การพัฒนาระบบทดสอบการสะสมของเถ้าลอยบนผนังแลกเปลี่ยนความร้อน สำหรับเตาเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผง

DEVELOPMENT OF ASH DEPOSITION TESTING SYSTEM ON HEAT EXCHANGER WALL OF PULVERIZED BIOMASS FURNACE

ฉัตรเฉลิม แก้วชมภู
ชนิกานต์ กาญจนวสะ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่งทางราง
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DEVELOPMENT OF ASH DEPOSITION TESTING SYSTEM ON HEAT EXCHANGER WALL OF PULVERIZED BIOMASS FURNACE

CHATCHALERM KAEWCHOMPOO
CHANIKANT KANJANAWASA

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN RAIL TRANSPORTATION ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2559
สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่งทางราง คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การพัฒนาระบบทดสอบการสะสมของเถ้าลอยบนผนังแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับเตาเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผง
DEVELOPMENT OF ASH DEPOSITION TESTING SYSTEM ON HEAT EXCHANGER WALL OF PULVERIZED BIOMASS FURNACE

ผู้จัดทำ

1. นาย ฉัตรเฉลิม แก้วชมภู รหัสประจำตัว 56010227
2. นางสาว ชนิกานต์ กาญจนวสะ รหัสประจำตัว 56010254

อาจารย์ที่ปรึกษา
(รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพัฒนาระบบทดสอบการสะสมของเถ้าลอยบนผนังแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับเตาเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผง

นาย ฉัตรเฉลิม แก้วชมภู 56010227
นางสาว ชนิกานต์ กาญจนวสะ 56010254
รศ.ดร จารุวัตร เจริญสุข อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2559

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบและการพัฒนาระบบทดสอบการสะสมของเถ้าลอยบนผนังแลกเปลี่ยนความร้อน สำหรับเตาเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงจากไม้ยางพารา โดยนำชุดทดสอบที่ออกแบบไว้ไปติดตั้งที่ห้องเผาไหม้เพื่อจำลองการเกาะของเถ้าลอยบนผิวแลกเปลี่ยนความร้อน จากนั้นนำข้อมูลมาวิเคราะห์อิทธิพลการสะสม เงื่อนไขการดำเนินงานที่เหมาะสม โดยทำการทดลองการเผาไหม้ที่ 300 กิโลวัตต์ความร้อน อากาศส่วนเกิน 15% โดยมีการใส่ใบบิด และ วัตถุขวางการไหล จากนั้นนำเถ้านักมาวิเคราะห์หาความสมบูรณ์ของการเผาไหม้ด้วยกระบวนการประมวลผลภาพ(Image processing) เพื่อนำค่าความเข้มสี (Intensity) มาช่วยในการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้ซึ่งสามารถนำไปพัฒนาการเผาไหม้ของเตาเผาและเอาไปใช้ในงานอุตสาหกรรม จากผลการศึกษาที่ได้พบว่าการเกาะของเถ้าบนผนังแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นการเกาะแบบแห้งมีอัตราการเกาะอยู่ในช่วง 140-178 g/m^{2}hr และค่าความเข้มแสงอยู่ในช่วง 97-129 ในส่วนของการหาความสมบูรณ์ของการเผาไหม้โดยใช้การประมวลผลภาพในเงื่อนไขของการใช้ Bluff body ให้ผลของการเผาไหม้ที่ดีที่สุด โดยมีคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) 454 ppm และมีค่าความเข้มสี 128.02 แต่จากผลของค่าความเข้มสีทำให้พบว่าการใช้การประมวลผลภาพสามารถบอกถึงแนวโน้มของการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ณ การเผาไหม้ที่อุณหภูมิต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGNING AND DEVELOPMENT OF ASH DEPOSITION TESTING SYSTEM ON HEAT EXCHANGER WALL OF PULVERIZED BIOMASS FURNACE

Chatchalerm Kaewchompoo 56010227
Chanikant Kanjanawasa 56010254
Assoc.Prof. Dr.Jarruwat Charoensuk Advisor
Year 2016

ABSTRACT

Ash deposition on heat exchanger wall for pulverized biomass furnace from rubber wood has been developed as a laboratory scale. The testing device has been installed in combustion chamber to simulate fouling deposition on heat exchanger wall. Then take bottom ash to analyze complete combustion by use image processing to find intensity for analyzing data that can use to develop combustion of furnace and in industry. From this study we found fouling deposition on heat exchanger wall is dry deposition which has deposition rate at 140-178 $g/m^2 \cdot hr$ and intensity in range 97-129. In complete combustion part by use image processing in install bluff body condition is the best condition of combustion. It has CO 454 ppm and intensity 128.02. But this intensity can predict trend of complete combustion in low temperature combustion.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดีด้วยคำแนะนำ ความกรุณา การถ่ายทอดความรู้และประสบการณ์ที่ดีจาก รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข ผู้จัดทำรู้สึกทราบซึ้งในความอนุเคราะห์และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงอีกทั้งขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ คณาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังและนักวิจัยประจำห้องปฏิบัติการทุกท่าน คำแนะนำที่ได้ให้คำปรึกษา คำแนะนำ คำติชมในการแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

การทำวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ ประสบความสำเร็จ ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

สุดท้ายนี้ขอกราบพระคุณบิดา มารดาและบุคคลในครอบครัวทุกท่านเป็นอย่างยิ่ง ที่เฝ้าเลี้ยงดูอบรมสั่งสอนและให้ทุนทรัพย์ในการศึกษา รวมทั้งเป็นกำลังใจในการแก้ไขอุปสรรคต่างๆเสมอมาและขอบพระคุณผู้ให้การสนับสนุนทุกท่านที่มิได้เอ่ยนามมา ณ ที่นี้ด้วย

ถ้าปราศจากบุคคลเหล่านี้ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้คงไม่สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้จัดทำขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน ขออำนาจคุณพระศรีรัตนตรัยอำนวยอวยพรความสุขสวัสดีจงมีแด่ท่าน

นาย ฉัตรเฉลิม แก้วชมภู
นางสาว ชนิกานต์ กาญจนวสะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ II

กิตติกรรมประกาศ III

สารบัญ IV

สารบัญตาราง IX

สารบัญรูป XI

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ XIV

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา 2

1.3 สมมติฐานของการศึกษา 2

1.4 ขอบเขตการวิจัย 2

1.5 ขั้นตอนการศึกษา 3

1.6 แผนการดำเนินงาน 3

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 4

1.8 ข้อจำกัดของการศึกษา 4

บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์ 6

2.1 วรรณกรรมปริทัศน์ 6

บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 9

3.1 ลักษณะทางกายภาพและพฤติกรรมการเกาะของเถ้า 9

3.2 การพาความร้อน 10

3.2.1 การพาความร้อนภายนอกท่อในแนวขวาง 11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.2 การพาความร้อนแบบบังคับภายในท่อ 12

3.2.2.1 พื้นฐานการวิเคราะห์ทางความร้อนของการพาความร้อน
แบบบังคับภายในท่อ 12

3.2.2.2 การพาความร้อนในรูปแบบอุณหภูมิที่ผิวคงที่ 12

3.2.3 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 14

3.2.3.1เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในทิศทางการไหลตั้งฉากกัน 14

3.2.3.2 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม 14

3.2.3.3 วิธีความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยแบบลอการิทึม 15

3.3 การแผ่รังสีของก๊าซ 16

3.3.1 การดูดกลืนทางปริมาตร 16

3.3.2 การปล่อยออกและการดูดกลืนของก๊าซ 17

3.4 การเผาไหม้ 21

3.4.1 ชนิดเชื้อเพลิง 21

3.4.1.1 เชื้อเพลิงแข็ง 21

3.4.1.2 เชื้อเพลิงชีวมวล 21

3.4.2 สภาวะปริมาณสัมพันธ์ของการเผาไหม้ 22

3.4.3 อุณหภูมิเปลวแบบอะเดียบาร์ติก 22

3.5 การรักษาเสถียรภาพเปลวไฟ 23

3.6 การประมวลผลภาพ 24

3.6.1 ฮีสโทแกรมของภาพ 25

3.7 การเลือกใช้อุปกรณ์ 26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.7.1 ปั๊มหอยโข่ง 26

3.7.1.1 รูปแบบการต่อปั๊ม 27

3.7.1.1.1 การต่อปั๊มแบบอนุกรม 27

3.7.1.1.2 การต่อปั๊มแบบขนาน 28

3.7.1.2 ความสูญเสียของเฮด 28

3.7.2 เครื่องกำจัดฟองอากาศ 30

3.7.3 ลักษณะการใช้งานของวาล์วแต่ละชนิด 30

3.7.3.1 วาล์วกันกลับ 30

3.7.3.1.1 สวิงเช็ควาล์ว 31

3.7.3.1.2 สปริงเช็ควาล์ว 31

3.7.3.2 วาล์วประตูน้ำชนิดโซลิตเวจ 32

3.7.3.3 โกลบวาล์ว 32

3.7.3.4 บอลวาล์ว 33

3.7.4 โรตามิเตอร์ 34

3.8 ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น 35

3.8.1 ค้อนน้ำ 35

3.8.2 ปรากฏการณ์การเกิดโพรงไอน้ำ 36

3.9 การทดสอบ 37

3.9.1 การทดสอบความดันตามมาตรฐาน ASME B31.1-2012 37

บทที่ 4 การคำนวณ และออกแบบชุดทดสอบ 38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.1 การออกแบบระบบทดสอบการสะสมของเถ้าลอยบนผนัง
ท่อแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลผง 38
4.1.1 แนวคิดในการออกแบบ 38
4.2 สมการการเผาไหม้ 39
4.2.1 สมการเผาไหม้สำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลผง 40
4.2.1.1 ณ สภาพนำส่ง (ความชื้น 5.81%) 41
4.3 โปรแกรมการคำนวณการถ่ายเทความร้อนโดยใช้ MATLAB
และผลการคำนวณโดยใช้โปรแกรม 42
4.4 อุณหภูมิเปลวในสภาวะที่ไม่มีการสูญเสียความร้อน 49
4.5 การแผ่รังสี 50
4.6 เฮดของปั๊มอนุกรมและการสูญเสียของเฮด 51
4.6.1การสูญของอุปกรณ์หลัก 51
4.6.2 การสูญเสียหลัก 52
4.6.3 การสูญเสียรอง 53
4.7 โปรแกรมประมวลผลภาพและผลจากการประมวลผลภาพ 54
บทที่ 5 อุปกรณ์ เงื่อนไขและวิธีการทดลอง 56
5.1 การสร้างอุปกรณ์ทดสอบการสะสมของเถ้าลอยบนผนังแลกเปลี่ยนความร้อน 56
5.1.1 ชิ้นงานทดสอบการสะสมของเถ้าลอยบนพื้นผิวอุปกรณ์ 55
5.2 อุปกรณ์ภายในระบบ 59
5.2.1 เครื่องแยกอากาศ 59
5.2.2 หม้อน้ำ 59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.2.3 พัดลมหม้อน้ำ 61

5.2.4 โรตามิเตอร์ 62

5.2.5 ปั๊มน้ำอัตโนมัติ 63

5.2.6 ปั๊มหอยโข่ง 63

5.2.7 เครื่องบันทึกอุณหภูมิ 64

5.2.8 เทอร์โมคัปเปิลชนิด K 64

5.2.9 วาล์วปรับอัตราการไหลอากาศ 65

5.2.10 ถังพักเชื้อเพลิงชีวมวลผงและสกรูลำเลียงเชื้อเพลิง 65

5.3 เงื่อนไขและการทดลอง 66

5.3.1 เงื่อนไขการทดลอง 66

5.3.2 วิธีการทดลอง 66

บทที่ 6 ผลการทดลอง และอภิปรายผลการทดลอง 67

6.1 สัดส่วนของเถ้าที่เกิดขึ้นในการทดลอง 67

6.2 อัตราการสะสมของเถ้าลอยบนพื้นผิวอุปกรณ์ 69

6.3 การอ้างอิงเถ้าที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้โดยใช้วิธีการประมวลผลภาพ 71

6.4 เถ้าหนักที่เกิดขึ้น 72

บทที่ 7 สรุปและขอเสนอแนะ 72

7.1 บทสรุป 73

7.2 ข้อเสนอแนะ 74

ภาคผนวก 75

ภาคผนวก ก.แบบอุปกรณ์ทดสอบ 76

ภาคผนวก ข.ตารางผลการทดลอง 77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

1.1 แสดงแผนการดำเนินงาน 3

3.1 สมการนัสเซลนัมเบอร์ของรูปทรงต่างๆ 11

3.2 ความยาวรังสีเฉลี่ย (Le) สำหรับรูปร่างของก๊าซต่างๆ 18

3.3 แสดงสัมประสิทธิ์ของการสูญเสียในอุปกรณ์ฟิตติ้งของท่อ 29

4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิงผงไม้ยางพารา 40

4.2 คุณสมบัติของไอเสีย 41

4.3 แสดงผลที่ได้จากโปรแกรมคำนวณโดยใช้ MATLAB 48

4.4 แสดงข้อมูลของการแผ่รังสีจากแก๊สร้อน 50

4.5 แสดงข้อมูลของเตาเผา 50

4.6 แสดงข้อมูลที่ได้จากการคำนวณ 50

4.7 แสดงข้อมูลที่ได้จากกราฟ 50

4.8 แสดงความดันและการสูญเสียของเฮดจากอุปกรณ์หลักภายในระบบ 51

4.9 แสดงการสูญเสียรองของอุปกรณ์ภายในระบบ 53

5.1 แสดงเงื่อนไขของการทดลอง 66

6.1 แสดงสัดส่วนเถ้าที่เกิดขึ้นในการทดลอง 67

6.2 แสดงอัตราการสะสมของเถ้าลอยบนพื้นผิวอุปกรณ์ในการทดลองแต่ละครั้ง 69

6.3 แสดงตัวอย่างเถ้าที่อ้างอิงการเผาไหม้สมบูรณ์และไม่สมบูรณ์กับความเข้มสี 71

6.4 แสดงความเข้มสีของเถ้าหนักในการทดลองแต่ละเงื่อนไข 72

ข.1 แสดงตารางบันทึกผลการทดลอง วันที่ 30 มกราคม 2560 80

ข.2 แสดงตารางบันทึกผลการทดลอง วันที่ 15 กุมภาพันธ์ 2560 81

ข.3 แสดงตารางบันทึกผลการทดลอง วันที่ 15 มีนาคม 2560 82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

ข.4 แสดงตารางบันทึกผลการทดลอง วันที่ 22 มีนาคม 2560 83

ข.5 แสดงตารางบันทึกผลการทดลอง วันที่ 31 มีนาคม 2560 84

ข.6 แสดงอัตราการป้อนเชื้อเพลิง ณ วันที่ 30 มกราคม 2560 85

ข.7 แสดงอัตราการป้อนเชื้อเพลิง ณ วันที่ 15 กุมภาพันธ์ 2560 86

ข.8 แสดงอัตราการป้อนเชื้อเพลิง ณ วันที่ 15 มีนาคม 2560 87

ข.9 แสดงอัตราการป้อนเชื้อเพลิง ณ วันที่ 22 มีนาคม 2560 88

ข.10 แสดงอัตราการป้อนเชื้อเพลิง ณ วันที่ 31 มีนาคม 2560 89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

1.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย 5

3.1 กลไกในการเกิดเถ้าของเชื้อเพลิงชีวมวล 10

3.2 สมการนัสเซลนัมเบอร์ของรูปทรงต่างๆ 11

3.3 กราฟแสดงแฟคเตอร์ปรับแก้ของ Single pass cross-flow
with one fluid mixed and the other unmixed 15

3.4 ค่าการปล่อยออกของไอน้ำในผสมของก๊าซที่ไม่แผ่รังสี
ที่ความดันรวม 1 atm รูปครึ่งทรงกลม 18

3.5 ตัวประกอบแก้ไขสำหรับค่าการปล่อยออกของไอน้ำที่ความดันอื่นๆ ที่ไม่ใช่ 1 atm 19

3.6 ค่าการปล่อยออกของ CO2 ในของผสมก๊าซที่ไม่แผ่รังสี
ที่ความดันรวม 1 atm รูปครึ่งทรงกลม 19

3.7 ตัวประกอบแก้ไขสำหรับค่าการปล่อยออกของ CO2
ที่ความดันนอกเหนือจาก 1 atm 20

3.8 ตัวประกอบแก้ไขสำหรับของผสมไอน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ 20

3.9 แสดงเสถียรภาพของเปลวไฟจากการไหลหมุนวน 23

3.10 แสดงกระบวนการประมวลผลภาพโดยใช้วิธีวิเคราะห์ภาพสีเทา 25

3.11 แสดงการเดินเครื่องอนุกรมปั๊ม 27

3.12 แสดงการเดินขนานปั๊ม 28

3.13 แสดงลักษณะการไหลของน้ำภายในสวิงเช็ควาล์ว 31

3.14 แสดงลักษณะการไหลของน้ำภายในสปริงเช็ควาล์ว 31

3.15 แสดงลักษณะการไหลของน้ำภายในวาล์วประตูน้ำชนิดโซลิตเวจ 32

3.16 แสดงลักษณะการไหลของน้ำภายในโกลบวาล์ว 32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.17 แสดงลักษณะการไหลของน้ำภายในบอลวาล์ว 33
3.18 หลักการทำงานของลูกลอยในโรตามิเตอร์ 34
3.19 แสดงการเกิดปรากฏการณ์ค้อนน้ำ 35
3.20 หลักการทำงานของหม้อลมที่ติดตั้งกับไดอะแฟรมปั๊ม 36
3.21 กราฟแสดงอัตราการไหลของปั๊มไดอะแฟรม 36
4.1 แสดงอุปกรณ์ทดสอบการสะสมของเถ้าลอยบนผนังท่อแลกเปลี่ยนความร้อน
สำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลผง 38
4.2 แสดงการป้อนน้ำเข้า-ออกอุปกรณ์ทดสอบ 39
4.3 แสดงการป้อนน้ำเข้าระบบทดสอบ 39
4.4 แสดง flow chart การคำนวณอัตราการไหลของน้ำ 42
4.5 แสดงภาพสีจากโปรแกรม 54
4.6 แสดงภาพGray scaleจากโปรแกรม 54
4.7 แสดงภาพพิกเซลGray scaleจากโปรแกรม 55
4.8 แสดงกราฟฮิสโทแกรมที่ได้จากโปรแกรม 55
5.1 อุปกรณ์ทดสอบการสะสมของเถ้าลอยบนผนังแลกเปลี่ยนความร้อน 57
5.2 แสดงProcess and instrumentation diagram 57
5.3 แสดงทิศทางการไหลของน้ำภายในชิ้นงานทดสอบ 57
5.4 แสดงตำแหน่งที่ติดตั้งชิ้นงานทดสอบในห้องเผาไหม้ 58
5.5 แสดงตำแหน่งของชิ้นงานทดสอบภายในห้องเผาไหม้ 58
5.6 แสดงเครื่องแยกอากาศ 59
5.7 แสดงกลไกการทำงานของหม้อน้ำ 60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.8 แสดงหม้อน้ำที่ใช้ในระบบ 60

5.9 แสดงกลไกการทำงานของสปริงรับแรงดัน 61

5.10 แสดงขั้วไฟฟ้าที่ต่อกับพัดลมหม้อน้ำ 61

5.11 แสดงโรตามิเตอร์วัดอัตราการไหลของน้ำ 62

5.12 แสดงตำแหน่งที่ติดตั้งโรตามิเตอร์ 62

5.13 แสดงปั๊มน้ำอัตโนมัติ Mitsubishi – 105QS 63

5.14 แสดงปั๊มหอยโข่ง Aqua CPM-158 63

5.15 แสดงเครื่องบันทึกอุณหภูมิ Data logger GRAPHTEC midi LOGGER GL820 64

5.16 แสดงหัวโพรบของเทอร์โมคัปเปิลชนิด K 64

5.17 แสดงวาล์วปรับอัตราการไหลอากาศ 65

5.18 แสดงถังพักเชื้อเพลิงชีวมวลผง และสกรูลำเลียงเชื้อเพลิง 65

6.1 แสดงองค์ประกอบภายในเถ้าของการทดลอง Test No.1
Bluff body and non-second swirler 67

6.2 แสดงองค์ประกอบภายในเถ้าของการทดลอง Test No.2
Bluff body with second swirler 68

6.3 แสดงองค์ประกอบภายในเถ้าของการทดลอง Test No.3
Bluff body and non-second swirler 68

6.4 แสดงองค์ประกอบภายในเถ้าของการทดลอง Test No.4
Bluff body and non-second swirler 68

6.5 แสดงองค์ประกอบภายในเถ้าของการทดลอง Test No.5
Non Bluff body and non-second swirler 69

6.6 แสดงอัตราการสะสมของเถ้าลอยบนพื้นผิวอุปกรณ์ในการทดลองแต่ละครั้ง ($g/m^2 \cdot hr$) 70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

Roman Symbols

a_λ	สัมประสิทธิ์ของการดูดกลืน (1/m)
A	พื้นที่ (m^2)
A_α	พื้นที่หน้าตัดแหวนระหว่างท่อและทุ่นซึ่งแปรผันตามระดับความสูง (m^2)
A_f	พื้นที่หน้าตัดของทุ่น (m^2)
A_s	พื้นที่ผิว (m^2)
(A/F)	อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง
$(A/F)_{stoich}$	อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่สภาวะเผาไหม้พอดี
C_c	ตัวประกอบแก้ไขความดันของคาร์บอนไดออกไซด์
C_d	ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงต้าน
C_p	ค่าความร้อนจำเพาะ (kJ/kg•K)
C_w	ตัวประกอบแก้ไขความดันของน้ำ
D	เส้นผ่านศูนย์กลาง (m)
E_g	การปล่อยออกรังสีจากก๊าซต่อหน่วยพื้นที่(W/m^2)
$\dot{E}_{in}$	พลังงานที่ทางเข้า (kJ)
$\dot{E}_{out}$	พลังงานที่ทางออก (kJ)
f	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน
F	แรง (N)
F_B	แรงลอยตัว (N)
F_D	แรงต้านการไหล (N)
F_G	แรงโน้มถ่วงของโลก (N)
F_y	แรงในทิศทางแกน y (N)
H	เฮด (m)
h	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (W/m^2•K)
h_l	การสูญเสียเฮดรอง (m)
h_m	การสูญเสียเฮดหลัก (m)
$\bar{h}$	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย (W/m^2•K)
$\bar{h}_L$	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยตามความยาว (W/m^2•K)
I_λ	ค่าความเข้มของลำแสง (W/m^2)
k	สัมประสิทธิ์การสูญเสีย
K_R	ค่าคงที่ของมิเตอร์
L	ความหนา (m)
L_e	ความยาวรังสีเฉลี่ย (m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อและสัญลักษณ์(ต่อ)

m_{air}	มวลของอากาศ (kg)
m_{fuel}	มวลของเชื้อเพลิง (kg)
$\dot{m}$	อัตราการไหลเชิงมวล (kg/s)
Nu	ค่านัสเซลนัมเบอร์
P_c	ความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ (atm)
P_L	ความดันลด (Pa)
P_{out}	ความดันทางออก (Pa)
P_w	ความดันของน้ำ (atm)
P_x	ความดัน ณ ตำแหน่งใดๆ (Pa)
Pr	เลขพรันด์เทิล
q"	ฟลักซ์ความร้อน ณ จุดใดๆบนพื้นผิว (W/m^2)
q_{conv}	ฟลักซ์ความร้อนจากการพาความร้อน (W/m^2)
q_{net}	ฟลักซ์ความร้อนสุทธิ (W/m^2)
Q	อัตราไหล (m^3/s)
$\dot{Q}$	อัตราการถ่ายเทความร้อน (kW)
Re	ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์
Re_D	ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของการไหลภายนอกท่อ
T_g	อุณหภูมิแก๊ส (°C หรือ K)
T_m	อุณหภูมิเฉลี่ย (°C หรือ K)
$T_{m,i}$	อุณหภูมิเฉลี่ยทางเข้า (°C หรือ K)
$T_{m,o}$	อุณหภูมิเฉลี่ยทางทางออก (°C หรือ K)
T_s	อุณหภูมิพื้นผิว (°C หรือ K)
T_∞	อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (°C หรือ K)
ΔT_i	ผลต่างของอุณหภูมิทางเข้า (°C หรือ K)
ΔT_{lm}	อุณหภูมิเฉลี่ยแบบลอการิทึม (°C หรือ K)
ΔT_o	ผลต่างของอุณหภูมิทางออก (°C หรือ K)
ΔT_s	ผลต่างของอุณหภูมิผิวกับสิ่งแวดล้อม (°C หรือ K)
U	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม
V	ความเร็ว (m/s)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อและสัญลักษณ์(ต่อ)

Greek symbols

ϕ	อัตราส่วนสมมูล
α_c	ค่าการดูดกลืนแสงของคาร์บอนไดออกไซด์
α_g	ค่าการดูดกลืนแสงของแก๊ส
α_w	ค่าการดูดกลืนแสงของน้ำ
α_λ	ค่าการดูดกลืนแสงของความยาวคลื่น
$\Delta\alpha$	ค่าการดูดกลืนแสง
ε_c	ค่าปล่อยออกคาร์บอนไดออกไซด์
ε_g	ค่าการปล่อยออกก๊าซทั้งหมด
ε_w	ค่าปล่อยออกไอน้ำทั้งหมด
ε_λ	ค่าปล่อยออกของความยาวคลื่นทั้งหมด
$\Delta\varepsilon$	ตัวประกอบแก้ไข
ρ	ค่าความหนาแน่น (kg/m^3)
ρ_{float}	ค่าความหนาแน่นของลูกลอย (kg/m^3)
ρ_{fluid}	ค่าความหนาแน่นของของไหล (kg/m^3)
μ	ค่าความหนืด ($kg/m \cdot s$)
μ_{fluid}	ค่าความหนืดของของไหล ($kg/m \cdot s$)
τ_λ	ค่าสเปกตรัมการส่งผ่าน
ν	น้ำหนักจำเพาะของสาร (N/m^3)
γ	น้ำหนักจำเพาะของน้ำ (N/m^3)
$\forall$	ปริมาตรของทุ่น (m^3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของการศึกษาการสะสมของเถ้าลอยบนผนังท่อแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับเตาเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผง ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษาสมมติฐานของการศึกษา ขอบเขตการวิจัย ขั้นตอนของการศึกษา แผนการดำเนินงาน ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ ข้อตกลงเบื้องต้น ข้อจำกัดของการศึกษาและคำจำกัดความที่ใช้ในการศึกษา

