.....	77
บทที่ 7 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	79
7.1 สรุปผลการทดลอง	79
7.1.1 ผลกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วยเมื่อติดตั้งตัวสร้างการหมุนควงแนวรัศมีทั้ง 4 แบบ.....	79
7.1.1 ผลขององค์ประกอบไอเสียเมื่อติดตั้งตัวสร้างการหมุนควงแนวรัศมีทั้ง 4 แบบ	80
7.2 ข้อเสนอแนะ	80
เอกสารอ้างอิง	82
ภาคผนวก.....	84
ภาคผนวก ก แบบสังผลิตตัวสร้างการหมุนควงแนวรัศมีแบบแผ่นโค้ง	85
ภาคผนวก ข. มาตรฐานการปลดปล่อยไอเสีย กระบวนการอุตสาหกรรม	92

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ตัวอย่างปริมาณออกซิเจน น้ำ และถ้าในเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ.....	9
3.2 ตัวอย่างการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์โดยประมาณ และการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของ RDF และเชื้อเพลิงต่างๆ (อ้างอิงเชื้อเพลิงแห้งและไม่คิดถ่าน).....	14
4.1 องค์ประกอบธาตุของชีวมวลไม้ยางพาราฝุ่น วิเคราะห์โดย TISTR.....	44
4.2 ผลการหาสถานะอากาศในสถานะการเผาไหม้จริง.....	45
4.3 สถานะต่างๆที่ใช้ในการเผาไหม้ที่กำลังความร้อนเป้าหมาย 1 MW.....	46
4.4 ตัวแปรต้นที่ใช้ในการคำนวณตัวเลขการหมุนควง กำลังความร้อน 300 kW.....	53
5.1 รายละเอียดชุดควบคุม (PLC).....	55
5.2 ข้อมูลจำเพาะของวาล์วปีกผีเสื้อ (butterfly valve) สำหรับอากาศทั้งสามส่วน.....	56
5.3 ข้อมูลจำเพาะของ Differential pressure transmitter ของอากาศทั้งสามส่วน.....	57

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 กราฟเปอร์เซ็นต์ Pressure Drop เทียบกับมุมบิด.....	4
2.2 กราฟความเร็วตามแนวแกนที่เปลี่ยนแปลงตามจำนวนใบ.....	5
2.3 กราฟเปรียบเทียบความเร็วตามแนวแกนในแต่ละโมเดล	5
2.4 กราฟเปรียบเทียบความเร็วตามแนวรัศมีในแต่ละโมเดล	6
3.1 ชีวมวลในประเทศไทย	10
3.2 กลไกการเผาไหม้สำหรับอนุภาคเชื้อเพลิงแข็งขนาดเล็ก	17
3.3 การไหลผ่านแผ่นขวางกั้นช่องทางการไหล	21
3.4 ลักษณะตัวสร้างการหมุนควงตามแนวรัศมี และค่า σ จากการทดลองและการคำนวณ.....	23
3.5 ลักษณะตัวสร้างการหมุนควงตามแนวแกน และผลการคำนวณตัวเลขการหมุนควง ตามทฤษฎีกับการทดลอง	25
3.6 ค่า C_1 ณ ที่ตัวเลขเรโนลด์ต่างๆ	26
3.7 ชนิดเครื่องเป่าต่างๆ a) แบบไหลตามแนวรัศมี (Centrifugal Fan) b) แบบไหลตามแนวแกน (Axial Fan).....	28
3.8 กราฟ Performance Curve ของชนิดใบพัดต่างๆ a) Backward Curved Blade b) แบบ Radial Curve Blade c) แบบ Forward Curved Blade	29
3.9 การเข้าคู่ระหว่างเครื่องสูบลับระบบจากจุดสองจุดที่ทราบค่า	30
3.10 กราฟ System Performance Curve	32
3.11 กราฟ System Performance Curve ที่เปลี่ยนแปลงหลังหริ้วาล์ว	33
4.1 แผนผังระบบเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น	34
4.2 ไซโลเก็บเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด และสกรูลำเลียง	35
4.3 เครื่องบดชนิด Wood pellet miller	35
4.4 โบลเวอร์ลำเลียงเชื้อเพลิง	35
4.5 bag house filter ไซโลเก็บเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น สกรูลำเลียง และท่ออากาศปฐมภูมิ	36
4.6 ระบบลำเลียงแก๊ส LPG	36
4.7 แผนผังระบบลำเลียงอากาศทั้งสามส่วน แผนผังระบบลำเลียงอากาศทั้งสามส่วน	37
4.3 หัวเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล	39

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 ส่วนประกอบของหัวเผาใหม่เชื้อเพลิงชีวมวล	39
4.10 ตัวสร้างการหมุนควงตามแนวรัศมี.....	40
4.11 ฉนวนปูนทนไฟภายในหัวเผา	41
4.12 ช่องว่างระหว่างปูนทนไฟกับผิวภายนอกของหัวเผา	41
4.13 ห้องเผาไหม้หลัก.....	42
4.14 เครื่องบำบัดไอเสียแบบเปียก.....	43
4.15 พัดลมดูดอากาศและบ่อดกตะกอน.....	43
4.16 แผนภาพ P&ID ของทางเดินท่อลมทุติยภูมิ (Secondary Air)	48
4.17 การวัดความเร็วลมที่ปลายท่อ Flexible	48
4.18 การวัดความเร็วและความดันลมที่ปลายท่อของ Blower	49
4.19 แผนภาพ P&ID ของทางเดินท่อลมทุติยภูมิหลังการปรับปรุง	50
4.20 กราฟของสมรรถนะของ Blower และ System ก่อนการปรับปรุง	51
4.21 กราฟของสมรรถนะของ Blower และ System หลังการปรับปรุง.....	51
4.22 ตำแหน่งของตัวแปรในตัวสร้างการหมุนควง	53
5.1 เครื่องควบคุมเชิงตรรกะที่สามารถโปรแกรมได้ (PLC).....	54
5.2 วาล์วควบคุมชนิดปีกผีเสื้อ (butterfly control valve).....	55
5.3 Differential pressure transmitter ของอากาศสำหรับการเผาไหม้.....	56
5.4 ลักษณะการติดตั้ง Orifice plate และ Differential Pressure Transmitter	57
5.5 ลักษณะของ Orifice plate ที่ใช้วัดอัตราการไหลร่วมกับ Differential Pressure Transmitter.....	57
5.6 ตู้สตาร์ทมอเตอร์สำหรับอากาศส่วนที่หนึ่ง อากาศส่วนที่สาม และโบเวอร์ลำเลียง.....	58
5.7 อินเวอร์เตอร์ ยี่ห้อ Schneider รุ่น ATV312 สำหรับสกรูขนถ่ายเชื้อเพลิงอัดเม็ด	59
5.8 อินเวอร์เตอร์ ยี่ห้อ Winner รุ่น WIN-V63 สำหรับสกรูขนถ่ายเชื้อเพลิงผงและพัดลมดูดแก๊สไอเสีย	59
5.9 ตู้สตาร์ทเครื่องบดเชื้อเพลิงชนิดค้อนเหวี่ยง (hammer mill)	59
5.10 Thermocouple type k.....	60
5.11 Testo 330-2LL Gas Analyzer.....	60
5.12 แผนภาพอย่างง่ายของระบบจุดและจ่ายแก๊ส LPG	61

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.13 ระบบจ่ายแก๊ส LPG ที่ใช้ในการทดลอง.....	61
5.14 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิ และองค์ประกอบไอเสีย	62
6.1 กราฟแสดงอุณหภูมิตามแนวรัศมีที่ตำแหน่งการวัด $x/D = 0.375$ เปรียบเทียบระหว่างตัวสร้าง การหมุนควงแนวรัศมีแบบแผ่นเรียบและแผ่นโค้งที่มุมไบบิดจากการคำนวณ.....	64
6.2 กราฟแสดงอุณหภูมิตามแนวรัศมีที่ตำแหน่งการวัด $x/D = 0.625$ เปรียบเทียบระหว่างตัวสร้าง การหมุนควงแนวรัศมีแบบแผ่นเรียบและแผ่นโค้งที่มุมไบบิดจากการคำนวณ.....	65
6.3 กราฟแสดงอุณหภูมิตามแนวรัศมีที่ตำแหน่งการวัด $x/D = 0.875$ เปรียบเทียบระหว่างตัวสร้าง การหมุนควงแนวรัศมีแบบแผ่นเรียบและแผ่นโค้งที่มุมไบบิดจากการคำนวณ.....	66
6.4 กราฟแสดงอุณหภูมิตามแนวรัศมีที่ตำแหน่งการวัด $x/D = 1.125$ เปรียบเทียบระหว่างตัวสร้าง การหมุนควงแนวรัศมีแบบแผ่นเรียบและแผ่นโค้งที่มุมไบบิดจากการคำนวณ	67
6.5 กราฟแสดงอุณหภูมิตามแนวรัศมีที่ตำแหน่งการวัด $x/D = 1.375$ เปรียบเทียบระหว่างตัวสร้าง การหมุนควงแนวรัศมีแบบแผ่นเรียบและแผ่นโค้งที่มุมไบบิดจากการคำนวณ	68
6.6 กราฟแสดงอุณหภูมิตามแนวรัศมีที่ตำแหน่งการวัด $r/D = 0$ เปรียบเทียบระหว่างตัวสร้างการ หมุนควงแนวรัศมีแบบแผ่นเรียบและแผ่นโค้งที่มุมไบบิดจากการคำนวณ.....	69
6.7 กราฟแสดงอุณหภูมิตามแนวรัศมีที่ตำแหน่งการวัด $r/D = 0.125$ เปรียบเทียบระหว่างตัวสร้าง การหมุนควงแนวรัศมีแบบแผ่นเรียบและแผ่นโค้งที่มุมไบบิดจากการคำนวณ.....	70
6.8 กราฟแสดงอุณหภูมิตามแนวรัศมีที่ตำแหน่งการวัด $r/D = 0.25$ เปรียบเทียบระหว่างตัวสร้างการ หมุนควงแนวรัศมีแบบแผ่นเรียบและแผ่นโค้งที่มุมไบบิดจากการคำนวณ.....	71
6.9 กราฟแสดงอุณหภูมิตามแนวรัศมีที่ตำแหน่งการวัด $r/D = 0.5$ เปรียบเทียบระหว่างตัวสร้างการ หมุนควงแนวรัศมีแบบแผ่นเรียบและแผ่นโค้งที่มุมไบบิดจากการคำนวณ.....	72
6.10 แผนภาพการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วย กรณีติดตั้งตัวสร้างการหมุนควง แนวรัศมีแบบแผ่นตรง มุมไบบิด 100 องศา.....	73
6.11 แผนภาพการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วย กรณีติดตั้งตัวสร้างการหมุนควง แนวรัศมีแบบแผ่นโค้ง มุมไบบิด 46 องศา.....	73
6.12 แผนภาพการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วย กรณีติดตั้งตัวสร้างการหมุนควง แนวรัศมีแบบแผ่นโค้ง มุมไบบิด 62 องศา	74
6.13 แผนภาพการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วย กรณีติดตั้งตัวสร้างการหมุนควง แนวรัศมีแบบแผ่นโค้ง มุมไบบิด 62 องศา	74

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.14 ภาพการเผาไหม้ กรณีติดตั้งตัวสร้างการหมุนควงแนวรัศมีแบบแผ่นเรียบ ที่มุม 100 องศา ...	75
6.15 ภาพการเผาไหม้ กรณีติดตั้งตัวสร้างการหมุนควงแนวรัศมีแบบแบนโค้ง ที่มุม 46 องศา	75
6.16 ภาพการเผาไหม้ กรณีติดตั้งตัวสร้างการหมุนควงแนวรัศมีแบบแบนโค้ง ที่มุม 62 องศา	76
6.17 ภาพการเผาไหม้ กรณีติดตั้งตัวสร้างการหมุนควงแนวรัศมีแบบแบนโค้ง ที่มุม 80 องศา	76
6.18 ผลการปลดปล่อย CO ในแก๊สไอเสีย กรณีติดตั้งตัวสร้างการหมุนควงแนวรัศมีแบบแผ่นเรียบ และแบนโค้ง	78
6.19 ผลการปลดปล่อย NOx ในแก๊สไอเสีย กรณีติดตั้งตัวสร้างการหมุนควงแนวรัศมีแบบแผ่นเรียบ และแบนโค้ง	78
ก1 แบบสั่งผลิตชิ้นส่วนข้อเหวี่ยงในตัวสร้างการหมุนควงแนวรัศมีแบบแบนโค้ง	86
ก2 แบบสั่งผลิตชิ้นส่วนแท่งยึดชิ้นงานในตัวสร้างการหมุนควงแนวรัศมีแบบแบนโค้ง	87
ก3 แบบสั่งผลิตชิ้นส่วนกลไกการหมุนในตัวสร้างการหมุนควงแนวรัศมีแบบแบนโค้ง	88
ก4 แบบสั่งผลิตชิ้นส่วนแผ่นรองรับใบพัดในตัวสร้างการหมุนควงแนวรัศมีแบบแบนโค้ง	89
ก5 แบบสั่งผลิตชิ้นส่วนแผ่นรองรับท่อเชื้อเพลิงในตัวสร้างการหมุนควงแนวรัศมีแบบแบนโค้ง	90
ก6 แบบสั่งผลิตชิ้นส่วนแผ่นใบพัดในตัวสร้างการหมุนควงแนวรัศมีแบบแบนโค้ง	90

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

จากวิทยานิพนธ์มหาบัณฑิตของ ชินภัทร ฐรการ [1] ได้ทำการออกแบบ และสร้างหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดฝุ่น (pulverized biomass burner) เพื่อใช้กับหม้อกำเนิดไอน้ำชนิดท่อไปแบบวางนอน (horizontal fire tube boiler) ขนาดกำลังความร้อนสูงสุดที่ถูกออกแบบไว้คือ 1 MW และได้ทำการออกแบบให้หัวเผามีห้องเผาไหม้ช่วย ซึ่งเป็นห้องที่ช่วยรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟ โดยใช้หลักการของการไหลหมุนควง (swirling flow) ผ่านการติดตั้งตัวสร้างการหมุนควงตามแนวรัศมีแบบแผ่นเรียบ (Flat vane - radial swirl generator) มาช่วยในการทำให้เกิดบริเวณที่มีกระแสหมุนวนภายใน (internal recirculation zone, IRZ) เพื่อให้แก๊สร้อนถูกกระแสนอนกลับมาถ่ายเทความร้อนให้กับเชื้อเพลิงที่เข้ามาใหม่ โดยสามารถทำให้เกิดการเผาไหม้อย่างต่อเนื่องที่กำลังความร้อน 300-500 kW โดยปรับมุมของใบพัดที่ 100° สำหรับใช้กับเชื้อเพลิงที่ถูกบดผ่านตะแกรง 0.5 mm และจากวิทยานิพนธ์มหาบัณฑิตของ พงศนันท์ แก่นพรม [6] ได้ทำการออกแบบ และจำลองเชิงตัวเลข แผ่นขวางกั้นช่องการไหล (bluff body) สำหรับใช้กับหัวเผาไหม้เชื้อเพลิงชนิดฝุ่น ร่วมกับตัวสร้างการหมุนควงตามแนวรัศมี ในการสร้างกระแสไหลวนที่กว้างและรุนแรงขึ้นเพื่อช่วยในการรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟ โดยสามารถทำให้เกิดการเผาไหม้อย่างต่อเนื่องที่กำลังความร้อน 300 kW สำหรับเชื้อเพลิงที่ถูกบดผ่านตะแกรง 1 mm

จากวิทยานิพนธ์มหาบัณฑิตของทั้งสองทั้งข้างต้นได้มีการเสนอแนะให้มีการเพิ่มอิทธิพลของการหมุนควงให้รุนแรงขึ้นเพื่อรองรับปริมาณและความเร็วของอากาศที่เพิ่มขึ้นในย่านกำลังความร้อนที่สูงกว่าให้มีการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ และคงความมีเสถียรภาพไว้ได้ แนวคิดการเปลี่ยนมาใช้ตัวสร้างการหมุนควงตามแนวรัศมีแบบแผ่นโค้ง (Curved vane - radial swirl generator) จึงเป็นหนึ่งในทางเลือกที่อาจสามารถรองรับการพัฒนาาระบบเผาไหม้ในอนาคตได้ งานวิจัยนี้จึงเลือกที่จะเปรียบเทียบอิทธิพลของตัวสร้างการหมุนควงแนวรัศมีระหว่างแบบแผ่นเรียบที่ใช้ในปัจจุบัน กับแบบแผ่นโค้ง เพื่อเพิ่มเสถียรภาพการเผาไหม้ที่กำลังความร้อนที่สูงขึ้นในอนาคต โดยใช้ทฤษฎีและวิธีการคำนวณที่ศึกษาจากงานวิจัยทางด้านอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamics) ทำการทดลองเผาไหม้และศึกษาผลกระทบของกำลังความร้อนต่อสถานะของการเผาไหม้ คือ อุณหภูมิ และองค์ประกอบไอเสีย เมื่อทำการติดตั้งตัวสร้างการหมุนควงทั้ง

สองแบบ พร้อมทั้งปรับปรุงระบบขนส่งอากาศที่สองให้เพียงพอกับอากาศที่ต้องการในกำลังความร้อน 1 MW

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวสร้างการหมุนควงตามแนวรัศมีแบบโค้ง เทียบกับแบบแผ่นเรียบ ภายในหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดฝุ่น โดยพิจารณาที่อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วย และองค์ประกอบของไอเสีย

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

การใช้ตัวสร้างการหมุนควงตามแนวรัศมีแบบโค้งสามารถรับลมในแนวรัศมีได้ดีกว่า เกิดปรากฏการณ์ wake ที่ใบพัดซึ่งไปขัดขวางการไหลเข้าของอากาศน้อยกว่า ทำให้ลมพุ่งเข้าสู่ผนังห้องเผาไหม้ช่วยได้รุนแรงกว่า ก่อให้เกิดกระแสไหลวนมีความรุนแรงกว่า อนุภาคร้อนสามารถไหลย้อนกลับมาให้ความร้อนอนุภาคใหม่ได้ดีกว่า ถ้าเชื้อเพลิงที่เกาะที่ผิวเชื้อเพลิงหลุดออกทำให้เกิดการเผาไหม้ซ้ำ จะทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิแกนกลางและที่ผิวของห้องเผาไหม้ช่วยมีแนวโน้มสูงกว่า องค์ประกอบของ CO ในไอเสียมีแนวโน้มน้อยกว่า และองค์ประกอบของ NO_x มีแนวโน้มสูงกว่าตัวสร้างการหมุนควงแนวรัศมีแบบแผ่นเรียบ

1.4 ขอบเขตการวิจัย

1. การทดลองจะทำการวัดอุณหภูมิจำนวน 5 จุดตามแนวแกน และ 3 จุดตามแนวรัศมีในแต่ละแนวแกน ภายในห้องเผาไหม้ช่วย ที่สภาวะคงตัวที่กำลังความร้อน 300 kW ที่อากาศส่วนเกิน 15%
2. ในการทดลอง ความเสถียรของเปลวไฟ จะหมายถึงการที่เชื้อเพลิงสามารถเผาไหม้ได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่ใช้แก๊ส LPG เป็นเวลาอย่างน้อยไม่ต่ำกว่า 30 นาที และอุณหภูมิมีแนวโน้มคงที่
3. ในการทดลอง แผ่นขวางกั้นช่องการไหลจากงานวิจัยของพงศนันท์ แก่นพรหม ที่สามารถสร้างกระแสไหลวนได้ดี จะยังมีการใช้งานอยู่ในระบบ
4. การติดตั้งตัวสร้างการหมุนควงแนวรัศมี จะศึกษาเฉพาะรูปทรงพื้นฐาน โดยไม่มีการศึกษาผลจากขนาด และการปรับเปลี่ยนตำแหน่งที่ติดตั้ง
5. สมรรถนะการเผาไหม้จะพิจารณาจากการปลดปล่อย CO NO_x

1.5 ขั้นตอนการศึกษา

1. กำหนดวัตถุประสงค์ และขอบเขตการวิจัย
2. ศึกษาทฤษฎีการเผาไหม้ ขั้นตอนการใช้งานแต่ละอุปกรณ์ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแผ่นขวาง กั้นช่องการไหล และตัวสร้างการหมุนควง
3. ซ่อมแซม และทดสอบระบบเก่าเพื่อให้ใช้งานได้ที่กำลังความร้อนที่ต้องการ พร้อมเก็บค่า เริ่มต้นก่อนทำการปรับปรุง
4. ออกแบบตัวสร้างการหมุนควง
5. ผลิตและติดตั้งพร้อมเก็บข้อมูลอุณหภูมิการเผาไหม้
6. วิเคราะห์ผลการเปลี่ยนแปลงจากการติดตั้งตัวสร้างการหมุนควงแบบต่างๆ
7. สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

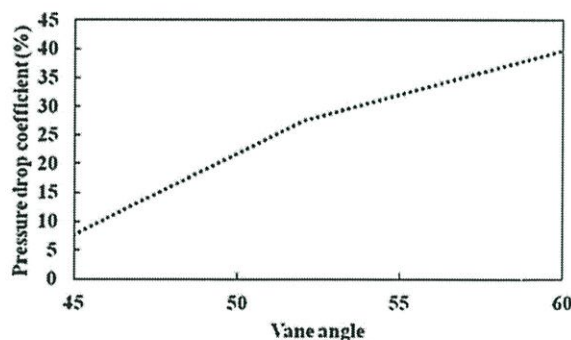
1. สามารถนำตัวสร้างการหมุนควง มาใช้ในหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดฝุ่นแบบมีห้องเผาไหม้ช่วย เพื่อให้ระบบการเผาไหม้มีเสถียรภาพระหว่างการทำงาน
2. สามารถนำผลที่ได้จากการจำลองและจากการทดลองมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเผาไหม้ เพื่อที่ใช้เป็นข้อมูลในการพัฒนาหัวเผาให้เหมาะสมกับลักษณะการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลชนิดฝุ่น

บทที่ 2

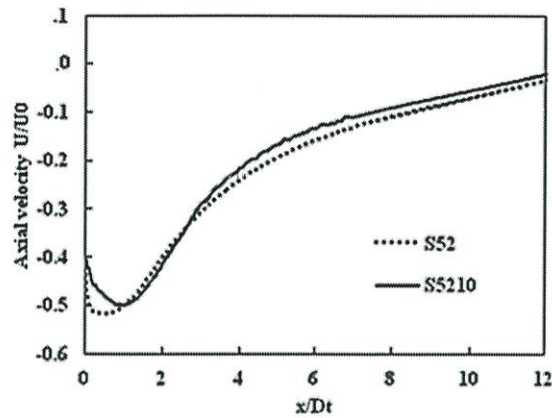
วรรณกรรมปริทัศน์

อิติพัทธ์ ลีสมกุล และคณะ [2] พบว่าลักษณะพฤติกรรมการไหลของอากาศที่เกิดจากการใช้หลักการหมุนควง ส่งผลดีต่อปัจจัยที่สำคัญต่อกระบวนการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่สมบูรณ์ และมีประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่สูงขึ้น เนื่องจากลักษณะการไหลแบบหมุนควงของอากาศและเชื้อเพลิง ทำให้มีระยะทางในการเคลื่อนที่เพิ่มมากขึ้น ระยะเวลาที่เชื้อเพลิงและอากาศอยู่ในเตาเผาเพิ่มมากขึ้น เอื้อต่อการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่นานขึ้น เมื่ออากาศและเชื้อเพลิงสามารถเกิดปฏิกิริยาเผาไหม้ได้นานขึ้น ย่อมส่งผลให้อุณหภูมิภายในเตาสูงขึ้น และเพียงพอที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาได้อย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้การไหลแบบหมุนควงของอากาศและเชื้อเพลิง จะช่วยเพิ่มความรุนแรงของความปั่นป่วนของกระแสการไหล ซึ่งจะกระตุ้นให้เถ้าที่เกาะอยู่ที่ผิวด้านนอกของเชื้อเพลิงหลุดออก จึงทำให้อากาศสามารถเข้าทำปฏิกิริยาด้านในของเชื้อเพลิง และเกิดการติดไฟในที่สุด จึงทำให้การเผาไหม้เกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่อง

Bhupendra Khandelwal และคณะ [11] ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของอากาศที่มีการไหลแบบปั่นป่วนที่เกิดจากการเปลี่ยนรูปร่างของอุปกรณ์สร้างการหมุนควง (axial swirler) โดยใช้ Computational Fluid Dynamics (CFD) ในการช่วยอธิบายปรากฏการณ์ โดยมีการออกแบบอุปกรณ์สร้างการหมุนควงที่มีมุมบิดและจำนวนใบที่แตกต่างกัน 4 แบบ คือ มุม 45 จำนวน 8 ใบ มุม 52 จำนวน 8 ใบ มุม 60 จำนวน 10 ใบ มุม 60 จำนวน 8 ใบ พบว่า ในการเพิ่มองศาของแผ่นใบบิด ทำให้เกิด pressure drop มากขึ้น และจำนวนใบของแผ่นใบบิดที่เพิ่มขึ้น ทำให้ความเร็วตามแนวแกนลดลง

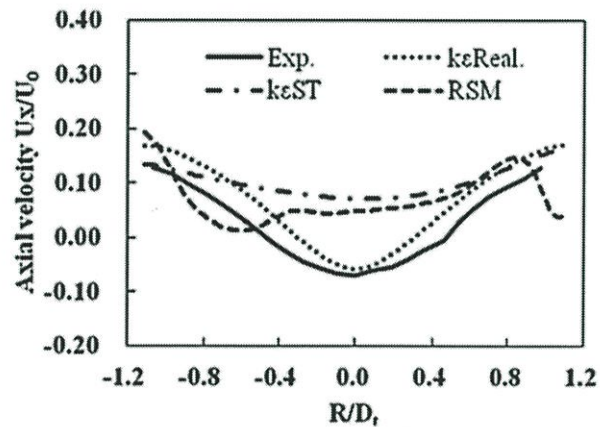


รูปที่ 2.1 กราฟเปอร์เซ็นต์ Pressure Drop เทียบกับมุมบิด

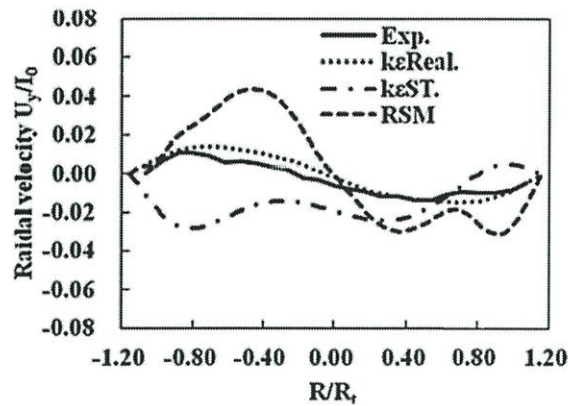


รูปที่ 2.2 กราฟความเร็วตามแนวแกนที่เปลี่ยนแปลงตามจำนวนใบ

แต่ก่อนที่ Bhupendra Khandelwal และคณะ ทำการใช้ CFD ในการทดลอง ได้ทำการตรวจสอบความถูกต้องของโมเดลที่ใช้คำนวณใน CFD เทียบกับผลการทดลอง ที่แผ่นใบบิดมุม 60 จำนวน 8 ใบ โดยได้ทำการเปรียบเทียบทั้งหมด 3 โมเดล กำหนดให้ประสิทธิภาพของ grid มีค่า skewness ไม่เกิน 0.73 และ ค่า aspect ratio ต่ำกว่า 3.67 ซึ่งที่หน้าตัดที่ระยะในแนวแกน z 120 mm และ 48 mm จากผลการจำลองเชิงตัวเลขพบว่า แบบจำลอง Realizable $k - \varepsilon$ มีผลลัพธ์ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด ดังรูปที่ 2.3 และ 2.4



รูปที่ 2.3 กราฟเปรียบเทียบความเร็วตามแนวแกนในแต่ละโมเดล



รูปที่ 2.4 กราฟเปรียบเทียบความเร็วตามแนวรัศมีในแต่ละโมเดล

Mohammad Nazri Mohd Jaafar และคณะ [12] ทำการศึกษาผลกระทบของมุมเปลวไฟ และ อุณหภูมิของห้องเผาไหม้ เมื่อทำการปรับเปลี่ยนมุมของอุปกรณ์สร้างการหมุนควงในแนวรัศมี (Radial swirler) โดยทำการทดลองปรับมุมของอุปกรณ์สร้างการหมุนควงอยู่ที่ 40 50 และ 60 องศา ในระบบเผาไหม้แบบ Low NO_x บันทึกผลอุณหภูมิผิว และแกนกลางของห้องเผาไหม้ รวมถึงองศาของเปลวไฟ จากการทดลองพบว่า อุณหภูมิผิวและแกนกลางของห้องเผาไหม้มีค่าสูงสุด และมีองศาของเปลวไฟกว้างที่สุด และสั้นที่สุด เมื่อใช้อุปกรณ์สร้างการหมุนควงที่มุม 60 องศา แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่ดีกว่า

Mohamad Shaiful Ashrul Ishak [14] ทำการศึกษาผลของตัวเลขการหมุนควง หรือ Swirl Number กับปริมาณมลพิษ CO และ NO_x ในการเผาไหม้น้ำมันปาล์ม โดยใช้อุปกรณ์สร้างการหมุนควงที่มีมุมบิด 45 50 60 และ 70 องศา ซึ่งมีตัวเลขการหมุนควงเป็น 0.78 0.978 1.427 และ 1.911 ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่าปริมาณ NO_x ลดลง 12 เปอร์เซ็นต์ที่ตัวเลขการหมุนควง 1.911 เมื่อเปรียบเทียบกับ 0.78 ส่วนมลพิษอื่นๆ เช่น CO มีแนวโน้มลดลงเช่นกัน เมื่อตัวเลขการหมุนควงที่สูงขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยที่สองของเขา ซึ่งได้ศึกษาอุณหพลศาสตร์ขณะเกิดการเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้ที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างการหมุนควงแนวรัศมี โดยใช้วิธีเชิงตัวเลขช่วยอธิบายปรากฏการณ์ จากการจำลองพบว่า เมื่อติดตั้งอุปกรณ์สร้างการหมุนควงแล้ว จะเกิดการส่ายย้อนกลับ กลายเป็นบริเวณที่อุณหภูมิของไหลจะไหลย้อนกลับ (recirculation zone) เหนี่ยวนำให้อุณหภูมิย้อนกลับมาเผาไหม้อุณหภูมิใหม่ ซึ่งช่วยให้เปลวไฟมีความเสถียรยิ่งขึ้น โดยที่มุมบิด 50 องศา จะมีบริเวณการไหลย้อนกลับนี้กว้างที่สุด

ชินภัทร ฐรการ [1] ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของการเผาไหม้ของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดฝุ่น จากความแตกต่างของสามุมไบบิตแนวรัศมี (radial guide vane swirl) 3 มุม ได้แก่ 60 85 100 องศา เมื่ออากาศหุติยภูมิเคลื่อนที่ผ่านไบบิตในแนวเฉือนจะทำให้เกิดการหมุนควงเข้าไปใน pre-chamber ทำให้เกิดกระแสหมุนวนและการไหลย้อนกลับ (recirculation) ซึ่งจะช่วยในการคลุกเคล้ากันระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง โดยพบว่า ที่องศาไบบิตเป็น 100 องศา จะทำให้เกิดกระแสหมุนวนที่สามารถทำให้การเผาไหม้เป็นไปอย่างต่อเนื่อง และสามารถดำเนินการทดลองได้ที่กำลังความร้อน 300 – 500 kW โดยไม่เกิดการเป่าดับ

นรเศรษฐ์ พิกุลเงิน [4] ทำการศึกษาผลกระทบต่ออัตราส่วนการป้อนอากาศให้หัวเผาชีวมวลชนิดฝุ่น โดยใช้แบบจำลองเชิงตัวเลขมาประยุกต์ใช้อธิบายปรากฏการณ์เทียบเคียงกับการทดลองที่กำลังความร้อน 300 kW พบว่าเงื่อนไขที่ดีที่สุดคือ ที่อัตราส่วนอากาศ ปฐมภูมิ : หุติยภูมิ : ตติยภูมิ มีค่าเท่ากับ 15 % : 80 % : 5 % โดยอุณหภูมิแนวแกนเพิ่มสูงขึ้น 8% อนุภาคชาร์ลดลงเหลือ 17.72% และปริมาณคาร์บอนมอนนอกไซด์ลดลงเทียบกับเงื่อนไขเปรียบเทียบ 88% แต่การที่อัตราส่วนอากาศตติยภูมิมีน้อยเกินไปจะส่งผลต่อความปลอดภัยและอายุการใช้งานของหัวเผา ดังนั้น อัตราส่วนอากาศที่เหมาะสมจึงเป็น 15 % : 75 % : 10 % โดยอุณหภูมิแนวแกนเพิ่มสูงขึ้น 1.6% อนุภาคชาร์ลดลงเหลือ 22.84% และปริมาณคาร์บอนมอนนอกไซด์ลดลงเทียบกับเงื่อนไขเปรียบเทียบ 78%

พีรพัฒน์ เทพลิบ [5] ได้ทำการเพิ่มเติมและปรับเปลี่ยนระบบลำเลียงอากาศเข้าสู่ห้องเผาไหม้ แต่เนื่องจากยังมีข้อจำกัดจากอุปกรณ์บางส่วน เช่น พัดลม ขนาดของแผ่นออริฟิสที่เมื่อมีอัตราการไหลสูง ความดันแตกต่างจะมากขึ้นด้วย และ Differential Pressure transmitter ที่มีย่านการวัดที่จำกัด รวมถึงช่วงการทำงานของวาล์วควบคุมชนิดปีกผีเสื้อ ประกอบกับข้อจำกัดของพัดลมป้อนอากาศปฐมภูมิ ทำให้สามารถทดลองเผาไหม้ได้ในย่านที่ 300 kW ถึง 650 kW ความร้อน โดยกำหนดเงื่อนไขการทดลองเผาไว้ที่ อากาศส่วนเกิน 15 % และอัตราส่วนระหว่างอากาศ ปฐมภูมิ : หุติยภูมิ : ตติยภูมิ มีค่าเท่ากับ 15 % : 75 % : 10 %

พงศนันท์ แก่นพรม [6] ได้ทำการนำแผ่นขวางกั้นช่องการไหล และแผ่นไบบิต สร้างกระแสไหลวนเพื่อทดลองใช้ในหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดฝุ่น ใช้ตะแกรงบดขนาด 1 mm ที่กำลังความร้อน 300 kW เพื่อลดการใช้พลังงานการบดเมื่อเทียบกับกรณีพื้นฐานของชินภัทร ฐรการ ที่ใช้ตะแกรงบดขนาด 0.5 mm เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลจากผลการจำลอง และการทดลองจริง พบว่ากรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นการไหลสามารถทำให้เปลวไฟมีความเสถียร และเผาไหม้ได้อย่างต่อเนื่อง สังเกตได้จากอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้

ที่สูงกว่า มีบริเวณความเร็วต่ำเป็นวงกว้าง เป็นผลจากกระแสย้อนกลับมีค่าสูง สัดส่วนของ O_2 ภายในห้องเผาไหม้ช่วยมีระดับต่ำกว่า รวมถึงการปลดปล่อยสารระเหยในสัดส่วนสูงกว่า กลับกัน ในกรณีติดตั้งแผ่นไบบิตนั้นไม่สามารถรักษาเสถียรภาพเปลวไฟได้ การปลดปล่อยสารระเหยต่ำ การกระจายอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ต่ำ เมื่อหยุดระบบ LPG เปลวไฟจะค่อยๆดับ ส่วนกรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นการไหลพร้อมกับแผ่นไบบิต มีผลใกล้เคียงกับกรณีติดตั้งแผ่นขวางกั้นช่องการไหล คือสามารถรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟไว้ได้ แต่มีการกระจายอุณหภูมิต่ำกว่า และมีการปลดปล่อย CO สูงกว่า

จากการศึกษางานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น พบว่าตัวสร้างการหมุนควงสามารถสร้างลักษณะการไหลแบบหมุนควงของอากาศและเชื้อเพลิง ทำให้การเผาไหม้ที่สมบูรณ์ได้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งตัวสร้างการหมุนควงควงแต่ละชนิดจะมีลักษณะการใช้งานที่เหมาะสมแตกต่างกันออกไป โดยที่ตัวที่สร้างการหมุนควงแนวรัศมีนั้นเหมาะสมกับหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้ในการทดลองมากที่สุดเนื่องด้วยลักษณะการรับลมและการติดตั้ง แต่จากการศึกษางานวิจัยในอดีต ยังไม่เคยมีการเปรียบเทียบอิทธิพลของลักษณะไบบิตของตัวสร้างการหมุนควง คือแบบแผ่นเรียบ และแบบแผ่นโค้ง ที่ใช้ในหัวเผาชีวมวลชนิดฝุ่น นี่จึงเป็นหนึ่งในแนวคิดที่สามารถใช้พัฒนาระบบที่มีในปัจจุบัน เพื่อรองรับการเพิ่มกำลังความร้อนที่สูงขึ้นได้ ซึ่งสามารถเลือกศึกษาเปรียบเทียบได้หลายวิธี โดยงานวิจัยนี้จะเลือกใช้การทดลองวัดการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ และองค์ประกอบไอเสีย จากตัวสร้างการหมุนควงทั้งสองประเภทมาเปรียบเทียบกันเพื่อตัดสินใจเลือกชนิดที่ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด

บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 เชื้อเพลิงแข็ง

เชื้อเพลิงแข็งที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติได้แก่ ไม้ ชีวมวล พืด ถ่านหิน ขยะจากที่อยู่อาศัย และจากอุตสาหกรรมบางประเภทจัดเป็นเชื้อเพลิงแข็งเช่นเดียวกัน องค์ประกอบของเชื้อเพลิงแข็งนอกจากจะประกอบด้วยคาร์บอน และไฮโดรเจนเป็นส่วนหลักแล้ว ยังประกอบด้วยออกซิเจน ไนโตรเจน กำมะถัน น้ำ และเถ้าอีกด้วย ตัวอย่างเช่นไม้มีออกซิเจนอยู่ถึง 45% (โดยมวลแลไม่รวมน้ำกับเถ้า) ในขณะที่ถ่านหินแอนทราไซต์มีอยู่เพียง 2% เท่านั้น ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ความชื้นในเชื้อเพลิงแข็งปรากฏอยู่สองรูปแบบ รูปแบบแรกเป็นน้ำอิสระ (Free water) แทรกตัวอยู่ระหว่างผนังเซลล์ของไม้ หรือในรูพรุนเล็กๆของถ่านหิน ซึ่งน้ำจะถูกดูดซับเข้าไปโดยอิทธิพลของความตึงผิว (Capillary effect) รูปแบบที่สองเป็นน้ำที่ถูกดูดไว้ในเชิงกายภาพ (Physical absorption หรือ Bound water) ความชื้นในเชื้อเพลิงแข็งมีผลกระทบโดยตรงต่ออัตราการเผาไหม้และประสิทธิภาพโดยรวมของการเผาไหม้

เถ้าในเชื้อเพลิงแข็งคือสารอนินทรีย์ที่เหลืออยู่หลังจากที่เชื้อเพลิงเผาไหม้หมดแล้ว ไม่มีเถ้า่น้อยมาก ในขณะที่ถ่านหินมีสูงถึง 10% หรือมากกว่า คุณลักษณะของเถ้ามีความสำคัญอย่างมากในการออกแบบอุปกรณ์เผาไหม้ และอุปกรณ์การถ่ายโอนความร้อน ทั้งนี้เพื่อหาทางลดปัญหาจากการเกิดเป็นสแลก (slag fouling) การกัดกร่อน (erosion) และการผุกร่อน (corrosion) ลงได้

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างปริมาณออกซิเจน น้ำ และเถ้าในเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ

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

องค์ประกอบของเชื้อเพลิงแข็งจะถูกรายงานในลักษณะตามที่ได้รับมา (as-received basis) หรือในลักษณะหลักอ้างอิงแห้ง (dry basis) หรือในลักษณะหลักอ้างอิงแห้ง และไม่คิดเถ้า (dry, ash - free basis) ดังนั้นการระบุองค์ประกอบของเชื้อเพลิงแข็งต้องระบุเงื่อนไขให้ถูกต้องเพราะเกี่ยวข้องกับการคำนวณหาค่าความร้อนทางสูง และทางต่ำโดยตรง ทำให้ช่วยพิจารณาได้อย่างถูกต้องว่าความร้อนแฝงของน้ำที่เกี่ยวข้องในปฏิกิริยาการเผาไหม้เป็นอิสระ (free water) หรือน้ำที่ถูกดูดกลืนในเชื้อเพลิง (bound water) หรือน้ำที่เกิดจากไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง

3.2 เชื้อเพลิงชีวมวล

ชีวมวลหมายถึงสิ่งที่ได้จากสิ่งมีชีวิต หรือสารอินทรีย์ที่สามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานได้ โดยรวมถึงวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรต่างๆ เช่น ฟางข้าว แกลบ กากอ้อย ทะลายปาล์ม เศษไม้ และมูลสัตว์ เป็นต้น โดยเชื้อเพลิงชีวมวลโดยส่วนใหญ่จะมีองค์ประกอบเป็นเซลลูโลส ($C_8H_{10}O_5$) และลิกนิน ($C_{40}H_{44}O_6$) ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเท่านั้น จากข้อมูลผลผลิตทางการเกษตรของสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตรในปีเพาะปลูก พ.ศ. 2549–2550 พบว่า



กากใยปาล์ม



ไม้ฟืน



ซังข้าวโพด



เหง้ามันสำปะหลัง



กะลามะพร้าว



แกลบ

รูปที่ 3.1 ชีวมวลในประเทศไทย

ชีวมวลจากข้าว

แกลบ จากข้อมูลพบว่าปริมาณการผลิตข้าวทั้งประเทศเท่ากับ 28.61 ล้านตัน และคิดเป็นปริมาณแกลบเท่ากับ 3.95 ล้านตัน โดยมีการนำแกลบเหล่านี้มาใช้งานคิดเป็นปริมาณรวม 0.86 ล้านตันหากนำปริมาณแกลบคงเหลือดังกล่าวมาหักด้วยปริมาณการสูญเสียของแกลบที่เกิดจากการขัดสี การฟุ้งกระจายทั้งในระหว่างกระบวนการต่างๆ และการขนส่ง ดังนั้นปริมาณแกลบคงเหลือที่สามารถนำมาใช้งานได้จะมีค่าสุทธิเท่ากับ 3.09 ล้านตัน คิดเป็นค่าพลังงานความร้อนเทียบเท่า 843 ktoe และมีประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 320 MW

ฟางข้าว จากข้อมูลสามารถประเมินปริมาณฟางข้าวเท่ากับ 34.04 ล้านตันเมื่อนำมาคิดปริมาณที่เก็บรวบรวมได้ (ฟางข้าวมีประสิทธิภาพในการเก็บรวบรวม 10%) ปริมาณฟางข้าวคงเหลือที่สามารถนำมาใช้งานได้จะมีค่าสุทธิเท่ากับ 3.40 ล้านตัน คิดเป็นค่าพลังงานความร้อนเท่ากับ 926.10 ktoe และคิดเป็นประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 352 MW

ชีวมวลจากข้าวโพด

ชังข้าวโพด พบว่ามีปริมาณการผลิตข้าวโพดทั้งประเทศเท่ากับ 4.40 ล้านตัน และคิดเป็นปริมาณชังข้าวโพดเท่ากับ 0.84 ล้านตัน โดยมีการนำชีวมวลเหล่านี้มาใช้ในภาคต่างๆคิดเป็นปริมาณรวม 74,000 ตัน ทำให้ปริมาณชีวมวลคงเหลือมีค่าเท่ากับ 0.43 ล้านตัน คิดเป็นค่าพลังงานความร้อนเท่ากับ 124.6 ktoe และคิดเป็นประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 47.31 MW

ชีวมวลจากอ้อย

ยอดและใบอ้อย จากข้อมูลพบว่าปริมาณการผลิตอ้อยทั้งประเทศเท่ากับ 70 ล้านตัน คิดเป็นชีวมวลประเภทยอดและใบอ้อยเท่ากับ 16.8 ล้านตัน เมื่อนำมาคิดประสิทธิภาพในการเก็บรวบรวม (40 %) จะมีชีวมวลคงเหลือสุทธิ 6.72 ล้านตัน คิดเป็นค่าพลังงานความร้อนเท่ากับ 1,935.7 ktoe และคิดเป็นประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 735 MW

กากอ้อย จากข้อมูลสามารถประเมินปริมาณกากอ้อยเท่ากับ 21 ล้านตัน ชีวมวลประเภทนี้มีการนำไปใช้อย่างกว้างขวางในภาคอุตสาหกรรม โดยปัจจุบันได้ถูกแปรไปเป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตพลังงานความร้อนในโรงงานผลิตน้ำตาล และบางโรงงานนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า จึงทำให้ชีวมวลประเภทนี้หมดไปกับการใช้ในโรงงานเป็นหลัก แม้แต่มีความต้องการใช้เป็นวัตถุดิบใน

อุตสาหกรรมอื่นๆ แต่ก็ไม่มีวัตถุดิบมาป้อน หลายโรงได้เริ่มเสาะหาเชื้อเพลิงประเภทอื่นๆมาใช้ร่วมกับกากอ้อยเนื่องจากภาวะขาดแคลนของกากอ้อย

ชีวมวลจากมันสำปะหลัง

ลำต้นมันสำปะหลัง จากข้อมูลพบว่ามีปริมาณการผลิตมันสำปะหลังทั้งประเทศเท่ากับ 17.6 ล้านตัน และคิดเป็นปริมาณลำต้นมันสำปะหลัง 2.11 ล้านตัน เมื่อนำปริมาณชีวมวลคงเหลือดังกล่าวมาคิดประสิทธิภาพในการเก็บรวบรวม (40%) จะมีปริมาณชีวมวลสุทธิเท่ากับ 0.84 ล้านตัน คิดเป็นค่าพลังงานความร้อนเทียบเท่า 198 ktoe และคิดเป็นประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 75 MW

เหง้ามันสำปะหลัง จากข้อมูลผลผลิตเหง้ามันสำปะหลังสามารถประเมินปริมาณเหง้ามันได้เท่ากับ 1.76 ล้านตัน เมื่อนำปริมาณชีวมวลคงเหลือดังกล่าวมาคิดประสิทธิภาพในการเก็บรวบรวม (40%) จะมีปริมาณชีวมวลสุทธิเท่ากับ 0.7 ล้านตัน คิดเป็นค่าพลังงานความร้อนเทียบเท่า 131 ktoe และคิดเป็นประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 50 MW ในปัจจุบันแทบไม่มีการนำเอาเหง้ามันสำปะหลังมาใช้ผลิตพลังงาน เนื่องจากการเก็บรวบรวมมีความยากลำบาก และต้นทุนการขนส่งสูง

ชีวมวลจากปาล์มน้ำมัน

ทางใบและก้านปาล์ม จากข้อมูลพบว่ามีปริมาณการผลิตปาล์มน้ำมันทั้งประเทศเท่ากับ 8.75 ล้านตัน และคิดเป็นปริมาณทางใบและก้านเท่ากับ 2.36 ล้านตัน เมื่อคิดประสิทธิภาพในการเก็บรวบรวม (65%) และการนำไปใช้ประโยชน์จะมีปริมาณชีวมวลคงเหลือสุทธิ 1.54 ล้านตัน คิดเป็นค่าพลังงานความร้อนเทียบเท่า 481 ktoe และคิดเป็นประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้า 183 MW

กากใยปาล์ม จากข้อมูลผลผลิตของกรมส่งเสริมการเกษตร ปาล์มน้ำมันมีปริมาณของกากใยปาล์มที่ได้เท่ากับ 1.31 ล้านตัน โดยชีวมวลประเภทนี้จะถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงงานอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม เมื่อหักปริมาณที่ถูกใช้งานออกจะมีชีวมวลคงเหลือสุทธิ 0.23 ล้านตัน คิดเป็นค่าพลังงานความร้อน 81.3 ktoe และคิดเป็นประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 31 MW

กะลาปาล์ม จากข้อมูลสามารถประเมินปริมาณกะลาปาล์มได้เท่ากับ 0.53 ล้านตัน โดยมีการใช้ชีวมวลประเภทนี้ในภาคอุตสาหกรรมเพื่อเป็นเชื้อเพลิงคิดเป็นปริมาณรวม 18,000 ตัน และใช้ในประเภทอื่นๆ 147,000 ตัน ดังนั้นจะมีชีวมวลคงเหลือสุทธิ 0.31 ล้านตัน คิดเป็นค่าพลังงานความร้อน 114 ktoe และคิดเป็นการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 43 MW เป็นระยะเวลา 1 ปี

ทะลายปาล์ม จากข้อมูลผลผลิตปาล์มน้ำมันของกรมส่งเสริมการเกษตร สามารถประเมินปริมาณของทะลายปาล์มได้เท่ากับ 2.01 ล้านตัน โดยมีการนำชีวมวลประเภทนี้ถูกนำมาใช้ในการ

ผลิตไฟฟ้าคิดเป็นปริมาณรวม 80,000 ตัน และใช้ในประเภทอื่นๆเช่น ทำปุ๋ย และเพาะเห็ดคิดเป็นปริมาณ 160,000 ตัน ดังนั้นจะมี ชีวมวลคงเหลือสุทธิ 1.13 ล้านตัน คิดเป็นค่าพลังงานความร้อน 385 ktoe และคิดเป็นการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 146 MW เป็นระยะเวลา 1 ปี

ชีวมวลจากไม้ยางพารา

ซีเลื่อยและเศษไม้ยางพารา จากรายงานของสถาบันวิจัยยางพาราทำให้ทราบว่าในแต่ละปีจะมีต้นยางพาราที่มีอายุเกิน 25 ปี ซึ่งครบรอบที่จะต้องทำการตัด คิดเป็นพื้นที่ยางพาราที่ถูกตัดฟัน 500,000 ไร่ต่อปี จะได้ปริมาณของไม้ยางพารา 200 ล้านตัน ซึ่งไม้ยางพาราที่ถูกตัดจะนำไปเข้ากระบวนการแปรรูปไม้เพื่อผลิตเฟอร์นิเจอร์ ดังนั้นจะมีชีวมวลที่ได้ภายหลังกระบวนการผลิตคิดเป็นเศษไม้ 3.6 ล้านตัน และซีเลื่อย 8 ล้านตัน เมื่อหักปริมาณที่ถูกนำไปใช้ประโยชน์จะมีเศษไม้คงเหลือ 3.55 ล้านตัน คิดเป็นพลังงานความร้อน 1,862 ktoe และพลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 707 MW ในส่วนของซีเลื่อยจะมีปริมาณคงเหลือ 1,037 ktoe และพลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 394 MW เป็นระยะเวลา 1 ปี

ชีวมวลที่ได้จากไม้ยูคาลิปตัส

ไม้ยูคาลิปตัสจะถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษเป็นส่วนใหญ่ โดยผลผลิตของไม้ยูคาลิปตัสทั้งประเทศมีปริมาณรวม 6.8 ล้านตันต่อปี มีชีวมวลเกิดขึ้นคือไม้พินและเปลือกไม้ โดยไม้พินจะถูกนำไปใช้ในการผลิตไฟฟ้า สำหรับเปลือกไม้จะนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในการให้ความร้อน เมื่อประเมินจำนวนของชีวมวลคงเหลือพบว่าจะมีไม้พินคงเหลือเท่ากับ 0.57 ล้านตัน คิดเป็นพลังงานความร้อน 167 ktoe และพลังงานไฟฟ้า 63.5 MW สำหรับเปลือกไม้ยูคาลิปตัสมีปริมาณคงเหลือ 0.61 ล้านตัน คิดเป็นพลังงานความร้อน 186 ktoe และพลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 70.5 MW เป็นระยะเวลา 1 ปี

ตารางที่ 3.2 ตัวอย่างการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์โดยประมาณ และการวิเคราะห์แยกธาตุของ RDF และเชื้อเพลิงต่างๆ (อ้างอิงเชื้อเพลิงแห้งและไม่คิดเถ้า)

องค์ประกอบ	ชนิดเชื้อเพลิง				
	ไม้	ฟีด	ถ่านหิน ลิกไนต์	ถ่านหิน บิทูมินัส	เชื้อเพลิง จากขยะ (RDF)
ผลวิเคราะห์โดยประมาณ (wt %)					
สารระเหย	81	65	55	40	85
คาร์บอนคงตัว	19	35	45	60	15
ผลวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (wt %)					
ไฮโดรเจน	6	6	5	5	7
คาร์บอน	50	55	68	78	52
กำมะถัน	0.1	0.4	1	2	0.3
ไนโตรเจน	0.1	1	1	2	0.6
ออกซิเจน	44	38	25	13	40
ค่าความร้อนทางสูง (HHV), (MJ/kg)	20	22	23	33	22

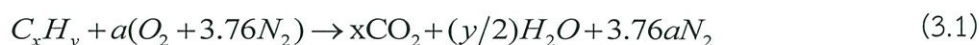
3.3 การเผาไหม้

นิยามของการเผาไหม้จากหนังสือ An Introduction to Combustion (Concepts and Application second edition) คือ “การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันอย่างรวดเร็วทำให้อุณหภูมิและความร้อนหรือทั้งความร้อนและแสงสว่าง ในทำนองเดียวกันถ้าปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดในอัตราที่ช้าจะก่อให้เกิดความร้อนในปริมาณที่น้อยและไม่มีแสงสว่างเกิดขึ้น” ซึ่งพลังงานความร้อนและแสง ที่เกิดจากการเผาไหม้นั้น เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปมาจากพลังงานที่ใช้ยึดเหนี่ยวพันธะทางเคมี สำหรับการจำแนกประเภทของการเผาไหม้ตามชนิดเชื้อเพลิงสามารถแบ่งได้ 3 แบบ ได้แก่ การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแข็ง เชื้อเพลิงเหลว และเชื้อเพลิงแก๊ส ในปริณูณานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการวิจัยโดยใช้เชื้อเพลิงชีวมวลชนิดฟ่อนซึ่งเป็นเชื้อเพลิงแข็ง ดังนั้น ในบทนี้จะกล่าวถึงเชื้อเพลิงแข็งเท่านั้น

3.3.1 สตอยชิโอเมตรีของการเผาไหม้ (Combustion Stoichiometry)

การเผาไหม้ที่ stoichiometry เป็นการคำนวณปริมาณออกซิโดเซอร์ที่พอดีในการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ ดังนั้นถ้าปริมาณออกซิโดเซอร์มากกว่าที่สภาวะ stoichiometry นั้นหมายถึงการเผาไหม้นั้นมีส่วนผสมอากาศต่อเชื้อเพลิงแบบบาง (fuel lean) ในทางกลับกัน เมื่อมีปริมาณออกซิโดเซอร์น้อยกว่าที่

สภาวะ stoichiometry หมายถึงมีส่วนผสมอากาศต่อเชื้อเพลิงแบบหนา (fuel rich) การหาความสัมพันธ์แบบ stoichiometry ทำได้โดยการเขียนสมการเผาไหม้ สำหรับเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอน (C_xH_y) จะสามารถเขียนสมการการเผาไหม้ได้ดังนี้



เมื่อ
$$a = x + y/4 \quad (3.2)$$

สัดส่วนของปริมาณออกซิเจนในอากาศซึ่งมักนิยมพิจารณาให้อากาศที่ใช้ในการเผาไหม้เป็นอากาศแห้งประกอบไปด้วยออกซิเจน 21% โดยปริมาตร และไนโตรเจน 79% โดยปริมาตร นั่นคือแต่ละโมลของออกซิเจนมีไนโตรเจน 3.76 โมล ซึ่งการหาอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ตามทฤษฎีหรือตาม stoichiometry สามารถหาได้จาก

$$(A/F)_{\text{stoic}} = \left(\frac{m_{\text{air}}}{m_{\text{fuel}}} \right) = \frac{7.76a}{1} \frac{MW_{\text{air}}}{MW_{\text{fuel}}} \quad (3.3)$$

เมื่อ MW_{air} และ MW_{fuel} เป็นน้ำหนักโมเลกุลของอากาศ และเชื้อเพลิงตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีปริมาณอื่นๆที่เกี่ยวข้องดังนี้

อัตราส่วนสมมูล (equivalent ratio, Φ) เป็นค่าที่ใช้บ่งบอกว่าส่วนผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงเป็นแบบstoichiometry หนา หรือบาง ซึ่งมีนิยามดังนี้

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

จากนิยามจะเห็นได้ว่า สำหรับส่วนผสมหนา (fuel rich) จะมีค่า $\Phi > 1$ ส่วนผสมบาง (fuel lean) จะมี $\Phi < 1$ และสำหรับ stoichiometry จะมี $\Phi = 1$ ซึ่งอัตราส่วนสมมูลนั้นเป็นพารามิเตอร์ที่มีประโยชน์มากในการบ่งบอกสมรรถนะของพารามิเตอร์อื่นๆ ได้แก่ % stoichiometry air คือปริมาณที่บอกให้ทราบว่าปริมาณอากาศที่ใช้จริงในการเผาไหม้คิดเป็นกี่เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอากาศตามทฤษฎี ซึ่งมีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนสมมูลดังนี้

$$\% \text{stoichiometry air} = \frac{100\%}{\Phi} \quad (3.5)$$

และเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน (% excess air) คือปริมาณที่บอกให้ทราบว่าปริมาณอากาศส่วนเกินที่เปอร์เซ็นต์โดยคิดจากอากาศทางทฤษฎีที่มี

3.2.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเผาไหม้

3.1.2.1 ปริมาณอากาศที่เพียงพอต่อการเผาไหม้ (Sufficient air to combustion) ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงให้สมบูรณ์จำเป็นต้องมีสัดส่วนของอากาศหรือออกซิเจนที่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาเผาไหม้ โดยปริมาณอากาศที่น้อยที่สุดที่สามารถทำให้เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์เรียกว่าปริมาณอากาศทางทฤษฎี ซึ่งสามารถคำนวณได้จากหัวข้อที่ผ่านมา

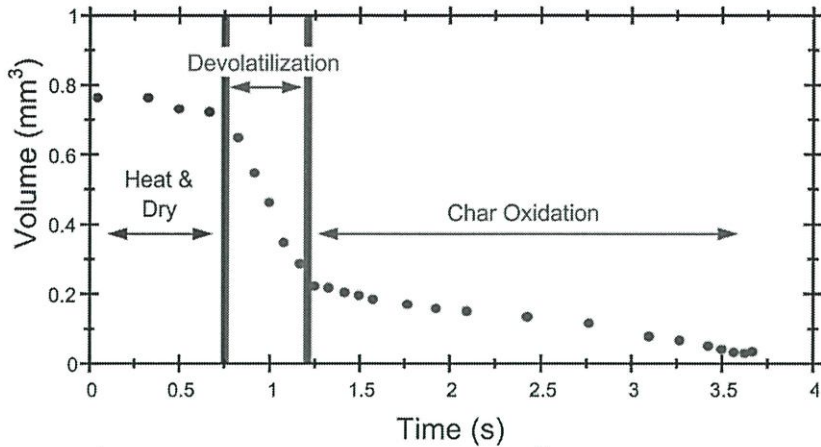
3.2.2.2 ระยะเวลาในการเผาไหม้ (Burning time) เนื่องจากในการทำปฏิกิริยาจำเป็นต้องอาศัยเวลาเพื่อที่จะทำให้ได้ปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ซึ่งหาระยะเวลาในการเผาไหม้ไม่เพียงพอจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการใช้เชื้อเพลิงต่ำ และนับว่าเป็นการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงด้วย

3.2.2.3 อุณหภูมิของการเผาไหม้ (Combustion Temperature) เป็นที่ทราบกันดีว่าการเผาไหม้เชื้อเพลิงนั้นเป็นการเกิดปฏิกิริยาเคมี ซึ่งความเร็วของการเกิดปฏิกิริยานั้นจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของการเกิดปฏิกิริยานั้นเป็นสำคัญด้วย โดยหากอุณหภูมิการเผาไหม้มีค่าสูง ความเร็วของการเผาไหม้ก็จะมีค่ามาก

3.2.2.4 ความปั่นป่วนระหว่างการเผาไหม้ (Turbulent) เนื่องจากในการเผาไหม้นั้นเป็นการทำปฏิกิริยาของเชื้อเพลิง และออกซิเจนในอากาศ ซึ่งหากระหว่างการเผาไหม้มีความปั่นป่วนเกิดขึ้นจะทำให้เกิดการคลุกเคล้ากันอย่างดีของเชื้อเพลิงและออกซิเจน ทำให้โอกาสที่ออกซิเจนจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิง และเกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์มีมากขึ้น

3.4 การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง

เมื่อเชื้อเพลิงอยู่ท่ามกลางกระแสการไหลของอากาศร้อน เชื้อเพลิงจะเกิดการสูญเสียมวลในสามช่วงได้แก่ (i) การทำแห้ง (drying) จากนั้นอนุภาคจะได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่สามารถเกิดการแยกสลายด้วยความร้อน (pyrolysis) (ii) การปล่อยสารระเหย (devolatilization) อนุภาคเชื้อเพลิงเกิดการแยกสลายด้วยความร้อน ได้สารระเหยอินทรีย์ที่เผาไหม้ได้ และถ่านชาร์ (char) เป็นผลิตภัณฑ์ (iii) การเผาไหม้ถ่านชาร์ (char combustion) เกิดขึ้นหลังจากการแยกสลายด้วยความร้อนสิ้นสุดลง โดยที่สารระเหยจะถูกเผาไหม้พร้อมๆกันกับกระบวนการเผาไหม้ถ่านชาร์ ความสำคัญของแต่ละช่วงต่อการสูญเสียมวลจะขึ้นอยู่กับ องค์ประกอบของเชื้อเพลิงว่ามี ความชื้น สารระเหยอินทรีย์ ถ่านคงตัว และเศษเถ้าอยู่มากน้อยเพียงใด สำหรับอนุภาคขนาดเล็กกระบวนการทั้งสามจะเกิดขึ้นตามลำดับกัน ดังแสดงในรูปที่



รูปที่ 3.2 กลไกการเผาไหม้สำหรับอนุภาคเชื้อเพลิงแข็งขนาดเล็ก

3.3.1 การทำแห้งของเชื้อเพลิงแข็ง (Drying)

ความชื้นมีอยู่ในเชื้อเพลิงแข็งได้ 2 รูปแบบ คือ น้ำอิสระ (free water) อยู่ภายในช่องว่างเล็กๆในเชื้อเพลิง และน้ำยึดเหนี่ยว (bound water) ซึ่งเป็นน้ำที่ถูกดูดซับไว้บนโครงสร้างพื้นผิวภายในของเนื้อเชื้อเพลิง พิจารณาอนุภาคเชื้อเพลิงขนาดเล็กที่อยู่ภายใต้แก๊สร้อน จะมีการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาและการแผ่รังสีไปยังพื้นผิวของอนุภาคเชื้อเพลิง ส่งผลให้อุณหภูมิของอนุภาคสูงขึ้นจนถึงจุดเดือดของน้ำ จนน้ำเกิดการระเหย และถูกไล่ออกมาภายนอก

3.3.2 การปล่อยสารระเหย (Devolatilization)

เมื่อการทำแห้งสิ้นสุดลง ในขณะที่อุณหภูมิจะเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ เชื้อเพลิงจะเริ่มการย่อยสลายด้วยความร้อน ในกระบวนการนี้จะมีสารระเหยอินทรีย์ออกมาภายนอกเชื้อเพลิง กระบวนการปลดปล่อยสารระเหยนี้จึงอาจถูกเรียกว่าเป็นช่วงไพโรไลซิส (pyrolysis) อัตราการปล่อยสารระเหย และผลิตภัณฑ์จากไพโรไลซิสจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และชนิดของเชื้อเพลิง สารระเหยที่ปล่อยออกมาจะผสมกับอากาศที่แพร่เข้ามารอบๆ เมื่ออุณหภูมิถึงจุดติดไฟก็จะเกิดเป็นเปลวไฟขึ้นรอบๆอนุภาคเชื้อเพลิงแข็ง เปลวไฟที่เกิดขึ้นก็ให้ความร้อนกับไปยังเชื้อเพลิง ส่งเสริมให้การปล่อยสารระเหยดีขึ้น สำหรับเชื้อเพลิงขนาดใหญ่ ความชื้นจะถูกขับออกมาพร้อมกับสารระเหย ความชื้นนี้จะส่งผลให้อุณหภูมิของเปลวไฟที่เกิดขึ้นรอบๆเชื้อเพลิงต่ำลง

อัตราการปล่อยสารระเหย หรือการเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสอาจจะนำเสนอได้ด้วยสมการปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่ง ดังนี้

$$\frac{dm_v}{dt} = -m_v k_{pr} \quad (3.6)$$

โดยที่ $k_{pr} = -k_0 \exp(-E_{pr} / RT_p)$ และ $m_v = m_p - m_c - m_a$ มวลของสารระเหยเท่ากับมวลของอนุภาคเชื้อเพลิงลบออกด้วยมวลของถ่านชาร์ และของเศษเถ้า อัตราการเกิดไพโรไลซิสจะไม่ขึ้นอยู่กับขนาดของเชื้อเพลิงหากอุณหภูมิของอนุภาคเชื้อเพลิงคงที่ ค่าพลังงานกระตุ้น และค่าคงที่หน้า exponential ต้องหามาจากการทดลอง สำหรับเชื้อเพลิงขนาดใหญ่ จะใช้เวลานานในการรับความร้อนจนถึงอุณหภูมิการปลดปล่อยสารระเหย และกระบวนการไพโรไลซิสจะเริ่มจากผิวนอก แล้วค่อยๆ เคลื่อนเข้าไปด้านในของเชื้อเพลิง หากมีการให้ความร้อนต่อเชื้อเพลิงในอัตราที่สูงกว่าปกติ อัตราการปลดปล่อยสารระเหยที่ได้ อาจจะมีมากขึ้นตามไปด้วย