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันราคาเชื้อเพลิงฟอสซิลมีการปรับตัวสูงขึ้นเนื่องมาจากความผันผวนของปริมาณผลผลิตซึ่งมีทิศทางสวนกับความต้องการของตลาดโลกและปัญหาทางการเมืองในบางประเทศ ส่งผลกระทบต่อภาคอุตสาหกรรมที่ต้องแบกรับภาระต้นทุนที่สูงขึ้น ทำให้ภาคอุตสาหกรรมได้มีการปรับตัวเพื่อความอยู่รอดของธุรกิจโดยลดการนำเข้าเชื้อเพลิงและหันมาใช้พลังงานทางเลือกจากชีวมวลที่สามารถหาได้ในประเทศเช่น แกลบ ฟาง ไม้ยางพารา เป็นต้น ถึงกระนั้นก็ยังเกิดปัญหาในระหว่างกระบวนการนำพลังงานจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลไปใช้ ไม่ว่าจะเป็นเถ้าลอย (Fly ash) ที่ลอยออกไปสร้างผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและยังไปรวมกับสแลคที่เป็นองค์ประกอบของเชื้อเพลิงที่เกิดจากการเผาไหม้โดยไปเกาะบริเวณเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) ซึ่งส่งผลกระทบต่อการแลกเปลี่ยนความร้อน ไอร้อนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเผาไหม้มีส่วนประกอบของสารอนินทรีย์ซึ่งก็คือ Cl(g) และH(g) ที่ทำปฏิกิริยาทางเคมีได้เป็นไอกรด HCl (g) นำไปสู่ปัญหาการกัดกร่อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทำให้ต้องหยุดการทำงานเพื่อซ่อมบำรุงและส่งผลต่อภาระค่าใช้จ่ายที่สูงขึ้น

ดังนั้นการศึกษาครั้งนี้ได้ให้ความสนใจในเรื่องของการสะสมของเถ้าลอยบนผนังท่อแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับเตาเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงแบบมีห้องเผาไหม้ช่วยซึ่งเหมาะกับเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำ (Low Calorific Value) สำหรับประยุกต์ใช้กับหม้อน้ำชนิดท่อไฟวางแนวนอน โดยห้องเผาไหม้ช่วยมีหน้าที่รักษาเสถียรภาพของเปลวไฟ ชดเชยเวลาในการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้และรักษาระยะฐานของเปลวไฟ อีกทั้งยังสนใจในเรื่องของการวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนที่หลงเหลือจากการเผาไหม้ตามเงื่อนไขต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบทดสอบการสะสมของเถ้าลอยบนผนังท่อแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับเตาเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผง
2. เพื่อศึกษาอัตราการสะสมและลักษณะการเกาะตัวของเถ้าลอยบนพื้นผิวของอุปกรณ์
3. เพื่อเปรียบเทียบความสมบูรณ์ของการเผาไหม้ในการทดลองแต่ละครั้งโดยศึกษาได้จากปริมาณและสีของเถ้าหนัก
4. เพื่อหาอิทธิพลที่ส่งผลต่ออัตราการสะสมของเถ้าลอยบนอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

1. การเกาะตัวของเถ้าลอยบนพื้นผิวอุปกรณ์เป็นไปตามลักษณะของการไหลภายนอกท่อ
2. สีของเถ้าหนักที่เกิดขึ้นจะมีสีดำเมื่อมีปริมาณคาร์บอนสูงและมีสีขาวเมื่อมีปริมาณคาร์บอนต่ำ

1.4 ขอบเขตการวิจัย

1. ออกแบบและพัฒนาระบบทดสอบการสะสมของเถ้าลอยบนผนังท่อแลกเปลี่ยนความร้อนให้ปลอดภัยและมีความเหมาะสมสำหรับเตาเผาเชื้อเพลิงชีวมวลเพื่อผลิตความร้อนขนาด 300 กิโลวัตร (kW)
2. ใช้เชื้อเพลิงแก๊สธรรมชาติชนิดเหลว (LPG) และชีวมวลผงจากขี้เลื่อยไม้ยางพาราเป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้
3. ควบคุมอุณหภูมิของน้ำที่ออกจากอุปกรณ์ทดสอบให้มีค่าไม่เกิน 73 องศาเซลเซียส (°C) เพื่อความปลอดภัยในการทดลอง
4. ผลรวมน้ำหนักของเถ้าหนัก เถ้าลอยและเถ้าลอยที่พื้นผิวของอุปกรณ์ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ชีวมวลอัดแท่งจากขี้เลื่อยไม้ยางพาราต้องมีค่าไม่เกินร้อยละ 2.28 ของเชื้อเพลิงที่ใช้
5. การถ่ายเทความร้อนภายในอุปกรณ์ทดสอบจะไม่คิดผลของความต้านทานที่เกิดขึ้นจากตะกรันบนผนังท่อด้านใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

1. กำหนดหัวข้อ วัตถุประสงค์และขอบเขตของการศึกษา
2. สำรวจและหาข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเกาะของเถ้าลอยบนผิวแลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน หม้อต้มและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง
3. ศึกษาทฤษฎีการเผาไหม้ หลักการทำงานของเตาเผาเชื้อเพลิงชีวมวล การทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลในห้องปฏิบัติการเผาไหม้ ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน หลักการคำนวณในการออกแบบส่วนต่างๆ เครื่องมือวัดและระบบจัดเก็บข้อมูล การเกิดเถ้าของเชื้อเพลิงชีวมวล การเลือกใช้อุปกรณ์ภายในระบบ ลักษณะการเกาะของเถ้าลอยบนพื้นผิวอุปกรณ์ การวิเคราะห์ตามมาตรฐาน
4. ออกแบบระบบทดสอบการสะสมของเถ้าลอยบนผนังท่อแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับเตาเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงและสร้างอุปกรณ์ทดสอบให้สอดคล้องกับเงื่อนไขของการทดลองและเหมาะสมกับพื้นที่ภายในห้องเผาไหม้
5. ทำการตรวจสอบและปรับปรุงข้อผิดพลาดของระบบทดสอบการสะสมของเถ้าลอยบนผนังท่อแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับเตาเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงเพื่อให้มีความปลอดภัย
6. ดำเนินการร่วมกับทีมปรับปรุงระบบลำเลียงเชื้อเพลิง บำบัดไอเสียและระบบควบคุม เพื่อทำการทดลองและเก็บผลการทดลอง
7. วิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุง พร้อมทั้งสรุปผลการพัฒนาระบบทดสอบการสะสมของเถ้าลอยบนผนังท่อแลกเปลี่ยนสำหรับเตาเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผง

1.6 แผนการดำเนินงาน (Gantt's Chart)

ตารางที่ 1.1 แสดงแผนการดำเนินงาน

กิจกรรม	ภาคการเรียนที่ 1 /2559				ภาคการเรียนที่ 2/2559			
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
สำรวจทฤษฎีของการสะสม fly ash&bottom ash								
หาวิธีการเก็บค่า Ash deposition rate								
ออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของเงื่อนไขของการเดินเครื่องต่ออัตราการสะสม								
ออกแบบและสร้างชุดการทดลอง								
สอบเทียบเครื่องมือวัด								
ปรับปรุงและพัฒนาชุดการทดลอง								
เก็บผลการทดลอง								
สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

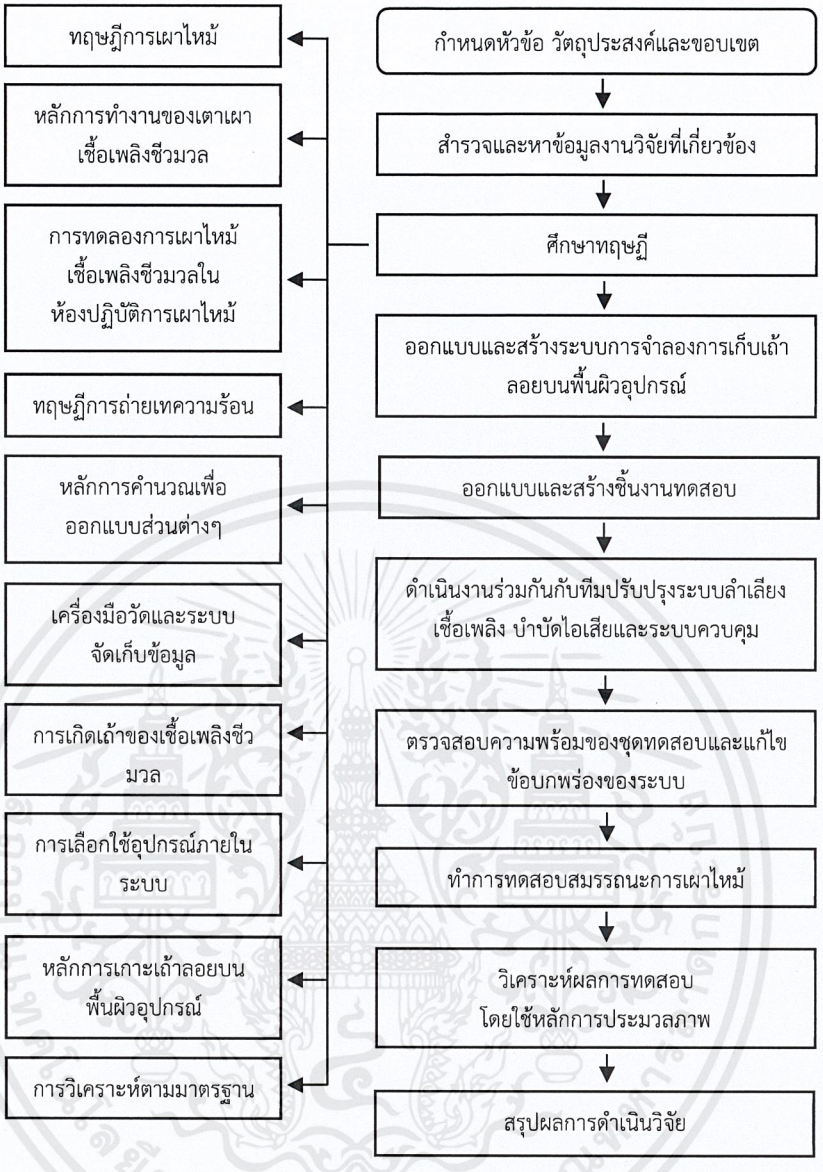
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ระบบทดสอบการสะสมของเถ้าลอยบนผนังท่อน้ำสำหรับเตาเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงแบบมีห้องเผาไหม้ช่วยเพื่อผลิตความร้อนขนาด 300 กิโลวัตร
2. ได้ทราบถึงอิทธิผลของเงื่อนไขการทดลองที่ส่งผลต่อสีของเถ้าหนักภายในห้องเผาไหม้
3. ได้ทราบถึงอิทธิผลของเงื่อนไขการทดลองที่ส่งผลต่อลักษณะการเกาะตัวของเถ้าลอยบนพื้นผิวอุปกรณ์

1.8 คำจำกัดความที่ใช้ในการศึกษา

1. เถ้าหนัก คือ เถ้าที่มีขนาดใหญ่ มวลหนักเมื่อเชื้อเพลิงเผาไหม้จนกลายเป็นเถ้าและจะตกกองอยู่บริเวณก้นเตา
2. เถ้าลอย คือ เถ้าที่มีขนาดเล็กและมีน้ำหนักเบา เมื่อเผาไหม้จะลอยออกไปสู่สิ่งแวดล้อมภายนอก ก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศ
3. สแลค คือ เถ้าลอยที่มีลักษณะเป็นของเหลวเหนียวไหลเยิ้มมาเกาะบนชิ้นงาน
4. ฟาล์วลิง คือ เถ้าลอยที่มีลักษณะแห้งเกาะบริเวณพื้นผิวของอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
วรรณกรรมปริทัศน์

2.1 วรรณกรรมปริทัศน์

จากบทที่หนึ่งทำให้เราได้ทราบถึงงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่มุ่งเน้นให้เห็นถึงความสำคัญของการศึกษาเถ้าลอยและฟาล์วลิงที่เกิดขึ้นกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและหม้อต้ม รวมไปถึงการออกแบบและพัฒนาระบบการจำลองการแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) ภายในเตาเผาให้มีความเหมาะสมกับพื้นที่และข้อจำกัดต่างๆในการติดตั้งชิ้นงานทดสอบภายในเตาเผา นอกจากนี้ยังมุ่งเน้นที่จะศึกษาให้ทราบถึงอิทธิพลของเงื่อนไขต่างๆที่ส่งผลต่ออัตราการสะสมของเถ้าลอยบนพื้นผิวอุปกรณ์ ซึ่งในการออกแบบอุปกรณ์ทดสอบนั้นจำเป็นต้องทำการศึกษาถึงหลักการทำงานของปั๊มหม้อน้ำรถยนต์ ข้อจำกัดของพื้นที่ในการติดตั้งอุปกรณ์รวมไปถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง จากปัญหาเถ้าลอยและฟาล์วลิงที่เกิดขึ้นนี้ทำให้นักวิจัยด้านพลังงานทดแทนหันมาสนใจในการเกาะของเถ้าลอยและฟาล์วลิงที่เกิดขึ้นจากเชื้อเพลิงชีวมวล ซึ่งทางผู้ศึกษาต้องศึกษางานวิจัยที่มีผู้ทำมาก่อน เพื่อให้ทราบถึงแนวคิด สมบัติ และปัจจัยต่างๆที่อาจส่งผลกระทบต่ออัตราการสะสมของเถ้าลอยบนพื้นผิวอุปกรณ์ นอกจากนี้ยังเป็นการป้องกันการละเมิดสิทธิบัตรของผู้วิจัยท่านอื่น ซึ่งจากอดีตจนถึงปัจจุบันนั้นมีนักวิจัยทั้งใน และต่างประเทศได้ศึกษาในหัวข้อที่เกี่ยวข้องกับเรื่องที่ผู้วิจัยกำลังศึกษามากมาย อาทิ เช่น

Jan Sandberg. [1] ได้ศึกษาเกี่ยวกับ Fouling in Biomass Fired Boiler กล่าวว่า ชีวมวลจะมีโลหะ อัลคาไลน์สูงกว่าเชื้อเพลิงฟอสซิล โลหะอัลคาไลน์ที่กล่าวมานั้นคือ โพแทสเซียม (K) และโซเดียม (Na) โดยจะรวมตัวกันที่อุณหภูมิต่ำในรูปของฟาล์วลิงที่บริเวณผิวที่เย็นเป็นชั้นๆ เกิดจากการหลอมเหลวขณะเผาไหม้แล้วลอยไปเกาะบริเวณผิวที่เย็นและเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็ง ส่งผลต่อประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อน

Blas Melissari. [2] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับ Ash related Problems with High Alkali Biomass and Its Mitigation Experimental Evaluation อธิบายเพิ่มเติมว่า พืชที่มีโลหะอัลคาไลน์ได้สร้างปัญหาให้กับหม้อต้มโดยโลหะอัลคาไลน์ที่กล่าวมานั้นมักพบในรูปเกลือยูเทคติค ทำให้ลดจุดละลายของเถ้าจนเกิดเป็นสแลคที่ท่อไอน้ำและอาจเกิดการกัดกร่อนขึ้นได้ โดยในการศึกษาจะใช้เชื้อเพลิงไม้อัดเม็ด โดยนำมาใช้ผสมกับถ่านหินเพื่อลดปริมาณเถ้า จากนั้นจะนำเถ้ามาทำการวิเคราะห์โดยใช้วิธีตาม German Institute for Standardization (DIN) Bubbling Fluidised Bed Combustion (BFBC)

L.J.R. Nunes. [3] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับ Biomass Combustion Systems : A Review on the Physical and Chemical Properties of the Ash อธิบายเพิ่มเติมว่า คลอรีน (Cl) ที่เป็นองค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวมวล ทำให้เกิดการกัดกร่อนที่หม้อต้มหรืออุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนโดยรวมตัวจากปฏิกิริยาทางเคมีของเกลือและจับตัวกันในรูปของโครงสร้างคาร์บอน พวกโลหะและออกไซด์ของโลหะระเหยที่อุณหภูมิสูงจะแข็งตัวบริเวณจุดที่มีอุณหภูมิต่ำในรูปของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เรียกว่าเถ้าลอย ซึ่งแบ่งตามขนาด โดยขนาดของเถ้าละเอียด (Fine Ash) มีขนาดเล็กกว่า 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไมโครเมตร เถ้าหยาบ (Coarse Ash) มีขนาดใหญ่กว่า 1 ไมโครเมตรและเถ้าขนาดใหญ่ (Grate Ash) ซึ่งมีลักษณะเป็นโครงข่าย(Grid) ขนาดใหญ่มากกว่า 10 ไมโครเมตร) นอกจากนั้นยังนำเถ้าที่ได้ไปทดสอบเพื่อดูองค์ประกอบภายในของเถ้าและรูปแบบของการจับตัวโดยใช้เครื่องวิเคราะห์ชนิดและปริมาณธาตุโดยหลักการคายแสงของธาตุ ด้วยการกระตุ้นจากพลาสมา (Inductively Coupled Plasma - Atomic Emission Spectrometry, (ICP-AES), รังสีเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray Fluorescence, XRF), การวิเคราะห์องค์ประกอบสารด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์(X-ray Diffraction, XRD), กล้องจุลทรรศน์อิเล็คตอนแบบส่องกราดและเอกซเรย์สเปคโตรสโคปีแบบกระจายพลังงาน(Scanning Electron Microscopy (SEM) with Energy Dispersive/ X-ray Spectrometry (EDX)), เครื่องไอออนโครมาโทกราฟ(Ion Chromatography, IC)

Yuanyuan Shao et al. [4] ได้ศึกษาเกี่ยวกับ Ash Deposition in Biomass Combustion or Co-Firing for Power/ Heat Generation ได้กล่าวว่าชีวมวลมีการสะสมของเถ้าที่กัดกร่อนมากกว่าถ่านหิน อิทธิพลของลักษณะชีวมวลบนการสะสมของเถ้าจากการเผาไหม้ขึ้นอยู่กับชนิดของเชื้อเพลิง โดยเชื้อเพลิงชีวมวลจะมีความต่างจากเชื้อเพลิงฟอสซิล (Fossil) เช่น ความชื้น พลังงาน เถ้า และโลหะอัลคาไลน์ โดยพวกพืชล้มลุกจะมีคลอไรด์สูง นอกจากนี้พืชที่มีองค์ประกอบภายในที่ประกอบด้วยน้ำเป็นส่วนมากจะส่งผลให้เถ้าที่เกิดขึ้นจะปริมาณที่มากกว่าปกติ องค์ประกอบภายในที่เป็นสารที่ระเหยง่ายจะไปควบแน่นที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยเหตุที่ว่าจุดหลอมเหลว (Melting Point) ของสารประกอบคลอไรด์ (Chrolide) ต่ำกว่า 700 องศาเซลเซียส ผลกระทบจากเถ้าที่พบได้แก่ การลดประสิทธิภาพของเตาเผา สร้างความเสียหายให้อุปกรณ์ สร้างปัญหาในการซ่อมบำรุง โดยการติดตามการสะสมของเถ้าและวิเคราะห์จากการทดลองที่ใช้อากาศเย็นเพื่อจำลองท่อไอน้ำ หรือ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ควบคุมท่อให้มีอุณหภูมิ 430-600 องศาเซลเซียส โดยใช้การปรับอัตราการไหลของอากาศและนำผลมาวิเคราะห์โดยเครื่องวิเคราะห์ชนิดและปริมาณธาตุที่พบในเถ้า

N. Hare, M.G. Rasul AND S. Moazzem. [5] ได้ในเรื่อง A Review on Boiler Deposition/Foulage Prevention and Removal Techniques for Power Plant โดยใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง กล่าวว่าในการใช้งานหม้อต้มนั้น เราไม่ต้องการให้เกิดสแลคและฟาล์วลิงแต่ผลกระทบของถ่านหินที่พบนั้นทำให้เกิดการเกาะของสารเหนียวและแข็งตัวที่หม้อต้มเป็นผลมาจากความแตกต่างของแร่ธาตุ แร่ธาตุจะเปลี่ยนรูปไปเป็นเถ้าและสแลค ซึ่ง สแลคคือของเหลวหนืดแข็งตัวที่อุณหภูมิต่ำโดยไปเกาะที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อน ส่งผลโดยตรงต่อกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ลดลง

Rudolf Riedl et al. [6] ได้ศึกษาเกี่ยวกับ Corrosion in Fire Tube Boilers of Biomass Combustion Plants มีการอธิบายเพิ่มเติมว่า เชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้ในออสเตรียเป็นพืชจำพวกไม้ ขี้เลื่อย และฟาง จะพบว่ามีปริมาณคลอไรด์และซัลเฟอร์ (S) ต่ำและเกิดการกัดกร่อนทำให้หม้อต้มรั่ว การเกาะของอนุภาคเถ้าบนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทำให้ประสิทธิภาพลดลงและการกัดกร่อนของเถ้าบนท่อ เถ้าที่เหนียวจะรวมตัวกับแก๊สทำให้เกิดแรงเทอร์โมโฟรีติค (Thermophoretic) เป็นเหตุให้อุณหภูมิของผนังและแก๊สสูง อนุภาคเล็กรวมตัวกันและควบแน่น ในกระบวนการเผาไหม้คลอรีน (Cl) ซัลเฟอร์ (S) และโลหะอัลคาไลน์ในรูปของแก๊สร้อน จะรวมตัวเป็นเถ้าและลดอุณหภูมิลง นำผลที่ได้ไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตรวจสอบอนุภาคที่ผิวเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

Peter Thy et al. [7] ได้ศึกษาในเรื่อง Trace Metal Mobilization During Combustion of Biomass Fuels โดยการนำเถ้า และสแลคจากไม้ เปลือกไม้ แกลบ ที่ใช้เตาเผาฟลูอิดไดเบดทำการทดลอง จากนั้นนำเถ้าที่ได้ไปวิเคราะห์การแยกองค์ประกอบระหว่างการเผาไหม้ ความเข้มของธาตุและโลหะหนัก ที่ใช้กระบวนการ X-ray Fluorescence Spectroscopy ,Instrumental Neutron Activation Analysis, X-ray Diffraction และยังไปวิเคราะห์ Weight loss ที่นำเถ้าไปเผาที่อุณหภูมิต่างๆ เพื่อหาปริมาณสารระเหยและคาร์บอนที่หลงเหลือในเถ้า พบว่าจะเริ่มมีการสูญเสียน้ำหนักที่ 525 องศาเซลเซียส จากนั้นยังนำเถ้ามาวิเคราะห์ด้วยวิธีการประมวลผลภาพ เพื่อดูความสว่างของเถ้าเทียบกับปริมาณคาร์บอนที่หลงเหลือและที่อุณหภูมิสูงเถ้าจะมีสีเข้มขึ้นเนื่องจากเกิดการกระบวนการตกผลึกใหม่ (Recrystallization)

จากวรรณกรรมปริทัศน์ที่ได้กล่าวมาในข้างต้นทำผู้ศึกษาสามารถสรุปได้ว่าการการศึกษาเถ้าลอยและฟาล์วลิงที่เกิดขึ้นกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและหม้อต้มได้ทำการจำลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีลักษณะเป็นท่อแลกเปลี่ยนความร้อนยื่นไปภายในเตาเผา โดยใช้ลมเป็นสารหล่อเย็นและทำการควบคุมอุณหภูมิผิวให้คงที่ ในส่วนของเถ้าหนักได้ใช้การประมวลผลภาพโดยการวัดความสว่างของเถ้า ในส่วนของการศึกษาเถ้าลอยและฟาล์วลิงที่เกิดขึ้นกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและหม้อต้มของผู้ศึกษาได้ทำการจำลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในลักษณะคล้ายท่อแลกเปลี่ยนความร้อนยื่นเข้าไปในเตาเผา โดยใช้น้ำเป็นสารหล่อเย็นที่ควบคุมอุณหภูมิของน้ำที่ผ่านการแลกเปลี่ยนความร้อน ในส่วนเถ้าหนักที่ใช้การประมวลผลภาพได้เลือกใช้วิธีการเปรียบเทียบความเข้มสี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

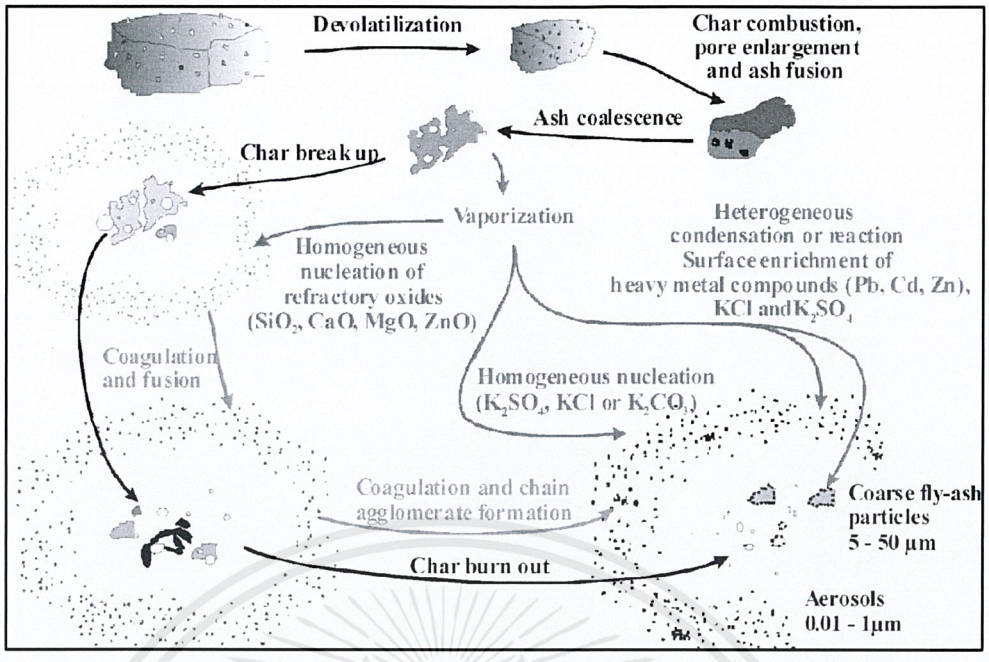
บทที่ 3
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 ลักษณะทางกายภาพและพฤติกรรมการเกาะของเถ้า [8]