การจุดติดไฟของเชื้อเพลิงแข็งสามารถเกิดขึ้นได้กับ การจุดติดไฟของถ่านชาร์บนผิวของเชื้อเพลิง และการจุดติดไฟของสารระเหยบนชั้นขีดขอบรอบๆผิวของเชื้อเพลิง แบบใดจะเกิดก่อนขึ้นอยู่กับอัตราการพา และการแผ่รังสีความร้อนไปยังเชื้อเพลิงแข็ง ถ้าการแผ่รังสีความร้อนมีค่าสูง ผิวของเชื้อเพลิงก็จะร้อนขึ้นเร็ว แต่สารระเหยที่ปล่อยออกมาจะถูกพัดออกไปก่อนที่จะมีส่วนผสมที่เผาไหม้ได้เกิดขึ้น การติดไฟจึงเกิดขึ้นที่ผิวก่อน ถ้าอัตราการให้ความร้อนที่ผิวของเชื้อเพลิงต่ำ สารระเหยจะจุดติดไฟได้ก่อน เพราะสารระเหยมีอุณหภูมิจุดติดไฟต่ำกว่าชาร์ สารระเหยเหล่านี้เผาไหม้รวดเร็ว และให้พลังงานความร้อนออกมามากเมื่อเทียบกับคาร์บอนคงตัว หรือถ่านชาร์ที่เหลืออยู่หลังกระบวนการปล่อยสารระเหย โดยที่เวลาล่าช้าในการจุดติด (ignition time delay) จะขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาค การแพร่ทางความร้อน อัตราการให้ความร้อน และอัตราการเกิดไพโรไลซิส เป็นต้น

3.3.3 การเผาไหม้ถ่านชาร์ (Burning of Carbon)

ขั้นตอนสุดท้ายของการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง คือการเผาไหม้ถ่านชาร์ ลักษณะของถ่านชาร์จะมีความพรุน (porous) สูงมาก ส่งผลให้พื้นที่ผิวภายในมากในระดับ 100 ตารางเมตรต่อกรัม สำหรับชาร์จากถ่านหิน และ 10,000 ตารางเมตรต่อกรัม สำหรับถ่านชาร์จากไม้ เมื่อไม่มีสารระเหยปล่อยออกมาแล้ว ออกซิเจนในอากาศก็สามารถแพร่เข้าไปด้านในของถ่านชาร์ได้ การเผาไหม้ของถ่านชาร์แบบนี้เป็น

กระบวนการเผาไหม้พื้นผิวสัมผัส (surface burning) ระหว่างสองสถานะที่ไม่เหมือนกัน หรืออาจจะเรียกว่าการเผาไหม้แบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (heterogeneous combustion) ซึ่งมีขั้นตอนสำคัญดังนี้

- ก. การขนส่งออกซิเจนไปยังพื้นผิวของเชื้อเพลิงด้วยการพา หรือการแพร่
- ข. การขนส่งออกซิเจนไปยังพื้นผิวของเชื้อเพลิงด้วยการพา หรือการแพร่
- ค. การดูดซับโมเลกุลออกซิเจนไว้บนผิวเชื้อเพลิง
- ง. ออกซิเจนที่ถูกดูดกลืนไว้ทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงได้สารผลิตภัณฑ์ และถูกดูดกลืนไว้ที่ผิวเชื้อเพลิง
- จ. สารผลิตภัณฑ์ถูกปล่อยออกมาที่ผิวเชื้อเพลิง
- ฉ. สารผลิตภัณฑ์แพร่ออกจากผิวเชื้อเพลิง

ขั้นตอนเหล่านี้เกิดขึ้นอย่างเป็นลำดับ ขั้นตอนไหนเกิดขึ้นช้าที่สุดจะเป็นตัวกำหนดอัตราการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงนั้น ยกตัวอย่าง เช่น ถ้าอนุภาคมีขนาดเล็ก อุณหภูมิค่อนข้างต่ำ และการไหลของของไหลรอบอนุภาคเป็นไปอย่างช้าๆ จะพบว่าขั้นตอน ค. (ปฏิกิริยาการเผาไหม้) จะเกิดขึ้นช้ากว่าขั้นตอน จ. (การแพร่ออกจากผิวเชื้อเพลิงของสารผลิตภัณฑ์) ดังนั้นอัตราการเผาไหม้จะถูกควบคุมโดยอัตราจลน์ทางเคมี (chemical kinetics หรือ kinetically control) เป็นหลัก ซึ่งอัตราการเผาไหม้ขึ้นกับอุณหภูมิ exponential โดยไม่ขึ้นกับขนาดอนุภาค และการไหลแต่อย่างใด นอกจากนี้ จากการที่อัตราการแพร่สูงกว่าอัตราการเผาไหม้ ทำให้ความเข้มข้นของการเผาไหม้ที่ผิวเชื้อเพลิงไม่ได้แตกต่างจากบริเวณกระแสอิสระที่อยู่ห่างออกไปจากผิวเชื้อเพลิงมากนัก

ในทางตรงกันข้าม ถ้าอนุภาคมีขนาดใหญ่ มีอุณหภูมิค่อนข้างสูง และการไหลโดยรอบอนุภาคเป็นไปอย่างรวดเร็ว จะได้ว่าขั้นตอน ค. (ปฏิกิริยาการเผาไหม้) จะเกิดเร็วกว่าขั้นตอน ก. และ จ. มาก (การแพร่เข้าหาผิวเชื้อเพลิงของออกซิเจน และการแพร่ออกจากผิวเชื้อเพลิงของสารผลิตภัณฑ์) ดังนั้นอัตราการเผาไหม้จะถูกควบคุมโดยการแพร่ของออกซิเจนเข้าสู่ผิวของเชื้อเพลิง (diffusional control) เป็นหลัก ซึ่งอัตราการเผาไหม้จะขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคมากกว่าขึ้นกับอุณหภูมิ นอกจากนี้ จากการที่อัตราการเผาไหม้สูงกว่าอัตราการแพร่จะส่งผลให้ความเข้มข้นของออกซิเจนที่ผิวเชื้อเพลิงมีค่าน้อยมากจนอาจตัดทิ้งได้ เพราะถูกนำไปใช้ในการเผาไหม้ที่ผิวเชื้อเพลิงเกือบหมดนั่นเอง

3.5 การรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟ

หากปรับเปลี่ยนเงื่อนไขในการเผาไหม้ เช่นการเพิ่มอัตราการไหลของเชื้อเพลิงหรืออากาศ อาจส่งผลต่อความเสถียรของเปลวไฟ เช่น เกิดการเป่าดับ (blow off) หรือ เปลวไฟย้อนกลับ (flashback) การรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟในหัวเผาจึงมีความสำคัญ สำหรับการรักษาเสถียรภาพ ของเปลวไฟในหัวเผาเชื้อเพลิงฝุ่น ทำได้โดยวิธีการทางอากาศพลศาสตร์ (aerodynamic) โดยการ หมุนวนกลับของแก๊สที่มีอุณหภูมิสูงมาผสมกับเชื้อเพลิงที่เข้ามาใหม่ในห้องเผาไหม้ เปลวไฟจะเสถียร เมื่อ เวลาที่ส่วนผสมของ

เชื้อเพลิงกับอากาศใหม่ ไหลเข้ามาในห้องเผาไหม้ ผ่านบริเวณที่เกิดแอส ไหลวน (recirculation zone) ยาวนานกว่าเวลาที่ใช้ในการติดไฟ ซึ่งสารระเหยส่วนใหญ่จะถูก ปลดปล่อย ณ บริเวณที่เกิดกระแสไหลวน นอกจากหลักของอากาศพลศาสตร์แล้ว คุณภาพของ เชื้อเพลิงก็มีส่วนสำคัญที่ทำให้เปลวไฟมีเสถียรภาพ เช่น ขนาดของอนุภาคที่ผ่านการบด ความชื้น และค่าความร้อน เป็นต้น การรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟ ความเร็วการไหลของส่วนผสม ต้องพอดี กันกับ ความเร็วของเปลวไฟ (flame speed) และการจะเพิ่มความเร็วมวลของส่วนผสมให้สูงขึ้น ความเร็วเป่าดับ (blow-off velocity) ต้องสูงกว่าความเร็วการไหลของส่วนผสม

ในงานวิจัยของพงศนันท์ แก่มพรม ได้ทำการค้นคว้าวิจัยอุปกรณ์สร้างเสถียรภาพของเปลวไฟ ได้แก่ แผ่นขวางกั้นช่องการไหล (bluff body) และตัวสร้างการหมุนควง (swirler หรือ swirl generator) ดังมีข้อมูลต่อไปนี้

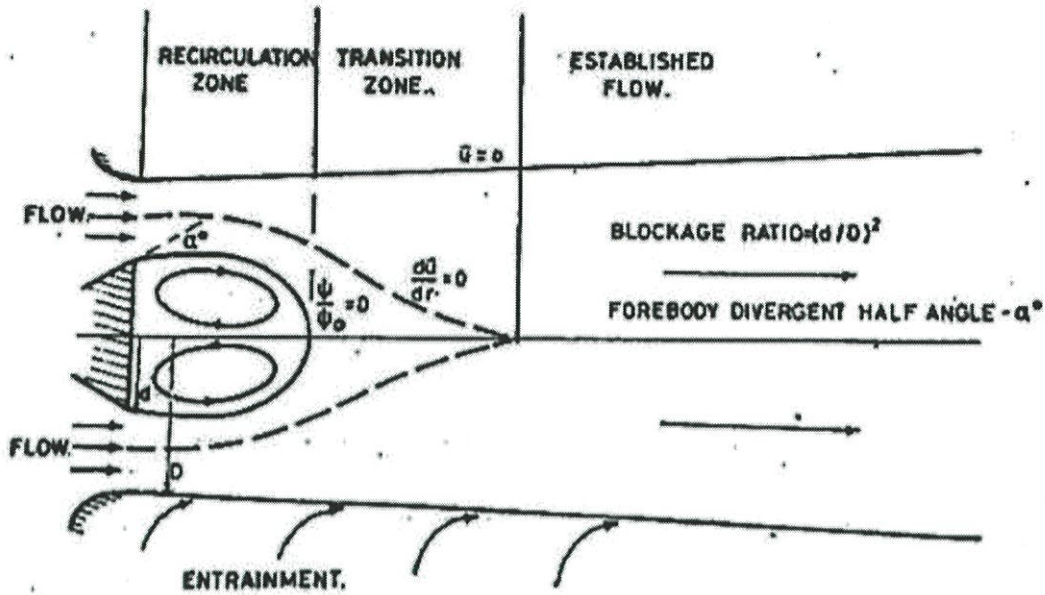
3.4.1 การใช้แผ่นขวางกั้นช่องการไหล (bluff body)

เมื่อส่วนผสมไหลผ่านแผ่นขวางกั้นช่องการไหล ความเร็วของส่วนผสมจะลดลงตรงบริเวณ ผนังของแผ่น การไหลปะทะด้านหน้าของแผ่นทำให้เกิดความดันสูง และด้านหลังมีความดันต่ำกว่า ทำให้เกิดการไหลวนเรียกว่า wake นอกจากนี้บริเวณที่ไม่มีเส้นกระแส (stream line) ทำให้เกิดความดันที่สวนทางกับกระแสการไหล ที่ปลายกระแสการไหล (downstream) สูงมาก ทำให้เกิดการแยกตัวของชั้นขอบเขต และบริเวณที่เกิดกระแสไหลวน (recirculation zone) จะถูกสร้างขึ้นบริเวณ wake ซึ่งบริเวณนี้จะมีการถ่ายเทมวล และความร้อนที่สูงมาก สารผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้ที่มี อุณหภูมิสูงที่เกิดขึ้นรอบๆบริเวณที่เกิดกระแสไหลวน จะแทรกซึมเข้าไปในกระแสไหลวนและถูกส่งมา ที่ต้นกระแสการไหล (upstream) คลุกเคล้ากับส่วนผสมใหม่ (fresh combustible mixture) จนถึงจุดติดไฟ

สิ่งที่ส่งผลต่อการไหลวนภายใน wake ของแผ่นขวางกั้นช่องการไหล ขึ้นอยู่กับขนาดรูปร่าง และการไหลล้อมรอบระบบ (surrounding flow system) ขอบเขตของบริเวณที่เกิดกระแสไหลวนจะถูกล้อมรอบด้วยเส้นความเร็วศูนย์

$$\text{Blockage ration} = (d/D)^2 \quad (3.7)$$

มุมของวัตถุขวางกั้น (α°) ของแต่ละชนิด (forebody divergent) จะมีค่าเท่ากับ 0° สำหรับวัตถุทรงกระบอก และ 180° สำหรับวัตถุรูปจาน (disc shape) สำหรับแผ่นรูปจาน ถ้าค่า blockage ratio ต่ำ จะทำให้บริเวณที่เกิดกระแสไหลวนยาวขึ้น แต่ส่งผลต่อความกว้างเพียงเล็กน้อย ถ้า blockage ratio คงที่ จะพบว่าแผ่นรูปจานทำให้บริเวณที่เกิดกระแสไหลวน กว้าง และยาว กว่า แผ่น รูปกรวย 45° และทรงกระบอก ตามลำดับ และแผ่นรูปจานจะสร้างกระแสนอกกลับ (reverse flow) สูงสุดซึ่งส่งผลต่อความเร็วลมที่นำพาแก๊สร้อนมาคลุกเคล้ากับส่วนผสมใหม่



รูปที่ 3.3 การไหลผ่านแผ่นขวางกั้นช่องทางการไหล

3.5.2 การใช้ตัวสร้างการหมุนควง (swirl generator)

การทำให้เกิดการหมุนควงของกระแสการไหลมีหลักการดังต่อไปนี้

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

การไหลหมุนควงมักถูกใช้ในการควบคุมเปลวไฟในห้องเผาไหม้ การไหลหมุนควงมีคุณลักษณะของการเคลื่อนที่แบบหมุน และความปั่นป่วนอิสระ เมื่อของไหลเกิดการหมุนควง จะมีองค์ประกอบความเร็วตามแนวสัมผัส ที่อยู่ในความเร็วตามแนวแกนและรัศมี นอกจากนี้ผลของการหมุนควงทำให้เกิดความดันตามแนวรัศมีและตามแนวแกนที่ส่งผลกระทบต่อสนามการไหล ในกรณีที่มีการหมุนควงมีความเข้มข้นสูง ความดันลบส่งผลให้เกิดกระแสย้อนกลับ ทำให้บริเวณที่เกิดกระแสไหลวนภายใน (internal recirculation zone, IRZ) ถูกสร้างขึ้น ความเข้มข้นของการหมุนควงจะถูกวัดด้วยตัวเลขการหมุนควง (swirl number) ซึ่งมีนิยามว่าเป็นอัตราส่วนระหว่างฟลักซ์ของโมเมนตัมเชิงมุม (angular momentum) กับฟลักซ์ของโมเมนตัมตามแนวแกน (axial momentum) โดยคำนวณได้จากสมการ

$$S = \frac{G_\phi}{G_x R} \quad (3.8)$$

เมื่อ R คือรัศมีของช่องทางออก โดยที่

$$G_{\phi} = \int_0^R (Wr) \rho U 2\pi r dr \quad (3.9)$$

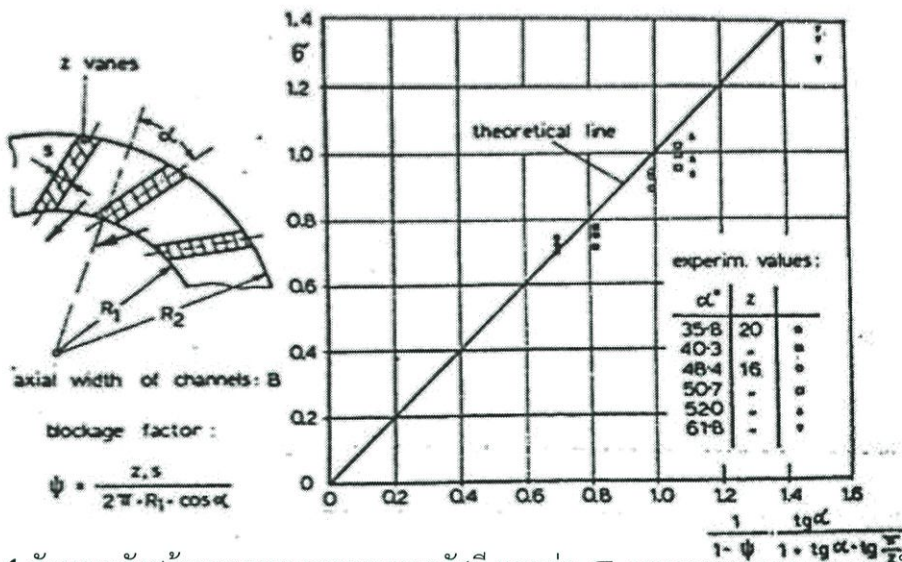
$$G_x = \int_0^R U \rho U 2\pi r dr + \int_0^R p 2\pi r dr \quad (3.10)$$

U , W และ p คือความเร็วตามแนวแกน ความเร็วตามแนวสัมผัส และความดันสถิตตามลำดับ

การคำนวณตัวเลขการหมุนควงโดยตรงจากสมการที่ (3.28) นั้น ต้องมีการวัดความเร็ว และความดันสถิตที่แม่นยำ ซึ่งการออกแบบมักจะไม่มียุทธศาสตร์ทดลอง จึงใช้การคำนวณตัวเลขการหมุนจากรูปทรง (geometry) โดย G_{ϕ} และเทอมของความเร็วที่อยู่ใน G_x สามารถคาดเดาได้ โดยประมาณจากข้อมูลเริ่มต้นสำหรับตัวสร้างการหมุนควงแบบต่างๆ ในการคำนวณตัวเลขการหมุนควงเทอมของความเร็วใน G_x จะมีอิทธิพลมากกว่าเทอมของความดัน ทำให้ตัดเทอมของความดันทิ้งได้ ทำให้ตัวเลขการหมุนควงที่ได้จากการประมาณคำนวณได้ดังนี้

$$S' = \frac{G_{\phi}}{G'_x R} \quad (3.11)$$

$$G'_x = 2\pi \int_0^R \rho U^2 r dr \quad (3.12)$$



รูปที่ 3.4 ลักษณะตัวสร้างการหมุนควงตามแนวรัศมี และค่า σ จากการทดลองและการคำนวณ

สำหรับตัวสร้างการหมุนควงตามแนวรัศมี (guide-vane cascades in a radial flow) แสดงตัวอย่าง ดังรูปที่ 3.4 โมเมนต์เชิงมุมจะคำนวณได้จากสมการ

$$G_\varphi = \sigma \frac{\dot{M}^2}{\rho 2\pi B} \tag{3.13}$$

โดยที่

$$\sigma = \frac{\bar{W}_1}{\bar{V}_1} \tag{3.14}$$

$$\bar{W}_1 = \frac{G_\varphi}{\dot{M} R_1} \tag{3.15}$$

$$\bar{V}_1 = \frac{\dot{M}}{\rho 2\pi R_1 B} \tag{3.16}$$

เมื่อ

\dot{M} = อัตราการไหลเชิงมวล

B = ความยาวของช่องตามแนวแกน

σ = อัตราส่วนขององค์ประกอบความเร็วตามแนวสัมผัส (\bar{W}_1) กับตามแนวรัศมี (\bar{V}_1) เฉลี่ยที่ช่องทางออกของตัวสร้างการหมุนควง R_1

หากสมมติให้ตัวเลขเรโนลด์ (Reynolds number) มีผลน้อยและสามารถละทิ้งได้ในการคำนวณ σ จะสามารถคำนวณได้จากรูปทรงของตัวสร้างการหมุนควง โดยสมการ

$$\sigma = \frac{1}{1 - \psi} \cdot \frac{\tan \alpha}{1 + \tan \alpha \tan(\pi / z)} \quad (3.17)$$

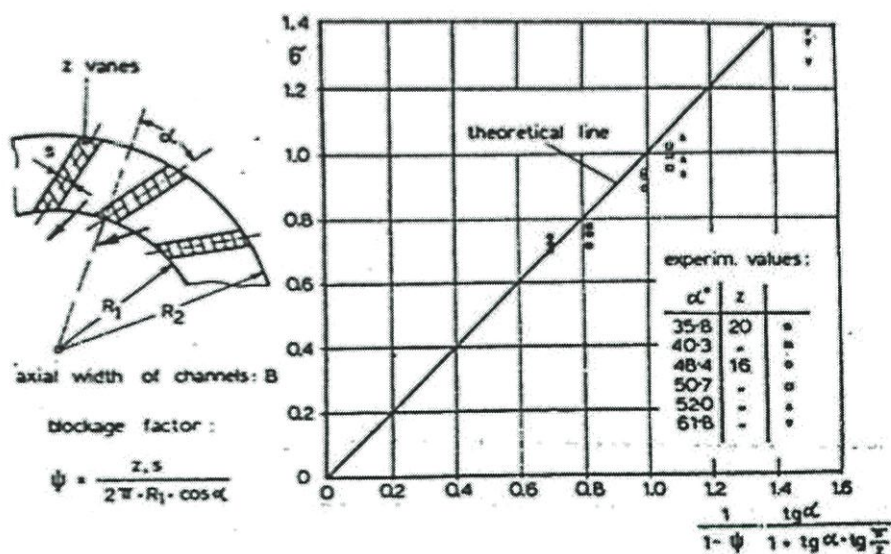
โดยที่ ψ คือ blockage factor คำนวณได้จาก

$$\psi = \frac{zs}{2\pi R_1 \cos \alpha} \quad (3.18)$$

เมื่อ

s = ความหนาของใบปิด

z = จำนวนของใบปิด



รูปที่ 3.5 ลักษณะตัวสร้างการหมุนควงตามแนวแกน และผลการคำนวณตัวเลขการหมุนควง ตามทฤษฎีกับการทดลอง

ตัวสร้างการหมุนควงตามแนวแกน แสดงตัวอย่างดังรูปที่ 3.5 โมเมนตัมเชิงมุมคำนวณได้จาก

$$G_\varphi = \int_{R_h}^R u w \rho 2\pi r^2 dr \quad (3.19)$$

ถ้าใบปิดบางมากโดยมีคอร์ดและมุม α คงที่ โมเมนตัมเชิงมุมคำนวณได้จาก

$$G_\varphi = 2\pi\rho U_0^2 \tan \alpha \frac{R^3 - R_h^3}{3} \quad (3.20)$$

โมเมนตัมตามแนวแกนคำนวณได้จาก

$$G'_x = \pi\rho U_0^2 (R^2 - R_h^2) \quad (3.21)$$

หรืออาจเขียนความสัมพันธ์ของโมเมนตัมเชิงมุมกับโมเมนตัมตามแนวแกนได้ดังนี้

$$G_{\varphi} = G'_x \tan \alpha R \frac{2}{3} \cdot \frac{1 - (R_h / R)^3}{1 - (R_h / R)^2} \quad (3.22)$$

ดังนั้นตัวเลขการหมุนควงของตัวสร้างการหมุนควงตามแนวแกนคำนวณได้จากสมการ

$$S' = \frac{G}{G'_x R} = \frac{2}{3} \cdot \left[\frac{1 - (R_h / R)^3}{1 - (R_h / R)^2} \right] \tan \alpha \quad (3.23)$$

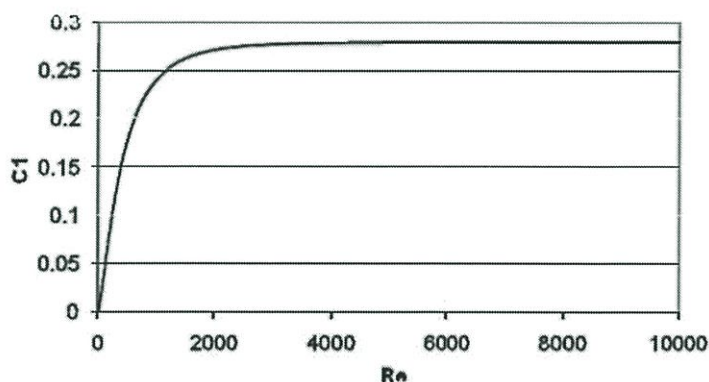
สำหรับตัวเลขการหมุนควงของตัวสร้างการหมุนควงตามแนวรัศมีนั้น Shee et al. ได้ทำการทดลองและพิสูจน์ความสัมพันธ์ขึ้นมาเพิ่มเติม พบว่าตัวเลขการหมุนควงมีค่าขึ้นอยู่กับตัวเลขเรโนลด์ ณ บริเวณช่องทางเข้าของตัวสร้างการหมุนควง และมุมของช่องปิด โดยตัวเลขการหมุนควงหลังจากการปรับแก้แล้วสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$S' = C_1 (Re) \sigma \quad (3.24)$$

โดย C_1 เป็นฟังก์ชันของตัวเลขเรโนลด์ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$C_1 = 0.28 \times \left[1 - \operatorname{sech}(0.026 Re^{0.67}) \right] \quad (3.25)$$

ในกรณีที่ตัวเลขเรโนลด์มีค่าสูง ค่า C_1 จะมีค่าคงที่ สามารถพิจารณาให้มีค่าเป็น 0.28 ได้ ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.6 ค่า C_1 ณ ที่ตัวเลขเรโนลด์ต่างๆ

Al-Kabie ได้ทำการสร้างสมการสำหรับตัวเลขการหมุนควงของตัวสร้างการหมุนควงตามแนวรัศมี โดยพิจารณาจากรูปทรงของตัวสร้างการหมุนควง ได้ตั้งสมการ

$$S_a = \frac{\sin\theta}{1 + \frac{1}{\tan\theta}} \cdot \left[\frac{A_{exit}}{C_c A_{th}} \right] \quad (3.26)$$

โดยที่ A_{exit} = พื้นที่หน้าตัดทางออกของ Swirler
 A_{th} = พื้นที่หน้าตัดบริเวณที่แคบที่สุดของช่องการไหลของ Swirler
 C_c = สัมประสิทธิ์หน้าสัมผัสของ Swirler โดยที่สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$C_c = \frac{C_D}{1 + \left(\frac{C_D A_{th}}{A_{exit}} \right)} \quad (3.27)$$

โดยที่ C_D = สัมประสิทธิ์การไหลของ Swirler โดยสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$C_D = \frac{\dot{m}}{A_{th} \sqrt{2\rho\Delta P}} \quad (3.28)$$

โดยที่ ΔP = ความดันสูญเสียระหว่างก่อน และหลัง Swirler
 \dot{m} = อัตราการไหลของอากาศที่ผ่าน Swirler

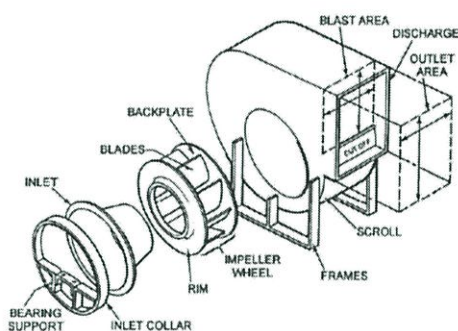
3.6 พัดลม

3.6.1 ชนิดของพัดลม

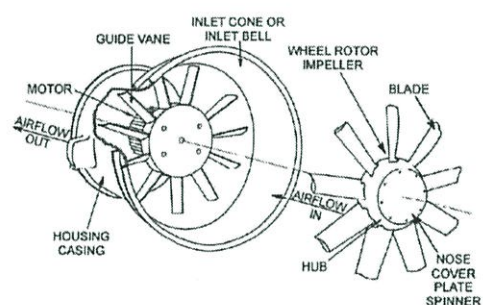
พัดลมหรือเครื่องเป่าลมคืออุปกรณ์ที่จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอากาศด้วยความเร็วและทิศทางที่ต้องการความแตกต่างระหว่างพัดลมและเครื่องเป่าลม มาตรฐาน JIS ได้กำหนดไว้ว่าพัดลมที่มีแรงดันลมต่ำกว่า 1,000

มิลลิเมตรน้ำเรียกว่า พัดลม (Fan) ส่วนพัดลมที่มีแรงดันลมตั้งแต่ 1,000 มิลลิเมตรน้ำแต่ไม่ถึง 10 เมตรน้ำ เรียกว่า เครื่องเป่าลม (Blower) แบ่งเป็นสองประเภทคือ

- แบบไหลตามแนวรัศมี (Centrifugal Fan)
- แบบไหลตามแนวแกน (Axial Fan)



(a)

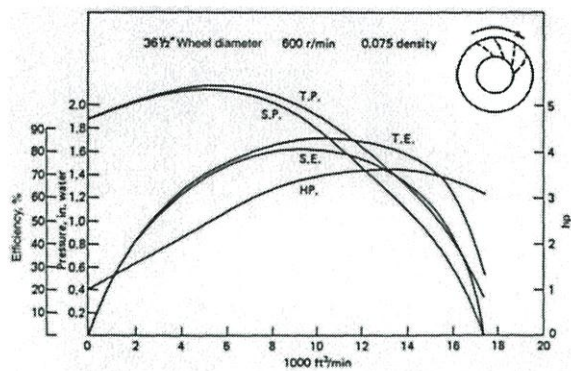


(b)

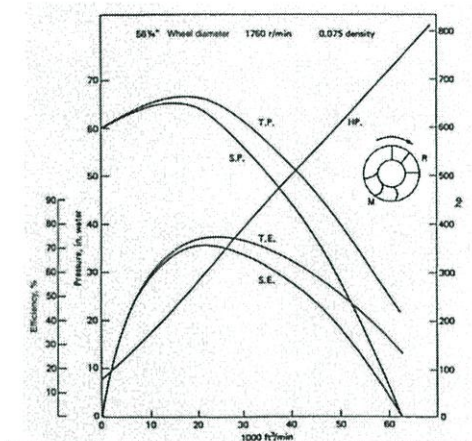
รูปที่ 3.7 ชนิดเครื่องเป่าต่างๆ a) แบบไหลตามแนวรัศมี (Centrifugal Fan) b) แบบไหลตามแนวแกน (Axial Fan)

พัดลมไหลตามแนวรัศมีสามารถแบ่งย่อยตามลักษณะของใบพัดได้อีก 3 แบบคือ

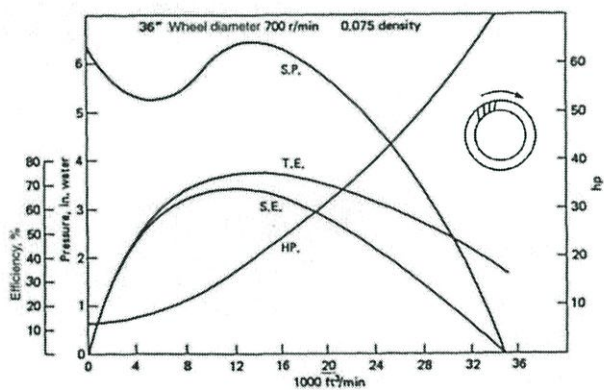
- 1) แบบ Backward Curved Blade
- 2) แบบ Radial Curve Blade
- 3) แบบ Forward Curved Blade



(a)



(b)



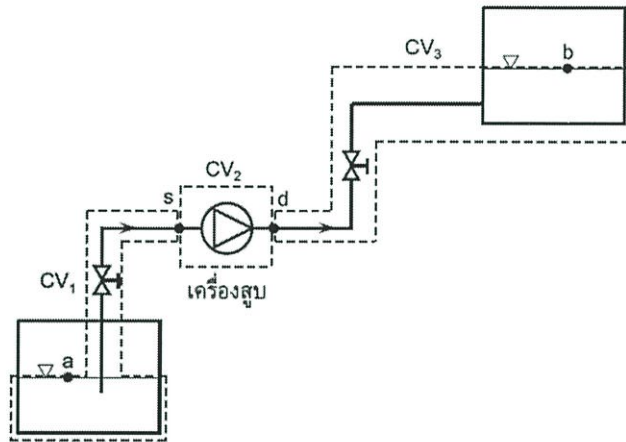
(c)

รูปที่ 3.8 กราฟ Performance Curve ของชนิดใบพัดต่างๆ a) Backward Curved Blade b) แบบ Radial Curve Blade c) แบบ Forward Curved Blade

พัดลมและปั๊มน้ำจะมีลักษณะเฉพาะที่คล้ายกันมาก ในการพิจารณาเลือกใช้หรือวิเคราะห์จะใช้กราฟที่เรียกว่า Performance Curve หรืออาจเรียกว่า H-Q Curve ที่สามารถบอกถึงข้อมูลการทำงานของพัดลมที่กำลังพิจารณาอยู่ได้

3.6.2 การทำงานของระบบของไหล

เส้นโค้งสมรรถนะของระบบ (System Performance Curve) คือเส้นโค้งความสัมพันธ์ของระบบทางกายภาพที่กำลังถูกใช้งานอยู่กับเครื่องสูบล้ำซึ่งสามารถพิจารณาในแต่ละกรณีได้ดังนี้



รูปที่ 3.9 การเข้าคู่ระหว่างเครื่องสูบล้ำกับระบบจากจุดสองจุดที่ทราบค่า

เมื่อพิจารณาระบบจากจุด a ไปยังจุด b ซึ่ง ณ จุดทั้งสองนั้น เราทราบค่าความดันสถิตและความเร็ว จากปริมาตรควบคุมทั้ง สามจะได้ว่า

CV_1 (from a to s)

$$\left(\frac{P_a}{\rho g} + \alpha_a \frac{\bar{V}_a^2}{2g} + Z_a \right) - \left(\frac{P_s}{\rho g} + \alpha_s \frac{\bar{V}_s^2}{2g} + Z_s \right) = H_{l_{r,a \rightarrow s}} \quad (3.29)$$

CV_2 (from s to d) (positive HP สำหรับเครื่องสูบล้ำ)

$$\left(\frac{P_s}{\rho g} + \alpha_s \frac{\bar{V}_s^2}{2g} + Z_s \right) - \left(\frac{P_d}{\rho g} + \alpha_d \frac{\bar{V}_d^2}{2g} + Z_d \right) = -H_p = \frac{-\dot{W}_h}{\rho g Q} \quad (3.30)$$

CV_3 (from d to b)

$$\left(\frac{P_d}{\rho g} + \alpha_d \frac{\bar{V}_d^2}{2g} + Z_d \right) - \left(\frac{P_b}{\rho g} + \alpha_b \frac{\bar{V}_b^2}{2g} + Z_b \right) = H_{l_{T,d \rightarrow b}} \quad (3.31)$$

หากนำสมการทั้งสามมารวมกันและจัดรูปจะได้ว่า

$$\left(\frac{P_b}{\rho g} + \alpha_b \frac{\bar{V}_b^2}{2g} + Z_b \right) - \left(\frac{P_a}{\rho g} + \alpha_a \frac{\bar{V}_a^2}{2g} + Z_a \right) + H_{l_{T,a \rightarrow s}} + H_{l_{T,d \rightarrow b}} = H_p \quad (3.32)$$

อาจจะมองได้ว่าเป็นสมการ Total Pressure รวมที่เกิดจาก CV รวมที่เกิดจาก CV ย่อยทั้งสามและทางด้านซ้ายมือของสมการเปรียบได้กับภาระของ H_p ที่ผลิตได้จากเครื่องสูบนั่นเอง หากจัดรูปสมการอีกครั้งจะได้ว่า

$$\left(\frac{P_{b_0} - P_{a_0}}{\rho g} \right) + (Z_b - Z_a) + H_{l_{T,a \rightarrow b}} = H_p \quad (3.33)$$

ดังนั้นทางด้านซ้ายมือของสมการเราจะเรียกว่าค่าหัวของระบบหรือ H_{sys} ดังนั้น

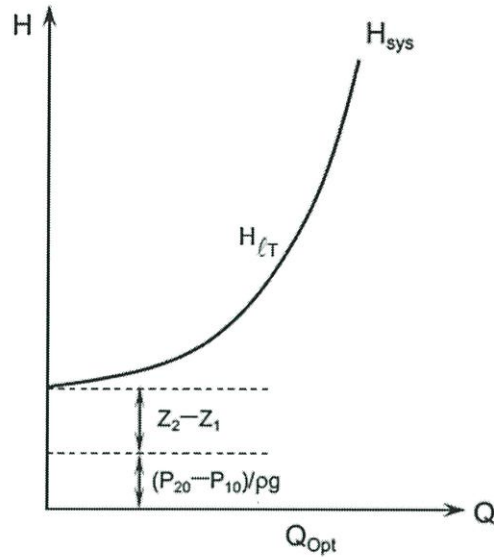
$$H_{sys} = \left(\frac{P_{b_0} - P_{a_0}}{\rho g} \right) + (Z_b - Z_a) + H_{l_{T,a \rightarrow b}} \quad (3.34)$$

$$H_{sys} = H_p \quad (3.35)$$

จะเห็นได้ว่า H_{sys} ในระบบเปิดจะประกอบด้วย

- แรงแเสียดทางในท่อและ fitting ต่างๆ
- ค่าหัวยกสถิต
- ค่าหัวที่เกิดจาก P_{b_0} และ P_{a_0} ที่แตกต่างกัน

จากที่ผ่านมา H_p ของเครื่องสูบน้ำที่อัตราไหลต่างๆ กันจะสามารถแสดงได้อยู่ในรูปของกราฟสมรรถนะของเครื่องสูบน้ำ ในทำนองเดียวกันเราสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง H_{sys} กับอัตราไหลซึ่งทำให้เกิดเป็นเส้นโค้งสมรรถนะของระบบ (System Performance Curve)



รูปที่ 3.10 กราฟ System Performance Curve

จะสังเกตว่าในส่วนของ H_{IT} นั้น ในกรณีการไหลแบบราบเรียบ $f = \frac{64}{Re D}$ จะได้ว่า

$$H_{IT} \propto Q$$

ในกรณีการไหลแบบปั่นป่วนซึ่งเป็นลักษณะการไหลที่พบโดยทั่วไป $f = f(Re_D, \epsilon)$ ตาม Moody Chart ซึ่ง ค่า f จะไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงตามค่า ดังนั้น

$$H_{IT} \propto Q^2$$

ในส่วนของ $Z_b - Z_a$ และ $\frac{P_{20} - P_{10}}{\rho g}$ นั้น จะเป็น ค่าคงที่ที่ทำให้ H_{sys} ของการไหลแบบปั่นป่วนสามารถเขียนได้อยู่ในรูปทั่วไปคือ

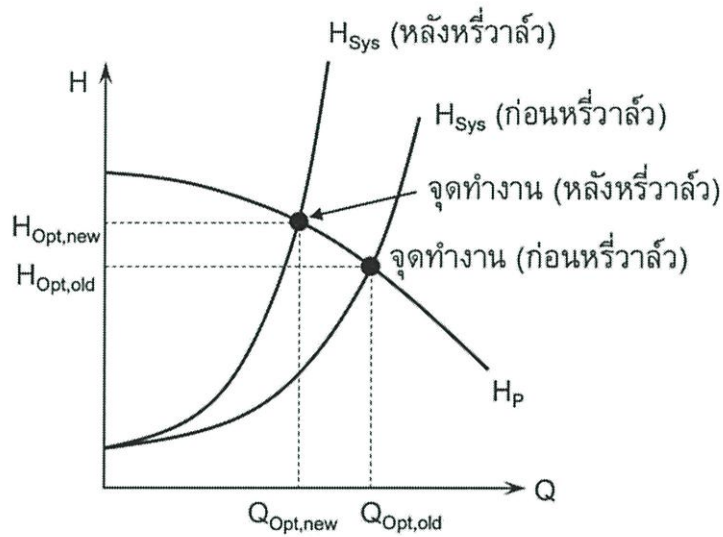
$$H_{sys} = C_1 + C_2 Q \quad (3.36)$$

ในกรณีที่จุด a และจุด b เป็น Reservoir ที่เปิดสู่บรรยากาศซึ่งอาจจะเรียกว่าการทำงานของเครื่องสูบน้ำ

ระบบเปิด ผลที่ได้คือ
$$\frac{P_{20} - P_{10}}{\rho g} = 0$$

3.6.3 จุดทำงานเมื่อต้องการลดอัตราไหล

การหรีวาล์วเราพบว่า H_{sys} ของระบบจะเปลี่ยนไปเมื่อทำการลดอัตราไหลโดยการหรีวาล์ว ในขณะที่ความสัมพันธ์ระหว่าง H_p และ Q ของเครื่องสูบน้ำยังคงเป็นเช่นเดิม



รูปที่ 3.11 กราฟ System Performance Curve ที่เปลี่ยนแปลงหลังหรีวาล์ว

การลดอัตราไหลด้วยการหรีวาล์วจะทำให้

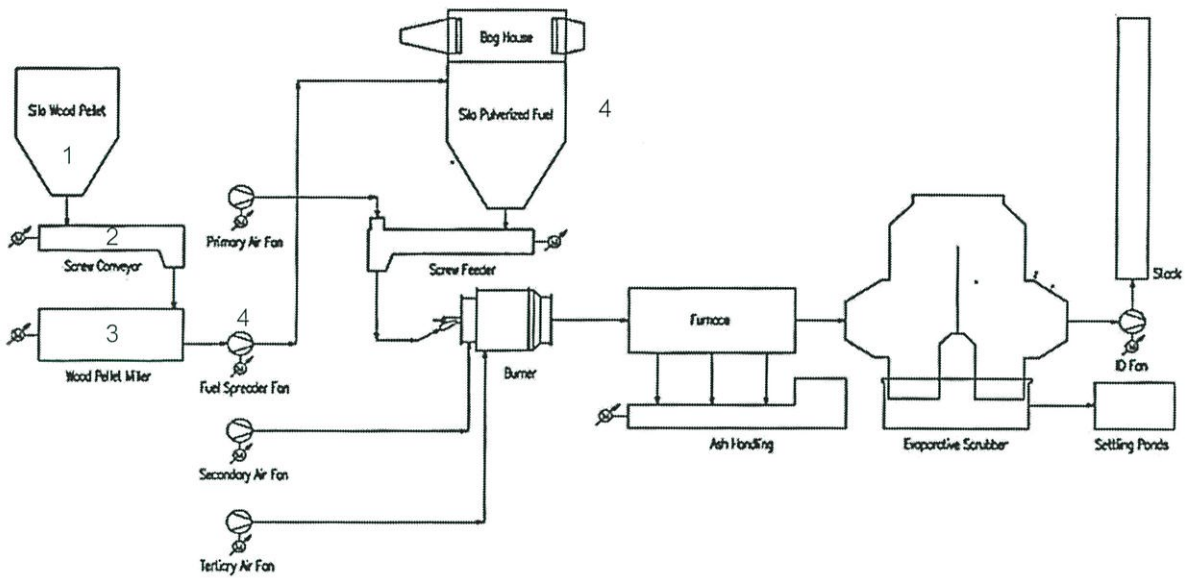
- ค่า K ในความสูญเสียรองเพิ่มขึ้นส่งผลให้เส้นโค้งของระบบชันขึ้น
- Q_{opt} ลดลงในขณะที่ H_{opt} เพิ่มขึ้น
- โดยทั่วไปแล้ว $\dot{W} = \rho g Q H_{opt}$ จะลดลงเมื่อหรีวาล์ว

บทที่ 4

การออกแบบ และการคำนวณ

4.1 ภาพรวมระบบเดิม

ส่วนประกอบทั้งหมดของระบบเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลชนิดฝุ่นมีดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แผนผังระบบเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น

4.1.1 ระบบบดและลำเลียงเชื้อเพลิง

เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดถูกบรรจุอยู่ในไซโลเชื้อเพลิงเม็ด (Silo wood pellet) และจะถูกลำเลียงโดยสกรู (Screw conveyor) ไปเข้ายังเครื่องบด (Wood pellet miller) จากนั้นจะกลายเป็นชีวมวลฝุ่น และจะถูกลำเลียงต่อไปยังไซโลเชื้อเพลิงฝุ่น (Silo Pulverized fuel) โดยพัดลม (Fuel spreader fan) เพื่อกักเก็บไว้ก่อนนำไปเป็นเชื้อเพลิงให้หัวเผาชีวมวลฝุ่นนี้ เมื่อต้องการใช้จะมีสกรูอีกชุด (Screw feeder) ลำเลียงชีวมวลฝุ่นมาบริเวณปากทางออกและจะมีพัดลมปฐมภูมิ (Primary air fan) เป่าชีวมวลมาตามท่อเข้าไปยัง Pre-chamber ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ไซโลเก็บเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด และสกรูลำเลียง



รูปที่ 4.3 เครื่องบดชนิด Wood pellet miller



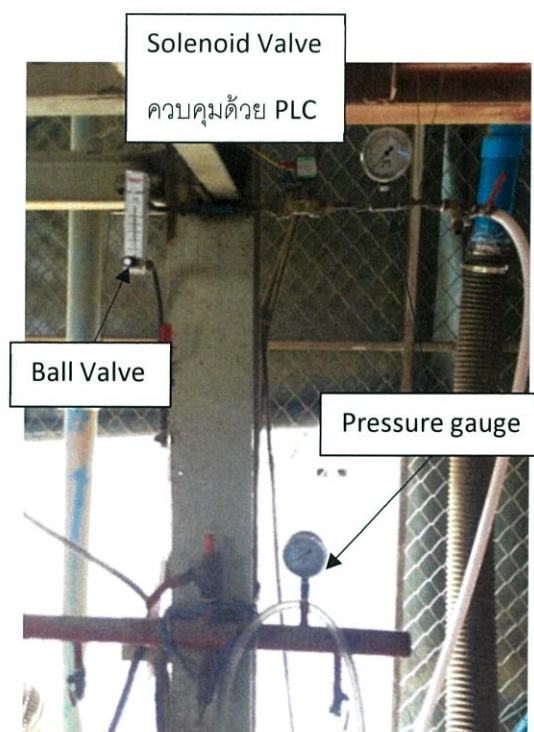
รูปที่ 4.4 โบลเวอร์ลำเลียงเชื้อเพลิง



รูปที่ 4.5 bag house filter ไชโลเก็บเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น สกรูลำเลียง และท่ออากาศปฐมภูมิ

4.1.2 ระบบลำเลียง LPG

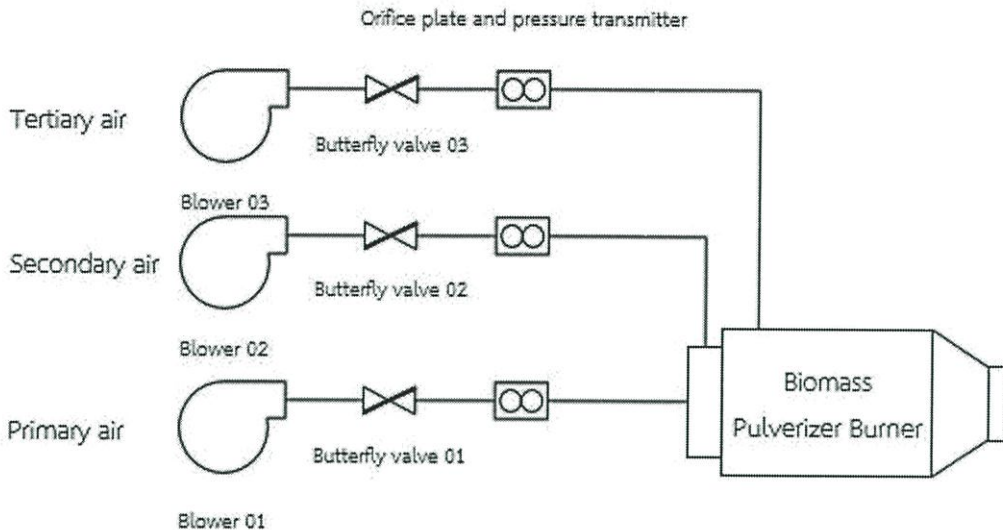
กรณีอุ่นหัวเผาจะมีการใช้ LPG เข้ามาช่วยอุ่น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีระบบลำเลียงแก๊สเพื่อควบคุมการไหลของแก๊ส ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ระบบลำเลียงแก๊ส LPG

4.1.3 ระบบลำเลียงอากาศ

สำหรับระบบลำเลียงอากาศจะแบ่งเป็นสามส่วน ได้แก่ อากาศปฐมภูมิ (Primary air) , อากาศทุติยภูมิ (Secondary air) และ อากาศตติยภูมิ (Tertiary air)



รูปที่ 4.7 แผนผังระบบลำเลียงอากาศทั้งสามส่วน

4.1.3.1 อากาศปฐมภูมิ (Primary Air)

มีหน้าที่ขนส่งเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่นจากไซโลเก็บเชื้อเพลิงสู่ห้องเผาไหม้ช่วย ท่อของอากาศปฐมภูมินั้นท่อช่วงที่ติดตั้งแผ่นออริฟิสมีขนาด 3 นิ้ว โดยแผ่นออริฟิสมีพื้นที่หน้าตัด 0.0021 ตารางเมตร ซึ่ง Differential Pressure Transmitter ที่ใช้ปรับย่านการวัดไว้ที่ 0-10 mbar โดยคำนวณหาค่าอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (Mass Flow Rate) ได้ เมื่อค่า C เป็นค่าคงที่กำหนดให้เท่ากับ 0.7 และค่า A_2 คือพื้นที่หน้าตัดแผ่นออริฟิส โดยค่า ρ เป็นค่าความหนาแน่นของอากาศ กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 1.184 (kg/m³) จากนั้นทำการคูณ 100 เพื่อแปลงหน่วยจากมิลลิบาร์ (mbar) เป็น ปาสกาล (Pa) ซึ่งจะได้

$$\dot{m} = 0.022879\sqrt{\Delta P}$$

เมื่อได้สมการอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศส่วนปฐมภูมิแล้ว จึงนำไปเขียนโปรแกรมใน TIA Portal V13 ซึ่งค่า ΔP นั้นจะได้มาจาก Differential Pressure Transmitter โดยการนำสัญญาณเข้ามาที่เครื่องควบคุม (PLC) มาคำนวณและแปลงค่าเป็นอัตราการไหลเชิงปริมาตรต่อไป

4.1.3.2 อากาศทุติยภูมิ (Secondary Air)

อากาศทุติยภูมิเป็นอากาศหลักในที่ใช้ในการเผาไหม้ โดยท่อช่วงที่ติดตั้งแผ่นออริฟิสมิขนาด 4 นิ้ว ซึ่งแผ่นออริฟิสมิพื้นที่หน้าตัด 0.00368 ตารางเมตร ซึ่ง Differential Pressure Transmitter ปรับย่านการวัดไว้ที่ 0-100 mbar โดยคำนวณหาค่าอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (Mass Flow Rate) ได้ เมื่อค่า C เป็นค่าคงที่ที่กำหนดให้เท่ากับ 0.7 และค่า A_2 คือพื้นที่หน้าตัดแผ่นออริฟิส โดยค่า ρ เป็นค่าความหนาแน่นของอากาศกำหนดให้เท่ากับ 1.184 (kg/m³) จากนั้นทำการคูณ 100 เพื่อแปลงหน่วยจากมิลลิบาร์ (mbar) เป็น ปาสกาล (Pa) ซึ่งจะได้

$$\dot{m} = 0.039694\sqrt{\Delta P}$$

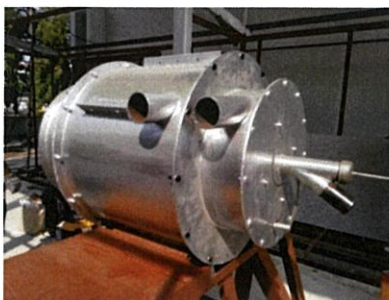
เมื่อได้สมการอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศส่วนทุติยภูมิแล้ว จึงนำไปเขียนโปรแกรมใน TIA Portal V13 ซึ่งค่า ΔP นั้นจะได้มาจาก Differential Pressure Transmitter โดยการนำสัญญาณเข้ามาที่เครื่องควบคุม (PLC) มาคำนวณและแปลงค่าเป็นอัตราการไหลเชิงปริมาตรต่อไป

4.7.1.3 อากาศตติยภูมิ (Tertiary Air)

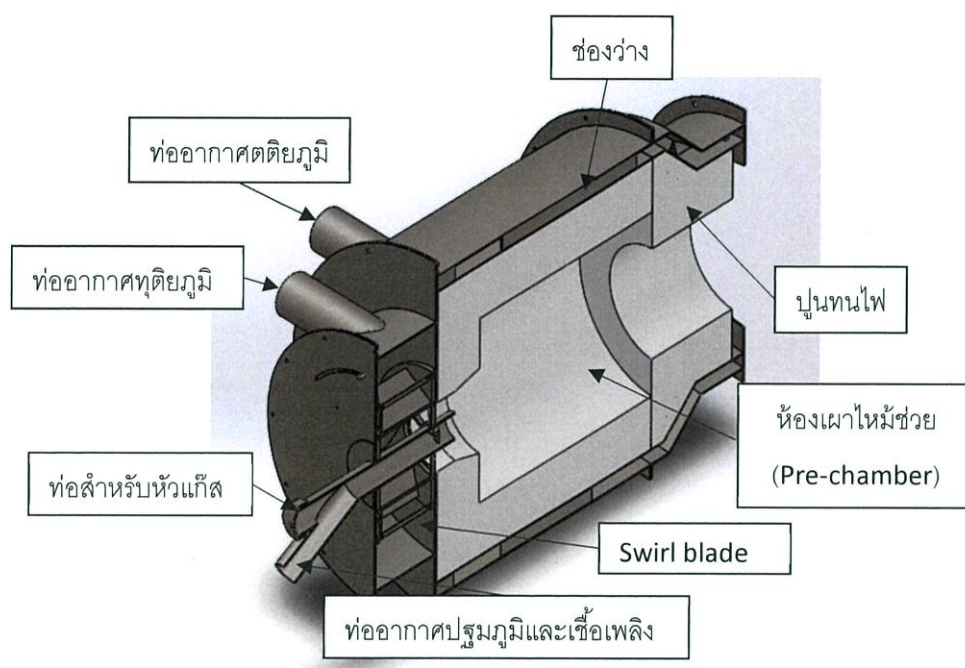
อากาศตติยภูมิมีหน้าที่ในการหล่อเย็นห้องเผาไหม้ช่วย และเป็นอากาศส่วนสุดท้ายที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้ ในส่วนของอากาศตติยภูมินั้นขนาดท่อมีขนาด 3 นิ้ว เช่นเดียวกับกับอากาศปฐมภูมิ เพราะฉะนั้นสมการที่ใช้คำนวณหาอัตราการไหลอากาศเชิงมวลจึงใช้สมการเดียวกับอากาศส่วนปฐมภูมิ Differential Pressure Transmitter แต่ปรับย่านการวัดที่ 0-50 (mbar) โดยการนำสัญญาณเข้ามาที่เครื่องควบคุม (PLC) มาคำนวณและแปลงค่าเป็นอัตราการไหลเชิงปริมาตรต่อไป

4.1.4 ระบบหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น

หัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่นจะประกอบด้วย (1.) ส่วนของท่อทางเข้าของชีวมวลฝุ่น ซึ่งชีวมวลฝุ่นภายในท่อจะถูกเหนี่ยวนำให้ไหลมาโดยอากาศปฐมภูมิ (Primary air) ต่อมาคือ (2.) ส่วนนี้มีไว้สำหรับใช้ในตอนที่ผู้ทดลองทำการอุ่นระบบ ซึ่งก็คือท่อสำหรับใส่หัวแก๊ส LPG นั้นเอง โดยหัวแก๊ส LPG จะถูกเสียบเข้าไปในท่อนี้ในแนวแกนกลาง และมีการติดตั้งหัวเทียนสำหรับจุดแก๊ส LPG ให้ติดไฟก่อนทำการอุ่นระบบสังเกตได้ดังรูปที่ 4.6 (3.) ท่อทางเข้าของอากาศทุติยภูมิ (Secondary air) ซึ่งจะติดอยู่กับ Swirl blade chamber (4.) คือท่อที่ติดอยู่กับผิวภายนอกของหัวเผา และท่อนี้คือท่อทางเข้าของอากาศตติยภูมิ (Tertiary air)



รูปที่ 4.8 หัวเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล



รูปที่ 4.9 ส่วนประกอบของหัวเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล

จากรูป 4.9 ส่วนประกอบภายในหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่นจะประกอบไปด้วย Pre-chamber, Swirl blades, ปูนทนไฟ และช่องว่าง ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

Pre-chamber

การเผาไหม้ของชีวมวลฝุ่นจะเริ่มเกิดขึ้นภายใน Pre-chamber หรือ ห้องเผาไหม้ช่วย ซึ่งประสิทธิภาพการเผาไหม้ภายใน Pre-chamber จะมีผลอย่างมากกับคุณลักษณะการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้หลัก (Furnace) หรือระบบการเผาไหม้รวมทั้งหมด และลักษณะของ Pre-chamber มีส่วนสำคัญ

มากอย่างยากับประสิทธิภาพการเผาไหม้ เพราะอนุภาคเชื้อเพลิงจะมีความปั่นป่วนและมีเวลาที่อยู่ใน Pre-chamber เพิ่มมากขึ้น จะทำให้การเผาไหม้เป็นไปอย่างต่อเนื่องโดยไม่เกิดการเป่าดับ

Swirl blades

Swirl blade คือ ตัวสร้างการหมุนควง หรือที่เรียกว่าใบพัด มีหน้าที่เหนี่ยวนำอากาศทุติยภูมิที่ไหลผ่านเข้าไปใน Pre-chamber ให้เกิดการหมุนควง ผลก็คือการเกิดกระแสอากาศหมุนวนขึ้นภายใน Pre-chamber ทั้งแบบ กระแสหมุนวนภายใน (Internal recirculation zone; IRZ) และกระแสหมุนวนภายนอก (External recirculation zone; ERZ) ปรากฏการณ์นี้จะช่วยให้เกิดการผสมกันระหว่างอากาศและชีวมวลฝุ่นใหม่ดีขึ้น ซึ่งมีอิทธิพลอย่างมากกับประสิทธิภาพของการเผาไหม้ของระบบ ดังนั้นมุมใบพัดจึงเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญเนื่องจากมีผลโดยตรงกับกระแสอากาศหมุนวนใน Pre-chamber



รูปที่ 4.10 ตัวสร้างการหมุนควงตามแนวรัศมี

ปูนทนไฟ

ปูนทนไฟในหัวเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่นนี้มีบทบาทเป็นผนังของ Pre-chamber ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นผนังดักความร้อนไม่ให้ออกมาสู่ผิวของหัวเผา และมีประโยชน์ที่สำคัญอีกประการหนึ่งก็คือ แผ่รังสีความร้อนให้กับกระบวนการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นภายใน Pre-chamber ซึ่งสามารถช่วยให้ปฏิกิริยาการเผาไหม้เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและมีเสถียรภาพ



รูปที่ 4.11 ผนังปูนทนไฟภายในหัวเผา

ช่องว่าง

ช่องว่าง (Layer) นี้อยู่ระหว่างปูนทนไฟกับผิวภายนอกของหัวเผา ซึ่งมิใช่สำหรับให้อากาศติดย ภูมิไหลผ่านและไหลของไปใน Furnace ณ บริเวณ คอคอดระหว่าง Pre-chamber กับ Furnace เพื่อ หล่อเย็นให้ผนังภายนอกของหัวเผาไม่ร้อนเกินไป



รูปที่ 4.12 ช่องว่างระหว่างปูนทนไฟกับผิวภายนอกของหัวเผา

ถัดจากส่วนประกอบของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวล จะเป็นระบบผลิตความร้อนและใช้ในการทดลอง

ห้องเผาไหม้หลัก

ห้องเผาไหม้หลัก (Furnace) เป็นส่วนประกอบที่อยู่ถัดมาจากหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น ซึ่งผนังของห้องเผาไหม้หลักจะถูกฉาบด้วยปูนทนไฟหนาเช่นเดียวกับผนังของ Pre-chamber ปฏิกริยาการเผาไหม้จะสิ้นสุดลงภายในห้องเผาไหม้หลักนี้ เนื่องจากภายในห้องเผาไหม้หลักส่วนใหญ่เป็นการเผาไหม้ของอนุภาคคาร์และขนาดของรศมีที่กว้างของการเผาไหม้ ในห้องเผาไหม้หลักจึงมีซีเถ้าหนัก (Bottom ash) จำนวนมาก ดังนั้นจึงมีการติดตั้งระบบขนถ่ายที่จะลำเลียงซีเถ้าหนักออกจากห้องเผาไหม้



รูปที่ 4.13 ห้องเผาไหม้หลัก

เครื่องบำบัดไอเสียแบบเปียก

เครื่องบำบัดไอเสียแบบเปียก (Wet scrubber) จะติดตั้งหัวฉีดไว้ข้างบนเพื่อพ่นน้ำที่ถูกลำเลียงมาตามท่อโดยปั๊ม เพื่อลดอุณหภูมิของไอเสียและดักซีเถ้าลอย (Fly ash) ไม่ให้ออกสู่บรรยากาศ

พัดลมดูดไอเสียและบ่อดกตะกอน

พัดลมดูดไอเสีย (ID Fan) จะมีหน้าที่ดูดเอาไอเสียออกสู่บรรยากาศเพื่อให้มีการระบายไอเสียตลอดเวลาและระบบจะทำงานได้อย่างต่อเนื่อง ส่วนบ่อดกตะกอนจะทำหน้าที่พักน้ำที่มาจากถังบำบัดไอเสียเพื่อให้อนุภาคที่มากับน้ำเกิดการตกตะกอนและจะมีปั๊มดูดเอาน้ำใสจากการตกตะกอนนี้้นำกลับไปใช้ในถังบำบัดไอเสียอีกครั้ง (Water treatment recirculation)



รูปที่ 4.14 เครื่องบำบัดไอเสียแบบเปียก



รูปที่ 4.15 พัดลมดูดอากาศและบ่อตกตะกอน

4.2 การทดสอบสมรรถนะของระบบ

จากบทที่ 1 และ 2 ระบบเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลชนิดฝุ่นนี้ถูกออกแบบมาให้สามารถรองรับกำลังความร้อนได้ที่ 1 MW แต่ ณ ปัจจุบันสามารถใช้งานได้ที่กำลังความร้อนสูงสุดเพียง 300 kW เท่านั้น จึงจำเป็นต้องทำการทดสอบระบบเพื่อหาข้อจำกัดต่างๆ และปรับปรุงแก้ไขให้สามารถใช้งานได้ที่กำลังความร้อนที่สูงขึ้น โดยได้ทำการทดสอบร่วมกับ ชนน สุสังกรกาญจน์ และคณะ [7] ที่ทำปริญญานิพนธ์เกี่ยวกับระบบลำเลียงเชื้อเพลิง และ พงศธร ณ นคร และคณะ [8] ที่ทำปริญญานิพนธ์เกี่ยวกับระบบ

บำบัด โดยในปริญญานิพนธ์เล่มนี้ จะมุ่งไปถึงการทดสอบสมรรถนะของระบบลำเลียงอากาศหุติยภูมิเป็นหลัก

4.2.1 การคำนวณอัตราการไหลของเชื้อเพลิงและอากาศ

ก่อนการทดลอง เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดซึ่งทำมาจากไม้ยางพาราจะถูกนำมาบดให้เป็นฝุ่น โดยมีองค์ประกอบธาตุดังนี้

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบธาตุของชีวมวลไม้ยางพาราฝุ่น วิเคราะห์โดย TISTR

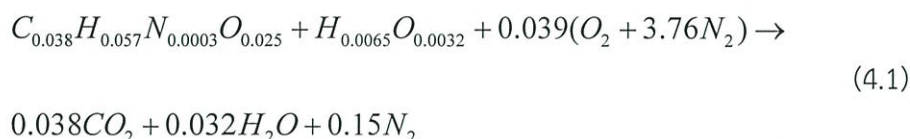
คุณสมบัติ	สภาพนำส่ง	สภาพน้ำหนักแห้ง
ความชื้น, %	5.81	-
สารระเหย, %	76.68	81.41
ถ่านคงตัว, %	15.23	16.16
เถ้า, %	2.28	2.43
ไฮโดรเจน, %	6.31	6.01
คาร์บอน, %	45.45	48.22
ไนโตรเจน, %	0.45	0.48
ออกซิเจน, %	45.54	42.86
ซัลเฟอร์, %	0.00	0.00
ค่าความร้อนสูง, กิโลจูล/กก.	17500	18589
ค่าความร้อนต่ำ, กิโลจูล/กก.	16161	17165

สามารถคำนวณหาอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิง (\dot{m}_{fuel}) เทียบเท่ากับกำลังความร้อนได้จากสมการ

$$\dot{m}_f = \frac{\dot{Q}}{Q_{LHV}} \quad \text{kg/s} \quad (4.1)$$

$$\dot{m}_f = \frac{\dot{Q}}{Q_{LHV}} = \frac{1000}{16161} = 0.061877 \quad \text{kg/s}$$

การหาอัตราการใช้ของอากาศ ต้องทำการดุลสมการสโตยซิโอเมตรีของการเผาไหม้ เมื่อทราบองค์ประกอบของธาตุในเชื้อเพลิงจากการวิเคราะห์แบบแยกธาตุดัง ตารางที่ 5.1 แล้ว จากสมการที่ (3.1) สโตยซิโอเมตรีของการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่นคือ



ทำการคำนวณหาอัตราส่วนอากาศกับเชื้อเพลิงตามทฤษฎี (Stoichiometric A/F ratio) จากสมการที่ (3.3) จะได้ Stoichiometric A/F ratio = 5.406

งานวิจัยของชินภัทร ชูการ และนเรศเรษฐ์ พิกุลเงิน ซึ่งใช้เชื้อเพลิงชนิดเดียวกัน พบว่าที่อากาศส่วนเกิน 15 % โดยมีอัตราส่วนอากาศสามส่วนคือ Primary Secondary และ Tertiary เป็น 25 : 65 : 10 มุมองศาของตัวสร้างการหมุนควงแบบรัศมีเป็น 100 องศา การเผาไหม้จะสามารถดำเนินไปได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่เกิดการเป่าดับ ดังนั้น การจำลองเชิงตัวเลข และการทดลองในปฏิกิริยานิพนธ์นี้ จะใช้อากาศส่วนเกินที่ 15 % และอัตราส่วนอากาศทั้งสามเป็น 20 : 65 : 10 เช่นเดียวกัน จากนั้นทำการคำนวณหาสภาวะอากาศในสภาวะการเผาไหม้จริง