เศษเถ้าจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อสมรรถนะของหม้อต้มหรือเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เนื่องจากสามารถเกาะตัวบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน หม้อต้ม ผนังเตาเผา และท่อภายในระบบ นอกจากนี้ยังนำไปสู่การกัดกร่อนของผิวท่อ สิ่งที่เกิดขึ้นเหล่านี้จะส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงาน อายุการใช้งานของระบบ และค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาระบบให้มีความพร้อมในการใช้งาน โดยเถ้าที่เกิดขึ้นเราสามารถแบ่งตามลักษณะทางกายภาพได้เป็น 4 ชนิด คือ 1. เถ้าหนัก คือเถ้าที่มีขนาดใหญ่ มวลหนักเมื่อเชื้อเพลิงเผาไหม้จนกลายเป็นเถ้า และจะตกกองอยู่บริเวณก้นเตา 2. เถ้าลอย คือเถ้าที่มีขนาดเล็กและมีน้ำหนักเบา เมื่อเผาไหม้จะลอยออกไปสู่สิ่งแวดล้อมภายนอก ก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศ 3. ฟาล์วลิง คือสแลคผสมกับเถ้าลอยที่แข็งตัวแล้วเกาะบริเวณพื้นผิวแลกแลกเปลี่ยนความร้อนหรือผิวเตา 4. สแลค คือเถ้าในสถานะแก๊สที่เป็นเปลี่ยนสถานะของแข็งหรือของเหลวเมื่อสัมผัสกับพื้นผิวที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า

กระบวนการเกิดฟาล์วลิงบนผิวแลกเปลี่ยนความร้อนเกิดจากเถ้าลอย และสแลคที่ล่องลอยภายในเตาเผา เมื่อเจอกับพื้นผิวที่เย็นกว่า เช่น เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน หม้อต้มและท่อภายในระบบ สแลคที่มีสถานะแก๊สจะเปลี่ยนสถานะจากแก๊สกลายเป็นของแข็งทันทีเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิผิวเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนกับแก๊สร้อน ลักษณะการเกาะที่เกิดขึ้นนี้จะเป็นการเกาะแบบหลวมๆเรียกว่าการเกาะแบบแห้ง (Dry deposition) หากมีการสะสมเป็นเวลานานจะทำให้การแลกเปลี่ยนความร้อนลดลง และลักษณะการเกาะก็จะเปลี่ยนไป โดยที่เถ้าในสถานะแก๊สมาเกาะที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อนจะเปลี่ยนเป็นของเหลวที่มีลักษณะเหนียวเยิ้ม (Wet deposition) ที่เราจะเรียกว่า สแลค ด้วยเหตุที่ว่าสแลคเป็นของเหลวจึงมีแรงตึงผิวและไปหลอมรวมกับสแลคที่อยู่ข้างเคียง โดยเถ้าลอยที่เกิดจากการเผาไหม้มีลักษณะเป็นเถ้าที่แห้งมาเกาะ และผสมกับสแลค ทำให้บริเวณพื้นผิวของอุปกรณ์โดยจะเกิดการพอกหนาขึ้นเรื่อยๆ จนอุณหภูมิของสแลคที่เกาะบนผิวแลกเปลี่ยนความร้อนเท่ากับอุณหภูมิของไอเสีย ณ จุดนี้ ไม่มีการพอกตัวหนาของสแลค ฟาล์วลิงที่เกิดขึ้นนี้จะเกี่ยวข้องโดยตรงกับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนเนื่องจากฟาล์วลิงนั้นจะมีหน้าที่เป็นตัวต้านทานการถ่ายเทความร้อน และการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นบนผิวแลกเปลี่ยนความร้อน เพราะนอกจากสารประกอบแล้วยังมีสารอนินทรีย์ที่สามารถทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่ำเกิดเป็นไอกรดแทรกซึมตามช่องว่างเข้าไปกัดกร่อนผิวแลกเปลี่ยนความร้อน ทำให้เมื่อใช้เชื้อเพลิงชีวมวลเป็นระยะเวลานานจะทำให้ผิวแลกเปลี่ยนความร้อนเสียหายจนต้องทำการหยุดระบบเพื่อทำการซ่อมบำรุง ส่งผลเสียต่อผู้ใช้งานในเรื่องของรายได้ที่หายไปในระหว่างการหยุดการทำงานของระบบ และค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงระบบเพื่อให้กลับมาอยู่ในสภาพที่พร้อมใช้งานอีกครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 กลไกในการเกิดเถ้าของเชื้อเพลิงชีวมวล [8]

กลไกในการเกิดเถ้าเราสามารถอธิบายได้ว่า เมื่อเกิดการเผาไหม้สารประกอบที่เป็นองค์ประกอบของเชื้อเพลิง สารประกอบนี้จะเปลี่ยนสภาพไปเป็นเศษเถ้า ซึ่งมีส่วนประกอบของซิลิกา (Silica) อลูมินา (Alumina) เหล็กออกไซด์ (FeO) แคลเซียม (Ca) และแมกนีเซียม (Mg) เป็นต้น เศษเถ้าเหล่านี้อาจมีการเกาะติดกันทางเคมีจากการหลอมตัว (Sintering) ที่อุณหภูมิประมาณ 650 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิเกิน 1000 องศาเซลเซียส เศษเถ้าจะเริ่มเกิดการหลอมละลายและที่อุณหภูมิ 1400 องศาเซลเซียส สแลคของเศษเถ้าเหลวจะเกิดขึ้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของเชื้อเพลิงที่นำมาใช้

3.2 การพาความร้อน (Convection) [9]

การพาความร้อนจะมีความเกี่ยวข้องกับสภาวะของของไหล ได้แก่ ความเร็วของของไหล อุณหภูมิพื้นที่ผิวสัมผัสความร้อน อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม โดยเมื่ออุณหภูมิผิวมีค่าไม่เท่ากับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม จะเกิดการพาความร้อนขึ้น ด้วยเหตุนี้ ฟลักซ์ความร้อน ณ จุดใดๆพบพื้นผิว q" (Local Heat Flux) จะมีค่าตามสมการดังนี้

$$q''= h(T_s-T_\infty) \quad (3.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1 การพาความร้อนภายนอกท่อในแนวขวาง (Cylinder in Cross Flow) [9]

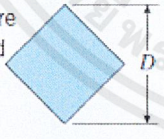
การถ่ายเทความร้อนภายนอกท่อในแนวขวาง เป็นการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่หรือออกจากของไหลผ่านผิวของวัตถุโดยถูกบังคับจากภายนอก เช่น เครื่องเป่าลม ปั๊ม เป็นต้น ตัวแปรที่สำคัญในการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนภายนอกท่อในแนวขวางคือ ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Re_D) โดยมีสมการ คือ

$$Re_D = \frac{\rho VD}{\mu} = \frac{VD}{\nu} \tag{3.2}$$

โดยทั่วไป $Re_D \leq 2x10^5$ จะเป็นการไหลแบบราบเรียบ (Laminar) $Re_D > 2x10^5$ จะเป็นการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent) โดยค่านัสเซลนัมเบอร์ (Nusselt number) สามารถหาจากตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.2 สมการนัสเซลนัมเบอร์ของรูปทรงต่างๆ [9]

Empirical correlations for the average Nusselt number for forced convection over circular and noncircular cylinders in cross flow (from Zukauskas, 1972, Jakob 1949, and Sparrow et al., 2004)

Cross-section of the cylinder	Fluid	Range of Re	Nusselt number
Circle	Gas or liquid	0.4–4	$Nu = 0.989Re^{0.330}\ Pr^{1/3}$
		4–40	$Nu = 0.911Re^{0.385}\ Pr^{1/3}$
		40–4000	$Nu = 0.683Re^{0.466}\ Pr^{1/3}$
		4000–40,000	$Nu = 0.193Re^{0.618}\ Pr^{1/3}$
		40,000–400,000	$Nu = 0.027Re^{0.805}\ Pr^{1/3}$
Square	Gas	3900–79,000	$Nu = 0.094Re^{0.675}\ Pr^{1/3}$
Square (tilted 45°) 	Gas	5600–111,000	$Nu = 0.258Re^{0.588}\ Pr^{1/3}$

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Convection Coefficients, h) หาได้จาก

$$Nu = \frac{hD_{cyl}}{k} \tag{3.3}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 การพาความร้อนแบบบังคับภายในท่อ [9]

การไหลภายในท่อเป็นการไหลที่แตกต่างจากการไหลภายนอกท่อคือขนาดของขอบเขตของการไหล เมื่อขยายตัวเต็มที่จะไม่สามารถขยายเพิ่มไปมากกว่าพื้นที่หน้าตัดได้ ดังนั้นในการพิจารณาลักษณะของการไหลภายในท่อจะต้องคำนึงถึงรูปแบบการขยายตัวของช่วงบริเวณทางเข้า (Entry Region) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับลักษณะของการไหลว่าเป็นแบบราบเรียบหรือแบบปั่นป่วน โดยค่าเรย์โนล์ดนัมเบอร์จะสามารถคำนวณได้จากสมการค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์สำหรับการไหลในท่อกลม ดังสมการที่ 3.4

$$Re=\frac{V_{avg}D}{\nu}=\frac{\rho V_{avg}D}{\mu}=\frac{4\dot{m}}{\mu\pi D} \qquad (3.4)$$

โดย การไหลแบบราบเรียบ $Re\leq 2,300$

การไหลแบบทรานซิชัน $2,300<Re<4,000$

การไหลแบบปั่นป่วน $Re\geq 10,000$

3.2.2.1 พื้นฐานการวิเคราะห์ทางความร้อนของการพาความร้อนแบบบังคับภายในท่อ

สมการอนุรักษ์สมการพลังงานสำหรับการไหลคงที่ของของเหลวในท่อ ดังสมการที่ 3.5

$$q_{conv}=\dot{m}c_p(\Delta T_s-\Delta T_o) \qquad \text{.....} \qquad (3.5)$$

3.2.2.2 การพาความร้อนในรูปแบบอุณหภูมิที่ผิวคงที่ (Constant Surface Temperature,

T_s = constant) [8]

การพาความร้อนในรูปแบบอุณหภูมิที่ผิวคงที่ จะนิยาม $\Delta T=T_s-T_m$ ดังสมการที่ 3.6

$$\frac{dT_m}{dx}=-\frac{d(\Delta T)}{dx}=\frac{P}{\dot{m}C_p}h\Delta T \qquad (3.6)$$

เมื่อทำการแยกตัวแปรและอินทิเกรตสมการจากทางเข้าถึงทางออกจะได้

$$\int_{\Delta T_i}^{\Delta T_o}\frac{d(\Delta T)}{dx}=-\frac{P}{\dot{m}c_p}\int_0^L h dx \qquad (3.7)$$

$$\ln\frac{\Delta T_o}{\Delta T_i}=-\frac{P}{\dot{m}c_pL}\int_0^L h dx \qquad (3.8)$$

จากนิยามของ $\bar{h}$ จะได้

$$\ln\frac{\Delta T_o}{\Delta T_i}=-\frac{P}{\dot{m}c_p}\bar{h} \qquad (3.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่ง $\overline{h_L}$ หรือ $\bar{h}$ เป็นค่าเฉลี่ยของ h ทั่วทั้งท่อโดยจัดรูปสมการใหม่ได้

$$\frac{\Delta T_o}{\Delta T_i}=\frac{T_s-T_{m,o}}{T_s-T_{m,i}}=\exp(-\frac{PL}{\dot{m}c_p}\bar{h}) \tag{3.10}$$

ถ้าอินทิเกรตจากทางเข้าถึงตำแหน่งใดๆ จะได้ว่า

$$\frac{T_s-T_{m(x)}}{T_s-T_{m,i}}=\exp(-\frac{Px}{\dot{m}c_p}\bar{h}) \tag{3.11}$$

โดยที่ค่า $\bar{h}$ ในสมการเป็นค่าเฉลี่ยของ h จากทางเข้าถึงระยะ x ใดๆ

การหาค่า q_{conv} ของระบบมีความซับซ้อนในการวิเคราะห์ ในที่นี้จึงใช้สมการที่เป็นค่าเฉลี่ยของ q_{conv}

$$q_{conv}=\dot{m}c_p[(T_s-T_{m,i})-(T_s-T_{m,o})]=\dot{m}c_p(\Delta T_s-\Delta T_o) \tag{3.12}$$

แทนค่า $\bar{h}A_s=\dot{m}c_p$ ลงในสมการได้เป็น

$$q_{conv}=\bar{h}A_s(\Delta T_s-\Delta T_o) \tag{3.13}$$

ในส่วนของการคำนวณหาค่าของนัสเซลนัมเบอร์จะขึ้นอยู่กับค่าเรย์โนล์ดนัมเบอร์ หากพบว่าเป็นการไหลแบบราบเรียบ จะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.14

$$Nu=\frac{hD}{K}=3.66 \tag{3.14}$$

สำหรับการไหลแบบปั่นป่วน ค่านัสเซลนัมเบอร์มีสมการที่เกี่ยวข้องอยู่หลายสมการ โดยสมการของ Gnielinski จะมีความแม่นยำที่ค่าเรย์โนล์ดนัมเบอร์ต่ำ โดย $0.5\le Pr\le 2{,}000$ และ $3{,}000\le Re\le 5\times10^6$ ดังสมการที่ 3.15

$$Nu=\frac{(f/8)(Re-1000)Pr}{1+12.7(\frac{f}{8})^{0.5}(Pr^{\frac{2}{3}}-1)} \tag{3.15}$$

โดยที่ $f=(0.79\ln(Re)-1.64)^{-2}$

หากค่าของเรย์โนล์ดนัมเบอร์มีค่ามากกว่า 10,000 จะใช้สมการของ Dittus-Boelter โดย $0.7\le Pr\le 160$, $Re > 10{,}000$ ซึ่งมีค่าที่แม่นยำมากกว่า ดังสมการที่ 3.16

$$Nu = 0.023Re^{0.8}Pr^n \; ; \; 0.7 \le Pr \le 160 \; , \; Re > 10{,}000 \tag{3.16}$$

โดย n = 0.4 สำหรับการให้ความร้อน

n = 0.3 สำหรับการเย็นตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) [9]

คืออุปกรณ์ที่ใช้สำหรับแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างกระแสของการไหลสองชนิดที่ไม่มีการผสมกันทางกายภาพ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในทางวิศวกรรมที่พบเห็นได้บ่อยคือ หม้อน้ำ คอนเดนเซอร์ คอยล์ร้อน คอยล์เย็น เป็นต้น สามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิดตามลักษณะของกระแสการไหลคือ ทิศทางขนานกัน (Parallel flow) ทิศทางการไหลสวนทางกัน (Counter flow) ทิศทางการไหลตั้งฉากกัน (Cross Flow Heat Exchanger) ในการศึกษาครั้งนี้จะพิจารณาเฉพาะเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในทิศทางการไหลตั้งฉาก

3.2.3.1 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในทิศทางการไหลตั้งฉากกัน (Cross Flow Heat Exchanger)

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในทิศทางการไหลตั้งฉากกัน เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่แลกเปลี่ยนกับกระแสของไหล 2 ชนิดที่ตั้งฉากกัน การวิเคราะห์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดนี้มีความซับซ้อนเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงทั้ง 2 ทิศทางคือ ทิศทางตามกระแสการไหลและทิศทางตั้งฉากกับกระแสการไหล ซึ่งจะเกิดขึ้น 2 กรณีคือ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิด Single Pass Cross - Flow with One Fluid Mixed and the Other Unmixed และ Single Pass Cross - Flow Both Fluid Mixed ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะ Single Pass Cross - Flow with One Fluid Mixed, the Other Unmixed

3.2.3.2 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (Overall Heat Transfer Coefficient)

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมเป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลกระทบโดยตรงต่อการแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งถูกนิยามอยู่ในเทอมของความต้านทานทางความร้อนระหว่างของไหล 2 ชนิด ค่าสัมประสิทธิ์นี้สามารถหาได้โดยการรวมความต้านทานการนำความร้อนและการพาความร้อนของของไหลที่ถูกแยก สำหรับกรณีที่ไม่มีครีบ สามารถลดรูปสมการได้ดังสมการที่ 3.17

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{U_i A_i} = \frac{1}{U_o A_o} \tag{3.17}$$

โดยที่ค่าแฟคเตอร์ของฟาล์วลิงจะไม่นำมาพิจารณา ดังสมการที่ 3.18

$$UA = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln (D_o/D_i)}{2\pi kL} + \frac{1}{h_o A_o} \tag{3.18}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3.3 วิธีความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยแบบลอการิทึม (Log mean temperature difference, LMTD)

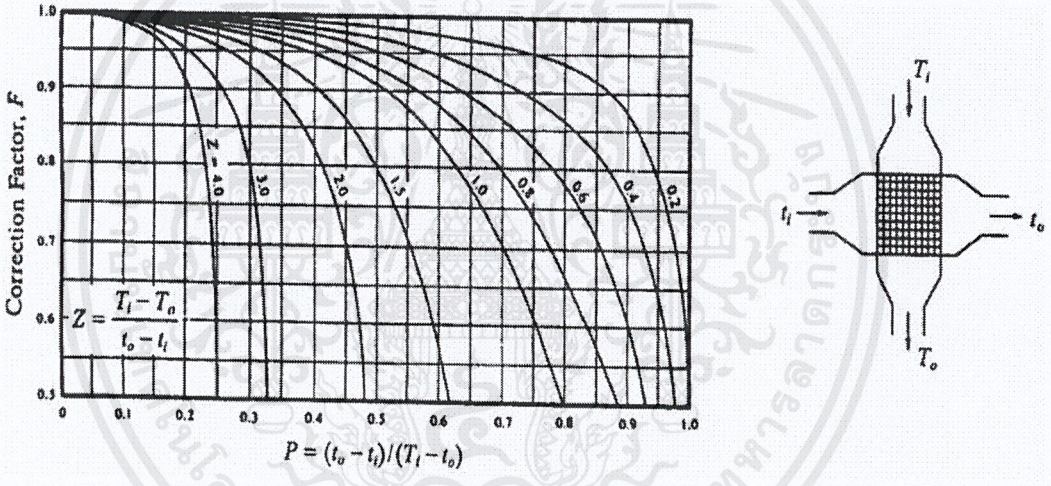
เป็นวิธีการหาค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิของของไหลที่มีความแตกต่างที่ทางเข้าและทางออกของของไหล 2 ชนิด สำหรับการไหลแบบตั้งฉากนั้นเราจำเป็นต้องใช้ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิดังสมการที่ 3.19

$$\Delta T_{lm}=F\Delta T_{lm,CF} \quad . (3.19)$$

เมื่อ $$\Delta T_{lm,CF}=\frac{\Delta T_o-\Delta T_i}{\ln(\frac{\Delta T_o}{\Delta T_i})} \quad (3.20)$$

ดังนั้น สามารถหาอัตราการถ่ายเทความร้อนจากสมการที่ 3.21

$$\dot{Q}=UA_s\Delta T_{lm} \quad (3.21)$$



รูปที่ 3.3 กราฟแสดงแฟคเตอร์ปรับแก้ของ Single pass cross-flow with one fluid mixed and the other unmixed [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การแผ่รังสีของก๊าซ [9]

การแลกเปลี่ยนรังสีความร้อน สำหรับก๊าซที่มีโครงสร้างโมเลกุลสมมาตรแบบไม่มีขั้ว เช่น ออกซิเจน หรือ ไนโตรเจน เนื่องจากก๊าซเหล่านี้ไม่มีการปล่อยของรังสีและเป็นสารโปร่งใส คือยอมให้รังสีที่มาตกกระทบผ่านได้อย่างปกติ ในกรณีที่เป็นก๊าซที่มีโครงสร้างโมเลกุลสมมาตรแบบมีขั้ว เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ แอมโมเนีย และก๊าซไฮโดรคาร์บอนต่างๆ จะมีการปล่อยออกและดูดกลืนของคลื่นรังสีตลอดช่วงอุณหภูมิที่กว้าง โดยการแผ่รังสีของก๊าซจะเน้นหนักในช่วงความยาวคลื่นเฉพาะซึ่งเป็นปรากฏการณ์ของปริมาตร

3.3.1 การดูดกลืนทางปริมาตร (Volumetric Absorption)

การดูดกลืนรังสีที่ความยาวคลื่นหนึ่งในก๊าซเป็นฟังก์ชันของสัมประสิทธิ์การดูดกลืน a_λ(1/m) และความหนา L ของตัวกลาง ถ้ารังสีคลื่นเดี่ยวของความเข้ม $I_{\lambda,0}$ ตกกระทบบนตัวกลาง ความเข้มนั้นจะลดลงเนื่องจากการดูดกลืน ปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นในพื้นที่เล็กที่มีความหนา dx อาจแสดงได้ดังสมการที่ 3.22

$$dI_\lambda(x)=a_\lambda I_\lambda(x)dx \tag{3.22}$$

แยกตัวแปร และอินทิเกรตได้เป็น

$$\int_{I_{\lambda,0}}^{I_{\lambda,L}} \frac{dI_\lambda(x)}{I(x)} = -a_\lambda \int_0^L dx \tag{3.23}$$

$$\frac{I_\lambda}{I(x)} = e^{-a_\lambda L} \tag{3.24}$$

สมการนี้เรียกว่า “กฎของเบียร์” (Beer’s Law) และแทนสมการลดลงแบบเอ็กโพเนนเชียล ซึ่งจะพบในชนิดต่างๆ ของการวิเคราะห์การแผ่รังสีที่เกี่ยวข้องกับการดูดกลืนตามนิยามของค่าผ่านทะลุผิว จะได้

$$\tau_\lambda = \frac{I_{\lambda,L}}{I_{\lambda,0}} = e^{-a_\lambda L} \tag{3.25}$$

สำหรับกรณีที่ก๊าซไม่มีการสะท้อนแล้ว จะได้ค่าการดูดกลืนเป็น

$$\alpha_\lambda = 1-\tau_\lambda = 1-e^{-a_\lambda L} \tag{3.26}$$

ถ้าเราใช้กฎของเคอร์ชอฟฟ์กับกรณีนี้ $\alpha_\lambda=\varepsilon_\lambda$ ซึ่งหาค่าจาก $\varepsilon_\lambda(\lambda,T) = \frac{\varepsilon_\lambda(\lambda,T)}{\varepsilon_\lambda,b(\lambda,T)}$ ก็จะให้ค่าการปล่อยออกที่ความยาวคลื่นหนึ่งของตัวกลาง (ε_λ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 การปล่อยออกและการดูดกลืนของก๊าซ (Gaseous Emission and Absorption)

การคำนวณทางวิศวกรรมทั่วไป ก็เพื่อต้องการหาค่า ฟลักซ์ความร้อนของการแผ่รังสีจากก๊าซสู่ผิวที่อยู่ใกล้ชิด ทั้งๆ ที่การแสดงผลทาง spectral และ directional มีความยุ่งยากมาก แต่ก็ยังมีวิธีการง่ายๆ ที่นำมาใช้ซึ่งถูกพัฒนาโดย Hotel และเกี่ยวข้องกับการหาการปล่อยของออกรังสีของมวลก๊าซรูปครึ่งทรงกลมที่อุณหภูมิ T_g สู่ผิวเล็กๆ dA_l ซึ่งมีตำแหน่งอยู่ที่ศูนย์กลางของฐานครึ่งทรงกลม การปล่อยออกรังสีจากก๊าซต่อหน่วยพื้นที่ของผิวเขียน ได้เป็น

$$E_g=\varepsilon_g\sigma T_g^4 \tag{3.27}$$

โดยที่ค่าการปล่อยออกก๊าซ ε_g หาได้โดยสหพันธ์ข้อมูลที่มีอยู่ ในกรณีเช่นนั้น ε_g เกี่ยวพันกับเทอมของอุณหภูมิ T_g และความดันรวม p ของก๊าซ ความดันย่อย p_s ของชนิดก๊าซแผ่รังสี และรัศมี L ของครึ่งทรงกลม

ผลสำหรับหาค่าการปล่อยออกของไอน้ำ ได้แสดงในรูปที่ 3.3 ซึ่งเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิก๊าซสำหรับความดันรวม 1 บรรยากาศ (1 atm) และสำหรับค่าที่แตกต่างกันของผลคูณของความดันย่อยของไอน้ำ และรัศมีครึ่งทรงกลม เพื่อหาค่าการปล่อยออกสำหรับความดันรวมอื่นต่างจาก 1 บรรยากาศ ค่าการปล่อยออก (ε) จากรูปที่ 3.3 ต้องคูณด้วยตัวประกอบแก้ไข C_w (Correction Factor) จากรูปที่ 3.4 ทำนองเดียวกันผลลัพธ์ของ CO_2 ก็หาได้และแสดงในรูปที่ 3.5 และ 3.6

ผลลัพธ์ที่กล่าวมาแล้วใช้เมื่อ ไอน้ำหรือคาร์บอนไดออกไซด์ปรากฏอย่างอิสระในของผสมกับก๊าซชนิดอื่นๆ ซึ่งไม่แผ่รังสี อย่างไรก็ตามผลลัพธ์นี้อาจขยายสู่สภาวะการณ์ที่ซึ่งไอน้ำและ CO_2 ปรากฏอยู่ร่วมกันในของผสมกับก๊าซที่ไม่แผ่รังสี ในกรณีเช่นนี้ ค่าการปล่อยออกก๊าซทั้งหมด (Total Gas Emissivity) อาจแสดงได้เป็น

$$\varepsilon_g=\varepsilon_w+\varepsilon_c-\Delta\varepsilon \tag{3.28}$$

โดยที่ตัวประกอบแก้ไข $\Delta\varepsilon$ ได้แสดงในรูปที่ 3.7 สำหรับค่าที่ต่างกันของอุณหภูมิก๊าซ ตัวประกอบนี้จะถูกนำมาคิดด้วยสำหรับการลดลงในการปล่อยออกซึ่งเกี่ยวข้องกับการดูดกลืนซึ่งกันและกันของรังสีระหว่างก๊าซ 2 ชนิด

จากผลลัพธ์ที่กล่าวมาให้ค่าการปล่อยออก (Emissivity) ของมวลก๊าซครึ่งทรงกลมรัศมี L ซึ่งแผ่รังสีสู่พื้นที่เล็กๆ ที่ศูนย์กลางของฐาน อย่างไรก็ตามผลลัพธ์ที่ได้อาจขยายไปสู่รูปทรงก๊าซอื่นๆ โดยการนำแนวคิดของ “ความยาวรังสีเฉลี่ย” (Mean Beam Length, L_e) ปริมาณนี้ได้นำไปสู่กลุ่มที่เกี่ยวเนื่องกันในเทอมของพารามิเตอร์เดียวกับการขึ้นอยู่กับค่าการปล่อยออกของก๊าซทั้งขนาดและรูปทรงเรขาคณิต สำหรับก๊าซต่างๆ ค่านี้ได้แสดงในตารางที่ 3.2 โดยการแทน L ด้วย L_e ในรูปที่ 3.3 ถึง 3.7 ค่าการปล่อยออกที่เกี่ยวกับรูปทรงเรขาคณิตที่สนใจก็สามารถ หาได้โดยใช้ผลลัพธ์ในตารางที่ 3.2 กับรูปที่ 3.3 ถึง 3.7 ทำให้สามารถหาค่าอัตราการแผ่รังสีสู่ผิวเนื่องจากการปล่อยออกของก๊าซที่อยู่ใกล้อัตราความร้อนนั้นแสดงได้เป็น

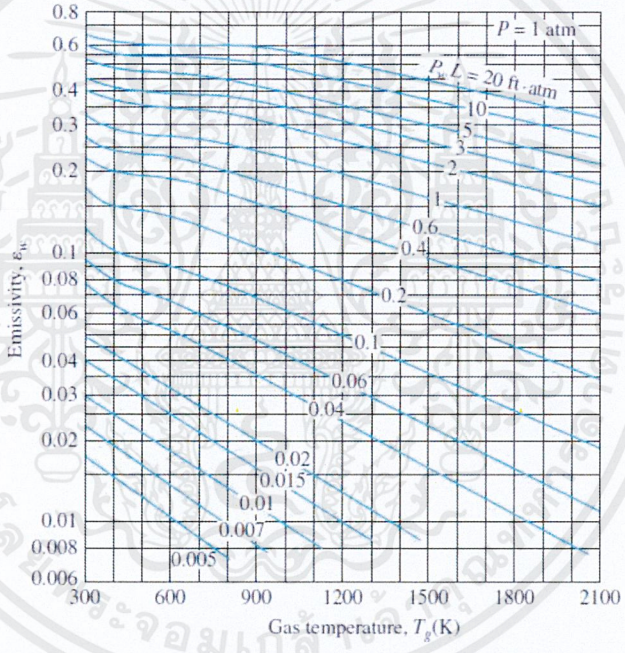
$$q=\varepsilon_g A_s\sigma T_g^4 \tag{3.29}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ A_s เป็นพื้นที่ผิว ถ้าเป็นผิวดำ รังสีทั้งหมดจะถูกดูดไว้หมด ผิวดำจะปล่อยรังสีออกเช่นเดียวกัน และอัตราสุทธิที่รังสีแลกเปลี่ยนระหว่างผิวที่ T_s และก๊าซที่ T_g

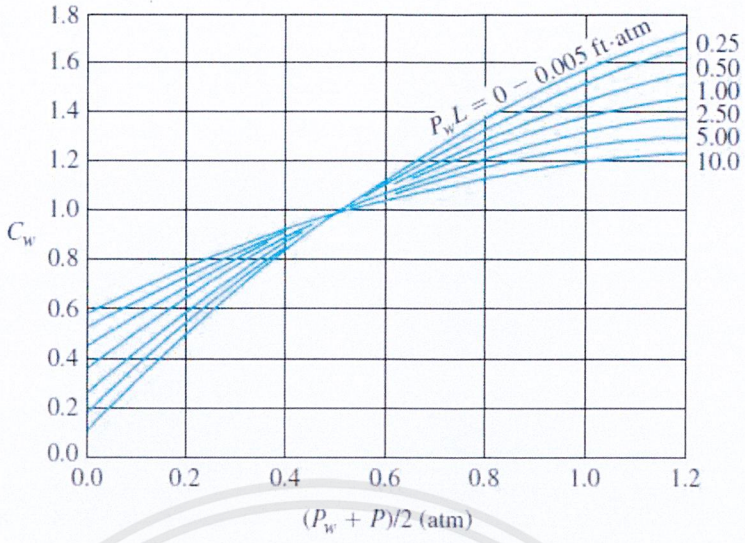
ตารางที่ 3.2 ความยาวรังสีเฉลี่ย (L_e) สำหรับรูปร่างของก๊าซต่างๆ

รูปร่าง	ความยาวลักษณะ	L_e
ทรงกลม (แผ่รังสีสู่ผิว)	เส้นผ่าศูนย์กลาง (D)	0.65D
ทรงกระบอกกลมยาวอนันต์ (แผ่รังสีสู่ผิวโค้ง)	เส้นผ่าศูนย์กลาง (D)	0.65D
ทรงกระบอกยาวกึ่งอนันต์ (แผ่รังสีสู่ผิวโค้ง)	เส้นผ่าศูนย์กลาง (D)	0.65D
ทรงกระบอกกลมมีความสูงและเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากัน (แผ่รังสีสู่ผิวทั้งหมด)	เส้นผ่าศูนย์กลาง (D)	0.65D
แผ่นเรียบขนานของอนันต์ (แผ่นรังสีสู่แผ่น)	ระยะระหว่างแผ่น (L)	1.80L
ลูกบาศก์ (แผ่รังสีสู่ผิวใดๆ)	ด้าน (L)	0.66L
รูปใดๆ ของปริมาตร V (รังสีสู่ผิวพื้นที่ A)	อัตราส่วนปริมาตรต่อพื้นที่ (V/A)	3.6V/A

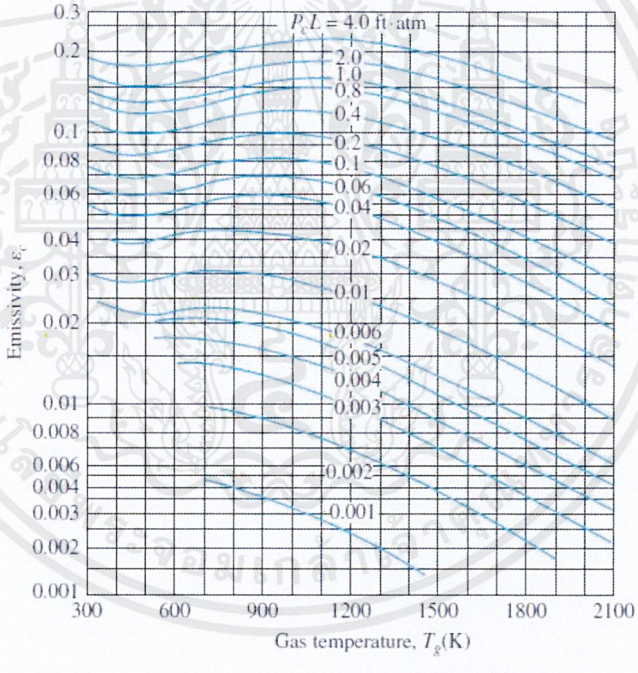


รูปที่ 3.4 ค่าการปล่อยออกของไอน้ำในผสมของก๊าซที่ไม่แผ่รังสี ที่ความดันรวม 1 atm รูปครึ่งทรงกลม [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

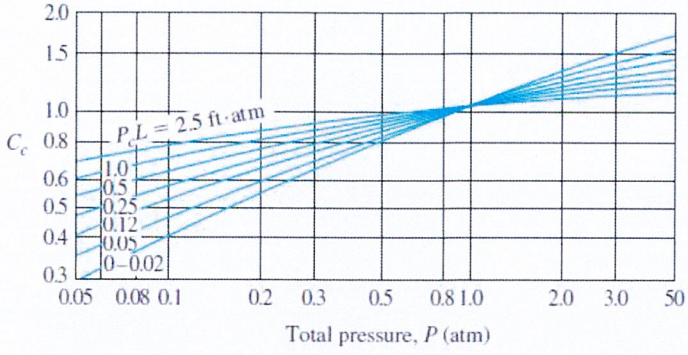


รูปที่ 3.5 ตัวประกอบแก้ไขสำหรับค่าการปล่อยออกของไอน้ำที่ความดันอื่นๆ ที่ไม่ใช่ 1 atm [11]

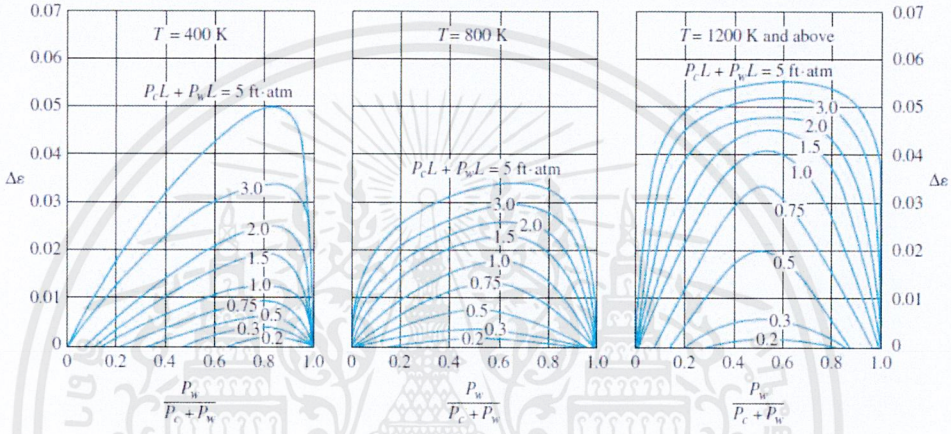


รูปที่ 3.6 ค่าการปล่อยออกของ CO_2 ในของผสมก๊าซที่ไม่แผ่รังสี
ที่ความดันรวม 1 atm รูปครึ่งทรงกลม [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 ตัวประกอบแก้ไขสำหรับค่าการปล่อยออกของ CO_2 ที่ความดันนอกเหนือจาก 1 atm [11]



รูปที่ 3.8 ตัวประกอบแก้ไขสำหรับของผสมไอน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ [11]

$$q_{net} = A_s\sigma(\varepsilon_g T_g^4 - \alpha_g T_s^4) \tag{3.30}$$

สำหรับไอน้ำ และ CO_2 ค่าการดูดกลืนของก๊าซ (α_g) ที่ต้องการหาได้จากค่าการปล่อยออก โดยแสดงในรูป

น้ำ :
$$\alpha_w = C_w\left(\frac{T_g}{T_s}\right)^{0.45} \times \varepsilon_w\left(T_s, p_w L_e \frac{T_s}{T_g}\right) \tag{3.31}$$

คาร์บอนไดออกไซด์ :
$$\alpha_c = C_c\left(\frac{T_g}{T_s}\right)^{0.65} \times \varepsilon_c\left(T_s, p_c L_e \frac{T_s}{T_g}\right) \tag{3.32}$$

โดยที่ ϵ_w และ ϵ_c หาจากรูปที่ 3.3 และ 3.5 ตามลำดับ ส่วน C_w และ C_c หาได้จากรูปที่ 3.4 และ 3.6 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามสังเกตว่าในการใช้รูปที่ 3.3 และ 3.5 นั้นค่า T_g แทนด้วย T_s และ p_wL_e หรือ p_cL_e แทนด้วย $p_wL_e(T_w/T_g)$ หรือ $p_cL_e(T_s/T_g)$ ตามลำดับ และเช่นเดียวกันในการที่มีไอน้ำ และ คาร์บอนไดออกไซด์ทั้งสองอยู่ด้วยกัน ค่าการดูดกลืนของก๊าซรวม แสดงได้เป็น

$$\alpha_g = \alpha_w + \alpha_c - \Delta\alpha \tag{3.33}$$

ซึ่ง $\Delta\alpha = \Delta\varepsilon$ หาได้จากรูปที่ 3.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การเผาไหม้ [8]

การเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างเชื้อเพลิงกับตัวออกซิไดเซอร์ (ออกซิเจน) โดยองค์ประกอบภายในเชื้อเพลิงคือ สารจำพวก คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) และกำมะถัน (S) เป็นต้น ซึ่งปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงภายในเวลาอันรวดเร็ว และเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ทำให้เกิดพลังงานจากการเผาไหม้ออกมา

3.4.1 ชนิดเชื้อเพลิง

3.4.1.1 เชื้อเพลิงแข็ง

เชื้อเพลิงแข็งแข็งเกินขึ้นโดยธรรมชาติ ได้แก่ ไม้ ชีวมวล ถ่านไม้ เป็นต้น เชื้อเพลิงเหล่านี้จะประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจนเป็นส่วนมาก และยังมีองค์ประกอบอื่นๆอีกเช่น ออกซิเจน ไนโตรเจน กำมะถัน น้ำ และเถ้า ความชื้นในเชื้อเพลิงจะอยู่ระหว่างผนังเซลล์หรือรูพรุน ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อการเผาไหม้

3.4.1.2 เชื้อเพลิงชีวมวล

เชื้อเพลิงชีวมวลส่วนมากประกอบด้วยเซลลูโลส $C_6H_{10}O_5$ และลิกนิน $C_{40}H_{44}O_6$ แบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือชนิดที่เป็นไม้และชนิดที่ไม่ใช่ไม้ โดยชนิดที่เป็นไม้ได้แก่ ขี้เลื่อย กิ่งไม้ เศษไม้ เป็นต้น

3.4.2. สภาวะปริมาณสัมพันธ์ของการเผาไหม้ (Combustion Stoichiometry) [8]

การเผาไหม้ที่สภาวะปริมาณสัมพันธ์ (Stoichiometry) เป็นการคำนวณปริมาณออกซิไดเซอร์ทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงอย่างพอดีซึ่งเรียกว่าการเผาไหม้สมบูรณ์ การหาความสัมพันธ์แบบปริมาณสัมพันธ์ ทำได้โดยการเขียนสมการการเผาไหม้ สำหรับเชื้อเพลิงชีวมวล ($C_cH_hN_nO_oS_s$) จะสามารถเขียนสมการการเผาไหม้ได้ดังนี้

$$C_cH_hN_nO_oS_s+H_hO_o+a(O_2+3.76N_2)\rightarrow bCO_2+eH_2O+fSO_2+gN_2 \qquad (3.34)$$

การหาอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ตามทฤษฎีหรือตาม stoichiometry สามารถหาได้จาก

$$(A/F)_{stoic}=\frac{(m_{air})}{(m_{fuel})} \qquad (3.35)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราส่วนสมมูล (Equivalent ratio, ϕ) เป็นค่าที่ใช้บ่งบอกว่าส่วนผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงเป็นแบบปริมาณสัมพันธ์หนาหรือบาง ซึ่งมีนิยามดังนี้

$$\phi=\frac{(A/F)_{stoic}}{(A/F)}=\frac{(F/A)}{(F/A)_{stoic}} \tag{3.36}$$

จากนิยามจะเห็นได้ว่า สำหรับส่วนผสมหนาจะมีค่า $\phi>1$ ส่วนผสมบางจะมีค่า $\phi<1$ และสำหรับปริมาณสัมพันธ์จะมีค่า $\phi=1$

%ปริมาณสัมพันธ์อากาศ (stoichiometry air) คือ ปริมาณที่บอกให้ทราบว่าปริมาณอากาศที่ใช้จริงโดยคิดเป็นกี่เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอากาศตามทฤษฎี ซึ่งมีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนสมมูลดังนี้

$$\%\text{stoichiometry air}=\frac{100\%}{\phi} \tag{3.37}$$

เปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน (%excess air)คือ ร้อยละปริมาณอากาศที่เกินจากการเผาไหม้โดยคิดจากอากาศทางทฤษฎีที่มีค่าเท่ากับ 100

$$\%\text{excess air}=\frac{(1-\phi)}{\phi}\cdot 100\% \tag{3.38}$$

3.4.3. อุณหภูมิเปลวแบบอะเดียบาร์ติก (Adiabatic Combustion Temperature) [12]

อุณหภูมิเปลวแบบอะเดียบาร์ติกเกิดขึ้นเมื่อเชื้อเพลิงและอากาศทำปฏิกิริยากันพอดีหรือสภาวะปริมาณสัมพันธ์ที่ความดันคงที่ โดยไม่มีการแลกเปลี่ยนความร้อนกับสิ่งแวดล้อมและไม่มีงานจากการเผาไหม้ อาจเรียกอีกอย่างว่าการเผาไหม้แบบอะเดียบาร์ติก

ที่อุณหภูมิเปลวในสภาวะที่ไม่มีการสูญเสียความร้อน (Adiabatic flame temperature) , $\Delta Q=0$

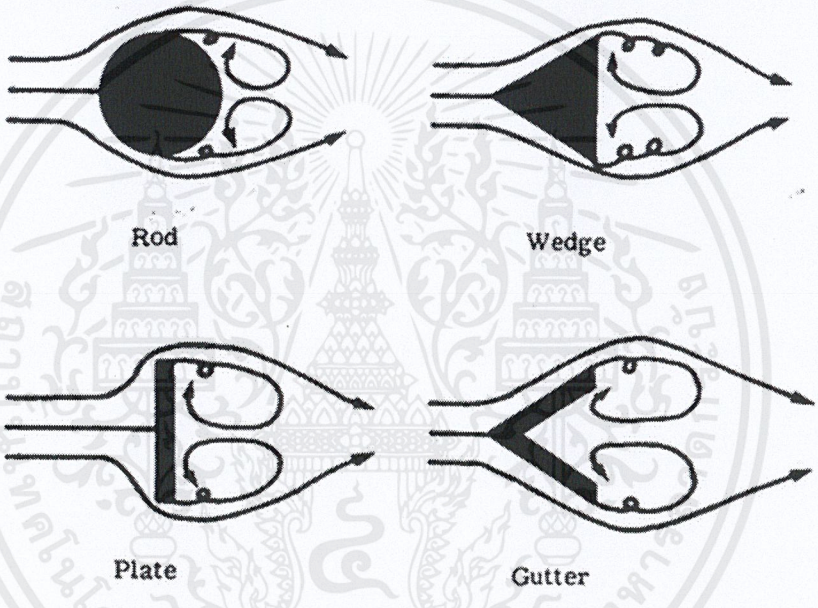
$$\sum_{P}(nMh)=\sum_{R}(nMh) \tag{3.39}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การรักษาเสถียรภาพเปลวไฟ [13]

การรักษาเสถียรภาพเปลวไฟ คือการรักษาอุณหภูมิในบริเวณเปลวไฟให้มีค่าสูงเพื่อให้การเผาไหม้เกิดขึ้นได้รวดเร็วและมีการคายความร้อนในอัตราที่สูง การรักษาอุณหภูมิที่สูงของเปลวไฟสามารถทำได้โดยการสร้างโครงสร้างหมุนเวียนความร้อน (Heat recirculation combustion) ซึ่งก็คือการพยายามเพิ่มการถ่ายเทความร้อนจากการเผาไหม้กลับเข้าสู่เปลวไฟให้มีปริมาณมากที่สุด ซึ่งการหมุนเวียนความร้อนโดยทั่วไป (Conventional combustion) สามารถทำได้โดยการใช้อากาศพลศาสตร์ (Aerodynamics stabilized) โดยการสร้างการไหลแบบหมุนวน (Recirculation)

การสร้างการไหลแบบหมุนวน (Recirculation) ทำได้หลายวิธี เช่น การใช้วัตถุเข้าขวางการไหล(Bluff body) หรือใช้การไหลแบบหมุนวน (Swirl or Jet-Induce Recirculation Flow)

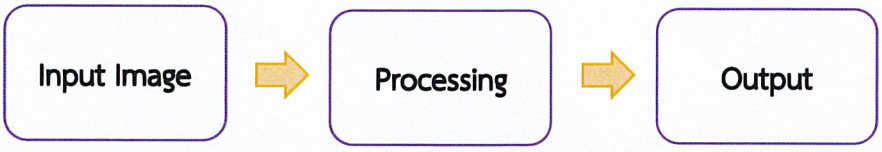


รูปที่ 3.9 แสดงเสถียรภาพของเปลวไฟจากการไหลหมุนวน [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 การประมวลผลภาพ (Image Processing) [15]

การประมวลผลภาพ เป็นการนำภาพมาประมวลผลด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์จะได้ข้อมูลที่ต้องการ โดยแสดงแผนภาพดังนี้



ข้อมูลที่ส่งออกมาเราสามารถนำไปวิเคราะห์เพิ่มเติมได้เช่น ขนาด ความเข้มของแสง ความสว่างของภาพ เป็นต้น วิธีการวิเคราะห์ที่นำมาใช้เป็นการประยุกต์ใช้ให้เหมาะสมตามเทคโนโลยีในปัจจุบัน ไม่ว่าจะเป็นการหารอยแตกบนผิวรางรถไฟ ระบบตรวจจับป้ายทะเบียนรถยนต์ ระบบคัดแยกขนาดผลิตภัณฑ์ เป็นต้น หากระบบนี้ใช้มนุษย์ในการคัดกรองจะทำให้ใช้เวลาในการคัดกรองนานและมีความผิดพลาดสูง ด้วยเหตุนี้จึงมีการนำคอมพิวเตอร์มาช่วยในการวิเคราะห์

ประเภทของภาพ (Image Type)

1. ภาพระดับความเข้มเทา (Gray Scale)

   ลักษณะของภาพชนิดนี้แต่ละพิกเซลของแสงจะไม่เท่ากันโดยจะไล่ระดับจากสีดำไปสีขาวเรียกว่าระดับความเข้มเทา (Gray Scale) ซึ่งมีขนาด 8 บิตและถูกแบ่งถึง 256 ระดับโดยไล่จากเฉดสีดำไปสีขาว
2. ภาพสี (Color Image)

   ภาพชนิดนี้แต่ละจุดภาพจะมีแม่สีหลัก3สีซ้อนกัน คือสีแดง สีเขียว สีน้ำเงิน โดยแต่ละพิกเซลจะแสดงความเข้มสีของแม่สีทั้ง 3 รวมกัน
3. ภาพไบนารี (Binary Image)

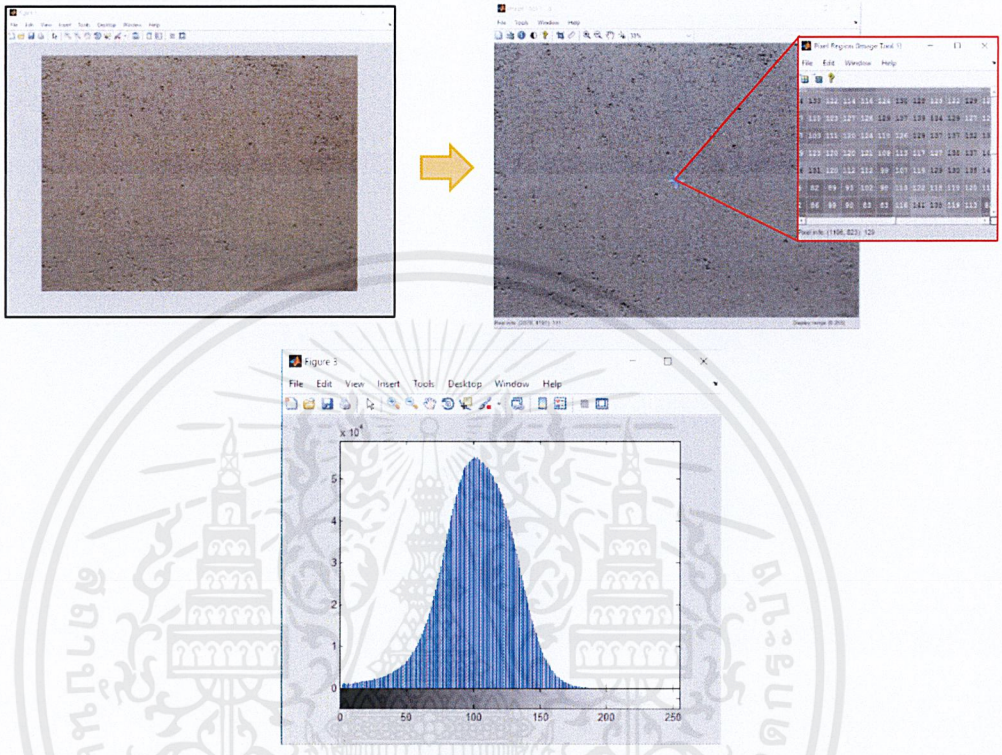
   เป็นภาพขนาด1บิตที่แสดงเป็นภาพขาวดำโดยจะแสดงเป็นเลข0คือ สีดำและ1คือ สีขาว
4. ภาพแบบดัชนี (Index Image)

   เป็นภาพที่แต่ละพิกเซลจะเก็บอัตราส่วนของแม่สี3สีที่เป็นองค์ประกอบของพิกเซลนั้นๆในรูปของจำนวนเต็ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.1 ฮีสโทแกรมของภาพ(Image Histogram)

ฮีสโทแกรม คือกราฟเส้นที่แสดงจำนวนพิกเซลทั้งหมดของข้อมูลรูปภาพตามค่าระดับความเข้มสีเทาที่ปรากฏบนภาพดิจิตอล โดยเรียงตามลำดับความเข้มสีเทา และเส้นฮีสโทแกรมจะรวมกันที่ความเข้มสีเทาของภาพสูงสุด