ตารางที่ 4.2 ผลการหาสภาวะอากาศในสภาวะการเผาไหม้จริง

Excess air	15 %
Stoichiometric A/F ratio	5.406/1
Actual A/F ratio	6.217/1
Equivalent ration	0.869

และทำการนำข้อมูลที่มีมาใช้ในการคำนวณหาสภาวะต่างๆที่ใช้ในการเผาไหม้ ที่กำลังความร้อนเป้าหมาย 1 MW ได้ตามตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 สภาวะต่างๆที่ใช้ในการเผาไหม้ที่กำลังความร้อนเป้าหมาย 1 MW

(1.) ค่าความร้อนต่ำ, kJ/kg	จากตาราง 4.1	16161
(2.) ค่าความร้อนที่ต้องการ, kW	ค่าเป้าหมาย	1000
(3.) อัตราการป้อนเชื้อเพลิง, kg/s	จากสมการ 4.1	0.0618
(4.) อัตราการป้อนอากาศรวม, kg/s	Actual A-F ratio x (3.)	0.384
(6.) อัตราการป้อนอากาศปฐมภูมิ, kg/s	(5.) x 0.25	0.0961
(7.) อัตราการป้อนอากาศทุติยภูมิ, kg/s	(5.) x 0.65	25×10^{-3}
(8.) อัตราการป้อนอากาศตติยภูมิ, kg/s	(5.) x 0.10	0.0384

ในการหาความเร็วของอากาศนั้น กำหนดให้ความหนาแน่นของอากาศมีค่าคงที่เท่ากับ 1.1389 kg/m^3 และจาก ค่า $Ma < 0.3$ จะเป็นการไหลประเภท Incompressible flow ที่อุณหภูมิ 30°C จากสมการ

$$c = \sqrt{KRT}$$

โดยที่ $K = 1.4$, $R = 0.287$ ได้ค่า c เป็น 348.92 m/s และจากสมการ

$$v = Ma \times c$$

$$v = 0.3 \times 348.92 = 104.676 \text{ m/s}$$

ดังนั้นจึงถ้าความเร็วที่ต่ำกว่า 104.676 m/s จึงสามารถสรุปได้ว่าเป็นการไหลของอากาศแบบ incompressible flow ซึ่งก็คือของไหลอัดตัวไม่ได้ จึงสามารถกำหนดได้ว่าความหนาแน่นของอากาศมีค่าคงที่ตลอดการไหลที่ 1.1389 kg/m^3 จากนั้นทำการคำนวณหาความเร็วของอากาศทุติยภูมิ (Secondary air)

$$\dot{m}_{\text{secondary air}} = \rho \times A \times v$$

$$v = \frac{\dot{m}_{\text{secondary air}}}{\rho \times A}$$

$$v = \frac{0.25}{1.1389 \times \frac{\pi}{4} \times (0.114 - 0.0162)^2}$$

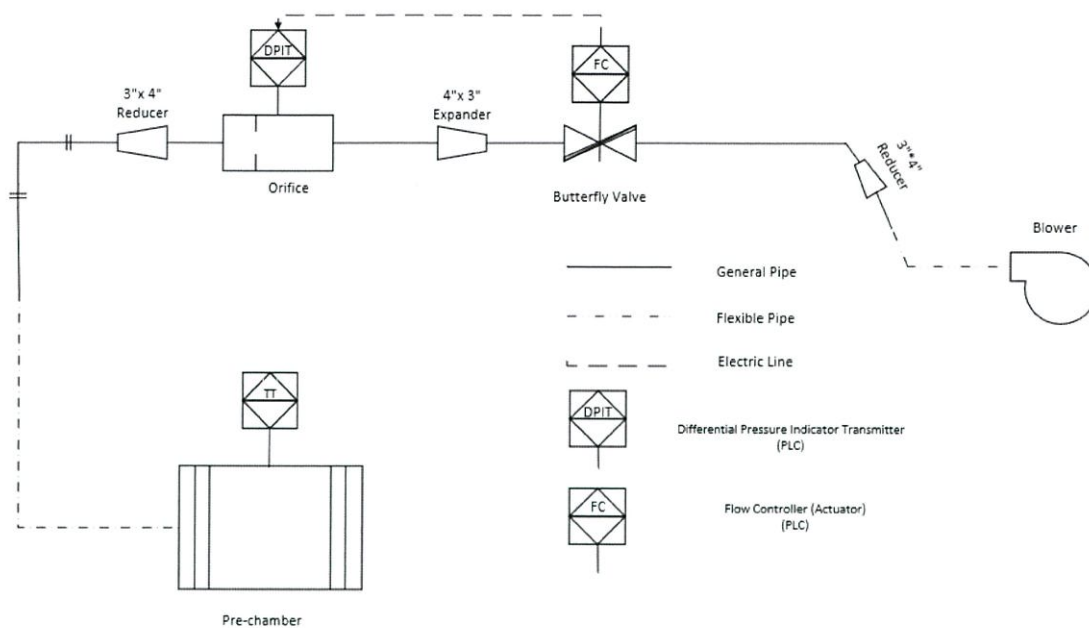
$$v = 29.22 \text{ m/s}$$

ดังนั้นความเร็วที่ใช้ในการในอากาศทุติยภูมิ (Secondary Air) ณ กำลังความร้อน 1 MW ควรจะมีความเร็วขั้นต่ำ 29.22 m / s หากคิดอยู่ในรูปของอัตราการไหลเชิงปริมาตร (Volumetric Flow Rate) จะมีเท่ากับ 0.22 m³ / s

4.2.2 การตรวจสอบสมรรถนะการป้อนอากาศทุติยภูมิ และการปรับปรุง

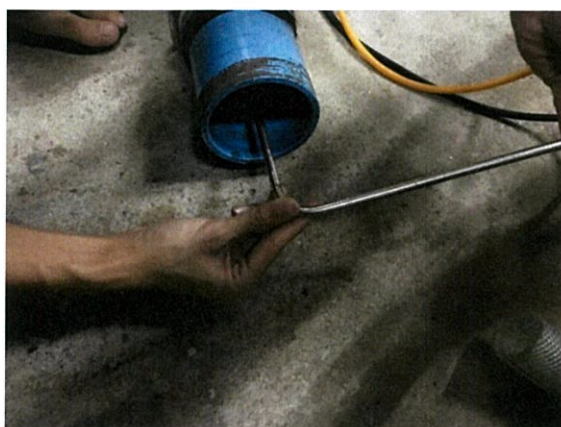
ความเร็วที่วัดได้จากเครื่องวัดความเร็วชนิด Static-pitot Tube โดยวัดที่ตำแหน่งปลายท่อของท่ออากาศทุติยภูมิ (Secondary Air)

จากการคำนวณค่า Hydrodynamic Entrance Length (L_h) ซึ่งเป็นความยาวของโปรไฟล์ความเร็วเริ่มที่จะเป็นสภาวะ Hydrodynamically Fully Developed region จากรูปที่ 4.16 ความยาวของท่อปลายซึ่งเป็นท่อประเภท Flexible Type บริเวณก่อนเข้า Pre-Chamber ซึ่งมียาวท่อเท่ากับ 380 cm = 3.8 m ดังนั้นความยาวท่อจึงมีค่าความยาว Hydrodynamic Entrance Length จึงสรุปได้ว่าอากาศบริเวณ ณ ตำแหน่งที่วัดเป็น Fully Developed Region เรียบร้อยแล้ว



รูปที่ 4.16 แผนภาพ P&ID ของทางเดินท่อลมทุติยภูมิ (Secondary Air)

ความเร็วลมจากการอ่านค่าของเครื่องมือวัดจาก Pitot-Static Tube ณ ตำแหน่งปลาย Flexible Pipe ดังรูปที่ 4.17 โดยทำการวัดความเร็วที่บริเวณกึ่งกลางของท่อ เนื่องจากเป็นบริเวณที่ไม่ได้รับผลกระทบของแรงเสียดทานที่ผนังท่อ ได้ผลของความเร็วลมเท่ากับ 25 m/s คิดเป็นอัตราการไหลเชิงปริมาตร (Volumetric Flow Rate) ที่มีค่าเท่ากับ $0.187 \text{ m}^3 / \text{s}$ ซึ่งไม่พอกับอัตราการไหลที่ต้องการ มีค่าเท่ากับ $0.22 \text{ m}^3 / \text{s}$ แต่จากการวัดความเร็วลมที่บริเวณปลายปากของ Blower ของลมดังรูปที่ 4.18 ได้ค่าของความเร็วเท่ากับ 50 m/s คิดเป็นอัตราการไหลเชิงปริมาตรเป็น $0.376 \text{ m}^3 / \text{s}$



รูปที่ 4.17 การวัดความเร็วลมที่ปลายท่อ Flexible



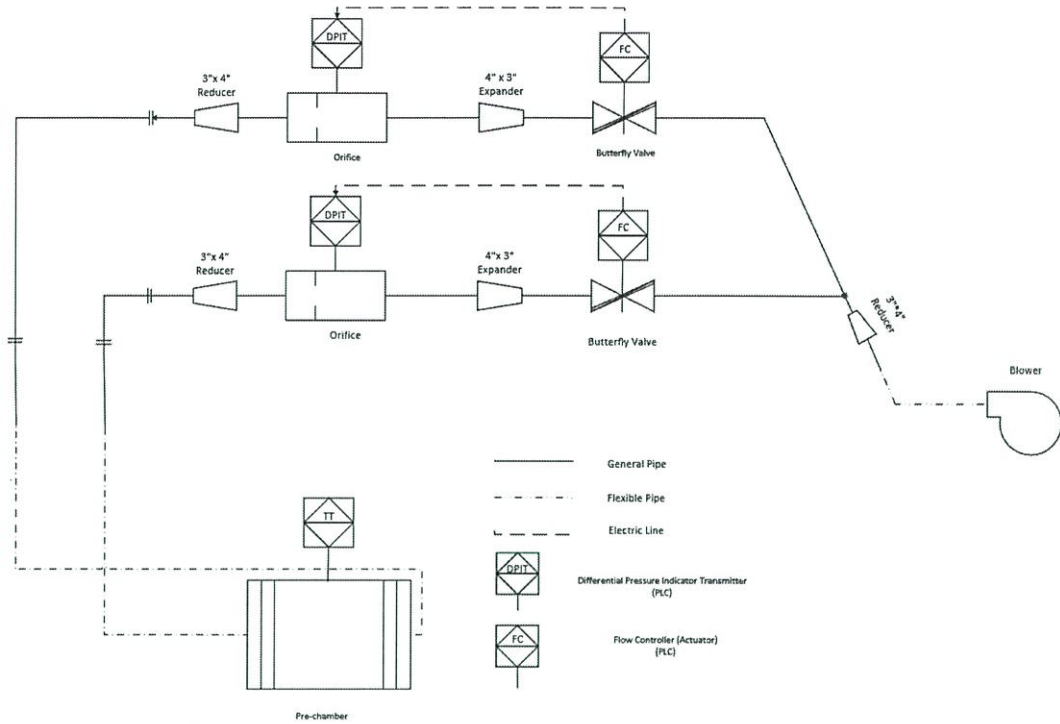
รูปที่ 4.18 การวัดความเร็วและความดันลมที่ปลายท่อของ Blower

จากการวัดความเร็วทำให้พบว่าอัตราการไหลที่ส่งจาก Blower นั้น เพียงพอต่อการขนส่งไปเพื่อการเผาไหม้ที่กำลังความร้อน (Thermal Throughput) ที่ 1 MW แต่สาเหตุที่ทำให้อัตราการไหลไม่เพียงพอ มีสาเหตุจากการสูญเสียภายในท่อที่ค่อนข้างมากเนื่องจากความเร็วในท่อที่สูงขึ้น เพราะว่าการสูญเสียหลักและการสูญเสียรอง (Major Losses & Minor Losses) เป็นความสัมพันธ์กับความเร็วยกกำลังสองดังสมการที่ คือ

$$h_{L_{major}} = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g}$$

$$h_{L_{minor}} = K_L \frac{v^2}{2g}$$

ดังนั้นจึงได้การออกแบบเพื่อลดความเร็วภายในท่อโดยที่ความดันสูญเสียมีค่าเท่าเดิมโดยใช้การออกแบบการต่อท่อนาน (Parallel Pipe System) ซึ่งการต่อท่อนานจะเป็นการทำให้อัตราการไหลเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนเท่าของท่อที่ต่อขนานและค่าเฮดการสูญเสีย (Head Losses) ยังมีค่าคงที่อีกด้วย โดยคำนวณอัตราการไหลของท่อจากการใช้ Blower ตัวเดิม (อัตราไหลเชิงปริมาตรฝั่งขาเข้าและความดันฝั่งขาเข้ามีค่าเท่าเดิม)



รูปที่ 4.19 แผนภาพ P&ID ของทางเดินท่อลมทุติยภูมิหลังการปรับปรุง

โดยการต่อขนานจะเป็นการที่ทำให้อัตราการไหลลดลงครึ่งหนึ่งต่อการไหลภายในท่อเดิม ดังนั้นอัตราการไหลเชิงปริมาตรที่ต้องการจึงเหลือเพียง $0.11 \text{ m}^3 / \text{s}$ ทำให้ความเร็วของการไหลภายในท่อมีความเร็วขั้นต่ำเท่ากับ $14.64 \text{ m} / \text{s}$ จากความสัมพันธ์ $h_L \propto CQ^2$ โดยที่ Q จะลดลงเป็น 2 เท่า

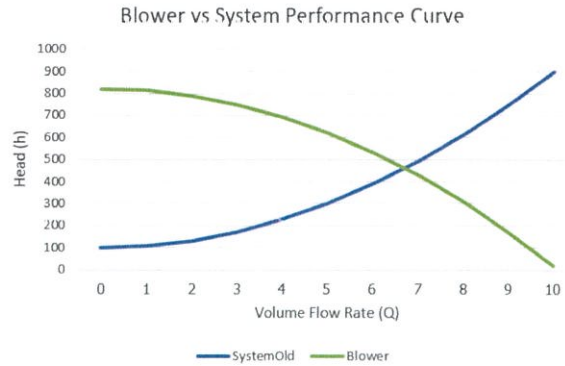
$$h_{L_{new}} \propto CQ_{new}^2$$

$$h_{L_{new}} \propto C \left(\frac{Q_{old}}{2} \right)^2$$

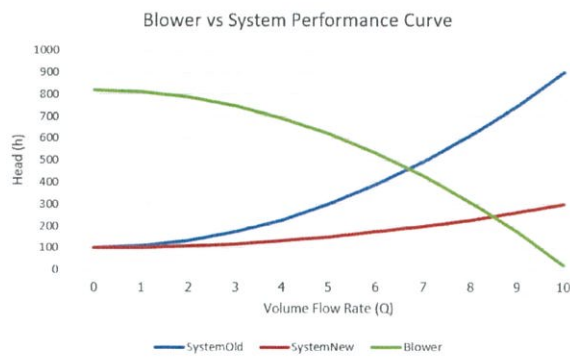
$$h_{L_{new}} \propto C \frac{Q_{old}^2}{4}$$

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า การต่อขนานจะทำให้เฮดสูญเสียรวมของระบบมีค่าลดลง 4 เท่า จากรูปที่ 4.20 ซึ่งเป็นการประมาณกราฟอย่างง่ายของความสัมพันธ์ระหว่างกราฟสมรรถภาพของ Blower (Blower Performance Curve) กับกราฟสมรรถภาพของระบบ (System Performance Curve) โดยใช้ฟังก์ชันของ Blower Performance Curve เป็นฟังก์ชัน $h_{blower} = C_1 - C_2 Q_{blower}^2$ ซึ่งเป็นฟังก์ชัน Performance curve ของ Centrifugal Blower และฟังก์ชัน System Performance Curve ของระบบเก่าเป็น $h_{Sys_{old}} = C_3 - C_0 Q_{blower}^2$ ส่วนกราฟ System Performance Curve ของระบบใหม่จะใช้

ความสัมพันธ์เป็น $h_{\text{Sys}_{old}} = C_3 - \frac{C_0}{4} Q_{\text{blower}}^2$ ซึ่งถูกแสดงอยู่ในรูปที่ 4.21 จากกราฟสามารถบอกได้ว่าที่ Head Loss คงที่ ระบบใหม่ที่ทำกาต่อขนานจะได้ค่าอัตราการไหลที่มีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 4.20 กราฟของสมรรถนะของ Blower และ System ก่อนการปรับปรุง



รูปที่ 4.21 กราฟของสมรรถนะของ Blower และ System หลังการปรับปรุง

จากสมการความสัมพันธ์ของความดันสูญเสีย (Pressure Loss)

$$\Delta P = \rho g \left(f \frac{L}{D} + K_L \right) \frac{v^2}{2g}$$

$$\Delta P = \rho (C_p) \frac{v^2}{2}$$

$$C_p = \frac{\Delta P}{\frac{\rho v^2}{2}}$$

เรียกการรวมพจน์ระหว่างสัมประสิทธิ์การสูญเสียหลักและการสูญเสียรอง (Major & Minor Losses Coefficient) ว่า Pressure Losses Coefficient ซึ่งเป็นอัตราส่วนความสัมพัทธ์แบบ Dimensionless ของ Static Pressure กับ Dynamic Pressure โดยจะคำนวณการออกแบบให้ Pressure Losses Coefficient ก่อนและหลังการออกแบบมีค่าเท่าเดิมเพื่อที่จะไม่ทำให้ระบบใหม่มีค่าการสูญเสียเพิ่มขึ้น

$$C_{P_{old}} = \frac{\Delta P}{\frac{\rho v^2}{2}} = \frac{650}{\frac{1.139 \times 25.108^2}{2}} = 1.8106$$

โดยค่า ΔP คือค่าความดันตกคร่อมระหว่างที่วัดได้จากปลาย Blower เทียบกับความดันปลายท่อโดยการวัดดังรูปที่ 4.18 ส่วนความเร็วที่ใช้ได้จากการวัดความเร็วจาก Orifice ในระบบ PLC เพื่อการตรวจสอบความดันส่ง (Supply Pressure) ของ Blower หลังการออกแบบระบบใหม่แล้วโดยใช้ความสัมพัทธ์ของ Pressure Losses Coefficient เท่าเดิม (การสูญเสียภายในระบบมีค่าเท่าเดิม ณ ตำแหน่งเดิม)

$$C_{P_{old}} = C_{P_{new}} = 1.8106 = \frac{\Delta P}{\frac{1.139 \times 14^2}{2}}$$

$$\Delta P = 218.2924 \text{ Pa}$$

ดังนั้น Supply Pressure ที่ใช้มีค่าน้อยกว่า 650 Pa ดังนั้น Blower ที่ใช้จึงมีค่าเพียงพอต่อการลำเลียงอากาศแล้ว

4.3 การออกแบบตัวสร้างการหมุนควงแนวรัศมีแบบแผ่นโค้ง

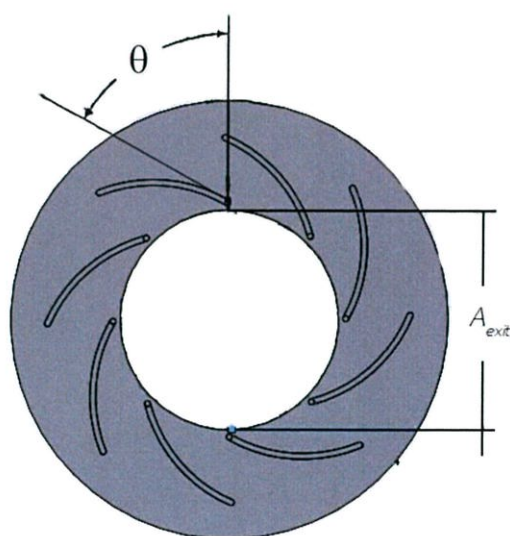
วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการศึกษเปรียบเทียบตัวสร้างการหมุนควงแนวรัศมีระหว่างแบบแผ่นเรียบและแบบแผ่นโค้ง โดยแบบแผ่นเรียบนั้น ชินภัทร ชูการได้ศึกษาและสรุปไว้แล้วว่าที่มุมไบบิต 100 องศาจะให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด ส่วนแบบแผ่นโค้งนั้น ผู้วิจัยจะใช้สมการจากหัวข้อที่ 3.4.2 มาเป็นแนวทางในการออกแบบตัวสร้างการหมุนควงแนวรัศมีแบบใหม่นี้

จากสมการ 3.26 ถึง 3.28 ตัวแปรที่จะต้องเลือกตั้งค่าตามการออกแบบมี 3 อย่างคือ ตัวเลขการหมุนควง (Swirl Number, S), มุมของใบพัด (Swirl Angle, θ) และ ความดันสูญเสียระหว่างก่อนและหลัง Swirler (Pressure drop, ΔP) โดยเป้าหมายคือ หามุมของใบพัดที่จะทำให้ตัวสร้างการหมุนควงแนวรัศมีแบบแผ่นโค้งนี้สร้างตัวเลขการหมุนควงได้มากกว่า 1 และมี Pressure drop ต่ำที่สุด

ตารางที่ 4.4 ตัวแปรต้นที่ใช้ในการคำนวณตัวเลขการหมุนควง ที่กำลังความร้อน 300 kW

ตัวแปร	ค่าของตัวแปร
A_{exit} (m^2)	0.013236
\dot{m} (kg/s)	0.25
ρ (kg/m^3)	1.14

จากการ Trial & Error สมการที่ 3.26 ถึง 3.28 เลือกมุมของใบพัดที่เหมาะสมตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ได้แก่ 40, 62 และ 84 องศา โดยจากการคำนวณ ทั้งสามมุมสามารถสร้างตัวเลขการหมุนควงได้จนถึง 2 และมี pressure drop น้อยกว่า 30 Pa แต่ด้วยข้อจำกัดทางด้านการผลิตชิ้นส่วน มุมของใบพัดที่ขึ้นงานทำได้มีความคลาดเคลื่อนจากการคำนวณได้เป็น 46, 62 และ 80 องศา ซึ่งยังได้ค่า pressure drop ต่ำอยู่



รูปที่ 4.22 ตำแหน่งของตัวแปรในตัวสร้างการหมุนควง

บทที่ 5

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

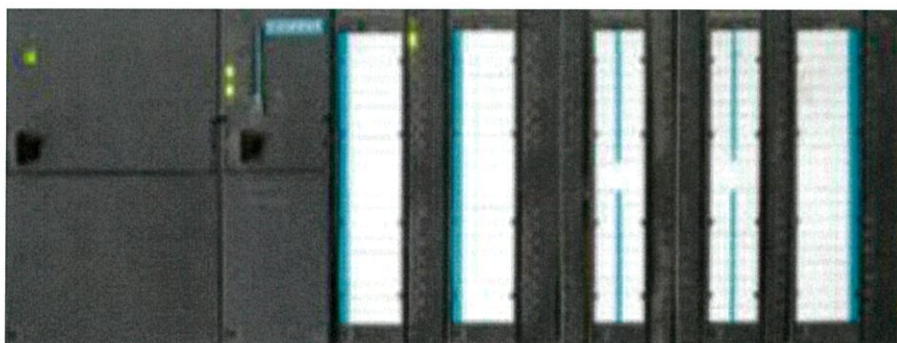
5.1 อุปกรณ์การทดลองและรายละเอียด

5.1.1 อุปกรณ์การทดลองเชิงโครงสร้าง

อุปกรณ์การทดลองเชิงโครงสร้างนั้นประกอบไปด้วย หัวเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลชนิดฝุ่น ห้องเผาไหม้ช่วย ตัวสร้างการหมุนควง วัตถุขวางการไหล ห้องเผาไหม้หลัก ถังบำบัดไอเสีย พัดลมดูดไอเสีย บ่อตกตะกอน ระบบลำเลียงเชื้อเพลิง ระบบลำเลียงอากาศ และระบบแก๊ส LPG ซึ่งรายละเอียดในแต่ละส่วนนั้นได้ระบุไว้ในบทที่ 4

5.1.2 อุปกรณ์การทดลองเชิงการวัดและควบคุม

ระบบเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลนี้ มีการควบคุมการทำงานด้วยเครื่องควบคุมเชิงตรรกะที่สามารถโปรแกรมได้ (Programable Logic Controller, PLC)



รูปที่ 5.1 เครื่องควบคุมเชิงตรรกะที่สามารถโปรแกรมได้ (PLC)

ตารางที่ 5.1 รายละเอียดชุดควบคุม (PLC)

ช่องที่ 1	ชนิด	รุ่น	ตำแหน่ง I	ตำแหน่ง Q
1	PS 307 10A	6ES7 307-1KA02-0AA0	-	-
2	CPU 315-2 PN/DP MP/DP interface PROFINET interface	6ES7 315-2EH14-0AB0	- 2047* 2046*	-
3	DI 16x24VDC	6ES7 321-1BH02-0AA0	0...1	-
4	DO 16x24VDC/0.5A	6ES7 322-1BH01-0AA0	4...5	-
5	AI 8x13BIT	6ES7 331-1KF02-0AB0	288...303	-
6	AI 8x13BIT	6ES7 331-1KF02-0AB0	304...319	-
7	AO 4x12BIT	6ES7 332-5HD01-0AB0	-	320...327

ตารางที่ 6.5 แสดงถึงรายละเอียดชนิดของโมดูลซึ่งประกอบไปด้วยหน่วยจ่ายไฟขนาด 10A หน่วยประมวลผล หน่วยรับสัญญาณดิจิทัลจำนวน 16 ช่อง หน่วยส่งสัญญาณดิจิทัล 16 ช่อง หน่วยรับสัญญาณอนาล็อก 8 ช่องจำนวน 2 ตัว หน่วยส่งสัญญาณอนาล็อก 4 ช่อง รวมไปถึงแสดงถึงตำแหน่ง การเข้าถึงข้อมูลของการรับ (I) และการส่งข้อมูล (Q)

จากรูปที่ 4.7 จะแสดงการควบคุมอากาศทั้งสามส่วนประกอบด้วยอุปกรณ์เหล่านี้คือ พัดลม (blower) 3 เครื่องสำหรับอากาศทั้ง 3 ส่วน วาล์วปีกผีเสื้อ (butterfly valve) orifice plate และ pressure transmitter ซึ่งวาล์วปีกผีเสื้อจะถูกควบคุม PLC ด้วยวิธีการควบคุมแบบพีไอดีซึ่งจะ มีความสัมพันธ์กับค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศที่วัดได้จาก pressure transmitter



รูปที่ 5.2 วาล์วควบคุมการไหลชนิดปีกผีเสื้อ (Butterfly control valve)

วาล์วปีกผีเสื้อมีหน้าที่ควบคุมอัตราการไหลของอากาศ primary air secondary air และ tertiary air ที่จะเข้าอยู่ห้องเผาไหม้โดยมีมอเตอร์ไฟฟ้าเป็นตัวขับเคลื่อน วาล์ว ซึ่งมีรายละเอียดดังตารางที่ 5.8

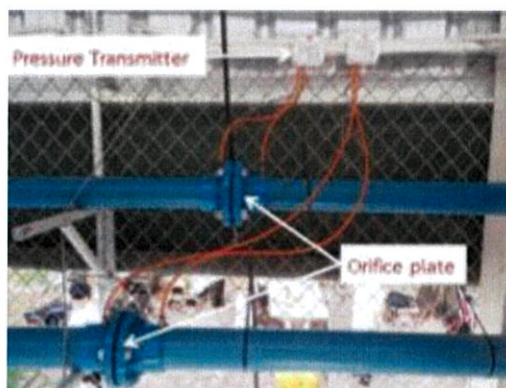
ตารางที่ 5.2 ข้อมูลจำเพาะของวาล์วปีกผีเสื้อ (butterfly valve) สำหรับอากาศทั้งสามส่วน

ข้อมูลจำเพาะ	อากาศ		
	Primary	Secondary	Tertiary
ยี่ห้อ/รุ่น	Heli HL-05	Heli HL-05	Heli HL-05
ขนาดวาล์ว	3 นิ้ว	4 นิ้ว	3 นิ้ว
กำลังไฟฟ้า	220 โวลต์	220 โวลต์	220 โวลต์
ทอร์คมอเตอร์	10 นิวตัน-เมตร	10 นิวตัน-เมตร	10 นิวตัน-เมตร
องศาการหมุน	0 – 90°	0 – 90°	0 – 90°
รูปแบบการส่งสัญญาณ	4-20 มิลลิแอมป์	4-20 มิลลิแอมป์	4-20 มิลลิแอมป์
รูปแบบการรับสัญญาณ	4-20 มิลลิแอมป์	4-20 มิลลิแอมป์	4-20 มิลลิแอมป์



รูปที่ 5.3 Differential pressure transmitter ของอากาศสำหรับการเผาไหม้

จากรูปที่ 5.6 เครื่องมือวัดชนิดนี้ทำงานโดยอาศัยหลักความแตกต่างของความดัน โดยทำการวัดความดันสองจุดที่อยู่ระหว่าง orifice plate มีลักษณะการติดตั้งดังรูปที่ 5.6 จากนั้นอุปกรณ์ จะทำการส่งสัญญาณที่วัดได้ไปยังเครื่องควบคุมซึ่งสามารถนำมาคำนวณเพื่อหาค่าอัตราการไหลเชิง ปริมาตรของอากาศต่อไปได้ ข้อมูลจำเพาะและย่านการใช้งานแสดงได้ดังตารางที่ 5.9



รูปที่ 5.4 ลักษณะการติดตั้ง Orifice plate และ Differential Pressure Transmitter

ตารางที่ 5.3 ข้อมูลจำเพาะของ Differential pressure transmitter ของอากาศทั้งสามส่วน

ข้อมูลจำเพาะ	อากาศ		
	Primary	Secondary	Tertiary
ยี่ห้อ/รุ่น	KIMO CP112-PN	KIMO CP113-PN	KIMO CP113-PN
กำลังไฟฟ้าที่ต้องการ	24 VDC	24 VDC	24 VDC
การตอบสนอง	1/e(63%)0.3s	1/e(63%)0.3s	1/e(63%)0.3s
ความแม่นยำ	± 1.5 % of reading ± 3 Pa	± 1.5 % of reading ± 3 Pa	± 1.5 % of reading ± 3 Pa
ย่านการใช้งาน	0.10 mbar	0-100 mbar	0-50 mbar
รูปแบบการส่งสัญญาณ	4-20 มิลลิแอมป์	4-20 มิลลิแอมป์	4-20 มิลลิแอมป์



รูปที่ 5.5 ลักษณะของ Orifice plate ที่ใช้วัดอัตราการไหลร่วมกับ Differential Pressure Transmitter

สำหรับชุดทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลชนิดผงนั้น มีการใช้มอเตอร์สำหรับพัดลม (Blower) เครื่องบดชนิด Hammer mill และสกรู เนื่องจากมอเตอร์ที่ใช้ขับพัดลมอากาศ ทุติยภูมิและเครื่องบดมีขนาดใหญ่ จึงมีการใช้ตู้ควบคุมมอเตอร์แบบซอฟสตาร์ท (Star-Delta) เพื่อทำการควบคุม การปิด-เปิดของมอเตอร์ ส่วนมอเตอร์ที่ใช้ขับพัดลมอากาศปฐมภูมิ ตติยภูมิและพัดลมที่ใช้ขนถ่ายเชื้อเพลิงผงจากเครื่องบดสู่ถังเก็บมีขนาดเล็กจึงใช้ชุดควบคุมมอเตอร์แบบ Direct On Line ดัง แสดงในรูปที่ 5.8



ก)

ข)

รูปที่ 5.6 ก) ตู้สตาร์ทมอเตอร์สำหรับอากาศส่วนที่หนึ่ง อากาศส่วนที่สาม และโบวเวอร์ลำเลียงเชื้อเพลิงชนิดผงเข้าไปเก็บในถังเก็บเชื้อเพลิง ข) ตู้สตาร์ทมอเตอร์สำหรับอากาศส่วนที่สอง

มอเตอร์ที่ใช้ในการทดลองบางส่วนมีการควบคุมความเร็วรอบซึ่งประกอบด้วย สกรูขนถ่ายเชื้อเพลิงอัดเม็ด สกรูขนถ่ายเชื้อเพลิงผง และพัดลมดูดแก๊สไอเสีย ซึ่งจะถูกควบคุมความเร็วรอบด้วยอินเวอร์เตอร์ที่แสดงดังรูปที่ 5.9 และรูปที่ 5.10 ตามลำดับ



รูปที่ 5.7 อินเวอร์เตอร์ ยี่ห้อ Schneider รุ่น ATV312 สำหรับสกรูขนถ่ายเชื้อเพลิงอัดเม็ด



รูปที่ 5.8 อินเวอร์เตอร์ ยี่ห้อ Winner รุ่น WIN-V63 สำหรับสกรูขนถ่ายเชื้อเพลิงผงและพัลลมุด แก๊สไอเสีย

โดยในการทดลองนั้นเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้นั้นตอนแรกมีลักษณะอัดแท่งเพื่อควบคุมความชื้น จากนั้นจะถูกนำมาบดด้วยเครื่องบดชนิด hammer mill เพื่อให้เป็นผงก่อนนำไปเผาไหม้ ซึ่งตู้ควบคุมสำหรับการปิด-เปิดการทำงานของเครื่องบด แสดงดังรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.9 ตู้สตาร์ทเครื่องบดเชื้อเพลิงชนิดค้อนเหวี่ยง (hammer mill)