รูปที่ 3.10 แสดงกระบวนการประมวลผลภาพโดยใช้วิธีวิเคราะห์ภาพสีเทา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7 การเลือกใช้อุปกรณ์

3.7.1 ปั๊มหอยโข่ง [16-18]

ปั๊มหอยโข่งเป็นเครื่องจักรที่ทำงานบนหลักการเครื่องจักรกลกังหัน (Turbo Machinery) สำหรับใช้ขนถ่ายจากตำแหน่งหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่ง ในกรณีที่น้ำนั้นไม่สามารถไหลไปได้เองตามธรรมชาติหรือไหลไม่เพียงพอกับความต้องการ จึงต้องมีการเพิ่มพลังงานให้กับน้ำ ในเครื่องสูบน้ำแบบหอยโข่งน้ำถูกดูดเข้ามาทางช่องทางน้ำเข้า (Inlet) ไหลเข้าไปในส่วนของใบพัด (Impeller) ที่ประกอบอยู่ภายในเรือนสูบแบบหอยโข่งหรือโวลูต (Volute Casing) พลังงานกลจากมอเตอร์ไฟฟ้าส่งผ่านเพลาและถ่ายทอดสู่น้ำด้วยกระบวนการอิมพัลส์ (Impulse) โดยใบพัดที่ติดอยู่กับเพลา การหมุนของใบพัดจะทำให้น้ำที่อยู่ภายในช่องว่างระหว่างครีบ (Vane) ของใบพัดหมุนไปด้วย ซึ่งน้ำจะรับพลังงานและเก็บไว้ในรูปของพลังงานจลน์ที่เพิ่มขึ้น เมื่อน้ำไหลออกจากใบพัดเข้าสู่เรือนสูบและช่องทางน้ำออก (Discharge) พลังงานจลน์ส่วนหนึ่งจะถูกเปลี่ยนเป็นความดันด้วยกระบวนการดิฟฟิวชัน (Diffusion) โดยขยายช่องทางไหลให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อลดความเร็วของน้ำและพลังงานอีกส่วนหนึ่งจะสูญเสียไป ในการส่งถ่ายพลังงานที่เกิดขึ้นในเครื่องสูบน้ำจะเป็นไปตามกฎการอนุรักษ์พลังงาน (Conservation of Energy) ซึ่งกล่าวว่าพลังงานไม่มีการเกิดขึ้นหรือสูญหายไป แต่สามารถเปลี่ยนรูปได้ ได้สมการสมดุลพลังงานของเครื่องสูบน้ำคือ

$$\dot{E}_{in} + \text{Power input} = \dot{E}_{out} + \text{Total loss} \tag{3.40}$$

จากสมการสมดุลพลังงานของเครื่องสูบน้ำหมายความว่า ผลรวมของพลังงานที่เข้าสู่ระบบกับกำลังที่ใส่ให้แก่ระบบมีค่าเท่ากับผลรวมของพลังงานที่ทางออกรวมกับความสูญเสียรวมที่เกิดขึ้นในระบบ เมื่อพิจารณาพลังงานที่ทางออก ($\dot{E}_{out}$) ซึ่งแสดงอยู่ในรูปของน้ำหนักจำเพาะของน้ำ (γ) อัตราไหล (Q) และเฮด (H) ดังนี้

$$\dot{E}_{out} = \frac{\dot{m}p_{out}}{\rho} = \gamma \rho H \tag{3.41}$$

พบว่าอัตราไหลและเฮด(ความดันหัวน้ำ) เป็นตัวกำหนดสมรรถนะของเครื่องสูบน้ำและเป็นตัวแปรไม่ทราบค่า แต่ตัวแปรทั้งสองมีความสัมพันธ์แบบแปรผกผัน ดังนั้นจะมีจุดที่ทำให้มีประสิทธิภาพของการทำงานสูงสุด (Best Efficiency Point , BEP) เพียงจุดเดียว โดยในการเลือกใช้งานเครื่องสูบน้ำจะเลือกใช้งานที่ใกล้จุด BEP

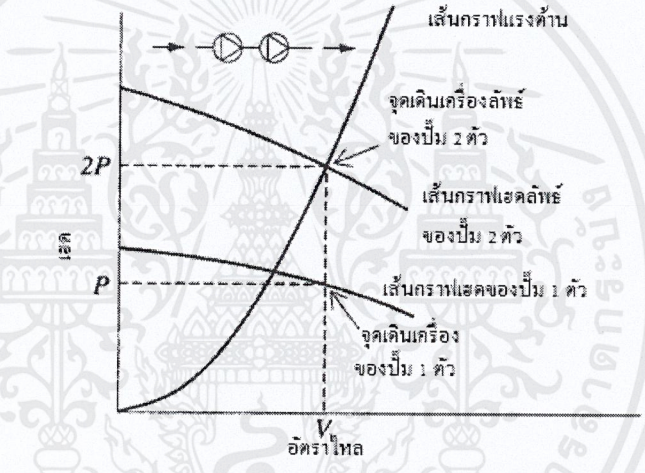
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.1.1 รูปแบบการต่อปั๊ม

การติดตั้งเครื่องสูบน้ำหลายเครื่องในระบบเพื่อที่จะทำให้ระบบมีเฮดโดยรวมสูงขึ้นหรือมีอัตราการไหลสูงขึ้น ซึ่งสามารถกระทำได้โดยการติดตั้งเครื่องสูบน้ำให้มีลักษณะการต่อแบบอนุกรมและแบบขนานในลักษณะคล้ายกับการต่อวงจรไฟฟ้า ในทางปฏิบัติการติดตั้งเครื่องสูบทั้งแบบอนุกรมและแบบขนานจะต้องติดตั้งวาล์วกันไหลกลับ เพื่อที่จะป้องกันการไหลย้อนกลับของของไหล

3.7.1.1.1 การต่อปั๊มแบบอนุกรม [16]

การติดตั้งเครื่องสูบแบบอนุกรม จะทำให้เฮดของระบบมีค่าสูงขึ้นแต่อัตราการไหลของของไหลภายในระบบไม่เปลี่ยนแปลง เฮดของระบบที่เพิ่มสูงขึ้นเราสามารถหาได้จากผลรวมของเฮดความกดดันของเครื่องสูบแต่ละเครื่อง ที่อัตราการไหล

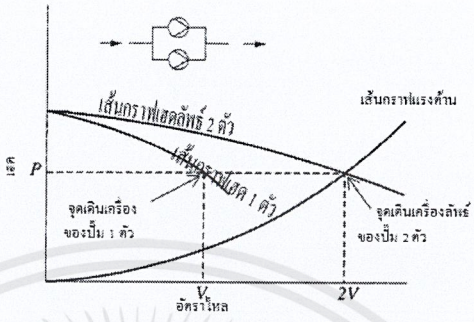


รูปที่ 3.11 แสดงการเดินเครื่องอนุกรมปั๊ม [16]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.1.1.2 การต่อปั๊มแบบขนาน [16]

การติดตั้งเครื่องสูบน้ำแบบขนานจะทำให้อัตราการไหลของระบบมีค่าสูงขึ้น แต่เฮดของระบบไม่เปลี่ยนแปลง อัตราการไหลของระบบที่เพิ่มสูงขึ้นเราสามารถหาได้จากผลรวมของอัตราการไหล ที่ได้จากเครื่องสูบแต่ละเครื่อง อัตราการไหลทั้งหมดของระบบหาได้จากผลรวมของอัตราการไหลที่ได้จากเครื่องสูบน้ำแต่ละเครื่อง



รูปที่ 3.1 แสดงการเดินขนานปั๊ม [16]

3.7.1.2 ความสูญเสียของเฮด [19]

การสูญเสียจากการไหลภายในท่อเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของความดันซึ่งอาจเป็นผลมาจากระดับท่อความเร็วของไหล และแรงเสียดทานการสูญเสียความดัน (Pressure Losses) ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดความดันในท่อขึ้น การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเราสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

1. Major Losses (h_l) เป็นการสูญเสียพลังงานที่ขึ้นกับความเครียดเฉือนของผนังระหว่างของเหลวกับผิวหยาบของท่อที่เทียบกับความโตของท่อหรือเกิดขึ้นเนื่องจากแรงเสียดทานภายในท่อและยังอยู่กับรูปแบบการไหลว่าเป็นแบบราบเรียบหรือปั่นป่วน

- การไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow)

ในกรณีการไหลแบบราบเรียบ การสูญเสียเนื่องจากความดันเขียนได้ดังสมการ

$$h_l=\left(\frac{64}{Re}\right)\left(\frac{L}{D}\right)\left(\frac{v^2}{2g}\right) \tag{3.42}$$

- การไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow)

ในกรณีการไหลแบบปั่นป่วน การสูญเสียเนื่องจากความดันเขียนได้ดังสมการ

$$h_l=(f)\left(\frac{L}{D}\right)\left(\frac{v^2}{2g}\right) \tag{3.43}$$

ค่า f สามารถหาได้จาก Moody Chart

2. Minor Losses (h_m) เกิดจากการที่ของไหลไหลผ่านสิ่งกีดขวางต่าง ๆ ตัวอย่างเช่น เกจวาล์ว, ข้องอ, ท่อที่มีพื้นที่หน้าตัดไม่คงที่และทางแยกต่าง ๆ Minor Losses คำนวณได้จากสมการ

$$h_m=\frac{kv^2}{2g} \tag{3.44}$$

โดยที่ k คือ loss coefficient ของแต่ละอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 แสดงสัมประสิทธิ์ของการสูญเสียในอุปกรณ์ฟิตติ้งของท่อ [20]

Friction Losses in Pipe Fittings
Resistance Coefficient K (use in formula $hf = Kv^2/2g$)

Fitting		LD	Nominal Pipe Size											
			½	¾	1	1¼	1½	2	2½-3	4	6	8-10	12-16	18-24
			K Value											
Angle Valve		55	1.48	1.38	1.27	1.21	1.16	1.05	0.99	0.94	0.83	0.77	0.72	0.66
Angle Valve		150	4.05	3.75	3.45	3.30	3.15	2.85	2.70	2.55	2.25	2.10	1.95	1.80
Ball Valve		3	0.08	0.08	0.07	0.07	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04
Butterfly Valve								0.86	0.81	0.77	0.68	0.63	0.35	0.30
Gate Valve		8	0.22	0.20	0.18	0.18	0.15	0.15	0.14	0.14	0.12	0.11	0.10	0.10
Globe Valve		340	9.2	8.5	7.8	7.5	7.1	6.5	6.1	5.8	5.1	4.8	4.4	4.1
Plug Valve Branch Flow		90	2.43	2.25	2.07	1.98	1.89	1.71	1.62	1.53	1.35	1.26	1.17	1.08
Plug Valve Straightaway		18	0.48	0.45	0.41	0.40	0.38	0.34	0.32	0.31	0.27	0.25	0.23	0.22
Plug Valve 3-Way Thru-Flow		30	0.81	0.75	0.69	0.66	0.63	0.57	0.54	0.51	0.45	0.42	0.39	0.36
Standard Elbow	90°	30	0.81	0.75	0.69	0.66	0.63	0.57	0.54	0.51	0.45	0.42	0.39	0.36
	45°	16	0.43	0.40	0.37	0.35	0.34	0.30	0.29	0.27	0.24	0.22	0.21	0.19
	long radius 90°	16	0.43	0.40	0.37	0.35	0.34	0.30	0.29	0.27	0.24	0.22	0.21	0.19
Close Return Bend		50	1.35	1.25	1.15	1.10	1.05	0.95	0.90	0.85	0.75	0.70	0.65	0.60
Standard Tee	Thru-Flow	20	0.54	0.50	0.46	0.44	0.42	0.38	0.36	0.34	0.30	0.28	0.26	0.24
	Thru-	60	1.62	1.50	1.38	1.32	1.26	1.14	1.08	1.02	0.90	0.84	0.78	0.72
90 Bends, Pipe Bends, Flanged Elbows, Butt-Welded Elbows	r/d=1	20	0.54	0.50	0.46	0.44	0.42	0.38	0.36	0.34	0.30	0.28	0.26	0.24
	r/d=2	12	0.32	0.30	0.28	0.26	0.25	0.23	0.22	0.20	0.18	0.17	0.16	0.14
	r/d=3	12	0.32	0.30	0.28	0.26	0.25	0.23	0.22	0.20	0.18	0.17	0.16	0.14
	r/d=4	14	0.38	0.35	0.32	0.31	0.29	0.27	0.25	0.24	0.21	0.20	0.18	0.17
	r/d=6	17	0.46	0.43	0.39	0.37	0.36	0.32	0.31	0.29	0.26	0.24	0.22	0.20
	r/d=8	24	0.65	0.60	0.55	0.53	0.50	0.46	0.43	0.41	0.36	0.34	0.31	0.29
	r/d=10	30	0.81	0.75	0.69	0.66	0.63	0.57	0.54	0.51	0.45	0.42	0.39	0.36
	r/d=12	34	0.92	0.85	0.78	0.75	0.71	0.65	0.61	0.58	0.51	0.48	0.44	0.41
	r/d=14	38	1.03	0.95	0.87	0.84	0.80	0.72	0.68	0.65	0.57	0.53	0.49	0.46
	r/d=16	42	1.13	1.05	0.97	0.92	0.88	0.80	0.76	0.71	0.63	0.59	0.55	0.50
	r/d=18	45	1.24	1.15	1.06	1.01	0.97	0.87	0.83	0.78	0.69	0.64	0.60	0.55
Mitre Bends	a=0°	2	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02
	a=15°	4	0.11	0.10	0.09	0.09	0.08	0.08	0.07	0.07	0.06	0.06	0.05	0.05
	a=30°	8	0.22	0.20	0.18	0.18	0.17	0.15	0.14	0.14	0.12	0.11	0.10	0.10
	a=45°	15	0.41	0.38	0.35	0.33	0.32	0.29	0.27	0.26	0.23	0.21	0.20	0.18
	a=60°	25	0.68	0.63	0.58	0.55	0.53	0.48	0.45	0.43	0.38	0.35	0.33	0.30
	a=75°	40	1.09	1.00	0.92	0.88	0.84	0.76	0.72	0.68	0.60	0.56	0.52	0.48
	a=90°	60	1.62	1.50	1.38	1.32	1.26	1.14	1.08	1.02	0.90	0.84	0.78	0.72

Note: Fittings are standard with full openings.

]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 แสดงสัมประสิทธิ์ของการสูญเสียในอุปกรณ์ฟิตติ้งของท่อ (ต่อ) [20]

Fitting	L/D	Minimum Velocity for Full Disc Lift		Nominal Pipe Size											
				½	¾	1	1¼	1½	2	2½-3	4	6	8-10	12-16	18-24
		General ft/sec	Water ft/sec	K Value											
Swing Check Valve	100	$35\sqrt{v}$	4.40	2.70	2.50	2.30	2.20	2.10	1.90	1.80	1.70	1.50	1.40	1.30	1.20
	50	$48\sqrt{v}$	6.06	1.40	1.30	1.20	1.10	1.10	1.00	0.90	0.90	0.75	0.70	0.65	0.60
Lift Check Valve	600	$40\sqrt{v}$	5.06	16.2	15.0	13.08	13.2	12.6	11.4	10.8	10.2	9.0	8.4	7.8	7.2
	55	$140\sqrt{v}$	17.7	1.50	1.40	1.30	1.20	1.20	1.10	1.00	0.94	0.83	0.77	0.72	0.66
Tilting Disc Check Valve	5	$80\sqrt{v}$	10.13						0.76	0.72	0.68	0.60	0.56	0.39	0.24
	15	$30\sqrt{v}$	3.80						2.30	2.20	2.00	1.80	1.70	1.20	0.72
Foot Valve with Strainer Poppet Disc	420	$15\sqrt{v}$	1.90	11.3	10.5	9.70	9.30	8.80	8.00	7.60	7.10	6.30	5.90	5.50	5.0
Foot Valve with Strainer Hinged Disc	75	$35\sqrt{v}$	4.43	2.00	1.90	1.70	1.70	1.70	1.40	1.40	1.30	1.10	1.10	1.00	0.90

Fitting	Description	All Pipe Sizes
		K Value
Pipe Exit	Projecting Sharp-Edged Rounded	1.00

3.7.2 เครื่องกำจัดฟองอากาศ (Deaerator) [21-22]

เป็นเครื่องที่ออกแบบมาเพื่อกำจัดฟองอากาศ ก๊าซออกซิเจน ไฮโดรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อให้มีน้ำคุณภาพดีป้อนเข้าอุปกรณ์ทดสอบ เพื่อป้องกันการกัดกร่อนที่เกิดจากออกไซด์คาร์บอเนต หรือกรดและยังช่วยให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้ดีขึ้น เพราะอากาศไม่สามารถควบแน่นในไอน้ำได้ จึงทำให้เกิดการสูญเสียประสิทธิภาพทางความร้อนถึง 4 เท่า เนื่องจากคุณสมบัติความเป็นฉนวนของอากาศ

3.7.3 ลักษณะการใช้งานของวาล์วแต่ละชนิด [23]

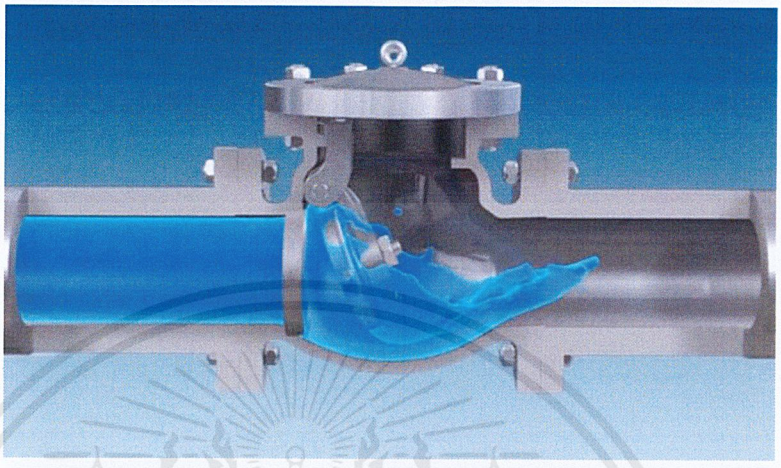
3.7.3.1 วาล์วกันกลับ (Check Valve)

เพื่อควบคุมทิศทางการไหลของของไหลให้มีทิศทางการไหลในทิศทางเดียว เป็นการสร้างความปลอดภัยให้แก่บางระบบที่ไม่ต้องการให้ของไหลไหลย้อนกลับ รวมไปถึงบางปรากฏการณ์ที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้นเพื่อป้องกันการสร้างความเสียหายให้แก่อุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.3.1.1. สวิงเช็ควาล์ว (Swing Check Valve)

เป็นวาล์วกันกลับชนิดหนึ่งที่มีแรงต้านการไหลน้อยขณะเปิดสุด ใช้ในงานติดตั้งกับท่อ หรือ line ที่ไม่ต้องการให้เกิดความดันลด (Pressure drop) มาก สำหรับบังคับให้น้ำไหลไปทางเดียว ป้องกันน้ำไหลย้อนกลับโดยใช้บานพับหรือลิ้นกันกลับ



รูปที่ 3.13 แสดงลักษณะการไหลของน้ำภายในสวิงเช็ควาล์ว [24]

3.7.3.1.2. สปริงเช็ควาล์ว (Spring Check Valve)

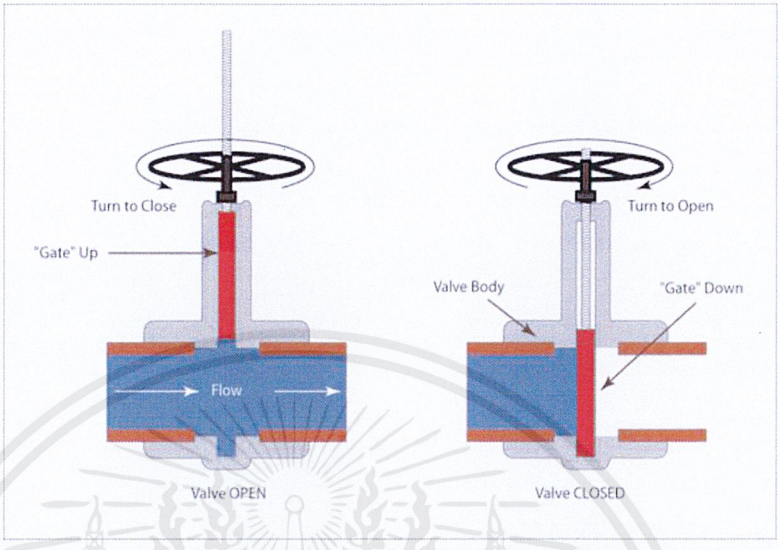
เป็นวาล์วกันกลับสำหรับบังคับน้ำไหลไปทางเดียว ป้องกันน้ำไหลย้อนกลับไปสร้างความเสียหายแก่อุปกรณ์ภายในระบบ อาศัยแรงดันจากสปริงที่ดันลิ้นกันกลับโดยจะเปิดก็ต่อเมื่อมีแรงดันน้ำมากระทำกับลิ้นมากกว่าแรงที่สปริงกด

รูปที่ 3.14 แสดงลักษณะการไหลของน้ำภายในสปริงเช็ควาล์ว [25]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.3.2. วาล์วประตูน้ำชนิดโซลิตเวจ (Solid Wedge Gate Valve)

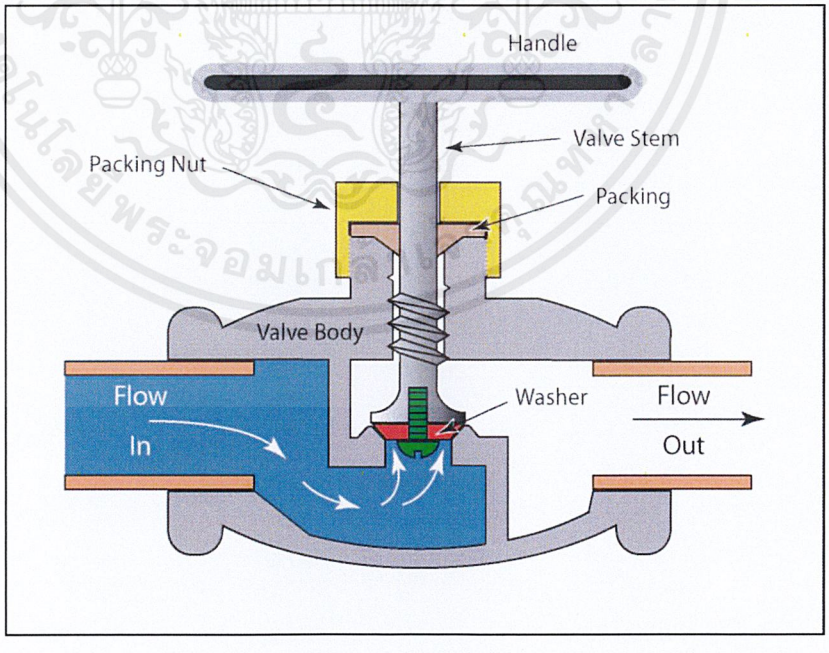
เป็นวาล์วที่มีลักษณะเป็นลิ่ม การไหลจะไม่ไหลพล่าน โดยถูกออกแบบให้เป็นวาล์วตัดตอน ซึ่งการไหลผ่านขณะเปิดสุดจึงเป็นการไหลเต็มที่ (Full flow)



รูปที่ 3.15 แสดงลักษณะการไหลของน้ำภายในวาล์วประตูน้ำชนิดโซลิตเวจ [26]

3.7.3.3. โกลบวาล์ว (Globe valve)

เป็นวาล์วที่ถูกออกแบบมาให้ปรับอัตราการไหลได้ละเอียด โดยการควบคุมที่ช่องว่างระหว่าง ดิสก์ (Disk) และซีท (Seat) ซึ่งทิศทางการไหลจะไหลจากล่างขึ้นบน

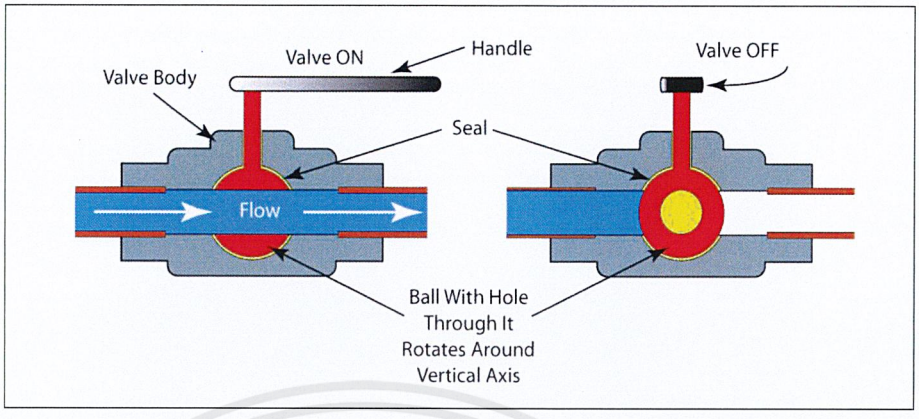


รูปที่ 3.16 แสดงลักษณะการไหลของน้ำภายในโกลบวาล์ว [27]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.3.4. บอลวาล์ว (Ball valve)

เป็นก๊อกน้ำแบบที่ก้านหมุนเพียง 90 องศาก็สามารถเปิดวาล์วได้เต็มที่หรือปิดวาล์วได้สนิท



รูปที่ 3.17 แสดงลักษณะการไหลของน้ำภายในบอลวาล์ว [28]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.4 โรตามิเตอร์ (Rotameter) [29]

โรตามิเตอร์ คือเครื่องวัดอัตราการไหลของของเหลวหรือก๊าซโดยอาศัยการไหลผ่านท่อปิดซึ่งมีพื้นที่หน้าที่ไม่สม่ำเสมอ (Tapered Tube) ภายในจะบรรจุทุ่นหรือลูกลอย (Float) เพื่อใช้สำหรับการอ่านอัตราการไหลด้วยการนำทฤษฎีในเรื่องของแรงลอยตัวมาประยุกต์

หลักการทำงาน

อาศัยความสมดุลของแรงที่กระทำต่อทุ่นเมื่อมีของไหลไหลผ่านท่อ กล่าวคือ แรงโน้มถ่วงของโลก (Gravity force, F_G) แรงลอยตัว (Buoyancy force, F_B) และแรงต้านการไหล (Drag force, F_D) ซึ่งสามารถแสดงดังสมการ

$$\sum F_y = 0 \tag{3.45}$$

$$F_B + F_D + F_G = 0 \tag{3.46}$$

หรือ

$$C_d \frac{\rho_{fluid} v^2 A_f}{2} + \rho_{fluid} \forall g - \rho_{float} \forall g = 0 \tag{3.47}$$

$$Q = A_a(y) \sqrt{\frac{2(\rho_{fluid} - \rho_{float})\forall g}{\mu_{fluid} C_d A_f}} = K_R \cdot A_a(y) \tag{3.48}$$

จากสมการข้างต้นจะได้ สมการแสดงอัตราการไหลของของไหลเมื่อไหลผ่านท่อซึ่งมีความสัมพันธ์กับพื้นที่หน้าตัดของวงแหวนระหว่างท่อและทุ่น ซึ่งจะแปรผันตามระดับความสูงของทุ่นเมื่ออัตราการไหลเปลี่ยนไป

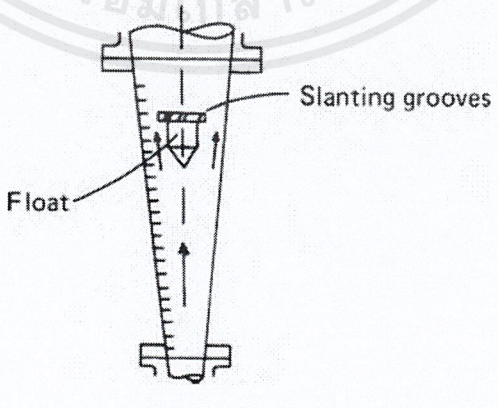
โดยที่ C_d คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงต้าน (Drag Coefficient)

A_f คือ พื้นที่หน้าตัดของทุ่น

$A_a(y)$ คือ พื้นที่หน้าตัดของวงแหวนระหว่างท่อและทุ่นซึ่งแปรผันตามระดับความสูง

$\forall$ คือ ปริมาตรของทุ่น

K_R คือ ค่าคงที่ของมิเตอร์



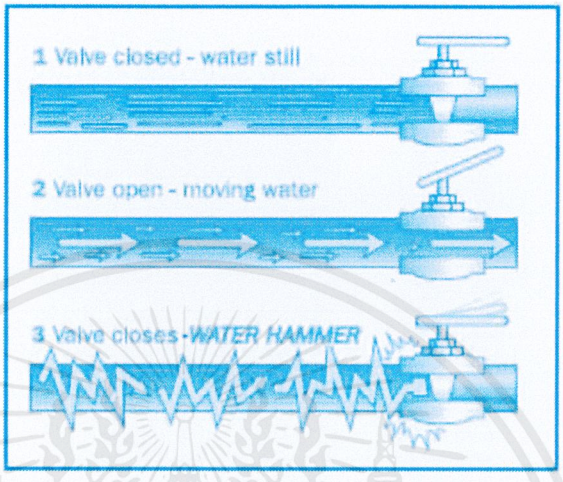
รูปที่ 3.18 หลักการทำงานของลูกลอยในโรตามิเตอร์ [30]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.8 ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น

3.8.1 ค้อนน้ำ (Water hammer) [31]

เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในกรณีที่ของเหลวในเส้นท่อเปลี่ยนแปลงความเร็วอย่างฉับพลัน ทำให้เกิดแรงกระแทกในเส้นท่อ ดังแสดงในรูปที่ 3.17



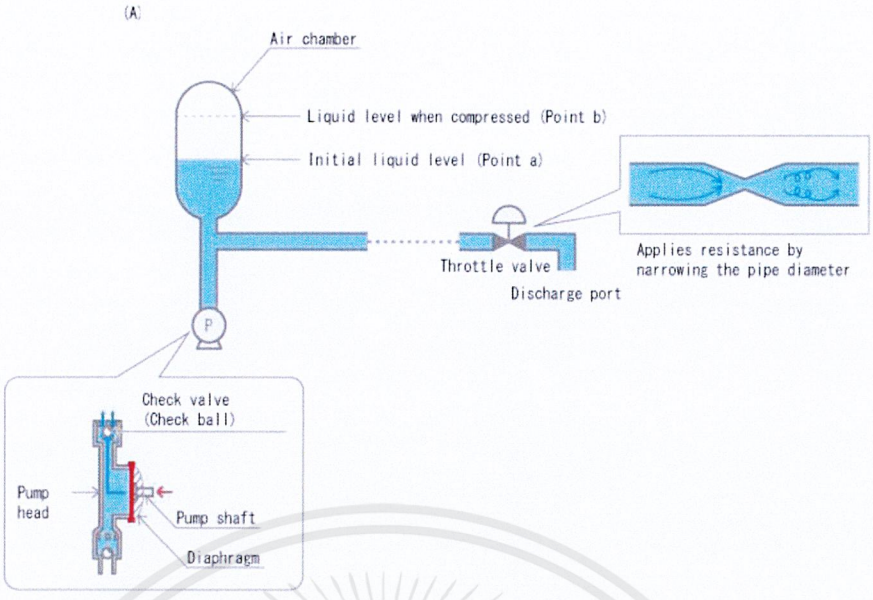
รูปที่ 3.19 แสดงการเกิดปรากฏการณ์ค้อนน้ำ [31]

การเปลี่ยนแปลงความเร็วของของเหลวในเส้นท่ออย่างรวดเร็วได้นั้น เกิดจากการปิดวาล์วอย่างฉับพลัน ในขณะที่ของเหลวเคลื่อนที่ด้วยความดัน ความรุนแรงของแรงที่เกิดขึ้นนั้นประกอบด้วยปัจจัยหลักๆ ได้แก่ ความหนาแน่นของของเหลวในท่อ อัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วของของเหลวที่วิ่งในท่อ ความยืดหยุ่นของเส้นท่อ หากเกิดค้อนน้ำอย่างรุนแรงมากอาจจะทำให้ท่อแตกหรือระเบิดได้

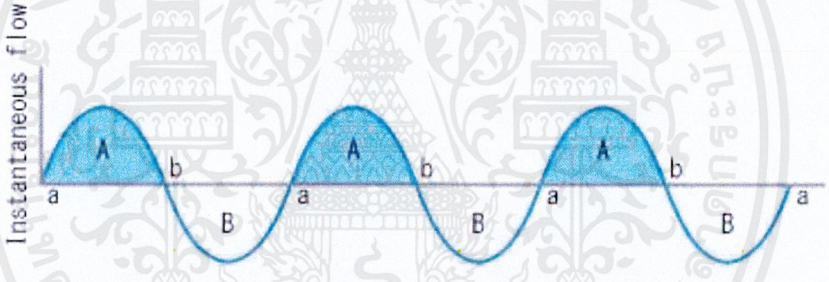
ในทางวิศวกรรมมีวิธีป้องกัน หรือบรรเทาความรุนแรงในการเกิดค้อนน้ำ เทคนิคที่ใช้งานทั่วไป คือการพยายามทำให้ความดันในระบบลดลง อาจเป็นการระบายความดันส่วนเกินที่เกิดขึ้นนี้ออกนอกระบบ หรือดูดซับแรงกระแทกที่เกิดขึ้นเพื่อลดความรุนแรง อุปกรณ์ที่นิยมใช้ ยกตัวอย่างเช่น

Air chamber [32] หลักการ คือการทำท่อกักเก็บอากาศเอาไว้ กรณีที่เกิดแรงกระแทกในเส้นท่ออากาศที่บรรจุในเส้นท่อนี้จะช่วยบรรเทาแรง หรือช่วยลดผลกระทบของแรงที่เกิดขึ้นได้ การติดตั้งทำได้โดยการเดินท่อขนาดเท่ากับน้ำดีที่เดินไว้ โดยเดินเป็นเส้นตรงในแนวดิ่งให้สูงขึ้นไปกว่าจุดจ่ายน้ำดีประมาณ 50 ซ.ม. และปิดปลายท่อด้วยจุกปิดใกล้กับวาล์วเปิดปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.20 หลักการทำงานของหม้อลมที่ติดตั้งกับไดอะแฟรมปั๊ม [33]



รูปที่ 3.21 กราฟแสดงอัตราการไหลของปั๊มไดอะแฟรม [33]

โดยที่ A คือ อัตราการไหลทางด้านไหลออกจากปั๊มและ B คือ ด้านไหลเข้าปั๊ม

3.8.2 ปรากฏการณ์การเกิดโพรงไอน้ำ (Cavitation) [34]

ปรากฏการณ์การเกิดโพรงไอน้ำเป็นปรากฏการณ์ที่น้ำเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นไอทำให้มีปริมาตรเพิ่มขึ้นเนื่องมาจากเมื่อน้ำไหลผ่านส่วนต่างๆของอุปกรณ์ ทำให้มีความเร็วที่เปลี่ยนไปเนื่องจากพื้นที่หน้าตัดเปลี่ยน โดยเริ่มจากการที่ของเหลวไหลผ่านบริเวณพื้นที่หน้าตัดขนาดเล็ก ณ จุดนั้นเป็นจุดมีความดันลดลงต่ำกว่าความดันไอในขณะที่ความเร็วยังไม่เปลี่ยนแปลง สิ่งที่เกิดขึ้นนี้ทำให้สังเกตเห็นฟองอากาศได้ด้วยตาเปล่า จากนั้นของไหลจะมีความเร็วเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.9 การทดสอบ

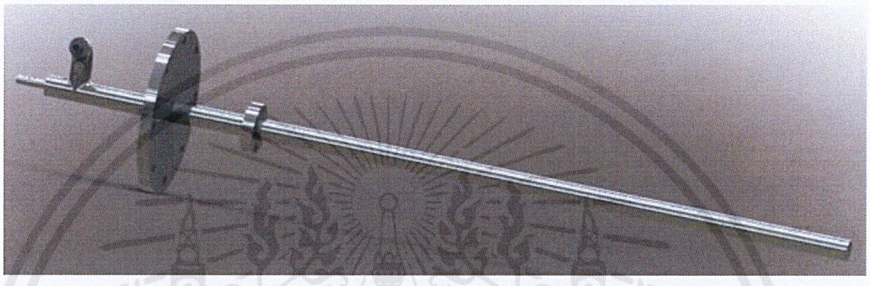
3.9.1 การทดสอบความดันตามมาตรฐาน ASME B31.1-2012

การทดสอบนิวเมติก (Pneumatic Testing) จะทดสอบรอยรั่วภายในท่อ โดยใช้แก๊สที่ไม่สามารถติดไฟได้และไม่เป็นพิษ ไม่ควรทดสอบเกิน 25 psig (175 kPa)หรือไม่ควรต่ำกว่า 1.2 และไม่มากกว่า 1.5 เท่าของความดันที่ออกแบบไว้ ไม่ใช้ความดันไม่เกินกว่าความดันที่อุปกรณ์สามารถทนได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
การคำนวณ และออกแบบชุดทดสอบ

ในบทนี้จะนำเสนอถึงรายละเอียดการออกแบบละการคำนวณโดยคำนึงถึงข้อจำกัดของพื้นที่ติดตั้ง ทฤษฎีที่นำมาอ้างอิง ได้แก่ ทฤษฎีการเผาไหม้ หลักการทำงานของเตาเผาเชื้อเพลิงชีวมวล การทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลในห้องปฏิบัติการเผาไหม้และทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน เป็นต้น เพื่อให้ได้มาซึ่งอุปกรณ์ทดสอบการสะสมของเถ้าลอยบนผนังท่อแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลผง แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงอุปกรณ์ทดสอบการสะสมของเถ้าลอยบนผนังท่อแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลผง

4.1 การออกแบบระบบทดสอบการสะสมของเถ้าลอยบนผนังท่อแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลผง

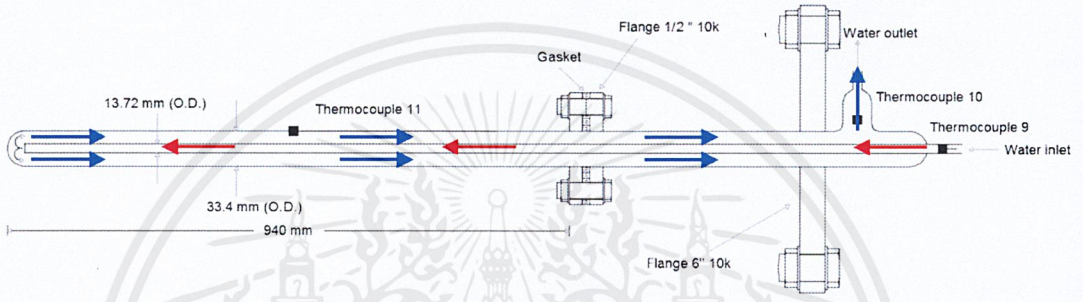
4.1.1 แนวคิดในการออกแบบ

จากบทนำและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ได้กล่าวมาในข้างต้น พบว่าการเกาะของเถ้าลอยและสแลคนั้นเกิดกับพื้นผิวที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดควบแน่นของเถ้า เช่น เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน หม้อต้ม ท่อภายในระบบ เป็นต้น ซึ่งเราสามารถแบ่งกระบวนการเกาะของเถ้าบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนได้ 2 ส่วน คือ 1.สแลค เป็นการควบแน่นของสารประกอบที่อยู่ในเชื้อเพลิง เมื่อได้รับความร้อนจากการเผาไหม้จนระเหยกลายเป็นแก๊สล่องลอยอยู่ในเตาเผา เมื่อเจอพื้นผิวที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดควบแน่นจะไปควบแน่นที่บริเวณนั้นๆโดยมีลักษณะเป็นของเหลวเหนียว 2. เถ้าลอยซึ่งเป็นของแข็งที่เกิดจากองค์ประกอบภายในเชื้อเพลิงที่ไม่สามารถเผาได้วิ่งเข้ามาชนกับผิวแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีสแลคที่เหนียวเกาะอยู่ จากนั้นทั้งสองส่วนนี้จะรวมกันและเย็นตัวลงกลายเป็นของแข็งเนื่องจากการถ่ายเทความร้อนที่ได้รับไปยังผนังที่และของไหลทำงานตามลำดับ พอกหนาขึ้นเรื่อยๆจนถึงจุดวิกฤซึ่งคือจุดที่อุณหภูมิของสแลคและเถ้าลอยที่มาเกาะมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิของแก๊สร้อน ทำให้ไม่เกิดการพอกขึ้นอีก การเกาะที่กล่าวขึ้นมานั้นจะมีลักษณะคล้ายหินงอกหินย้อยที่พบให้ถ้ำตามแหล่งท่องเที่ยวทั่วไป

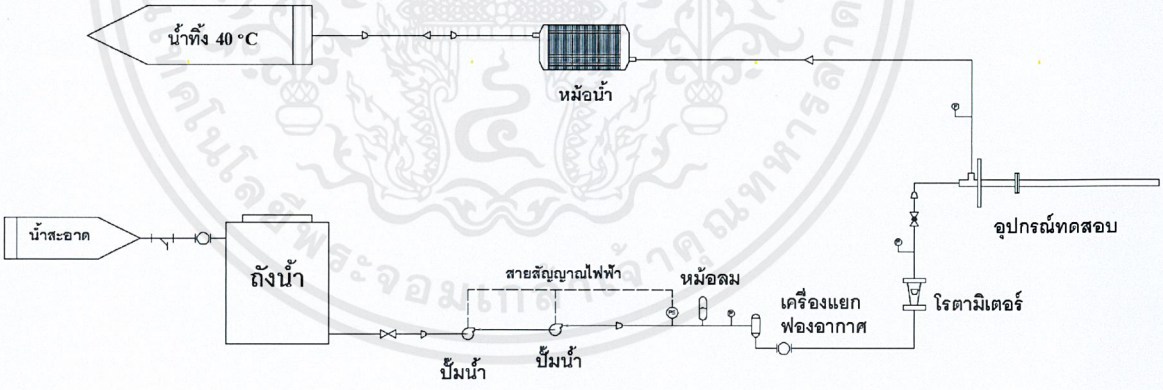
การออกแบบระบบและสร้างชิ้นงาน ผู้ศึกษาได้ทำจำลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนให้ที่ใกล้เคียงกับการใช้งานในภาคอุตสาหกรรมซึ่งมีลักษณะเป็นท่อยื่นเข้าไปในเตาและใช้น้ำในการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แลกเปลี่ยนความร้อนกับแก๊สร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ แต่ในการจำลองผู้ศึกษาต้องคำนึงถึงความปลอดภัยเป็นอันดับแรกจึงทำให้ทางผู้ศึกษาเลือกของไหลทำงานเป็นน้ำโดยการควบคุมอุณหภูมิน้ำที่ออกจากอุปกรณ์ทดสอบให้มีค่าไม่เกิน 73 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันการเดือดของสารทำงานและความดันที่สูงขึ้นภายในอุปกรณ์ในส่วนของการออกแบบอุปกรณ์ทดสอบถัดมา คือทำการออกแบบระบบการสะสมของเถ้าให้ไม่ส่งผลกระทบต่อผู้ร่วมทำการทดลองในระบบต่างๆหรือส่งผลกระทบน้อยที่สุด สามารถทำการซ่อมบำรุงได้ง่ายและสะดวกแก่การเคลื่อนย้ายหรือจัดวางในรูปแบบใหม่โดยใช้เวลาที่สั้น อีกทั้งผู้ศึกษาได้คำนึงเรื่องของน้ำเสียที่มีความจำเป็นต้องทิ้งสู่สิ่งแวดล้อม โดยมาตรฐานสิ่งแวดล้อมกำหนดน้ำเสียที่ทิ้งสู่สิ่งแวดล้อมที่ 40 องศาเซลเซียส จึงมีความจำเป็นต้องนำหม้อน้ำรถยนต์มาประยุกต์ใช้เพื่อระบายความร้อนให้น้ำที่ทิ้งสู่สิ่งแวดล้อมเป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนดไว้



รูปที่ 4.2 แสดงการป้อนน้ำเข้า-ออกอุปกรณ์ทดสอบ



รูปที่ 4.3 แสดงการป้อนน้ำเข้าระบบทดสอบ

4.2 สมการการเผาไหม้

ในการออกแบบอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการเผาไหม้นั้น เราจำเป็นต้องทราบถึงคุณสมบัติของเชื้อเพลิงเพื่อที่จะสามารถนำมาวิเคราะห์สมการการเผาไหม้ให้ได้มาซึ่งอัตราส่วนระหว่างอากาศต่อเชื้อเพลิงเพื่อที่ผู้ออกแบบจะได้นำไปประกอบกับอากาศส่วนเกินในแต่ละเงื่อนไขของการทดลองและนำมาหาคุณสมบัติของแก๊สร้อน (Flue gas) มาออกแบบอุปกรณ์ในระบบทดสอบการสะสมของเถ้าลอยบนผนังท่อแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลผง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1 สมการเผาไหม้สำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลผง

เชื้อเพลิงชีวมวลที่นำมาหาคุณสมบัติของแก๊สร้อน คือ ยางพารา ซึ่งกรณีศึกษานี้จะทำการเผาไหม้ที่สภาวะเผาไหม้พอดี (Stoichiometry) ในการวิเคราะห์สมการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงจะคิดที่สภาพนำส่ง ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิงผงไม้ยางพารา

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, %	45.42	48.22
ไนโตรเจน, %	0.45	0.48
ออกซิเจน, %	45.54	42.86
ซัลเฟอร์, %	0.00	0
ค่าความร้อนสูง, กิโลแคลอรี/กก.	4,180	4,440
ค่าความร้อนต่ำ, กิโลแคลอรี/กก.	3,860	4,100

ที่มา : สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1.1 ณ สภาพนำส่ง (ความชื้น 5.81%)

จากทฤษฎีการเผาไหม้ในก่อนหน้านี้ ทำให้ได้สมการการเผาไหม้ที่สภาวะเผาไหม้พอดี (Stoichiometry) ดังนี้

$$[0.2918C+0.4364H+0.0024N+0.1945O]+[0.0497H+0.0248O]+0.3036(O_2+3.76N$$

$$\longrightarrow 0.2918O_2+0.2431H_2O+1.1431N_2 \quad (3.1)$$

สมการการเผาไหม้ของการทดลองในสภาวะปริมาณสัมพันธ์ที่มีอากาศส่วนเกิน 15%ดังนี้

$$[0.3141C+0.4219H+0.0026N+0.1856O]+[0.4219H+0.1856O]+0.7055(O_2+3.76N_2)$$

$$\longrightarrow 0.3153O_2+0.2358H_2O+2.6543N_2+0.3774O_2 \quad (3.2)$$

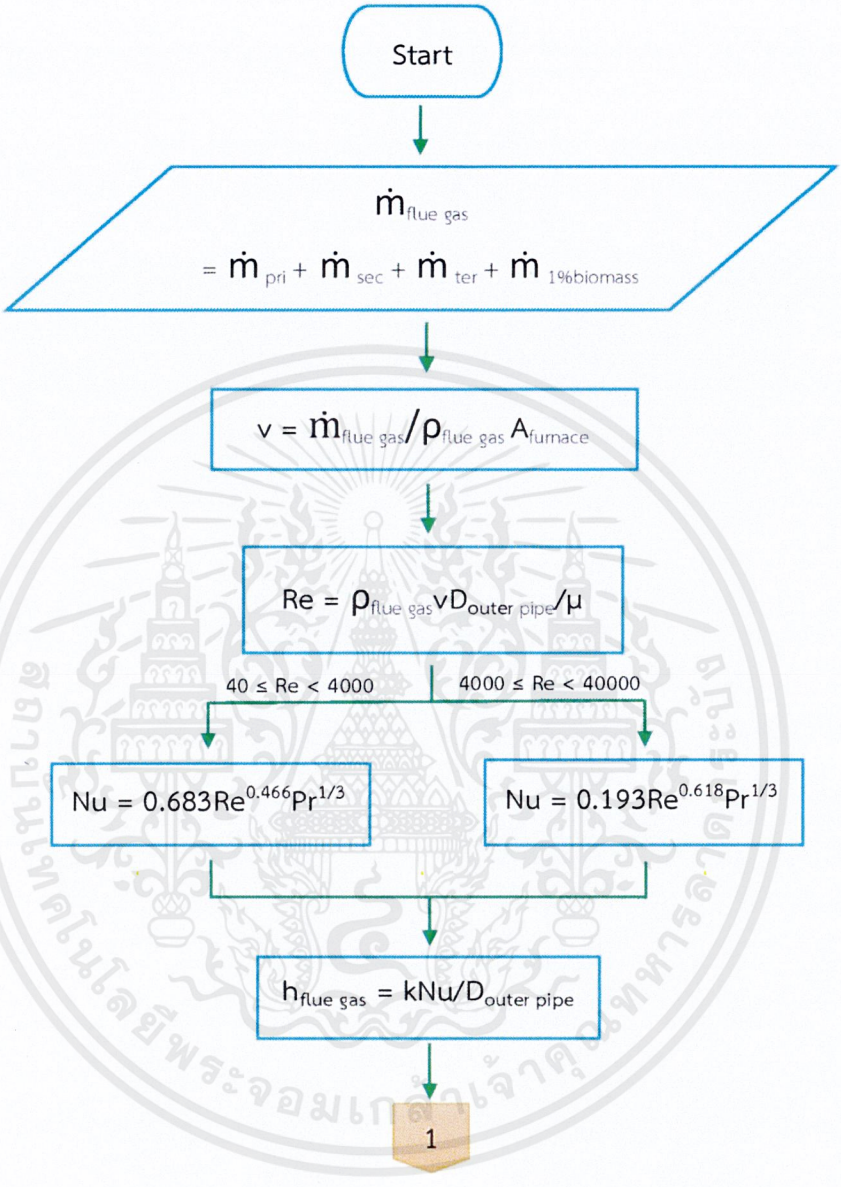
อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงจริงมีค่าเท่ากับ 12.3416579 และอัตราส่วนสมมูลมีค่าเท่ากับ 0.465116279 ทำให้ทราบคุณสมบัติของไอเสียที่ได้ดังนี้

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติของไอเสีย [35]

Thermal conductivity, k (W/m°C)	0.0856
Density, ρ (kg/m^3)	0.28
Specific heat, Cp (kJ/kg°C)	1.26
Thermal Diffusivity, α (m^2/s^2)	3.06x10^{-4}
Dynamic viscosity, μ (kg/m • s)	4.8x10^{-5}
Kinematic Viscosity, ν (m^2/s)	1.76x10^{-4}
Prandtl Number	0.71