อุณหภูมิจะถูกวัดด้วย Thermocouple type k (แสดงในรูปที่ 5.12) และแสดงผลผ่านโปรแกรม Siemen ซึ่งใช้เขียนเครื่องควบคุมเชิงตรรกะที่สามารถโปรแกรมได้ (Programmable Logic Controller, PLC) โดยที่ Pre-chamber มีช่องสำหรับใส่ Thermocouple 5 จุด, ที่ Furnace 1 จุด และหลัง Furnace อีก 1 จุด สำหรับจุดที่ใช้วัดองค์ประกอบของ Flue gas นั้น คือจุดหลัง Furnace โดยใช้ Testo 330 gas analyzer ดังแสดงในรูปที่ 5.13



รูปที่ 5.10 Thermocouple type k

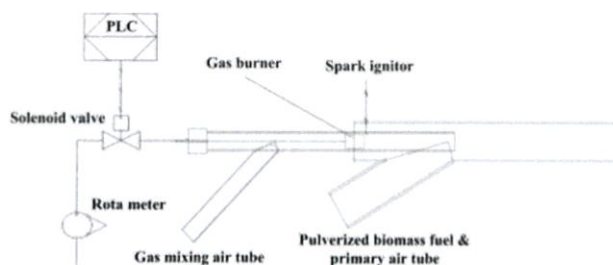


รูปที่ 5.11 Testo 330-2LL Gas Analyzer

5.2 วิธีการทดลอง

5.2.1 การอุ่นระบบ

ในการทดลองจะควบคุมการใช้แก๊สที่ 4 U/min ในการอุ่น จากรูปที่ 5.14 และ 5.15 เมื่อสั่งเปิดระบบจุดไฟ อุปกรณ์จ่ายไฟจะทำงานเพื่อจุดหัวเทียน จากนั้น Solenoid valve จึงเปิดตามมา แก๊สที่ไหลผ่านประกายไฟจากหัวเทียนจะลุดติดในห้องเผาไหม้ ระยะเวลาการอุ่นแต่ละครั้งจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ หรืออุณหภูมิที่ผนัง จากนั้นจึงเริ่มป้อนเชื้อเพลิง และอากาศปฐมภูมิที่อัตราการไหลของเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น 100 kW เมื่อเชื้อเพลิงชีวมวล และ อากาศปฐมภูมิไหลผ่านเปลวไฟที่มาจากแก๊ส เชื้อเพลิงจะเริ่มติดเป็นสะเก็ดไฟ เมื่ออุณหภูมิที่ผนังและ ห้องเผาไหม้สูงพอ สารระเหยที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากอนุภาคมีความเข้มข้นสูงขึ้น เปลวไฟจึงลุดติด เมื่อเปลวไฟลุดติดจนห้องเผาไหม้ช่วยมีอุณหภูมิสูงขึ้นและคงที่ จึงทำการเพิ่มอัตราการไหลของเชื้อเพลิง ถึงขั้นตอนนี้ จะเริ่มใช้อากาศทุติยภูมิ และอากาศตติยภูมิ ด้วยอัตราการไหลเทียบเท่ากับเปอร์เซ็นต์ อากาศส่วนเกินตามทฤษฎีที่คำนวณจากอัตราการไหลเชื้อเพลิงในขณะนั้น การเพิ่มอัตราการไหลของ เชื้อเพลิง จะเพิ่มขึ้นครั้งละเทียบเท่ากับ กำลังความร้อนที่ 100 kW



รูปที่ 5.12 แผนภาพอย่างง่ายของระบบจุดและจ่ายแก๊ส LPG



รูปที่ 5.13 ระบบจ่ายแก๊ส LPG ที่ใช้ในการทดลอง

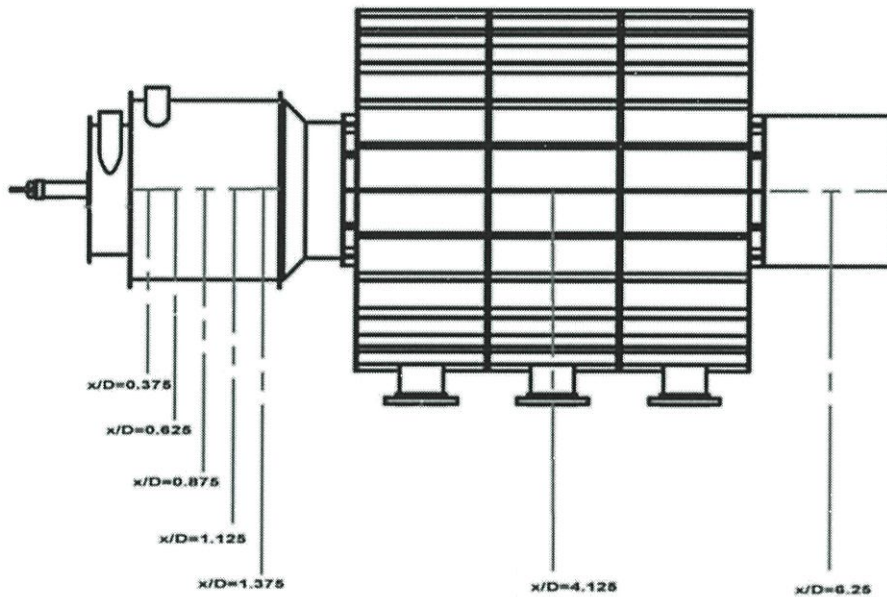
5.2.2 การหยุดระบบแก๊สเพื่อใช้เชื้อเพลิงชีวมวลอย่างเดียว

เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของเชื้อเพลิง จนเทียบเท่า 300 kW จึงทำการหยุดระบบแก๊สเพื่อใช้เชื้อเพลิงชีวมวลล้วนเพียงอย่างเดียว หลังจากแก๊สดับจนอุณหภูมิของระบบคงที่ ถ้าเปลวไฟเสถียรแล้ว เชื้อเพลิงสามารถเผาไหม้ต่อไปได้อย่างต่อเนื่อง จึงทำการเก็บผลการวัด อุณหภูมิ และแก๊สไอเสีย (flue gas) ที่ทางออกได้

5.2.3 การปรับมุมของใบพัดขณะทำการทดลอง

ในการทดลอง มุมของใบพัดจะต้องคงที่เสมอในระหว่างการเพิ่มกำลังความร้อน เมื่อระบบทำงานที่กำลังความร้อนที่ต้องการ โดยที่อุณหภูมิในห้องเผาไหม้ช่วยมีแนวโน้มคงที่แล้ว บ่งบอกถึงระบบเข้าสู่เสถียรภาพแล้ว จึงสามารถปรับเปลี่ยนมุมของใบพัดของตัวสร้างการหมุนควงแนวรัศมีที่ติดตั้งไว้ได้แล้วต้องรอให้ระบบเสถียรอีกครั้งเมื่อจะปรับเป็นมุมอื่น โดยเริ่มจากมุมที่มีค่าน้อยที่สุดที่ได้จากการคำนวณ

5.2.4 การบันทึกอุณหภูมิ และองค์ประกอบแก๊สไอเสีย



รูปที่ 5.14 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิ และองค์ประกอบไอเสีย

การวัดอุณหภูมิตามแนวแกนจะวัดด้วยเทอร์โมคัปเปิลชนิด K ดังรูปที่ 5.12 อุณหภูมิถูกวัดทั้งหมด 7 จุดตามแนวแกนที่ ตำแหน่ง x/D ต่างๆ เมื่อ x คือตำแหน่งตามแนวแกน และ D คือเส้นผ่านศูนย์กลางของห้องเผาไหม้ ($D = 0.4$ m) นอกจากนี้จะทำการวัดอุณหภูมิตามแนวรัศมี r/D ภายในห้องเผาไหม้ เมื่อ r คือตำแหน่ง ตามแนวรัศมีภายในห้องเผาไหม้ และ D คือเส้นผ่านศูนย์กลางของห้องเผาไหม้ ($D=0.4$ m) ตำแหน่ง การวัดแสดงได้ดังรูปที่ 5.16 แต่ผลการทดลองจะบันทึกผลอุณหภูมิที่เฉพาะ 5 จุดภายในห้องเผาไหม้ช่วยเท่านั้น ส่วนของการวัดแก๊สไอเสียจะวัดที่บริเวณ $x/D = 6.25$ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์แก๊สไอเสีย Testo รุ่น 330-2LL ดังรูปที่ 5.13

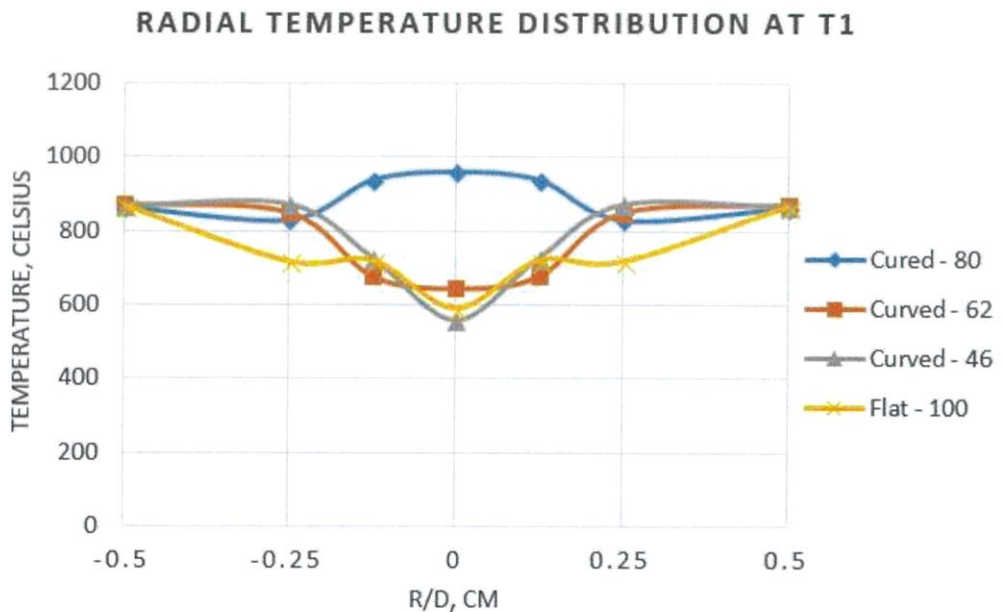
บทที่ 6

ผลการทดลอง

การทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลชนิดฝุ่นที่กำลังความร้อน 300 kW เปอร์เซ็นอากาศส่วนเกินที่ 15 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนอากาศปฏิกิริยา ทฤษฎี และตติยภูมิเป็น 25 : 65 : 10 มีการติดตั้งวัตถุขวางการไหลที่หัวเผาไหม้ ตะแกรงบดเชื้อเพลิงขนาด 1 มิลลิเมตร กำหนดตำแหน่งวัดอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วยที่ระยะ r/D เท่ากับ 0, 0.125, 0.25 และ 0.5 ในแต่ละช่องเสียบ Thermocouple ตำแหน่ง T1, T2, T3, T4 และ T5 ซึ่งคือที่ระยะ x/D เท่ากับ 0.375, 0.625, 0.875, 1.125 และ 1.375 มีผลการทดลองดังต่อไปนี้

6.1 ผลอุณหภูมิตามแนวรัศมีภายในห้องเผาไหม้ช่วย

6.1.1 ผลอุณหภูมิตามแนวรัศมีภายในห้องเผาไหม้ช่วยที่ตำแหน่ง T1 ($x/D = 0.375$)

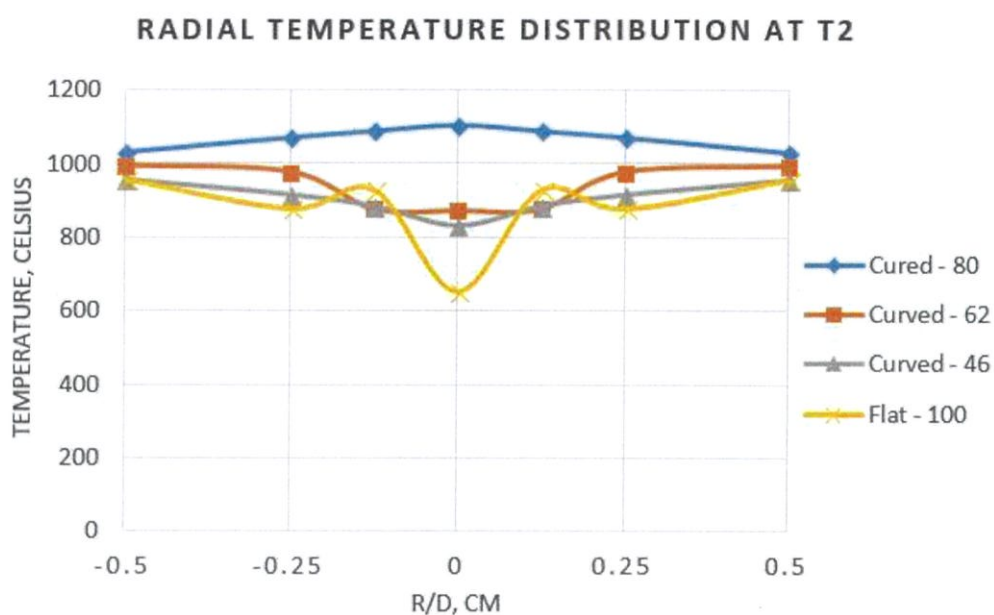


รูปที่ 6.1 กราฟแสดงอุณหภูมิตามแนวรัศมีที่ตำแหน่งการวัด $x/D = 0.375$ เปรียบเทียบระหว่างตัวสร้างการหมุนควงแนวรัศมีแบบแผ่นเรียบและแผ่นโค้งที่มุมไบบิตจากการคำนวณ

จากรูปที่ 6.1 ตัวสร้างการหมุนควงแนวรัศมีแบบแผ่นโค้งที่มุมไบบิต 80 องศา ให้ผลการกระจายอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุด และมีแนวโน้มสูงขึ้นจากผนังเข้าสู่แกนกลางห้องเผาไหม้ช่วย มีค่าอุณหภูมิ

สูงสุดอยู่ที่ 959 องศาเซลเซียส ส่วนที่มุม 62 และ 46 องศา แบบแผ่นเรียบที่มุมไบบิต 100 องศา อุณหภูมิมีแนวโน้มลดลงจากผนังสู่แกนกลางห้องเผาไหม้ช่วย โดยที่แกนกลางห้องเผาไหม้ช่วยมีอุณหภูมิ 645 558 และ 591 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

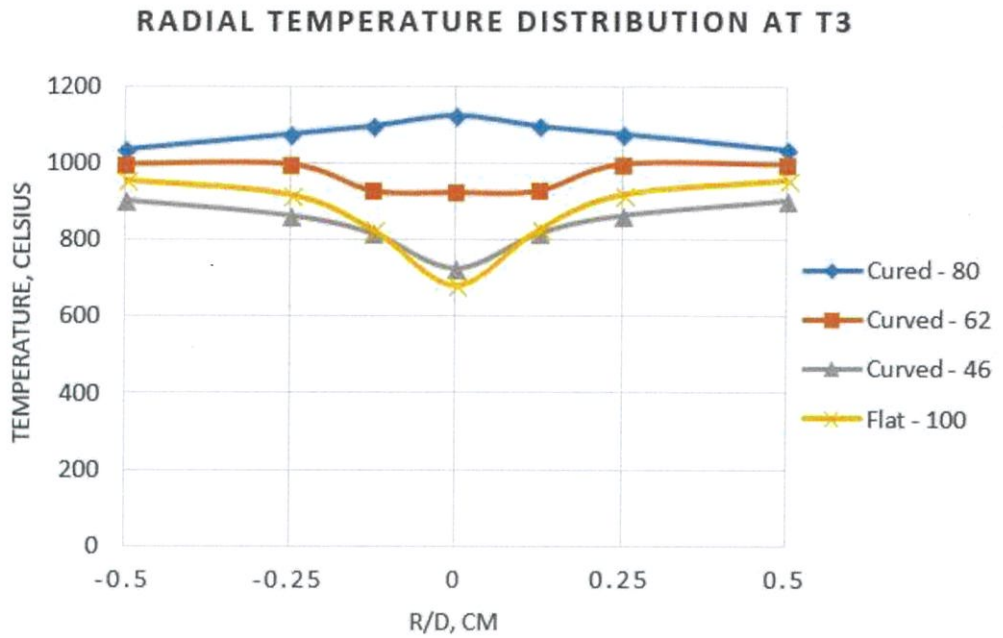
6.1.2 ผลอุณหภูมิตามแนวรัศมีภายในห้องเผาไหม้ช่วยที่ตำแหน่ง T2 ($x/D = 0.625$)



รูปที่ 6.2 กราฟแสดงอุณหภูมิตามแนวรัศมีที่ตำแหน่งการวัด $x/D = 0.625$ เปรียบเทียบระหว่างตัวสร้างการหมุนควงแนวรัศมีแบบแผ่นเรียบและแผ่นโค้งที่มุมไบบิตจากการคำนวณ

จากรูปที่ 6.2 ตัวสร้างการหมุนควงแนวรัศมีแบบแผ่นโค้งที่มุมไบบิต 80 องศา ให้ผลการกระจายอุณหภูมิเฉลี่ยสูงที่สุด และมีแนวโน้มสูงขึ้นจากผนังเข้าสู่แกนกลางห้องเผาไหม้ช่วย มีค่าอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ 1104 องศาเซลเซียส ส่วนที่มุม 62 และ 46 องศา แบบแผ่นเรียบที่มุมไบบิต 100 องศา อุณหภูมิมีแนวโน้มลดลงจากผนังสู่แกนกลางห้องเผาไหม้ช่วย โดยที่แกนกลางห้องเผาไหม้ช่วยมีอุณหภูมิ 872 832 และ 652 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

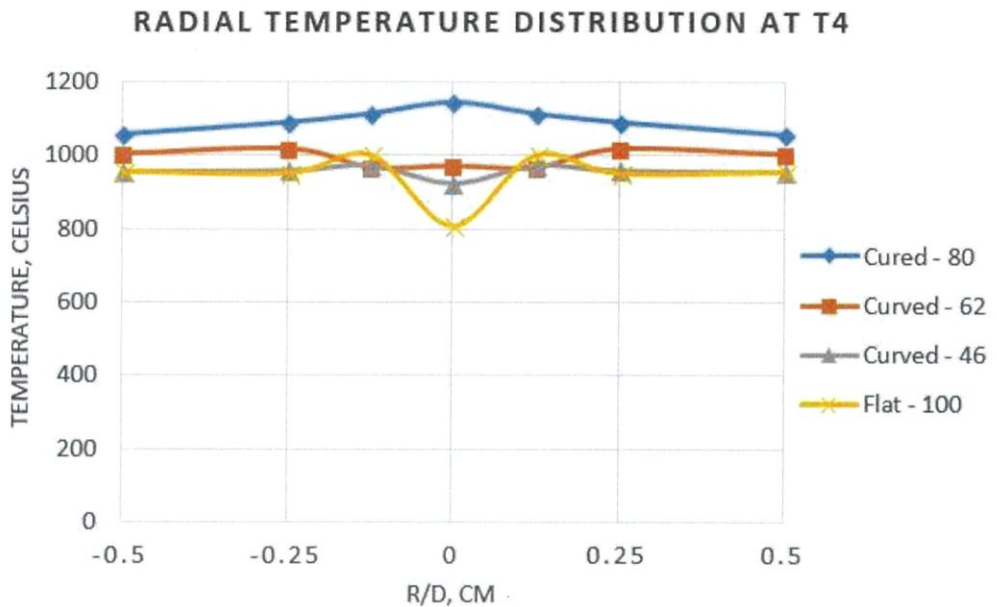
6.1.3 ผลอุณหภูมิตามแนวรัศมีภายในห้องเผาไหม้ช่วยที่ตำแหน่ง T3 ($x/D = 0.875$)



รูปที่ 6.3 กราฟแสดงอุณหภูมิตามแนวรัศมีที่ตำแหน่งการวัด $x/D = 0.875$ เปรียบเทียบระหว่างตัวสร้างการหมุนคองแนวรัศมีแบบแผ่นเรียบและแผ่นโค้งที่มุมไบบิดจากการคำนวณ

จากรูปที่ 6.3 ตัวสร้างการหมุนคองแนวรัศมีแบบแผ่นโค้งที่มุมไบบิด 80 องศา ให้ผลการกระจายอุณหภูมิเฉลี่ยสูงที่สุด และมีแนวโน้มสูงขึ้นจากผนังเข้าสู่แกนกลางห้องเผาไหม้ช่วย มีค่าอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ 1123 องศาเซลเซียส ส่วนที่มุม 62 และ 46 องศา แบบแผ่นเรียบที่มุมไบบิด 100 องศา อุณหภูมิมีแนวโน้มลดลงจากผนังสู่แกนกลางห้องเผาไหม้ช่วย โดยที่แกนกลางห้องเผาไหม้ช่วยมีอุณหภูมิ 923 832 และ 682 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

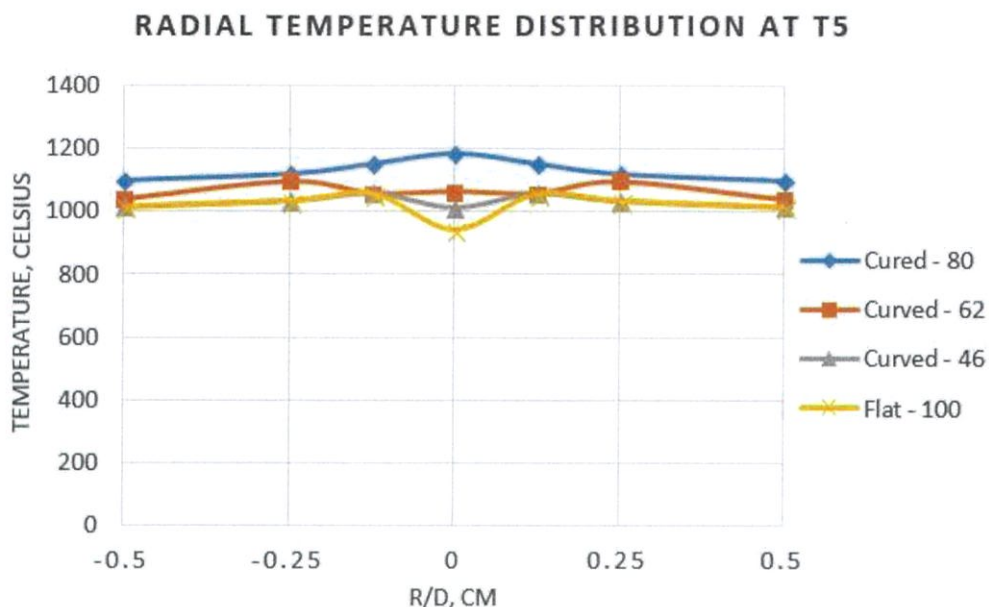
6.1.4 ผลอุณหภูมิตามแนวรัศมีภายในห้องเผาไหม้ช่วยที่ตำแหน่ง T4 ($x/D = 1.125$)



รูปที่ 6.4 กราฟแสดงอุณหภูมิตามแนวรัศมีที่ตำแหน่งการวัด $x/D = 1.125$ เปรียบเทียบระหว่างตัวสร้างการหมุนควงแนวรัศมีแบบแผ่นเรียบและแผ่นโค้งที่มุมไบบิตจากการคำนวณ

จากรูปที่ 6.3 ตัวสร้างการหมุนควงแนวรัศมีแบบแผ่นโค้งที่มุมไบบิต 80 องศา ให้ผลการกระจายอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุด และมีแนวโน้มสูงขึ้นจากผนังเข้าสู่แกนกลางห้องเผาไหม้ช่วย มีค่าอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ 1142 องศาเซลเซียส ส่วนที่มุม 62 และ 46 องศา แบบแผ่นเรียบที่มุมไบบิต 100 องศา อุณหภูมิมีแนวโน้มลดลงจากผนังสู่แกนกลางห้องเผาไหม้ช่วย โดยที่แกนกลางห้องเผาไหม้ช่วยมีอุณหภูมิ 970 924 และ 809 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

6.1.5 ผลอุณหภูมิตามแนวรัศมีภายในห้องเผาไหม้ช่วยที่ตำแหน่ง T5 ($x/D = 1.375$)



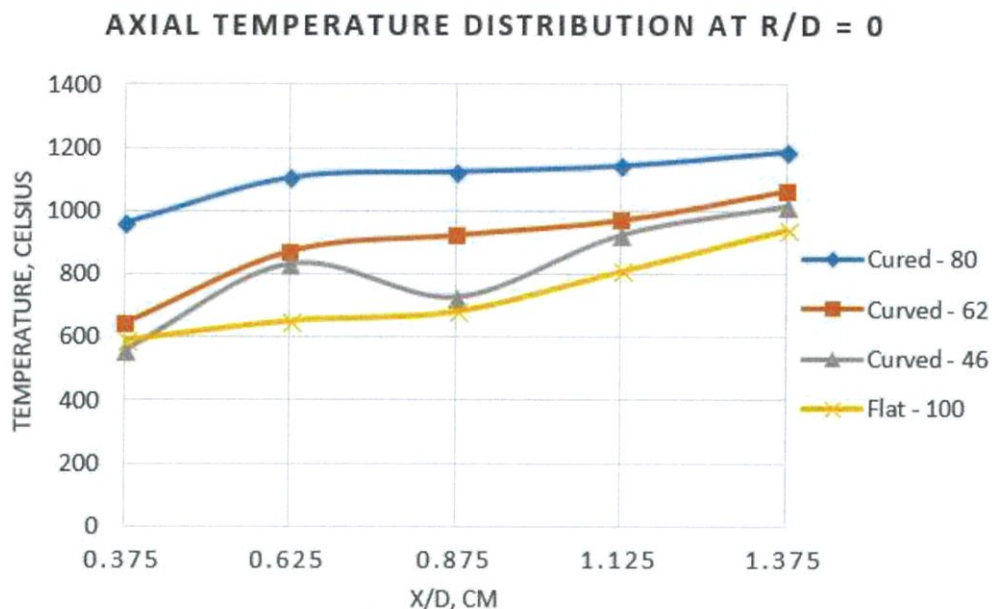
รูปที่ 6.5 กราฟแสดงอุณหภูมิตามแนวรัศมีที่ตำแหน่งการวัด $x/D = 1.375$ เปรียบเทียบระหว่างตัวสร้างการหมุนควงแนวรัศมีแบบแผ่นเรียบและแผ่นโค้งที่มุมไบบิตจากการคำนวณ

จากรูปที่ 6.5 ตัวสร้างการหมุนควงแนวรัศมีแบบแผ่นโค้งที่มุมไบบิต 80 องศา ให้ผลการกระจายอุณหภูมิเฉลี่ยสูงที่สุด และมีแนวโน้มสูงขึ้นจากผนังเข้าสู่แกนกลางห้องเผาไหม้ช่วย มีค่าอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ 1187 องศาเซลเซียส ส่วนที่มุม 62 และ 46 องศา แบบแผ่นเรียบที่มุมไบบิต 100 องศา อุณหภูมิมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยจากผนังสู่แกนกลางห้องเผาไหม้ช่วย โดยที่แกนกลางห้องเผาไหม้ช่วยมีอุณหภูมิ 1063 1015 และ 940 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

จากผลการทดลองที่ 6.1 ข้างต้น สังเกตได้ว่าตัวสร้างการหมุนควงแนวรัศมีแบบแผ่นโค้งที่มุมไบบิต 80 องศา นั้น ให้ผลอุณหภูมิตามแนวรัศมีในทุกตำแหน่งการวัดสูงที่สุด ซึ่งสามารถสรุปได้ตามสมมุติฐานที่กำหนดไว้ว่า ตัวสร้างการหมุนควงแนวรัศมีแบบแผ่นโค้งสามารถสร้างกระแสไหลย้อนหรือ Recirculation ภายในห้องเผาไหม้ช่วยได้รุนแรงกว่า เปลวไฟและอนุภาคร้อนจากการเผาไหม้จึงถูกเหนี่ยวนำให้ไหลกลับเข้ามาบริเวณแกนกลางห้องเผาไหม้ช่วยได้เยอะกว่า สังเกตได้จากอุณหภูมิที่แกนกลางห้องเผาไหม้ช่วยจะสูงมาก และค่อยๆ ลดลงตามแนวรัศมี ทำให้ทั่วห้องเผาไหม้ช่วยร้อนยิ่งขึ้น ส่วนที่มุมไบบิต 80 องศา นั้น จะรีดอากาศให้มีความเร็วเข้าห้องเผาไหม้ให้เร็วยิ่งขึ้นเนื่องด้วยช่องอากาศที่เล็ก อากาศที่ถูกเหวี่ยงออกไปทางผนังมีความเร็วสูง ทำให้กระแสไหลย้อนกลับยิ่งสูงขึ้น

6.2 ผลอุณหภูมิตามแนวแกนภายในห้องเผาไหม้ช่วย

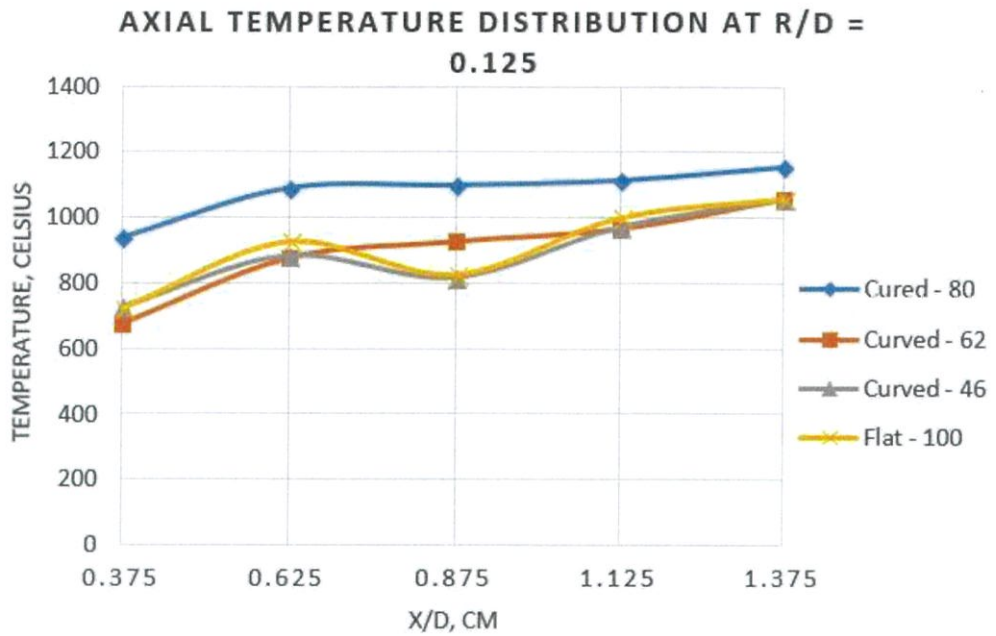
6.2.1 ผลอุณหภูมิตามแนวแกนภายในห้องเผาไหม้ช่วยที่ตำแหน่ง $r/D = 0$



รูปที่ 6.6 กราฟแสดงอุณหภูมิตามแนวแกนที่ตำแหน่งการวัด $r/D = 0$ เปรียบเทียบระหว่างตัวสร้างการหมุนควงแนวรัศมีแบบแผ่นเรียบและแผ่นโค้งที่มุมไบปิดจากการคำนวณ

จากรูปที่ 6.6 ตัวสร้างการหมุนควงทุกประเภทและทุกมุมไบปิดที่ทดสอบให้ผลการกระจายอุณหภูมิที่มีแนวโน้มสูงขึ้นจากต้นสู่ปลายห้องเผาไหม้ โดยแบบแผ่นโค้งที่มุมไบปิด 80 องศา ให้ผลการกระจายอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุด มีค่าอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ตำแหน่งสุดท้าย ($x/D = 1.375$) 1187 องศาเซลเซียส เช่นเดียวกันกับที่มุม 62 และ 46 องศา แบบแผ่นเรียบที่มุมไบปิด 100 องศา มีค่าอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ตำแหน่งสุดท้ายเช่นกันที่ 1063 1015 และ 940 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