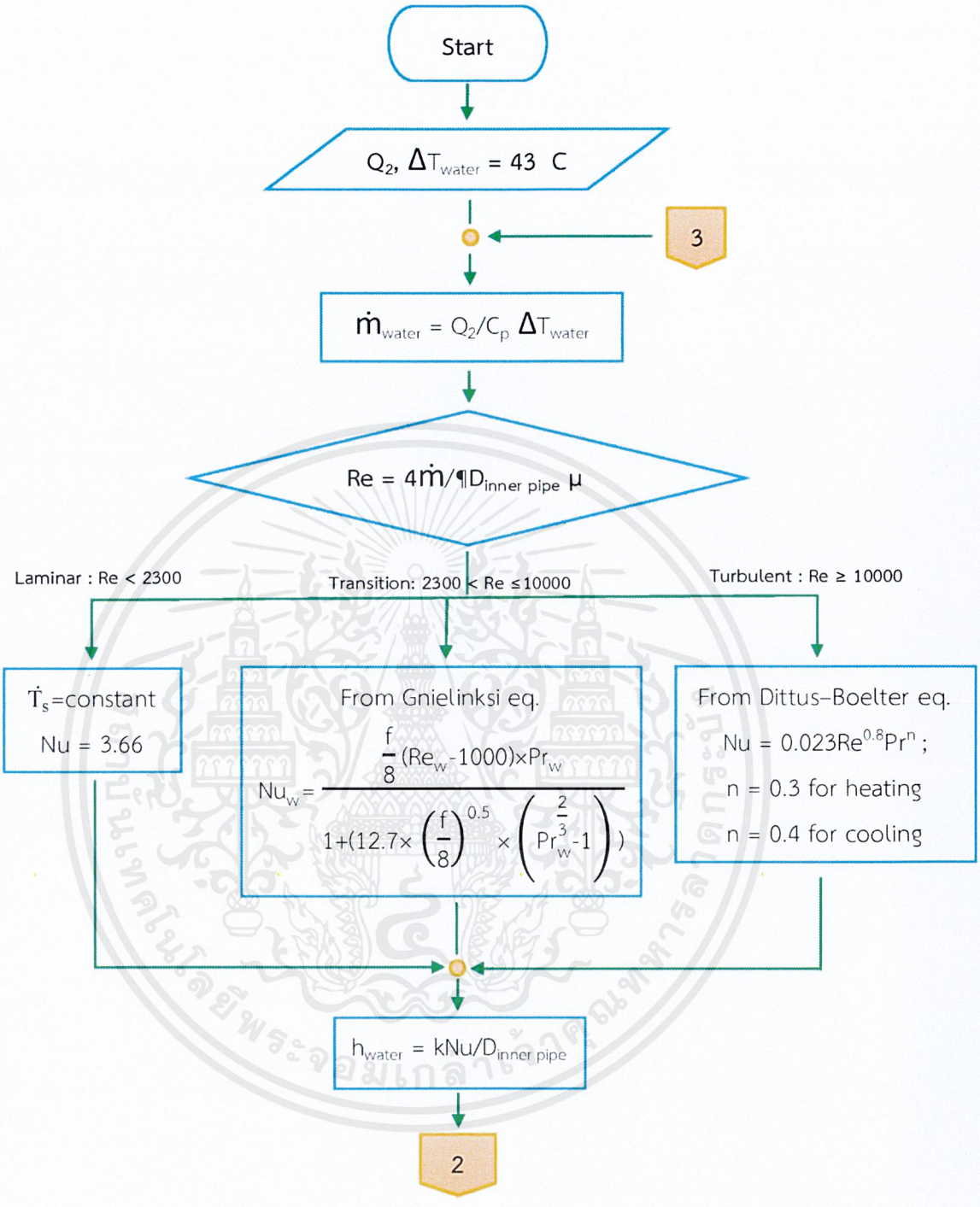
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 โปรแกรมการคำนวณการถ่ายเทความร้อนโดยใช้ MATLAB และผลการคำนวณโดยใช้โปรแกรม



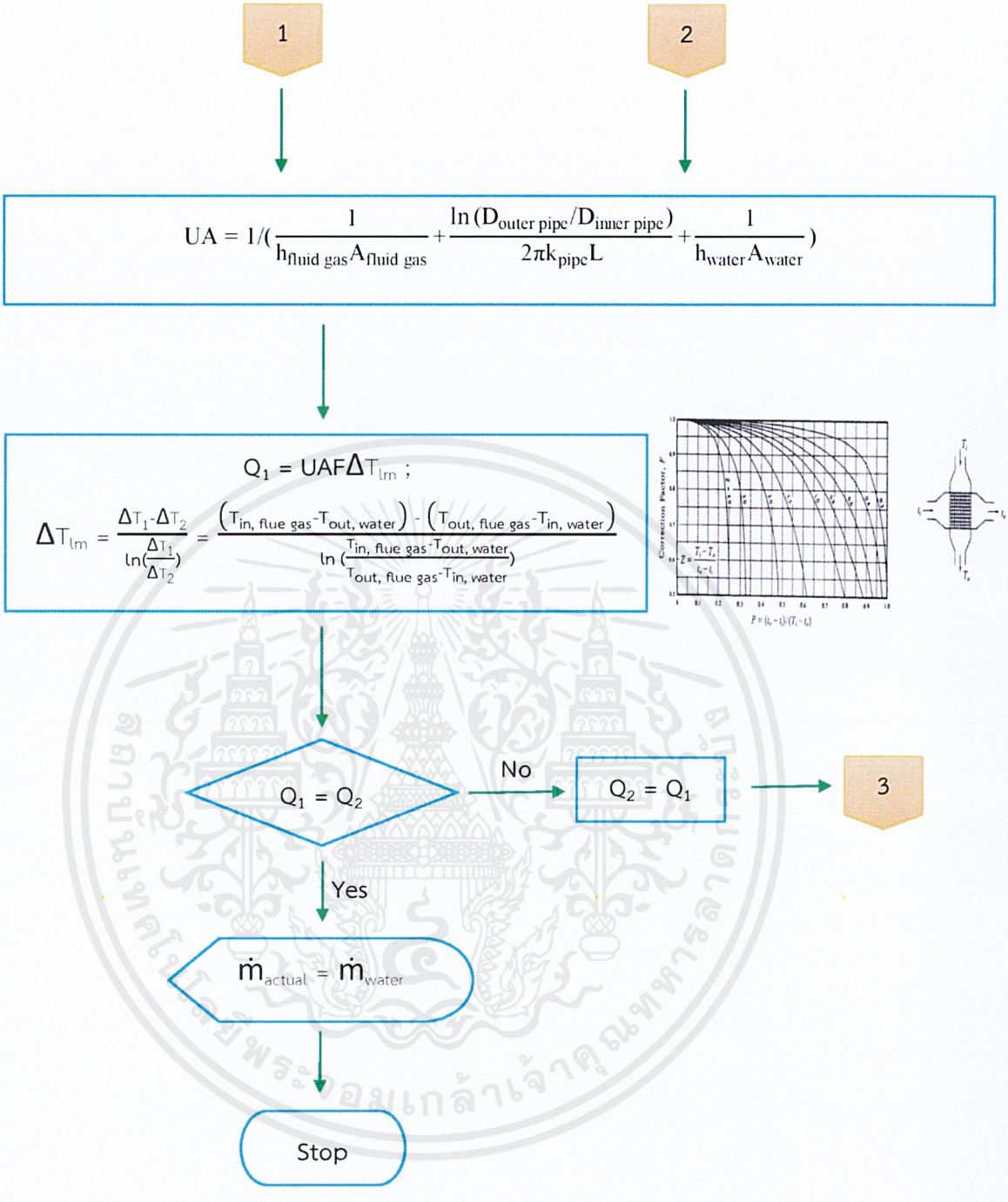
รูปที่ 4.4 แสดง flow chart การคำนวณอัตราการไหลของน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 แสดง flow chart การคำนวณอัตราการไหลของน้ำ (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 แสดง flow chart การคำนวณอัตราการไหลของน้ำ(ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมการคำนวณการถ่ายเทความร้อนโดยใช้ MATLAB

```
%% properties parts %%

% properties system
F = 0.996  ;              % correction factor

% properties of pipe
kp = 21.4 ;               % thermal conductivity of pipe @ 500C
Do = 0.0334 ;             % outer diameter of pipe
ro = Do/2 ;               % outer radius of pipe
Di = Do-(2*0.00277) ;     % inner diameter of pipe
ri = Di/2 ;               % inner radius of pipe
L =  0.94 ;               % length of pipe
Dt = (Do/Di) ;            % diameter ratio

% properties of flue gas at 1025C = (1250+800)/2
den = 0.284643923 ;       % density of flue gas
kf = 0.085673507 ;        % thermal conductivity of flue gas
visf = 4.8284*(10^(-5)) ; % dynamic viscousity of flue gas
Prf = 0.710185291 ;       % Prandtl number of flue gas
mf = 0.1406 ;             % mass flow rate of flue gas
Af = pi*(0.55^2);         % furnace area
Tinf = 1250 ;             % inlet temperature of flue gas
Toutf = 800 ;             % outlet temperature of flue gas

% properties of water 51.377 = (72.4314+30.3226)/2
kw = 0.644 ;              % thermal conductivity of water
cpw = 4181 ;              % specific heat of water
Toutw = 72.4314 ;         % outlet temperatue of water
Tinw = 30.3226 ;          % inlet temperature of water
Aw = 2*pi*ri*L ;          % surface area
Prw = 3.55 ;              % Prandtl number of water
visw = 0.547*(10^(-3)) ;  % dynamic viscousity of water
Tw = Toutw - Tinw ;       % delta T,water
hrad = 5.964785351 ;      % adiabatic flame temp.
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมการคำนวณการถ่ายเทความร้อนโดยใช้ MATLAB (ต่อ)

```
%% calculate part flue gas %%

% calculate velocity
vf = mf/(den*Af) ;                  % velocity of flue gas

% calculate Reynold Num of flue gas
Ref = (den*vf*Do)/visf ;            % Reynolds number of flue gas

% calculate Nusselt Number of flue gas Zukauskas equation
Nuf = 0.683*((Ref^0.466)*(Prf^(1/3))) ;  % Nusselt number of flue gas

% calculate heat transfer coefficient flue gas
hf = Nuf*kf/(2*ro); % convection heat transfer coefficient of flue gas

% log mean temperature
Tlm =(((Tinf-Toutw)-(Toutf-Tinw))/log((Tinf-Toutw)/(Toutf-Tinw)));

Rrad = 1/(hrad*Af) ;
Rconvi = 1/(hf*Af) ;
Rcond = (log(Dt)/(2*pi*kp*L)) ;

tol = 10^-5 ;      %tolerance
Q1old = 3*(10^5) ;  % Random

%% start trial and error calculation %%
for iter = 1 : 100 ;
    mw = Q1old/(cpw*Tw) ;              % mass flow rate of water
    Rew = (4*mw)/(pi*Di*visw) ;
    f=((0.790*log(Rew))-1.64)^(-2) ; % friction factor