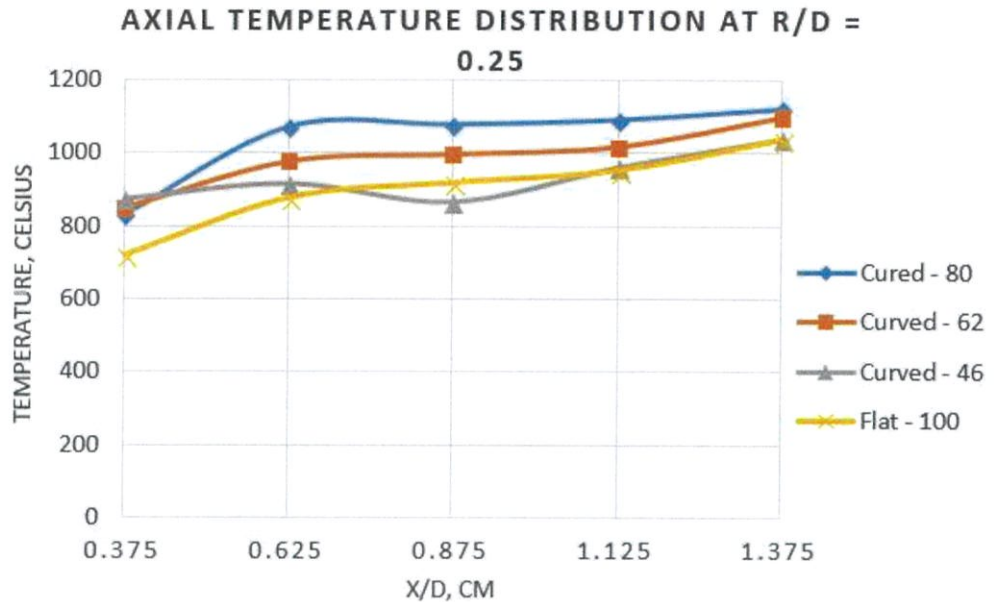
6.2.2 ผลอุณหภูมิตามแนวแกนภายในห้องเผาไหม้ช่วยที่ตำแหน่ง $r/D = 0.125$



รูปที่ 6.7 กราฟแสดงอุณหภูมิตามแนวแกนที่ตำแหน่งการวัด $r/D = 0.125$ เปรียบเทียบระหว่างตัวสร้างการหมุนควงแนวรัศมีแบบแผ่นเรียบและแผ่นโค้งที่มุมไบบิตจากการคำนวณ

จากรูปที่ 6.7 ตัวสร้างการหมุนควงทุกประเภทและทุกมุมไบบิตที่ทดสอบให้ผลการกระจายอุณหภูมิที่มีแนวโน้มสูงขึ้นจากต้นสู่ปลายห้องเผาไหม้ โดยแบบแผ่นโค้งที่มุมไบบิต 80 องศาให้ผลการกระจายอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุด มีค่าอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ตำแหน่งสุดท้าย ($x/D = 1.375$) 1153 องศาเซลเซียส เช่นเดียวกันกันที่มุม 62 และ 46 องศา แบบแผ่นเรียบที่มุมไบบิต 100 องศา มีค่าอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ตำแหน่งสุดท้ายเช่นกันที่ 1057 1059 และ 1058 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

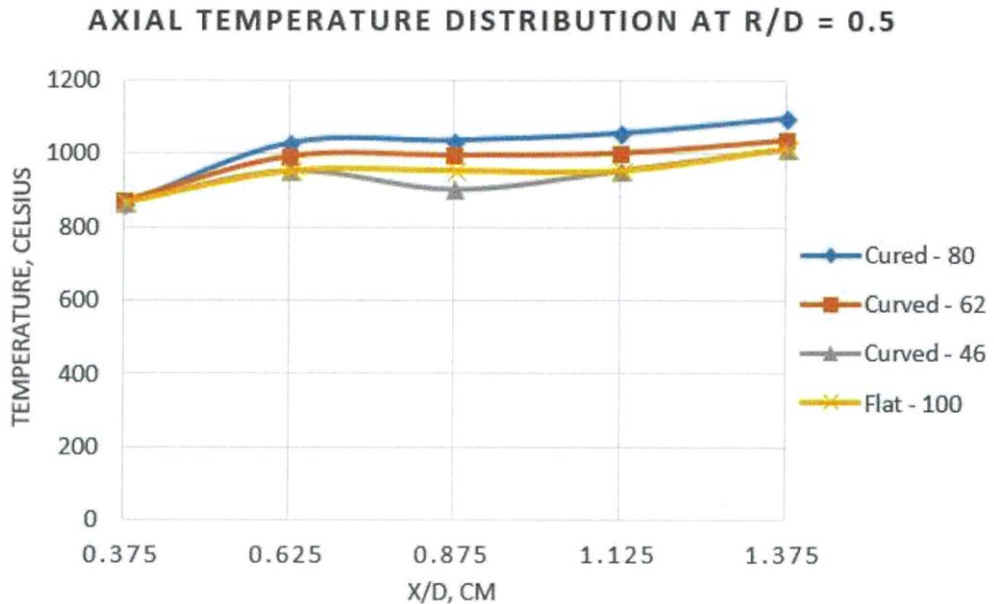
6.2.3 ผลอุณหภูมิตามแนวแกนภายในห้องเผาไหม้ช่วยที่ตำแหน่ง $r/D = 0.25$



รูปที่ 6.8 กราฟแสดงอุณหภูมิตามแนวแกนที่ตำแหน่งการวัด $r/D = 0.25$ เปรียบเทียบระหว่างตัวสร้างการหมุนควงแนวรัศมีแบบแผ่นเรียบและแผ่นโค้งที่มุมไบบิตจากการคำนวณ

จากรูปที่ 6.8 ตัวสร้างการหมุนควงทุกประเภทและทุกมุมไบบิตที่ทดสอบให้ผลการกระจายอุณหภูมิที่มีแนวโน้มสูงขึ้นจากต้นสู่ปลายห้องเผาไหม้ โดยแบบแผ่นโค้งที่มุมไบบิต 80 องศา ให้ผลการกระจายอุณหภูมิเฉลี่ยสูงที่สุด มีค่าอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ตำแหน่งสุดท้าย ($x/D = 1.375$) 1119 องศาเซลเซียส เช่นเดียวกันกับที่มุม 62 และ 46 องศา แบบแผ่นเรียบที่มุมไบบิต 100 องศา มีค่าอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ตำแหน่งสุดท้ายเช่นกันที่ 1096 1036 และ 1036 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

6.2.4 ผลอุณหภูมิตามแนวแกนภายในห้องเผาไหม้ช่วยที่ตำแหน่ง $r/D = 0.5$

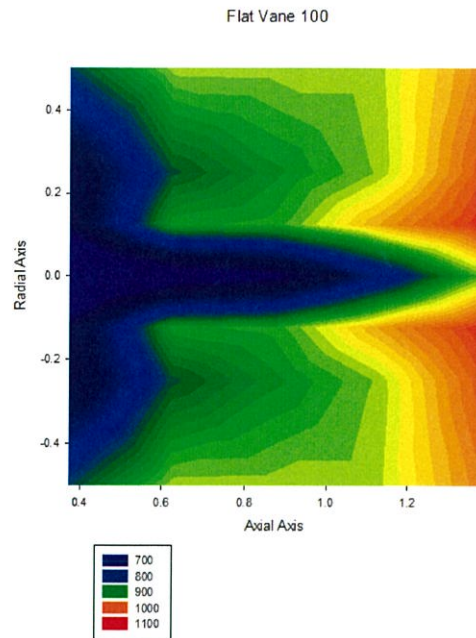


รูปที่ 6.9 กราฟแสดงอุณหภูมิตามแนวแกนที่ตำแหน่งการวัด $r/D = 0.5$ เปรียบเทียบระหว่างตัวสร้างการหมุนควงแนวรัศมีแบบแผ่นเรียบและแผ่นโค้งที่มุมไบบิตจากการคำนวณ

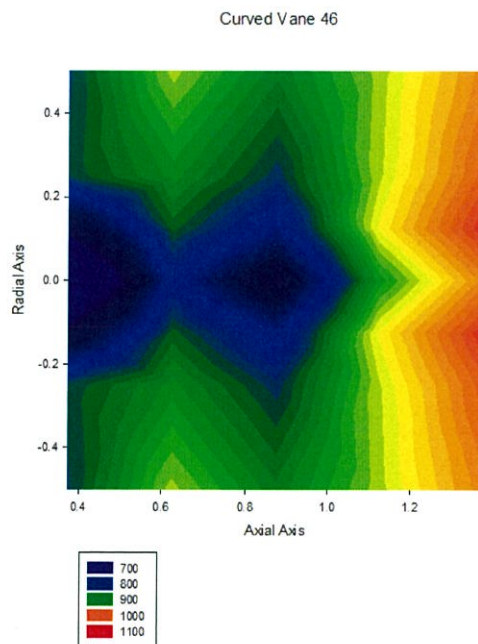
จากรูปที่ 6.8 ตัวสร้างการหมุนควงทุกประเภทและทุกมุมไบบิตที่ทดสอบให้ผลการกระจายอุณหภูมิที่มีแนวโน้มสูงขึ้นจากต้นสู่ปลายห้องเผาไหม้ โดยแบบแผ่นโค้งที่มุมไบบิต 80 องศา ให้ผลการกระจายอุณหภูมิเฉลี่ยสูงที่สุด มีค่าอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ตำแหน่งสุดท้าย ($x/D = 1.375$) 1097 องศาเซลเซียส เช่นเดียวกันที่มุม 62 และ 46 องศา แบบแผ่นเรียบที่มุมไบบิต 100 องศา มีค่าอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ตำแหน่งสุดท้ายเช่นกันที่ 1037 1016 และ 1016 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

ผลการทดลองข้างต้นมีผลลัพธ์ใกล้เคียงกับผลการทดลองที่ 6.1 ตัวสร้างการหมุนควงแนวรัศมีแบบแผ่นโค้งที่มุมไบบิต 80 องศาสามารถสร้างกระแสไหลย้อน หรือ Recirculation ภายในห้องเผาไหม้ช่วยได้รุนแรงกว่า สังเกตได้จากแนวโน้มอุณหภูมิจะค่อยๆ สูงขึ้นตามแนวแกน แสดงให้เห็นถึงการเหนี่ยวนำเปลวไฟและอนุภาคร้อนกลับเข้ามาในห้องเผาไหม้ช่วย

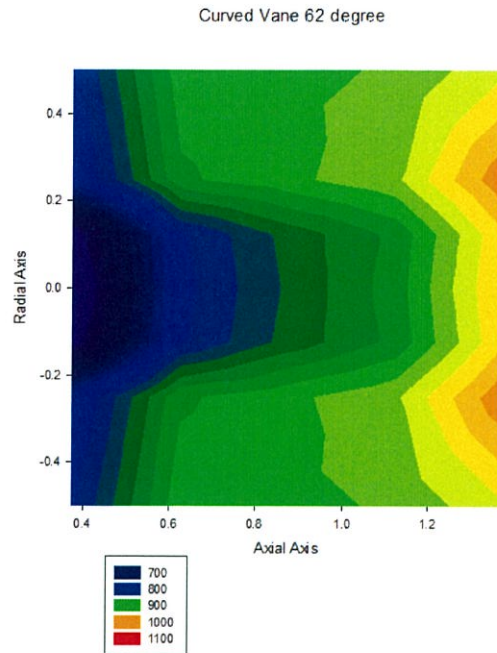
เมื่อนำผลอุณหภูมิทั้งแนวแกนและรัศมีของแต่ละประเภทของตัวสร้างการหมุนควงต่างๆ มาแสดงเป็นแผนภาพ Surface ของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วยด้วยโปรแกรม SigmaPlot ได้ผลดังรูปที่ 6.10 ถึง 6.13



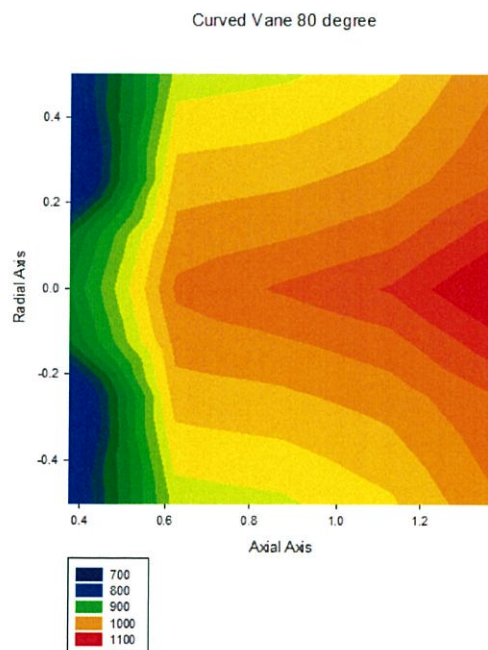
รูปที่ 6.10 แผนภาพการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วย กรณีติดตั้งตัวสร้างการหมุนควง
แนวรัศมีแบบแผ่นตรง มุมใบพัด 100 องศา



รูปที่ 6.11 แผนภาพการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วย กรณีติดตั้งตัวสร้างการหมุนควง
แนวรัศมีแบบแผ่นโค้ง มุมใบพัด 46 องศา



รูปที่ 6.12 แผนภาพการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วย กรณีติดตั้งตัวสร้างการหมุนควง
แนวรัศมีแบบแผ่นโค้ง มุมใบพัด 62 องศา

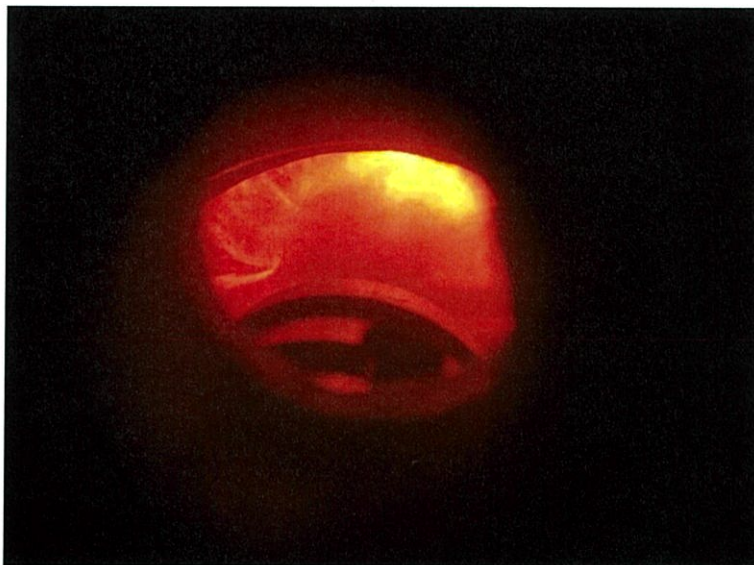


รูปที่ 6.13 แผนภาพการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วย กรณีติดตั้งตัวสร้างการหมุนควง
แนวรัศมีแบบแผ่นโค้ง มุมใบพัด 80 องศา

6.3 ลักษณะของเปลวไฟและการคลุกเคล้าของเชื้อเพลิงกับอากาศ



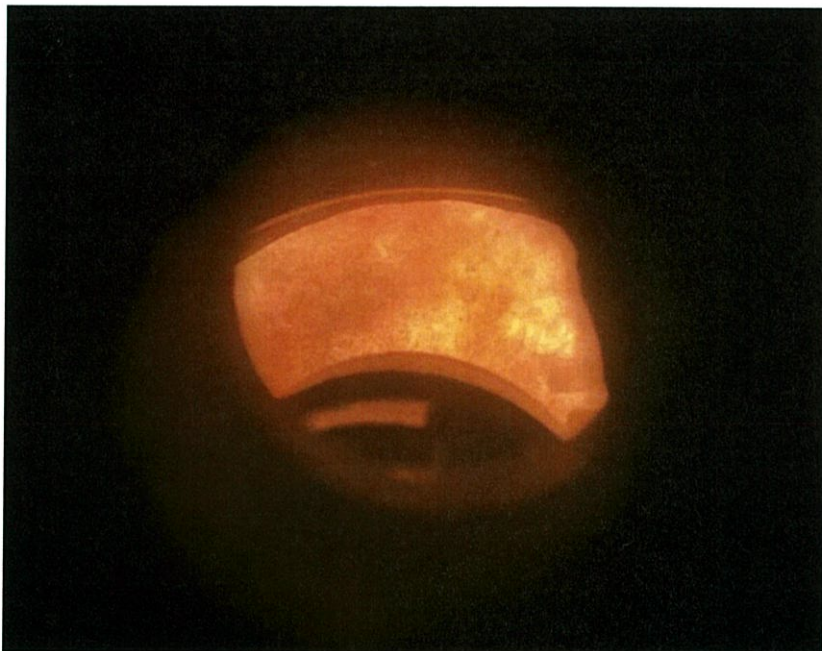
รูปที่ 6.14 ภาพการเผาไหม้ กรณีติดตั้งตัวสร้างการหมุนควงแนวรัศมีแบบแผ่นเรียบ ที่มุม 100 องศา



รูปที่ 6.15 ภาพการเผาไหม้ กรณีติดตั้งตัวสร้างการหมุนควงแนวรัศมีแบบแบบโค้ง ที่มุม 46 องศา



รูปที่ 6.16 ภาพการเผาไหม้ กรณีติดตั้งตัวสร้างการหมุนควงแนวรัศมีแบบแผ่นโค้ง ที่มุม 62 องศา



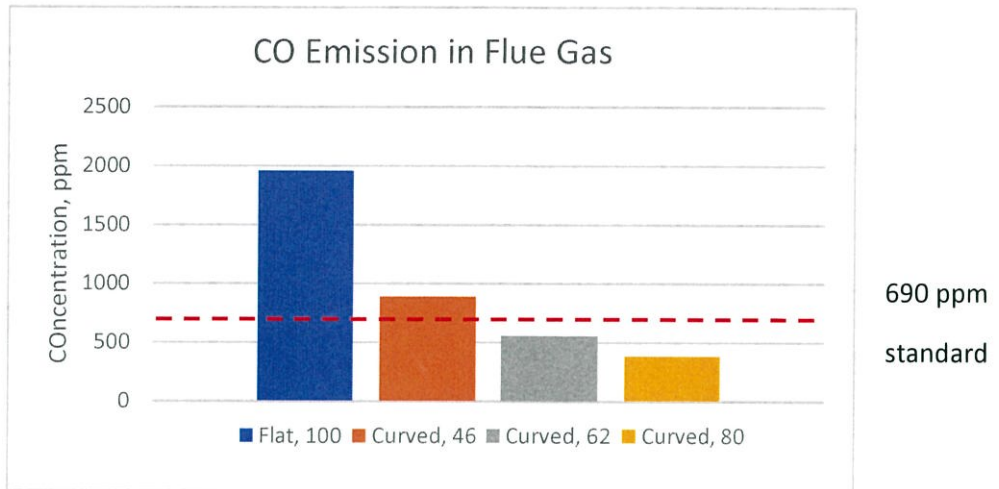
รูปที่ 6.17 ภาพการเผาไหม้ กรณีติดตั้งตัวสร้างการหมุนควงแนวรัศมีแบบแผ่นโค้ง ที่มุม 80 องศา

จากรูปที่ 6.14 คือลักษณะการเผาไหม้ของกรณีติดตั้งตัวสร้างการหมุนควงแนวรัศมีแบบแผ่นเรียบ โดยเชื้อเพลิงจะมีลักษณะรวมตัวอยู่ที่จุดศูนย์กลางและเคลื่อนที่หลุดออกในแนวแกนเนื่องจากอิทธิพลจากลมปฐมภูมิ(Primary Air) และการหมุนควงที่เกิดจาก Secondary Air ไม่ส่งผลกระทบต่อมากเมื่อเปรียบเทียบกับลักษณะการเผาไหม้ของกรณีติดตั้งตัวสร้างการหมุนควงแนวรัศมีแบบโค้งที่มุม 46, 62

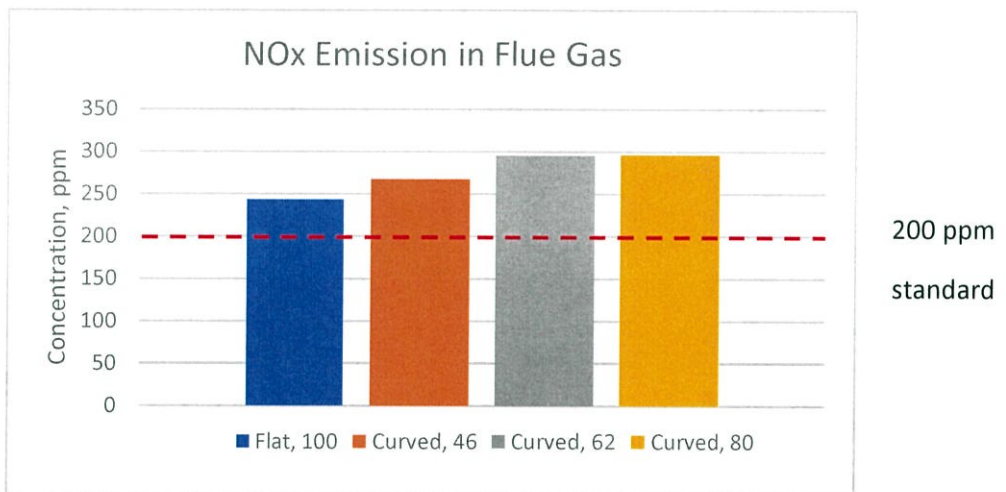
ดังรูปที่ 6.15 และ 6.16 ตามลำดับ เชื้อเพลิงจะคงมีลักษณะรวมตัวอยู่ที่จุดศูนย์กลางแต่ ผลที่เกิดจาก หมุนควงของ Secondary air ส่งผลให้เชื้อเพลิงมีการกระจาย และรูปที่ 6.17 กรณีติดตั้งตัวสร้างการหมุนควงแนวรัศมีแบบโค้งที่มุม 80 องศา เชื้อเพลิงมีลักษณะฟุ้งกระจายอย่างมาก เนื่องจาก อิทธิพลการหมุนควงที่เกิดจาก Secondary Air ซึ่งสอดคล้องกับผลของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการคลุกเคล้าระหว่าง อากาศกับเชื้อเพลิงที่มากขึ้น

6.4 การปลดปล่อยแก๊สไอเสียของกรณีติดตั้งแผ่นบังค้ำการไหลแบบตรง และกรณีติดตั้งแผ่นบังค้ำการไหลแบบโค้งที่มุมต่างๆ

หัวข้อนี้จะนำเสนอผลการวัดองค์ประกอบแก๊สไอเสีย กรณีติดตั้งตัวสร้างการหมุนควงแนวรัศมีแบบแผ่นเรียบ และแบบแผ่นโค้งที่มุมต่างๆ โดยเปรียบเทียบตามมาตรฐานอุตสาหกรรมที่เปอร์เซ็นต์ O_2 ในไอเสีย 6 เปอร์เซ็นต์ จากพบการวัดแก๊สไอเสียแสดงดัง รูปที่ 6.18 พบว่า การปลดปล่อย CO ของกรณีติดตั้งแผ่นบังค้ำการไหลแบบโค้งที่มุม 46 องศา , 62 องศา , 80 องศา มีค่า 887 , 553 , 379 ppm ตามลำดับ และ กรณีติดตั้งแบบแผ่นตรง มีค่ามากที่สุดอยู่ที่ 1956 ppm ซึ่งเป็นการบ่งบอกว่าคุณภาพของการคลุกเคล้าระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง มีผลต่อการเผาไหม้ของระบบที่ติดตั้งส่งผลให้เกิด CO ที่น้อย ในขณะที่ส่วนค่าการปลดปล่อย NO_x ติดตั้งแผ่นบังค้ำการไหลแบบโค้งที่มุม 46 องศา , 62 องศา , 80 องศา มีค่า 267 , 295 , 296 ppm ตามลำดับ แสดงดัง รูปที่ 6.19 พบว่ากรณีติดตั้งตัวสร้างการหมุนควงแนวรัศมีแบบแผ่นโค้งทุกค่ามุม มีการปลดปล่อยที่เกินค่ามาตรฐาน ส่วนกรณีแบบแผ่นเรียบนั้นมีการปลดปล่อยอยู่ที่ 243 ppm ซึ่งเกินค่ามาตรฐานเช่นกัน แต่มีการปลดปล่อยที่น้อยกว่ากรณีแบบแผ่นโค้งทุกค่ามุม



รูปที่ 6.18 ผลการปลดปล่อย CO ในแก๊สไอเสีย กรณีติดตั้งตัวสร้างการหมุนควงแนวรัศมีแบบแผ่นเรียบ และแผ่นโค้ง



รูปที่ 6.19 ผลการปลดปล่อย NO_x ของกรณีติดตั้งตัวสร้างการหมุนควงแนวรัศมีแบบตรง และ กรณีติดตั้งตัวสร้างการหมุนควงแนวรัศมีแบบโค้ง

บทที่ 7

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยฉบับนี้ทำการศึกษาถึงอิทธิพลของตัวสร้างการหมุนควงแนวรัศมีแบบแผ่นเรียบและแบบแผ่นโค้ง ที่มีต่ออุณหภูมิและองค์ประกอบของแก๊สเสีย เมื่อติดตั้งใช้งานในหัวเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลชนิดฝุ่นที่กำลังความร้อน 300 kW เปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกินที่ 15 เปอร์เซ็นต์ ใช้อัตราส่วนอากาศปฏิกิริยาเคมี ตติยภูมิที่ 25 : 65 : 10 มีการติดตั้งวัดอุณหภูมิจากท่อที่หัวเผาไหม้ ตะแกรงบดเชื้อเพลิงขนาด 1 มิลลิเมตร กำหนดตำแหน่งวัดอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วยที่ระยะ r/D เท่ากับ 0, 0.125, 0.25 และ 0.5 ในแต่ละช่องเสีย Thermocouple ตำแหน่ง T1, T2, T3, T4 และ T5 ซึ่งคือที่ระยะ x/D เท่ากับ 0.375, 0.625, 0.875, 1.125 และ 1.375 สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

7.1.1 ผลกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วยเมื่อติดตั้งตัวสร้างการหมุนควงแนวรัศมีทั้ง 4 แบบ

จากผลการทดลองพบว่าตัวสร้างการหมุนควงแนวรัศมีแบบแผ่นโค้งที่มีมุมของใบพัดอยู่ที่ 80 องศา ให้อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วยเฉลี่ยสูงที่สุด เมื่อเทียบกับแบบแผ่นเรียบที่มีมุมใบพัด 100 องศา โดยมีอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วยเฉลี่ยมากกว่าแบบแผ่นเรียบอยู่ 17.397 เปอร์เซ็นต์ โดยที่แบบแผ่นโค้งมุม 62 องศาทำได้ 5.678 เปอร์เซ็นต์ และแบบแผ่นโค้งมุม 46 แตกต่างเพียง 0.911 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสอดคล้องกับสมมุติฐานที่ได้ตั้งไว้ว่า ตัวสร้างการหมุนควงแนวรัศมีแบบแผ่นโค้งจะทำให้อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้สูงกว่าแบบแผ่นเรียบ โดยแผ่นใบโค้งจะค่อยๆเปลี่ยนทิศทางของลมทางเข้าซึ่งเป็นสาเหตุในการยับยั้งการเกิดขึ้นของการแยกการไหล (Flow Separation) ของอากาศบริเวณหลังแผ่นใบพัด ซึ่งการแยกการไหลจะเป็นการทำให้เกิด ปรากฏการณ์ wake ซึ่งจะเกิดแรงต้านการไหล (Drag Force) ที่ทางออกของแผ่นใบพัด โดยมุมใบพัด 80 ของแผ่นใบพัดโค้งเป็นมุมที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนทิศทางไปเป็นความเร็วในแนวรัศมีมากที่สุดเพราะการต้านทานจากการไหลน้อยที่สุด ซึ่งจะทำให้เกิดปรากฏการณ์การหมุนวนภายในห้องเผาไหม้ช่วยได้เยอะที่สุด และอีกสาเหตุที่ทำให้มุม 80 องศาของแผ่นใบพัดแบบโค้งเป็นมุมที่ให้การกระจายตัวของอุณหภูมิสูงที่สุด เพราะลักษณะการหมุนวนเข้มข้น (Strong Swirl) ที่สูงเป็นสาเหตุที่ทำให้ความดันสถิตภายในแกนกลางของการไหลย้อนกลับ (Recirculation) มีค่าต่ำที่สุดที่จะทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของความดันตามระยะทางที่เป็นเกรเดียนต์ความดันที่ไม่พึงประสงค์

(Adverse Axial Pressure gradient) ที่มากกว่าพลังงานจลน์ของการไหลในแนวแกน ซึ่งเป็นสาเหตุ ก่อให้เกิดการวางแหวนการหมุนวน (Central Toroidal Vortex) ที่มากที่สุด ภายในบริเวณใกล้ห้องเผาไหม้ ช่วย จึงทำให้เกิดการเหนี่ยวนำตัวผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการเผาไหม้ให้มาผสมรวมกับเชื้อเพลิงและอากาศที่ เข้ามาใหม่ได้ดีมากขึ้นและทำหน้าที่เป็นแหล่งเก็บความร้อนและสารที่พร้อมทำปฏิกิริยาทางเคมีได้ดีมาก ขึ้น

7.1.2 ผลขององค์ประกอบไอเสียเมื่อติดตั้งตัวสร้างการหมุนควงแนวรัศมีทั้ง 4 แบบ

จากผลการตรวจสอบองค์ประกอบไอเสียนั้น ในส่วนของ CO พบว่าตัวสร้างการหมุนควงแนวรัศมีแบบแผ่นโค้งที่มีมุมของใบพัดอยู่ที่ 80 องศา จะให้ผลการปลดปล่อย CO ในแก๊สไอเสียต่ำที่สุด เมื่อเทียบกับแบบแผ่นเรียบที่มีมุมใบพัด 100 องศา โดยมีผลการปลดปล่อย CO ในแก๊สไอเสียน้อยกว่าแบบแผ่นเรียบอยู่ 80.6 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อเปรียบเทียบกับค่าการปลดปล่อย CO ตามมาตรฐานการปลดปล่อยไอเสียของกรมโรงงานอุตสาหกรรมพบว่าต่ำกว่ามาตรฐานอยู่ 41.07 เปอร์เซ็นต์ โดยสาเหตุที่ทำให้ผลการปลดปล่อยไอเสียมีค่าน้อยที่สุดเนื่องจากการคลุกเคล้าในห้องเผาไหม้มากที่สุด ซึ่งทำให้เชื้อเพลิงจะถูกทำให้เผาไหม้อย่างสมบูรณ์มากขึ้น ส่วนแผ่นเรียบที่มีมุมใบพัด 100 องศา มีผลการปลดปล่อย CO ที่มากที่สุด เพราะความสามารถในการคลุกเคล้าที่ต่ำที่สุดในส่วนของ NO_x พบว่าตัวสร้างการหมุนควงแนวรัศมีแบบแผ่นโค้งที่มีมุมของใบพัดอยู่ที่ 80 องศา จะให้ผลการปลดปล่อย NO_x ในแก๊สไอเสียสูงที่สุด เมื่อเทียบกับแบบแผ่นเรียบที่มีมุมใบพัด 100 องศา โดยมีผลการปลดปล่อย NO_x ในแก๊สไอเสียมากกว่าแบบแผ่นเรียบอยู่ 22 เปอร์เซ็นต์ โดยสาเหตุที่เป็นเช่นนั้นเพราะว่าอุณหภูมิไอเสียที่ออกมาจากการติดตั้งแผ่นใบพัดแบบแผ่นโค้งที่มีมุม 80 องศา มีค่าสูงที่สุด ซึ่ง N ทำปฏิกิริยาได้ดีกับ O ที่อุณหภูมิสูงจึงทำให้ผลการปลดปล่อยของ NO_x นั้นมีค่าสูงที่สุด

7.2 ข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยครั้งนี้พบข้อจำกัดบางอย่างที่เป็นอุปสรรคต่อการดำเนินงานวิจัย หัวข้อนี้จึงเกี่ยวข้องกับข้อเสนอแนะเพื่อเป็นประโยชน์ในการปรับปรุงแก้ไข และการทำวิจัยของผู้ที่สนใจในอนาคต

7.2.1 ควรมีการปรับปรุงระบบการวัดอุณหภูมิใหม่ แทนการเสียบแทง Thermocouple เข้าไปในห้องเผาไหม้ช่วย เพื่อไม่ให้เป็นการรบกวนกระแสหมุนวนที่เกิดขึ้นขณะทำการทดลอง

7.2.2 ระหว่างการทดลองควรมีระบบในการช่วยเก็บเก้าอี้ที่เหลืจากการเผาไหม้ เพื่อส่งไปวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ ในการคำนวณประสิทธิภาพจากการทดลองจริงได้

7.2.3 ความชื้นในเชื้อเพลิงและอากาศนั้นเปลี่ยนไปตามสภาพภูมิอากาศที่ทำการทดลอง ดังนั้น เพื่อผลการทดลองที่แม่นยำยิ่งขึ้น ควรมีการวางแผนการทดลองทุกครั้ง เชื้อเพลิงควรบดและทดลอง ในช่วงเวลาใกล้เคียงกันให้ได้มากที่สุดในช่วงที่ไม่มีฝน หรือการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศมากนัก

7.2.4 ตัวสร้างการหมุนควงแนวรัศมีแบบโค้งที่ทำการวิจัยนั้น ยังไม่ได้ศึกษาครอบคลุมถึงปัจจัย ด้านขนาดและรัศมีความโค้ง จึงเป็นอีกหนึ่งประเด็นที่น่าสนใจในการศึกษาต่อยอดในอนาคต รวมไปถึง การพัฒนาเพิ่มเติมให้การปลดปล่อย NO_x อยู่ในค่ามาตรฐาน

เอกสารอ้างอิง

- [1] ชินภัทร ชูการ., “การพัฒนาหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลในหม้อน้ำอุตสาหกรรม.” วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2557.
- [2] ธิติพัทธ์ ลิ้มสกุล. “การประยุกต์หลักการอากาศไหลหมุนควงในเตาเผาเชื้อเพลิงชีวมวล.” วิศวกรรมลาดกระบัง. ปีที่ 28 ฉบับที่4 ธันวาคม 2554
- [3] นันทพล จันคง. “การพัฒนาระบบควบคุมสัญญาณการเผาไหม้สำหรับเตาเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผง.” วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2560.
- [4] นรเศรษฐ์ พิกุลเงิน. “ผลกระทบของสัดส่วนการป้อนอากาศต่อสมรรถนะของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดฝุ่น.” วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2560.
- [5] พีรพัฒน์ เทพลิบ “การพัฒนาระบบควบคุมการไหลของอากาศและเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง สำหรับหัวเผาเชื้อเพลิงแข็งชนิดผงขนาด 1 MW.” วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2560.
- [6] พงศนันท์ แก่นพรหม. “อิทธิพลของแผ่นใบปิดและแผ่นขวางกั้นช่องการไหลต่อสมรรถนะของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดฝุ่น.” วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2560.
- [7] ชนน สุสังกรกาญจน์, วรรณพงศ์ ชุนโต และ ศุภกฤต สนธิศิริกฤตย์. “การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ การลำเลียงเชื้อเพลิงผงก้นเข้าสู่ห้องเผาไหม้” วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2561.
- [8] พงศธร ณ นคร, ภาวนัฐฎ์ เลิศอัษฎมงคล และ วันเฉลิม พีรพัฒน์ภูมิ. “การพัฒนาระบบหมุนเวียนน้ำเพื่อการสมดุลความร้อนในเครื่องบำบัดเสียแบบเปียก” วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
2561.

[9] Al-Kabie, H.S., **Radial Swirler for Low Emissions Gas Turbine Combustion**, PhD. Thesis, Univ. of Leeds., 1989.

[10] Beer, J.M. and Chigier, N.A., **Combustion Aerodynamics**, Applied Science Publishers Ltd., 1975

[11] Bhupendra Khandelwal, Dong Lili, Vishal Sethi., “Design and Study on Performance of Axial Swirler for Annular Combustor by Changing Different Design Parameters”, **Journal of the Energy Institute.**, 2013.

[12] Mohammad Nazri Mohd Jaafar and Mohamad Shaiful Ashrul Ishak Mohamad Shaiful Ashrul Ishak, “The Effect of Swirl Number on Discharge Coefficient for Various Orifice Sizes in a Burner System”, Faculty of Mechanical Engineering, Univeriti Teknologi Malasia., 2004.

[13] Mohammad Nazri Mohd Jaafar and Mohammad Rosian Rahim, “Effect of Flame Angle Using Various Swirler Angle in Combustion Performance”, **Journal Teknologi.**, 2015.

[14] Mohamad Shaiful Ashrul Ishak, “The Effect of Radial Swirl Generator on Reducing Emissions from Bio-Fuel Burner System”, **Modern Applied Science**, 2009.

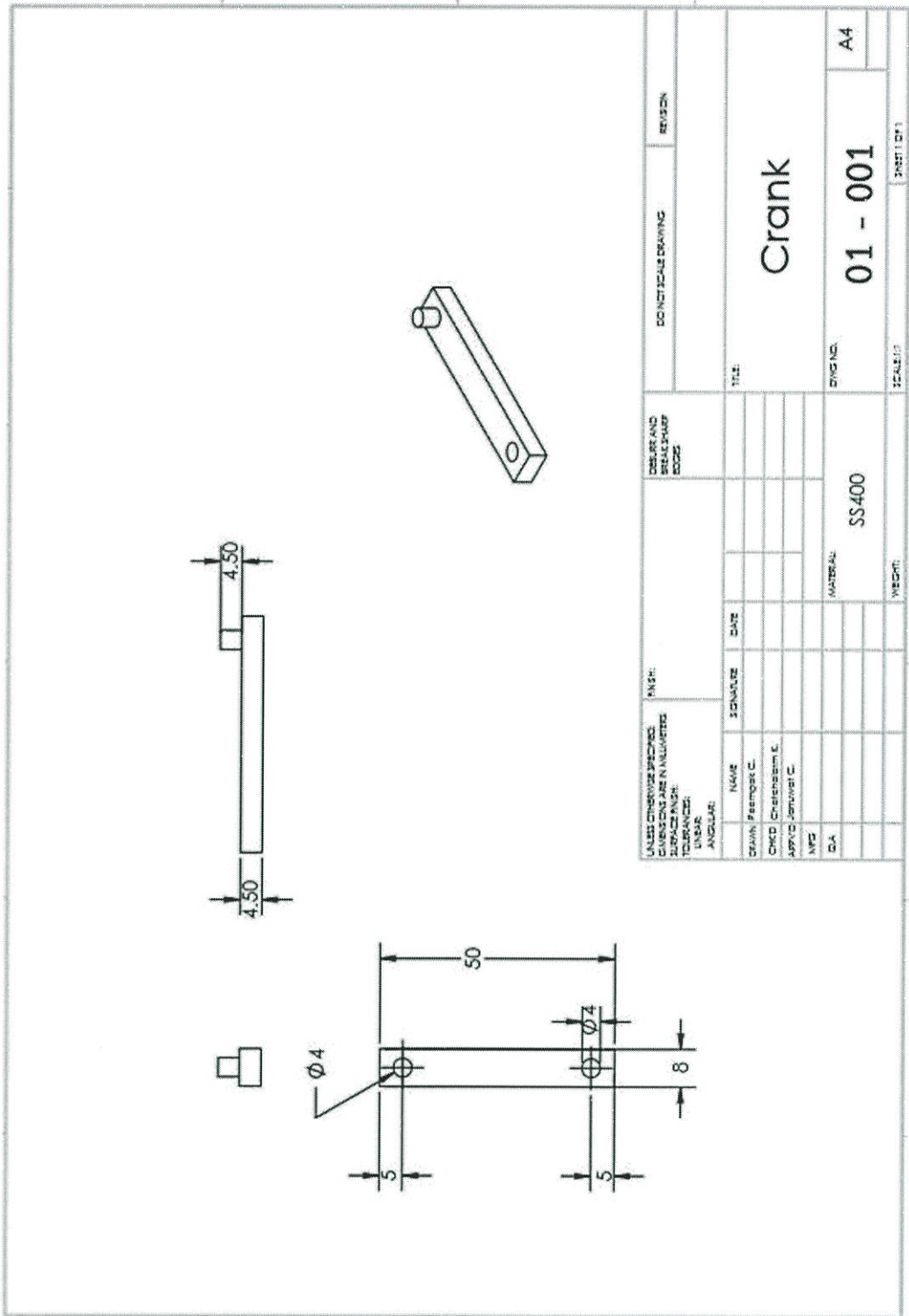
[15] Shee, H. J. & Chen W. J.& Jeng, S.Y. & Huang, T. L. Correlation of swirl number for a radial-type swirl generator. **Experimental Thermal and Fluid Science**, 12, 444-451., 1996.

[16] Arther H. Lefebvre and Dilip R. Ballal, **Gas Turbine Combustion Alternative Fuels and Emissions**, CRC Press Taylor & Francis Group, 2010

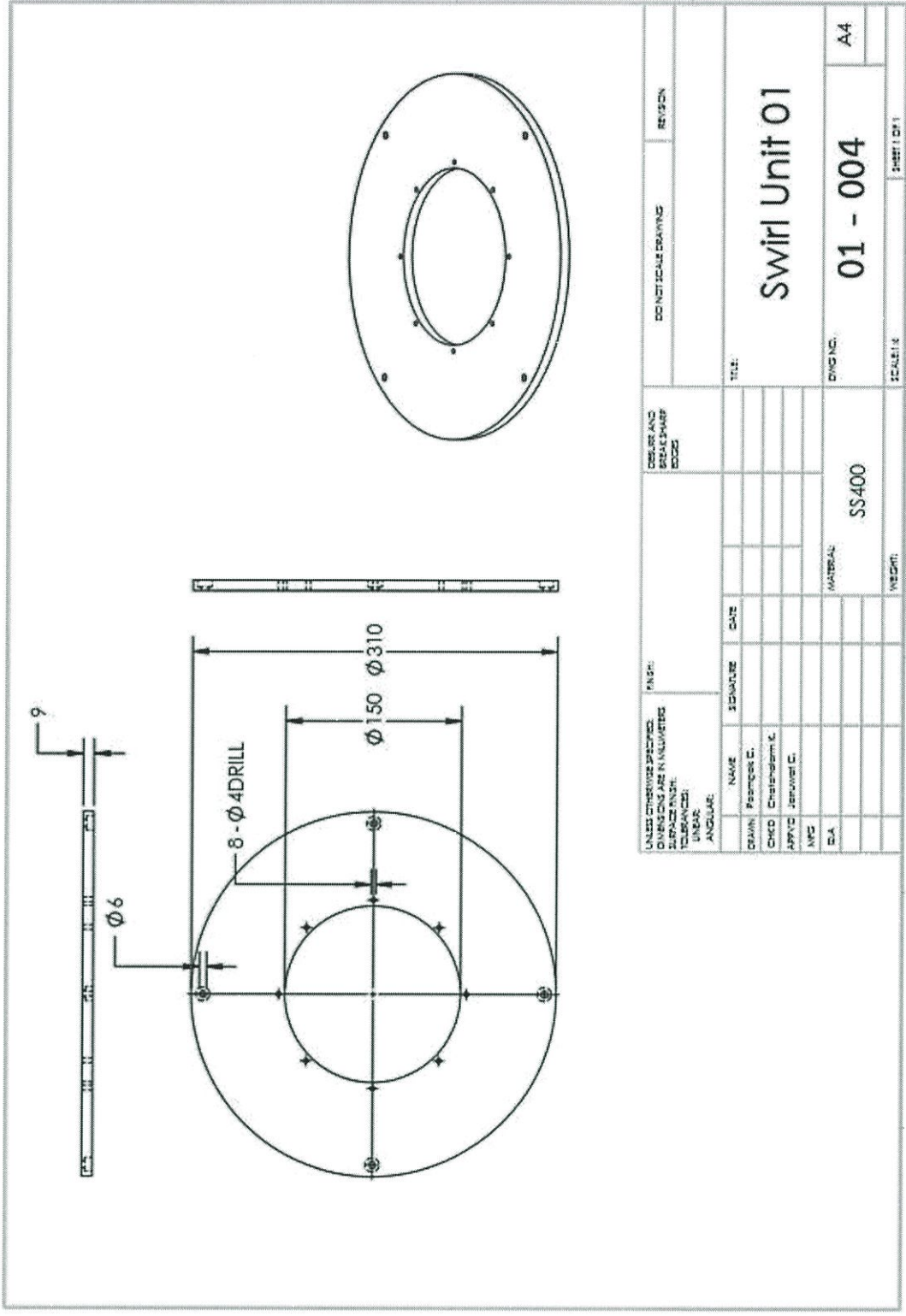
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

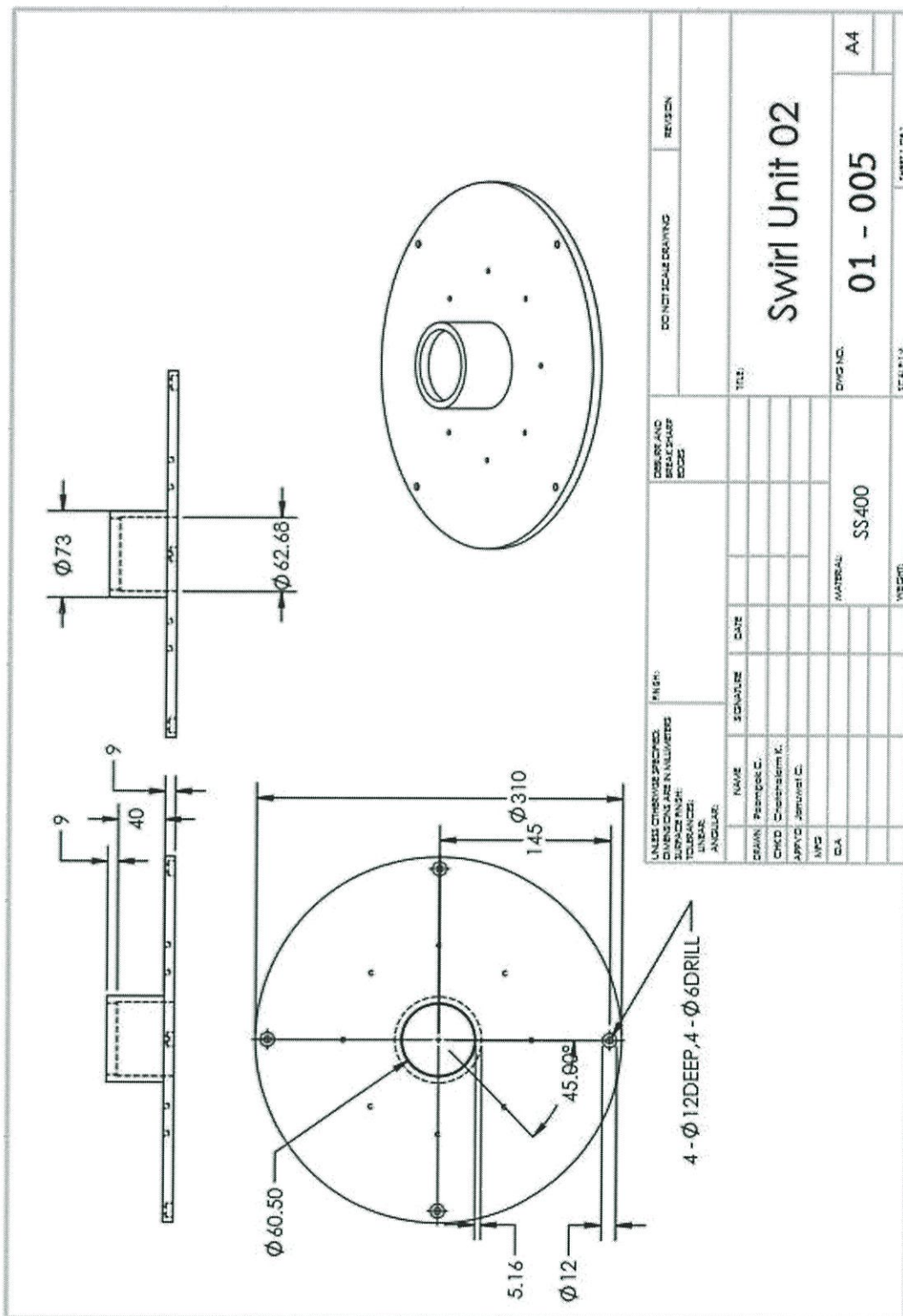
แบบสั่งผลิตตัวสร้างการหมุนควงแนวรัศมีแบบแผ่นโค้ง



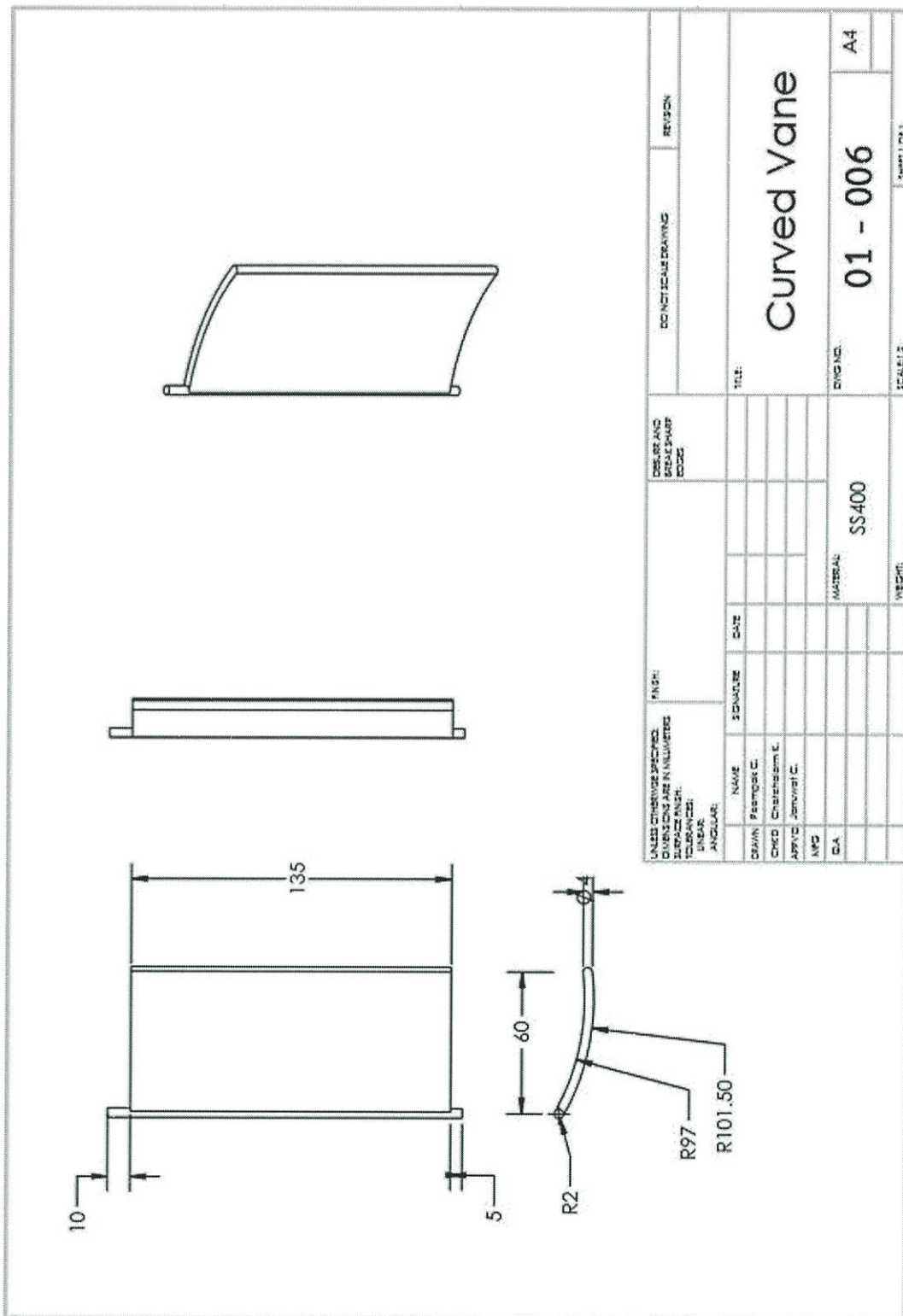
รูปที่ ก1 แบบสั่งผลิตชิ้นส่วนข้อเหวี่ยงในตัวสร้างการหมุนควงแนวรัศมีแบบแผ่นโค้ง



รูปที่ ก4 แบบสั่งผลิตชิ้นส่วนแผ่นรองรับใบพัดในตัวสร้างการหมุนควงแนวรัศมีแบบแผ่นโค้ง



รูปที่ ก5 แบบสั่งผลิตชิ้นส่วนแผ่นรองรับท่อเชื่อมเพลิงในตัวสร้างการหมุนควงแนวรัศมีแบบแผ่นโค้ง



รูปที่ ก6 แบบสั่งผลิตชิ้นส่วนแผ่นใบปิดในตัวสร้างการหมุนควงแนวรัศมีแบบแผ่นโค้ง

ภาคผนวก ข

มาตรฐานการปลดปล่อยไอเสีย กระจกอุตสาหกรรม

ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม

เรื่อง กำหนดค่าปริมาณของสารเจือปนในอากาศที่ระบายออกจากโรงงาน

พ.ศ. ๒๕๕๕

อาศัยอำนาจตามความในข้อ ๑๖ แห่งกฎกระทรวงฉบับที่ ๒ (พ.ศ. ๒๕๓๕) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. ๒๕๓๕ รัฐมนตรีว่าการกระทรวงอุตสาหกรรม จึงได้ออกประกาศไว้ดังต่อไปนี้

ข้อ ๑ ให้ยกเลิกประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง กำหนดค่าปริมาณของสารเจือปนในอากาศที่ระบายออกจากโรงงาน พ.ศ. ๒๕๔๘ ลงวันที่ ๔ กุมภาพันธ์ พ.ศ. ๒๕๔๘

ข้อ ๒ ในประกาศนี้

“อากาศที่ระบายออกจากโรงงาน” หมายความว่า อากาศที่ระบายออกจากปล่องหรือช่องหรือท่อระบายอากาศของโรงงานไม่ว่าจะผ่านระบบบำบัดหรือไม่ก็ตาม

“น้ำมันหรือน้ำมันเคา” ให้หมายความรวมถึง ผลพลอยได้ที่นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับการเผาไหม้ด้วยการเผาไหม้ด้วย

“ถ่านหิน” ให้หมายความรวมถึง ผลพลอยได้ที่นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับการเผาไหม้ด้วย

“เชื้อเพลิงชีวมวล” หมายความว่า เชื้อเพลิงที่ได้มาจากอินทรีย์สารหรือสิ่งมีชีวิต รวมทั้งผลผลิตจากการเกษตร การปศุสัตว์และการทำป่าไม้ เช่น ไม้พิน เศษไม้ แกลบ ฟาง ชานอ้อย ต้นและใบอ้อย ใบปาล์ม กะลาปาล์ม ทะลายปาล์ม กะลามะพร้าว ใบมะพร้าว เศษพืช มูลสัตว์ ก๊าซชีวภาพ กากตะกอน หรือของเสียจากโรงงานแปรรูปผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร เป็นต้น

“เชื้อเพลิงอื่น ๆ” หมายความว่า เชื้อเพลิงอื่นใดนอกเหนือจากที่ระบุไว้ในประกาศนี้ แต่ไม่รวมถึงเชื้อเพลิงที่ได้กำหนดค่าการระบายปริมาณสารเจือปนในอากาศไว้เป็นการเฉพาะ

“ระบบปิด” หมายความว่า ระบบการเผาไหม้เชื้อเพลิงและหรือวัฏจักรที่มีการออกแบบให้มีการควบคุมปริมาณอากาศและสภาวะแวดล้อมในการเผาไหม้ เช่น หม้อเผาปูนซีเมนต์ หม้อน้ำ เป็นต้น

หน้า ๘

เล่ม ๑๒๓ ตอนที่พิเศษ ๑๒๕ ง ราชกิจจานุเบกษา ๔ ธันวาคม ๒๕๕๕

“ระบบเปิด” หมายความว่า ระบบการเผาไหม้เชื้อเพลิงและหรือวัสดุคืบที่ไม่มีการออกแบบเพื่อควบคุมปริมาณอากาศและสภาวะแวดล้อมในการเผาไหม้ เช่น เตาเผาปูนขาว เตาหลอมโลหะแบบคิวโปล่า (Cupola) เป็นต้น

ข้อ ๓ อากาศที่ระบายออกจากโรงงาน ต้องมีค่าปริมาณของสารเจือปนแต่ละชนิดไม่เกินที่กำหนดไว้ ดังต่อไปนี้

ชนิดของสารเจือปน (หน่วยวัด)	แหล่งที่มาของสารเจือปน	ค่าปริมาณของสารเจือปน ในอากาศที่	
		ไม่มีการเผาไหม้ เชื้อเพลิง	มีการเผาไหม้ เชื้อเพลิง
๑. ฝุ่นละออง (Total Suspended Particulate) (มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	ก. แหล่งกำเนิดความร้อนที่ใช้ - น้ำมันหรือน้ำมันเตา - ถ่านหิน - เชื้อเพลิงชีวมวล - เชื้อเพลิงอื่น ๆ ข. การถลุง หล่อหลอม ริดคิง และ/ หรือผลิต อลูมิเนียม ค. การผลิตทั่วไป	- - - - ๓๐๐ ๔๐๐	๒๔๐ ๓๒๐ ๓๒๐ ๓๒๐ ๒๔๐ ๓๒๐
๒. พลวง (Antimony) (มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	การผลิตทั่วไป	๒๐	๑๖
๓. สารหนู (Arsenic) (มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	การผลิตทั่วไป	๒๐	๑๖
๔. ทองแดง (Copper) (มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	การผลิตทั่วไป	๓๐	๒๔
๕. ตะกั่ว (Lead) (มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	การผลิตทั่วไป	๓๐	๒๔
๖. พรอท (มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	การผลิตทั่วไป	๓	๒.๔
๗. คลอรีน (Chlorine) (มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	การผลิตทั่วไป	๓๐	๒๔
๘. ไฮโดรเจนคลอไรด์ (Hydrogen chloride) (มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	การผลิตทั่วไป	๒๐๐	๑๖๐

หน้า ๕

เล่ม ๑๒๓ ตอนพิเศษ ๑๒๕ ง ราชกิจจานุเบกษา ๔ ธันวาคม ๒๕๔๕

ชนิดของสารเจือปน (หน่วยวัด)	แหล่งที่มาของสารเจือปน	ค่าปริมาณของสารเจือปน ในอากาศที่	
		ไม่มีการเผาไหม้ เชื้อเพลิง	มีการเผาไหม้ เชื้อเพลิง
๘. กรดกำมะถัน (Sulfuric acid) (ส่วนในล้านส่วน)	การผลิตทั่วไป	๒๕	-
๑๐. ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogen sulfide) (ส่วนในล้านส่วน)	การผลิตทั่วไป	๑๐๐	๘๐
๑๑. คาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon monoxide) (ส่วนในล้านส่วน)	การผลิตทั่วไป	๘๗๐	๖๕๐
๑๒. ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Sulfur dioxide) (ส่วนในล้านส่วน)	ก. แหล่งกำเนิดความร้อนที่ใช้ - น้ำมันหรือน้ำมันเตา - ถ่านหิน - เชื้อเพลิงชีวมวล - เชื้อเพลิงอื่น ๆ	- - - -	๕๕๐ ๗๐๐ ๖๐ ๖๐
	ข. การผลิตทั่วไป	๕๐๐	-
๑๓. ออกไซด์ของไนโตรเจน (Oxides of nitrogen) (ส่วนในล้านส่วน)	แหล่งกำเนิดความร้อนที่ใช้ - น้ำมันหรือน้ำมันเตา - ถ่านหิน - เชื้อเพลิงชีวมวล - เชื้อเพลิงอื่น ๆ	- - - -	๒๐๐ ๔๐๐ ๒๐๐ ๒๐๐
	๑๔. ไซลีน (Xylene) (ส่วนในล้านส่วน)	การผลิตทั่วไป	๒๐๐
๑๕. ครีซอล (Cresol) (ส่วนในล้านส่วน)	การผลิตทั่วไป	๕	-

ข้อ ๔ กรณีโรงงานใช้เชื้อเพลิงร่วมกันตั้งแต่ ๒ ประเภทขึ้นไป อากาศที่ระบายออกจากโรงงาน ต้องมีค่าปริมาณสารเจือปนในอากาศไม่เกินค่าที่กำหนด สำหรับเชื้อเพลิงประเภทที่มีสัดส่วนการใช้มากที่สุด

ข้อ ๕ การตรวจวัดค่าปริมาณของสารเจือปนในอากาศที่ระบายออกจากโรงงาน แต่ละชนิด ให้ใช้วิธีดังต่อไปนี้

(๑) การตรวจวัดค่าปริมาณฝุ่นละออง ให้ใช้วิธี Determination of Particulate Emissions from Stationary Sources ที่องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งประเทศสหรัฐอเมริกา (United States Environmental Protection Agency : U.S. EPA) กำหนดไว้ หรือใช้วิธีตามมาตรฐานอื่นที่เทียบเท่า

(๒) การตรวจวัดค่าปริมาณพลวง สารหนู ทองแดง ตะกั่ว และสารปรอท ให้ใช้วิธี Determination of Metals Emissions from Stationary Sources ที่องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งประเทศสหรัฐอเมริกา (United States Environmental Protection Agency : U.S. EPA) กำหนดไว้ หรือใช้วิธีตามมาตรฐานอื่นที่เทียบเท่า

(๓) การตรวจวัดค่าปริมาณคลอรีน และไฮโดรเจนคลอไรด์ ให้ใช้วิธี Determination of Hydrogen Halide and Halogen Emissions from Stationary Sources Non-Isokinetic หรือวิธี Determination of Hydrogen Halide and Halogen Emissions from Stationary Sources Isokinetic ที่องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งประเทศสหรัฐอเมริกา (United States Environmental Protection Agency : U.S. EPA) กำหนดไว้ หรือใช้วิธีตามมาตรฐานอื่นที่เทียบเท่า

(๔) การตรวจวัดค่าปริมาณกรดกำมะถัน ให้ใช้วิธี Determination of Sulfuric Acid Mist and Sulfur Dioxide Emissions from Stationary Sources ที่องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งประเทศสหรัฐอเมริกา (United States Environmental Protection Agency : U.S. EPA) กำหนดไว้ หรือใช้วิธีตามมาตรฐานอื่นที่เทียบเท่า

(๕) การตรวจวัดค่าปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ ให้ใช้วิธี Determination of Hydrogen Sulfuric, Carbonyl Sulfide and Carbon Disulfide Emissions from Stationary Sources ที่องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งประเทศสหรัฐอเมริกา (United States Environmental Protection Agency : U.S. EPA) กำหนดไว้ หรือใช้วิธีตามมาตรฐานอื่นที่เทียบเท่า

(๖) การตรวจวัดค่าปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ ให้ใช้วิธี Determination of Carbon Monoxide Emissions from Stationary Sources ที่องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งประเทศสหรัฐอเมริกา (United States Environmental Protection Agency : U.S. EPA) กำหนดไว้หรือใช้วิธีตามมาตรฐานอื่นที่เทียบเท่า

(๗) การตรวจวัดค่าปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ให้ใช้วิธี Determination of Sulfur Dioxide Emissions from Stationary Sources หรือวิธี Determination of Sulfuric Acid Mist and Sulfur Dioxide Emissions from Stationary Sources ที่องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งประเทศสหรัฐอเมริกา (United States Environmental Protection Agency : U.S. EPA) กำหนดไว้ หรือใช้วิธีตามมาตรฐานอื่นที่เทียบเท่า

(๘) การตรวจวัดค่าปริมาณออกไซด์ของไนโตรเจนในรูปไนโตรเจนไดออกไซด์ ให้ใช้วิธี Determination of Nitrogen Oxide Emissions from Stationary Sources ที่องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งประเทศสหรัฐอเมริกา (United States Environmental Protection Agency : U.S. EPA) กำหนดไว้ หรือใช้วิธีตามมาตรฐานอื่นที่เทียบเท่า

(๙) การตรวจวัดค่าปริมาณไซลีน และครีซอล ให้ใช้วิธี Measurement of Gaseous Organic Compound Emissions by Gas Chromatography ที่องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งประเทศสหรัฐอเมริกา (United States Environmental Protection Agency : U.S. EPA) กำหนดไว้หรือใช้วิธีตามมาตรฐานอื่นที่เทียบเท่า

ข้อ ๖ การรายงานผลการตรวจวัดค่าปริมาณของสารเจือปนในอากาศ ให้รายงานผลดังต่อไปนี้

(๑) ในกรณีที่ไม่มีการเผาไหม้เชื้อเพลิง ให้คำนวณผลที่ความดัน ๑ บรรยากาศ หรือที่ ๗๖๐ มิลลิเมตรปรอท อุณหภูมิ ๒๕ องศาเซลเซียส ที่สภาวะแห้ง (Dry Basis) โดยมีปริมาตรออกซิเจนในอากาศเสียสภาวะจริงในขณะตรวจวัด

(๒) ในกรณีที่มีการเผาไหม้เชื้อเพลิง

(ก) ระบบปิดให้คำนวณผลที่ความดัน ๑ บรรยากาศ หรือที่ ๗๖๐ มิลลิเมตรปรอท อุณหภูมิ ๒๕ องศาเซลเซียส ที่สภาวะแห้ง (Dry Basis) โดยมีปริมาตรอากาศส่วนเกินในการเผาไหม้ (Excess Air) ร้อยละ ๕๐ หรือ มีปริมาตรออกซิเจนในอากาศเสีย ร้อยละ ๑

(ข) ระบบเปิดให้คำนวณผลที่ความดัน ๑ บรรยากาศ หรือที่ ๗๖๐ มิลลิเมตรปรอท อุณหภูมิ ๒๕ องศาเซลเซียส ที่สภาวะแห้ง (Dry Basis) โดยมีปริมาตรออกซิเจนในอากาศเสีย ณ สภาวะจริงขณะตรวจวัด

ข้อ ๗ ประกาศฉบับนี้ใช้บังคับสำหรับประเภทโรงงานใด ๆ ที่เป็นแหล่งกำเนิดสารเจือปนในอากาศที่ไม่ได้กำหนดค่าการระบายปริมาณสารเจือปนในอากาศไว้เป็นการเฉพาะ

ทั้งนี้ ให้ใช้บังคับตั้งแต่วันถัดจากวันประกาศในราชกิจจานุเบกษาเป็นต้นไป

ประกาศ ณ วันที่ ๓๑ ตุลาคม พ.ศ. ๒๕๕๕

โฆสิต ปั้นเปี่ยมรัษฎ์

รัฐมนตรีว่าการกระทรวงอุตสาหกรรม