        if Rew <= 2300
           Nuw = 3.66 ;                % Surface temp. const.
        elseif  2300 < Rew <= 10000
           Nuw = ((f/8)*(Rew-1000)*Prw)/(1+(12.7*((f/8)^0.5)*((Prw^(2/3))-1))) ;
        else Rew > 10000 ;
           Nuw = 0.023*(Rew^0.8)*(Prw^(0.4)) ; % Ditttus-Boelter equation
        end
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมการคำนวณการถ่ายเทความร้อนโดยใช้ MATLAB (ต่อ)

```
    hw = (Nuw*kw)/Di ;
    Rconvo = 1/(hw*Aw) ;
    Rtot = (1/((1/Rrad)+(1/Rconvi)))+ Rcond + Rconvo ;
    UA = 1/Rtot ;
    Q1 = UA*F*Tlm ;
    mw1 = Q1/(cpw*Tw) ;
    deltaQ = Q1 - Q1old ;
    dQ = abs(deltaQ) ;

    if dQ > tol
        fprintf('%5d  %15.5f  %15.5f  %15.5f\n',iter,Q1,Q1old,mw1);
        Q1old = Q1 ;

    else dQ < tol ;
       break

    end
end
 Q2 = Q1/1000 ;
 mw2 = mw1*60 ;
 mw3 = mw1*3600 ;
 fprintf('Iterate = %3d times\n',iter-1) ;
 fprintf('Total heat transfer rate = %8.2f W or %5.2f kW \n',Q1,Q2) ;
 fprintf('Mass flow rate = %5.4f kg/s or %8.4f kg/min or %8.4f
kg/hr\n',mw1,mw2,mw3) ;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลที่ได้จากโปรแกรมคำนวณโดยใช้ MATLAB

ตารางที่ 4.3 แสดงผลที่ได้จากโปรแกรมคำนวณโดยใช้ MATLAB

Reynolds number of flue gas ($Re_{flue\ gas}$)	102.34	-
Reynolds number of water (Re_{water})	$6.67x10^3$	-
Nusselt number of flue gas ($Nu_{flue\ gas}$)	5.26	-
Nusselt number of water (Nu_{water})	41.96	-
Heat-transfer coefficient of flue gas ($h_{flue\ gas}$)	13.51	$W/m^2 \cdot K$
Heat-transfer coefficient of water (h_{water})	969.94	$W/m^2 \cdot K$
Conduction resistant (R_{cond})	0.0014	-
Inlet convection resistant ($R_{conv,i}$)	0.0779	-
Outer convection resistant ($R_{conv,o}$)	0.0125	-
Flue gas (v_f)	0.52	m/s^2

ผลการคำนวณอัตราการไหลของน้ำที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนจากโปรแกรมที่ใช้ MATLAB 287.29 ลิตรต่อชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 อุณหภูมิเปลวในสภาวะที่ไม่มีการสูญเสียความร้อน (Adiabatic Flame Temperature)

อุณหภูมิเปลวในสภาวะที่ไม่มีการสูญเสียความร้อน เป็นอุณหภูมิสุดท้ายหลังปฏิกิริยาการคายความร้อนที่ 25 องศาเซลเซียส ณ สภาวะที่ไม่มีการสูญเสียความร้อนและความดันคงที่ ดังนั้น เราสามารถแทนค่าความร้อนของสารตั้งต้นได้จากสมการปฏิกิริยาเคมีที่ 25 องศาเซลเซียส

จากสมการที่ 3.1 เราสามารถหา H_{prod} เท่ากับ $\sum N\bar{h}_f$

$$H_{react}= \sum \left(N\bar{h}_f\right)_{react}$$

$$H_{react}=-181,139.65 \text{ kJ/kmol}$$

$$H_{react}=H_{prod}$$

$$H_{prod}=N_{co_2}\left(\bar{h}_f+\bar{h}_T+\bar{h}_{298}\right)_{CO_2}+N_{H_2O}\left(\bar{h}_f+\bar{h}_T+\bar{h}_{298}\right)_{H_2O}+N_{N_2}\left(\bar{h}_f+\bar{h}_T+\bar{h}_{298}\right)_{N_2}$$

$$H_{react}=0.31537\Delta h_{CO_2}+0.2358\Delta h_{H_2O}+1.2353\Delta h_{N_2}=141,927.968\frac{\text{kJ}}{\text{kg-mol}}$$

กำหนดให้ใช้ค่าเอนทาลปีของก๊าซที่อุณหภูมิ 2000K

$$0.31537(121,944)+0.2358(99,112)+1.2353(74,305)=141,927.968\frac{\text{kJ}}{\text{kg-mol}}$$

กำหนดให้ใช้ค่าเอนทาลปีของก๊าซที่อุณหภูมิ 2500K

$$0.31537(97,477)+0.2358(77,952)+1.2353(59,738)=141,927.968\frac{\text{kJ}}{\text{kg-mol}}$$

ประมาณค่าภายในช่วง(Interpolate) หาค่าอุณหภูมิของแก๊สร้อนได้เท่ากับ

$$T = 2,347.7 \text{ K} = 2074 \text{ °C}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 การแผ่รังสี (Radiation)

จากข้อมูลของการแผ่รังสีจากแก๊สร้อนได้ดังนี้

ตารางที่ 4.4 แสดงข้อมูลของการแผ่รังสีจากแก๊สร้อน

Product	Composition	%by mole	Partial pressure (atm)	
CO_2	0.315376889	0.156061957	0.156061957	(P_c)
H_2O	0.235845927	0.11670664	0.11670664	(P_w)
O_2	0.049226951	0.024359598		
N_2	1.420394357	0.702871805		
SO_2	0	0	1	Total pressure, atm
Sum	2.020844124	1		

ตารางที่ 4.5 แสดงข้อมูลของเตาเผา

Diameter (m)	1.10
Length (m)	1.64
Volume (m^3)	1.561553
พื้นที่รับการแผ่รังสี (m^2)	5.678376

ตารางที่ 4.6 แสดงข้อมูลที่ได้จากการคำนวณ

Mean Beam Length for Fire Chamber (L), m	0.99
Pc*L	0.15450134
Pw*L	0.11553957
(Pw+P)/2	0.55835332
(Pc*L)+(Pw*L)	0.27004091
Pw/(Pw+Pc)	0.42785952

ตารางที่ 4.7 แสดงข้อมูลที่ได้จากกราฟ

$\Delta\varepsilon$	0.003	จากรูปที่ 3.7
ε_{CO_2}	0.039	จากรูปที่ 3.5
ε_{H_2O}	0.018	จากรูปที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หา ε_{gasous}

$$\varepsilon_{gasous}=\varepsilon_{CO_2}(P_cL)+\varepsilon_{H_2O}(P_wL)-\Delta\varepsilon$$

$$\varepsilon_{gasous}=0.005105$$

หา h_{rad} ได้จาก

Adiabatic flame temperature. : 2347.7 K

ค่าคงที่ของ Stefan Bolzman : 5.67×10^{-8}

$T_{inner\ surface}$: 906.15K

ค่า Emissivity (ε): 0.005105

$$h_{rad}=\varepsilon\sigma(T_{rad}^2+T_{adiabatic}^2)(T_{rad}+T_{adiabatic})$$

h_{rad} = 5.96478535 $W/m^2\cdot K$

4.6 เฮดของปั๊มอนุกรมและการสูญเสียของเฮด

4.6.1 การสูญของอุปกรณ์หลัก

$$h_{eq}=\frac{\Delta P}{\rho g}\ (m)$$

ตัวอย่างการคำนวณ

$$h_{eq}=\frac{37.2x10^3x6.89}{998x9.81}=26.2\ \text{เมตร}$$

ตารางที่ 4.8 แสดงความดันและการสูญเสียของเฮดจากอุปกรณ์หลักภายในระบบ

อุปกรณ์	Inlet pressure (psia)	Outlet pressure (psia)	ΔP (psia)	Head loss (m)
Deaerator	55	52.5	2.5	1.76
Testing device	55.2	18	37.2	26.2.
Radiator	16	5	11	7.73
			Total (m)	35.69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.2 การสูญเสียหลัก (Major Losses, h_L)

จากข้อมูล

อัตราการไหล 258 ลิตรต่อชั่วโมง

ความเร็ว 0.29 เมตรต่อวินาที

เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 0.017 เมตร

ความยาว 16.64 เมตร

ε=0.000007

$\frac{\varepsilon}{D}$=0.000412

การคำนวณเพื่อเลือกสมการ

$$Re= \frac{\rho vD}{\mu} = \frac{998x0.29x0.017}{1.01xz10^{-6}} =4941.27$$

จาก Moody chart จะได้

Friction factor = 0.035

ดังนั้นจะได้

$$h_L = f_D \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} = 0.035 \frac{16.64}{0.017} \frac{0.29^2}{2x9.81} =0.15 \text{ เมตร}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.3 การสูญเสียรอง (Minor Losses, h_L)

$$h_m = \frac{kv^2}{2g}$$

ตัวอย่างการคำนวณ

การสูญเสียของเฮด ที่วาล์วประตูน้ำขนาด1นิ้ว

จากตารางที่ 2.3 : k= 0.18

$$h_m = \frac{kv^2}{2g} = \frac{0.18x0.29^2}{2x9.81} = 0.000792 \text{ เมตร}$$

ตารางที่ 4.9 แสดงการสูญเสียรองของอุปกรณ์ภายในระบบ

อุปกรณ์	k	การสูญเสียต่อชิ้น	จำนวน	การสูญเสียรวมแต่ละอุปกรณ์
gate valve	0.22	0.000968	1	0.000968
standard tee	1.8	0.007922	5	0.039612
90 elbow	0.81	0.003565	22	0.078432
check valve	4	0.017605	1	0.017605
globe valve	10	0.044013	1	0.044013
ball valve	0.08	0.000352	1	0.000352
45 elbow	0.43	0.001893	2	0.003785
lift check valve	16.2	0.071301	1	0.071301
			รวม (เมตร)	0.2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7 โปรแกรมประมวลผลภาพและผลจากการประมวลผลภาพ

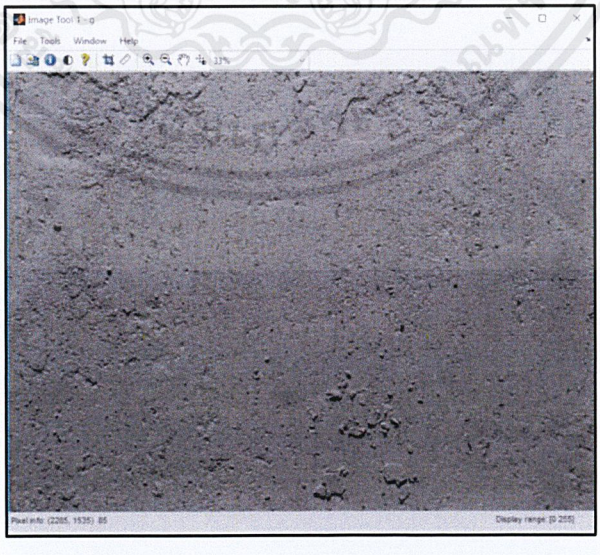
```
f=imread('File name.jpg');
figure,imshow(f)
g=rgb2gray(f);
figure,imshow(g)
imtool(g);
figure,imhist(g)
```

ตัวอย่างการประมวลผลภาพ วันที่31/01/2560

1. อ่านขอมูลภาพจากไฟล์รูป
2. แสดงรูปที่อ่าน

รูปที่ 4.5 แสดงภาพสีจากโปรแกรม

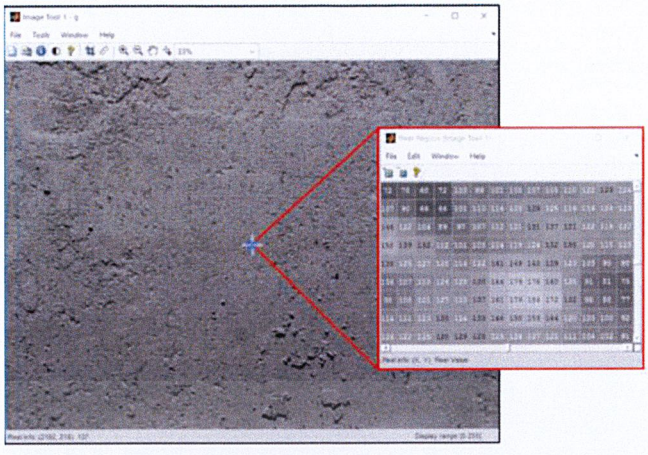
3. แปลงรูปสีเป็นรูป Gray scale



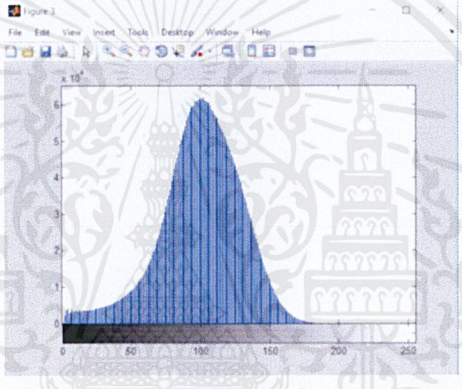
รูปที่ 4.6 แสดงภาพGray scaleจากโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. โปรแกรมจะแปลงผลพิกเซลภายในภาพจากนั้นจะแสดงข้อมูลเป็นกราฟฮิสโทแกรม



รูปที่ 4.7 แสดงภาพพิกเซล Gray scale จากโปรแกรม



รูปที่ 4.8 แสดงกราฟฮิสโทแกรมที่ได้จากโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
อุปกรณ์ เงื่อนไขและวิธีการทดลอง

ในบทนี้จะนำเสนอถึงการสร้างอุปกรณ์ทดสอบการสะสมของเถ้าลอยบนผนังแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับเตาเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผง โดยคำนึงถึงข้อจำกัดในเรื่องของพื้นที่ในการติดตั้งและการคำนวณหาอัตราการไหลของน้ำเพื่อเลือกขนาดของปั๊มให้เพียงพอตามการออกแบบและมีความความปลอดภัยในการทดลอง นอกจากนี้ยังจะกล่าวถึงรายละเอียดเกี่ยวกับอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบเครื่องมือวัด เงื่อนไขของการทดลอง และวิธีการทดลอง เป็นต้น

5.1 การสร้างอุปกรณ์ทดสอบการสะสมของเถ้าลอยบนผนังแลกเปลี่ยนความร้อน

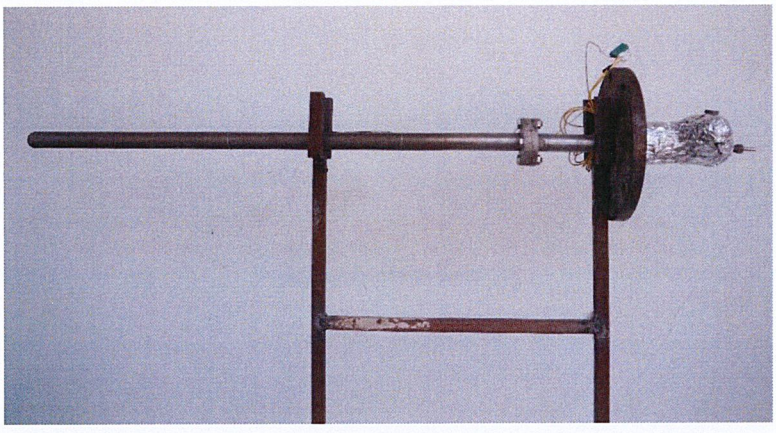
หลังจากการสำรวจสถานที่ในการติดตั้งอุปกรณ์ทดลองและข้อจำกัดในการทำการทดลองนำมาสู่การออกแบบและคำนวณอุปกรณ์ทดสอบการสะสมของเถ้าลอยบนผนังแลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสมสำหรับเตาเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผง ในหัวข้อนี้จะนำเสนอถึงการประกอบชิ้นงานทดสอบระบบการจำลองการแลกเลี่ยนความร้อน รวมไปถึงการติดตั้งชิ้นงานภายในห้องเผาไหม้ ดังแสดงในรูปที่ 5.1

5.1.1 ชิ้นงานทดสอบการสะสมของเถ้าลอยบนพื้นผิวอุปกรณ์

ขนาดของชิ้นงานที่ได้ออกแบบตามข้อจำกัดของพื้นที่ภายในและภายนอกห้องเผาไหม้ทำให้ต้องออกแบบบางส่วนของอุปกรณ์ที่จะต้องเข้าไปอยู่ภายในเตาโดยได้มีการออกแบบให้มีหน้าแปลนเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ขนาด 0.5 นิ้ว รับความดันได้ 10 $kg \cdot f/cm^2$ เพื่อทำการถอดประกอบสำหรับการชั่งน้ำหนักของชิ้นงานและยังเป็นส่วนรองรับน้ำหนักไม่ให้ท่อโก่งงอในขณะรับความร้อน ในส่วนของท่อที่นำมาสร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเป็นท่อเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ขนาด 1 นิ้ว Sch 10 ยาว 1.30เมตร ท่อป้อนน้ำเข้าไปในอุปกรณ์เป็นท่อเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 1/4 นิ้ว Sch 10 และอุปกรณ์ฟิตติ้งที่นำมาใช้ประกอบตัวชิ้นงานทดสอบประกอบด้วย ฝาครอบเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 1 นิ้ว Sch 10 ข้องอ 90องศา เหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 1 นิ้ว Sch 10 หางปลาไหลเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 1/4 นิ้ว ดังรูปที่ 5.1

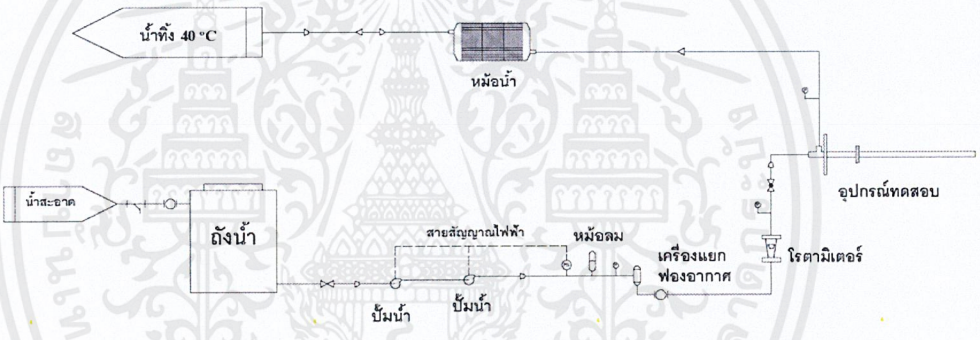
การประกอบชิ้นงานทำโดยการเชื่อมรอบข้อต่อด้วยวิธีการเชื่อมแบบการเชื่อมทิก (Tungsten Inert Gas welding, TIG) ซึ่งเป็นการเชื่อมแบบอาร์คทังสเตนที่มีแก๊สเฉื่อยปกคลุมเพื่อป้องกันการปนเปื้อนหรือการทำปฏิกิริยากับอากาศรอบข้าง แก๊สเฉื่อยที่ใช้คืออาร์กอน จากการนำมาทดสอบรอยรั่วจากการเชื่อมโดยใช้การทดสอบความดันตามมาตราฐาน ASME B31.1-2012

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

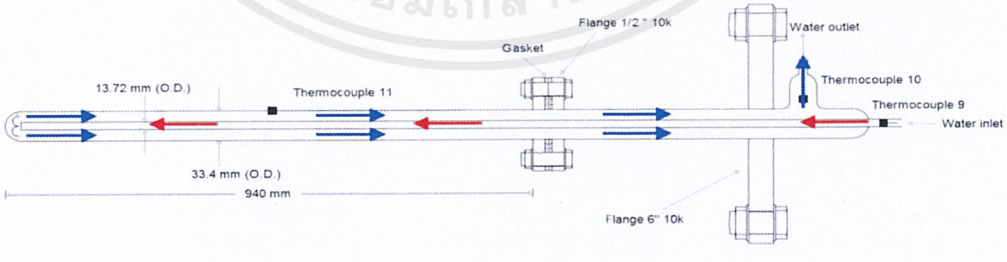


รูปที่ 5.1 อุปกรณ์ทดสอบการสะสมของเถ้าลอยบนผนังแลกเปลี่ยนความร้อน

เมื่อทำการทดลองน้ำในถังเก็บจะถูกป้อนเข้าระบบไหลผ่านอุปกรณ์ต่างๆ ที่ได้ออกแบบไว้ในส่วนของอัตราการไหลถูกควบคุมโดยโกลบวาล์วและอ่านค่าอัตราการไหลของน้ำจากโรตามิเตอร์ ซึ่งทิศทางของน้ำภายในชิ้นงานจะเป็นไปตามรูปที่ 5.2

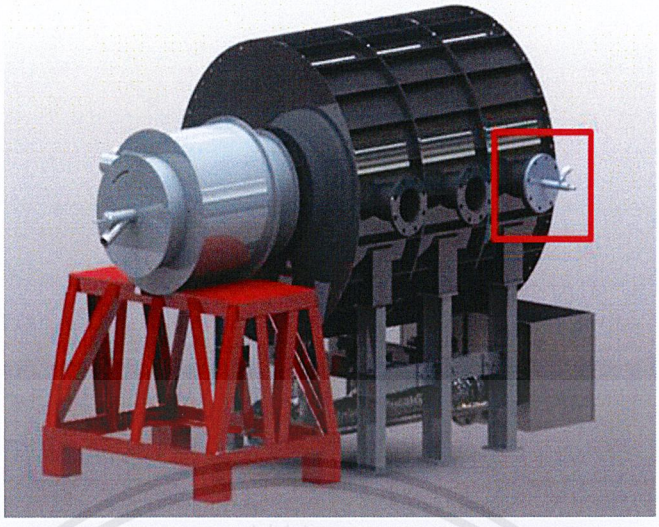


รูปที่ 5.2 แสดงProcess and instrumentation diagram

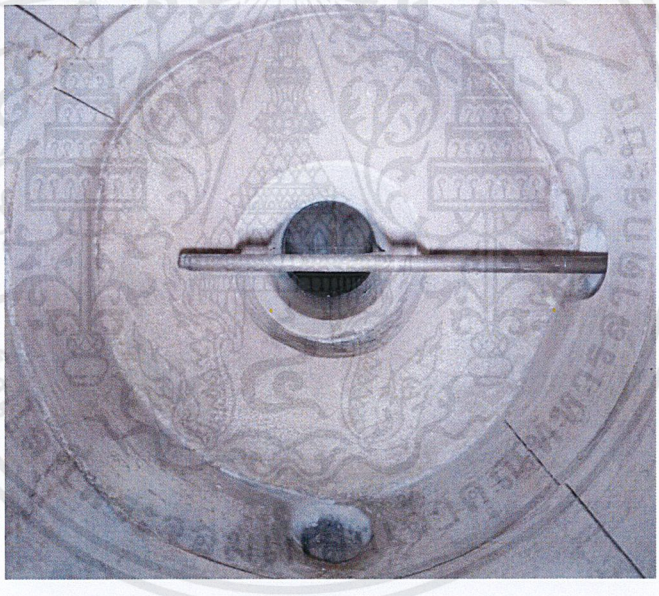


รูปที่ 5.3 แสดงทิศทางการไหลของน้ำภายในชิ้นงานทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.4 แสดงตำแหน่งที่ติดตั้งชิ้นงานทดสอบในห้องเผาไหม้



รูปที่ 5.5 แสดงตำแหน่งของชิ้นงานทดสอบภายในห้องเผาไหม้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 อุปกรณ์ภายในระบบ

5.2.1 เครื่องแยกอากาศ (Deaerator)

ถูกออกแบบมาให้แยกอากาศกับน้ำเพื่อให้มีเฉพาะน้ำที่เข้าอุปกรณ์ทดลองและทำการติดตั้งเครื่องแยกอากาศก่อนที่น้ำจะเข้าอุปกรณ์ เพื่อป้องกันอากาศเข้าสู่ชิ้นงานขณะทดลองเนื่องจากอากาศที่หลุดเข้าไปจะมีอุณหภูมิสูงซึ่งอาจก่อให้เกิดอันตรายได้

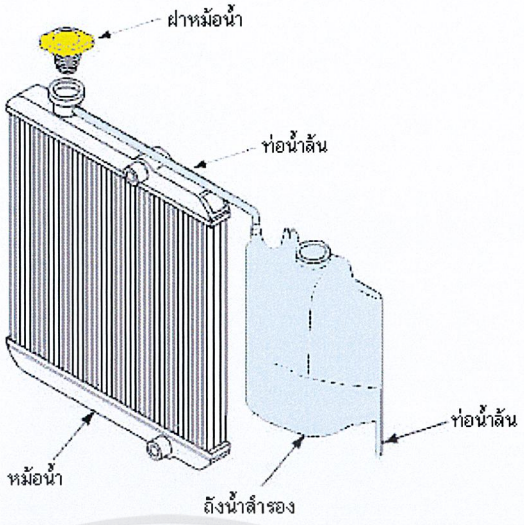
รูปที่ 5.6 แสดงเครื่องแยกอากาศ

5.2.2 หม้อน้ำ (Radiator) [36]

หม้อน้ำ คืออุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำหล่อเย็นกับอากาศ ซึ่งในการทดลองใช้น้ำในการหล่อเย็น โดยน้ำที่ไหลมาจากอุปกรณ์ทดสอบที่ได้รับความร้อนจนมีอุณหภูมิ 73 องศาเซลเซียสจะไหลเข้ามาสู่หม้อน้ำทางด้านล่าง จากนั้นน้ำดังกล่าวจะไหลขึ้นไปตามท่อน้ำในหม้อน้ำ โดยท่อน้ำเหล่านี้จะเชื่อมติดกับครีบระบายความร้อน (รังผึ้ง) ซึ่งทำจากโลหะที่ถ่ายเทความร้อนได้อย่างรวดเร็ว เมื่อน้ำที่มีอุณหภูมิสูงเหล่านี้เคลื่อนตัวจากด้านล่างลงสู่ด้านบนก็จะถ่ายเทความร้อนออกไปให้กับครีบระบายความร้อนดังกล่าว ขณะเดียวกันพัดลมหม้อน้ำ (Fan) ก็จะทำการหมุนเพื่อดูดอากาศที่อยู่ด้านนอกหม้อน้ำไหลผ่านครีบระบายความร้อนหม้อน้ำออกมาทางด้านหลังเป็นการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำร้อนภายในหม้อน้ำกับอากาศ

เมื่อน้ำที่มีอุณหภูมิสูงไหลขึ้นสู่ด้านบนอุณหภูมิลดลงต่ำกว่า 40 องศาเซลเซียส จะถูกปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.7 แสดงกลไกการทำงานของหม้อน้ำ [36]

รูปที่ 5.8 แสดงหม้อน้ำที่ใช้ในระบบ

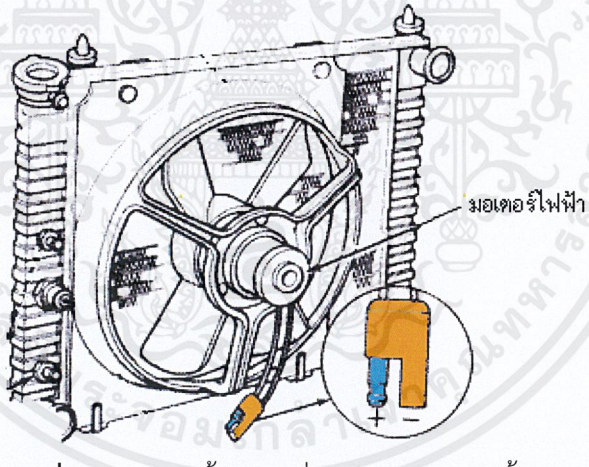
นอกจากนั้นหากน้ำภายในหม้อน้ำมีการขยายตัวจะทำให้เกิดแรงดันสูงจนเกิดการล้นออกมาจากหม้อน้ำ ดังนั้นหม้อน้ำจึงมีเซฟตี้วาล์วแบบพิเศษที่มีสปริงดันวาล์วสุญญากาศไว้ และมีท่อน้ำล้นนำน้ำหล่อเย็นไปพักไว้ในถังน้ำสำรองเพื่อพักน้ำหล่อเย็นเอาไว้ เมื่ออุณหภูมิน้ำหล่อเย็นในระบบลดลงนั้นคือน้ำหยุดการขยายตัวแล้วกลับสู่สภาวะปกติ น้ำที่อยู่ในถังสำรองกลับเข้าไปในหม้อน้ำในอุณหภูมิปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.9 แสดงกลไกการทำงานของสปริงรับแรงดัน [36]

5.2.3 พัดลมหม้อน้ำ (Radiator Fan) [37]

พัดลมหม้อน้ำทำหน้าที่เพิ่มพลังงานให้กับของไหลให้มีความเร็วขึ้นเพื่อนำของไหลไประบายความร้อน โดยจะพัดพาเอาความร้อนด้านหน้าหม้อน้ำผ่านครีบระบายความร้อนออกมาทางด้านหลังหม้อน้ำซึ่งพัดลมหม้อน้ำขับเคลื่อนด้วยแรงหมุนจากมอเตอร์ที่ต่อสวิตช์มาจากแบตเตอรี่

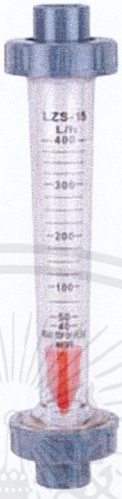


รูปที่ 5.10 แสดงขั้วไฟฟ้าที่ต่อกับพัดลมหม้อน้ำ [37]

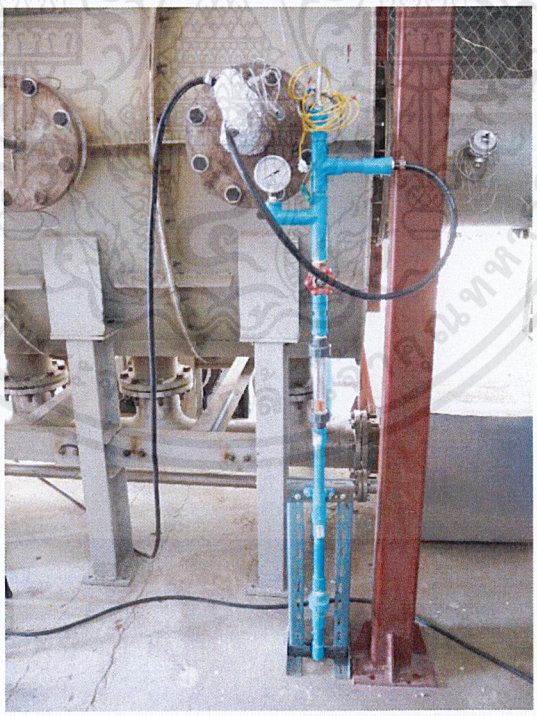
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.4 โรตามิเตอร์ (Rotameter)

เป็นอุปกรณ์ที่วัดอัตราการไหลโดยทำการอ่านค่าจากลูกลอยซึ่งเครื่องมือวัดชนิดนี้ได้ประยุกต์ใช้ในเรื่องของแรงลอยตัวมาใช้งาน โดยภายในจะมีท่อที่มีความชันเพื่อสร้างพื้นที่หน้าตัดที่แตกต่างทำให้เกิดอัตราการไหลเพิ่มขึ้นหรือลดลง



รูปที่ 5.11 แสดงโรตามิเตอร์วัดอัตราการไหลของน้ำ



รูปที่ 5.12 แสดงตำแหน่งที่ติดตั้งโรตามิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

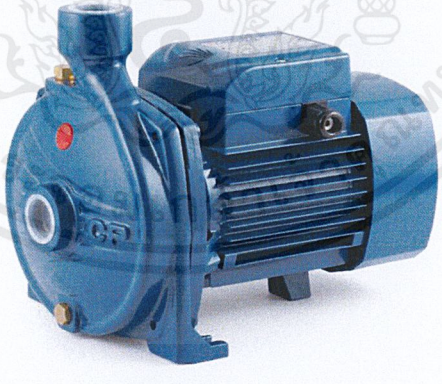
5.2.5 ปั๊มน้ำอัตโนมัติ (Automatic pump)

เป็นปั๊มน้ำที่ควบคุมโดยการใช้สวิตช์ความดันที่วัดความดันจากน้ำภายในท่อ ปั๊มชนิดนี้จะมีถังลมอยู่ด้านล่างทำให้เวลาที่ปั๊มทำงานและหยุดทำงานจะลดการกระแทกของน้ำที่มีอัตราการสูบน้ำ 33 ลิตรต่อนาที ระยะส่ง 12 เมตร ระยะดูด 8 เมตร และท่อดูด 3/4 นิ้ว

รูปที่ 5.13 แสดงปั๊มน้ำอัตโนมัติ Mitsubishi – 105QS

5.2.6 ปั๊มหอยโข่ง (Centrifugal pump)

ปั๊มหอยโข่งเป็นปั๊มที่สร้างความดันจากแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่เกิดจากการหมุนและรูปทรงของใบพัด แรงดันที่เกิดขึ้นจะสร้างแรงดันสูงผลักน้ำขึ้นไปตามท่อ อัตราการสูบน้ำ 110 ลิตรต่อนาที ระยะส่ง 32 เมตร ระยะดูด 9 เมตร และท่อดูด 1 นิ้ว



รูปที่ 5.14 แสดงปั๊มหอยโข่ง Aqua CPM-158

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.7 เครื่องบันทึกอุณหภูมิ (Data logger)

เครื่องบันทึกอุณหภูมิ คืออุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่า แล้วทำการบันทึกค่าที่วัดได้ลงในเครื่องตามช่วงเวลาที่เรากำหนดไว้ เช่น อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ เป็นต้น โดยการแปลงสัญญาณทางไฟฟ้าเป็นข้อมูล

รูปที่ 5.15 แสดงเครื่องบันทึกอุณหภูมิ Data logger GRAPHTEC midi LOGGER GL820

5.2.8 เทอร์โมคัปเปิลชนิด K (Thermocouples type K)

เทอร์โมคัปเปิลคืออุปกรณ์วัดอุณหภูมิที่ทำงานโดยอาศัยคุณสมบัติทางไฟฟ้าของโลหะ 2 ชนิดที่เชื่อมติดกัน เมื่ออุณหภูมิที่ปลายลวดด้านที่เชื่อมกันแตกต่างกับปลายลวดด้านที่เหลือจะเกิดความต่างศักดิ์ มีหน่วยเป็น ไมโครโวลท์ (μV) หรือ มิลลิโวลท์ (mV) ซึ่งเรานำความต่างศักย์ที่พบนี้มาแปลงเป็นอุณหภูมิ

รูปที่ 5.16 แสดงหัวโพรบของเทอร์โมคัพเปิลชนิด K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.9 วาล์วปรับอัตราการไหลอากาศ

เป็นวาล์วปรับอัตราการไหลอัตโนมัติโดยลักษณะของวาล์วเป็นแบบปีกผีเสื้อสำหรับการเผาไหม้ในย่านต่างๆ ซึ่งอากาศจะไปผสมกับเชื้อเพลิงที่ถูกลำเลียงจากสกรูลำเลียงเชื้อเพลิงก่อนเข้าห้องเผาไหม้ รวมไปถึงการเป็นอากาศในส่วนที่ 2 สำหรับการทำให้เกิดการหมุนควงและอากาศส่วนที่ 3 สำหรับหล่อเย็นผนังห้องเผาไหม้

รูปที่ 5.17 แสดงวาล์วปรับอัตราการไหลอากาศ

5.2.10 ถังพักเชื้อเพลิงชีวมวลผง (Hopper) และสกรูลำเลียงเชื้อเพลิง (Screw feed)

ถังพักเชื้อเพลิงเป็นถังสำหรับเก็บเชื้อเพลิงที่ได้รับการบดแล้วมาเก็บไว้สำหรับการเผาไหม้โดยสามารถเก็บไว้เผาไหม้ได้ 45 นาที เมื่อต้องการใช้งานจะใช้สกรูลำเลียงมาผสมกันที่ห้องผสมก่อนเข้าห้องเผาไหม้

รูปที่ 5.18 แสดงถังพักเชื้อเพลิงชีวมวลผง และสกรูลำเลียงเชื้อเพลิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 เงื่อนไขและการทดลอง

5.3.1 เงื่อนไขการทดลอง

ตารางที่ 5.1 แสดงเงื่อนไขของการทดลอง

Excess air 15%	Ratio(P:S:T) 25:65:10					
kW	LPG (L/min)	ID fan (Hz)	Biomass feed (Hz)	Primary air (m^3/s)	Secondary air (m^3/s)	Tertiary air (m^3/s)
100	4	12	0.7	0.012	-	-
150	4	12	1.17	0.012	0.0290	0.0070
200	4	12	1.56	0.020	0.0390	0.0100
250	4	12	2.07	0.020	0.0490	0.0120
300	4	12	2.42	0.023	0.0596	0.0092
300	-	12	2.42	0.023	0.0596	0.0092

5.3.2 วิธีการทดลอง

1. ทำการอุ่นเตาประมาณ 30 นาที จากนั้นทำการป้อนเชื้อเพลิง ตามตารางเงื่อนไขการทดลอง
2. โดยจะเริ่มเปลี่ยนขั้นของกิโลวัตต์ความร้อนเมื่ออุณหภูมิของเตาเผามีค่าคงที่ จดค่าอุณหภูมิของน้ำเข้า-ออกของตัวอุปกรณ์ทดสอบ
3. ควบคุมอุณหภูมิน้ำออกจากตัวอุปกรณ์ทดสอบให้มีค่าไม่เกิน 73 องศาเซลเซียส และค่อยๆ ปรับอัตราการไหลของน้ำเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

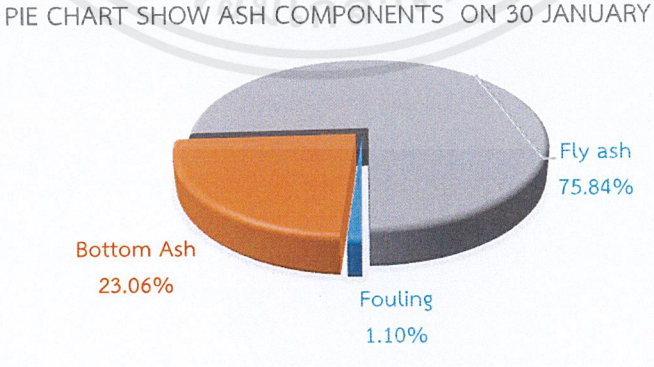
ผลการทดลอง และอภิปรายผลการทดลอง

จากบทที่ผ่านมาเราได้ทราบถึงหลักการในการออกแบบระบบทดสอบทดสอบการสะสมของเถ้าลอยบนผนังแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับเตาเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผง รวมไปถึงวิธีการทดสอบการทำงานของชุดทดสอบ และเงื่อนไขการทดสอบการเผาไหม้ของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลเป็นที่เรียบร้อยแล้ว สำหรับบทนี้จึงเป็นการนำเสนอผลการทดลอง และการอภิปรายผลที่ได้จากการทดลอง ซึ่งจะนำไปสู่ข้อสรุปทางด้านการทำงานของระบบต่างๆ การเกาะตัวของเถ้าลอย รวมไปถึงการนำเถ้าหนักมากวิเคราะห์ด้วยการประมวลผลภาพเพื่อวิเคราะห์แนวโน้มความสมบูรณ์ของการเผาไหม้

6.1 สัดส่วนของเถ้าที่เกิดขึ้นในการทดลอง

ตารางที่ 6.1 แสดงสัดส่วนเถ้าที่เกิดขึ้นในการทดลอง

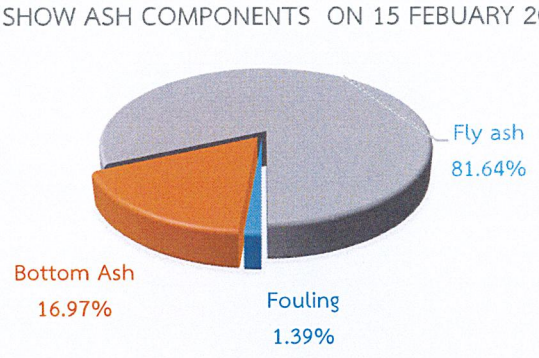
Test No.	Experiment condition	Ash		
		Bottom ash (g)	Fly ash (g)	Fouling (g)
1	Bluff body and non second swirler	672	2210	32
2	Bluff body and non second swirler	854	4109	70
3	Bluff body with second swirler	972	2478	34
4	Bluff body and non second swirler	856	1657	30
5	non bluff body and non second swirler	462	1093	24



รูปที่ 6.1 แสดงองค์ประกอบภายในเถ้าของการทดลอง Test No.1

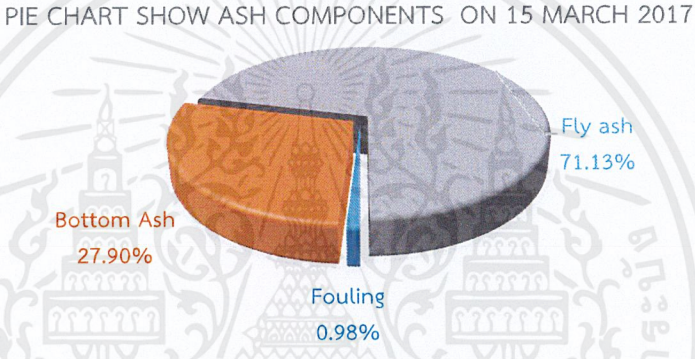
Bluff body and non-second swirler

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



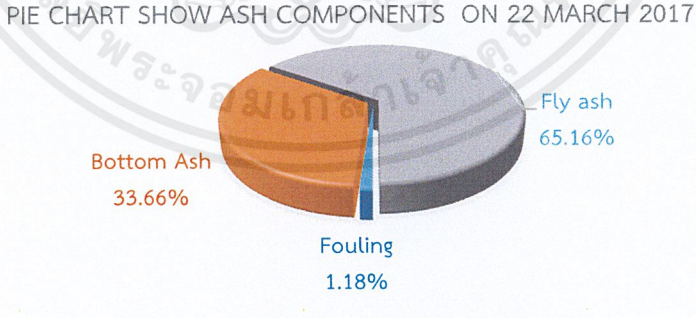
รูปที่ 6.2 แสดงองค์ประกอบภายในเถ้าของการทดลอง Test No.2

Bluff body with second swirler



รูปที่ 6.3 แสดงองค์ประกอบภายในเถ้าของการทดลอง Test No.3

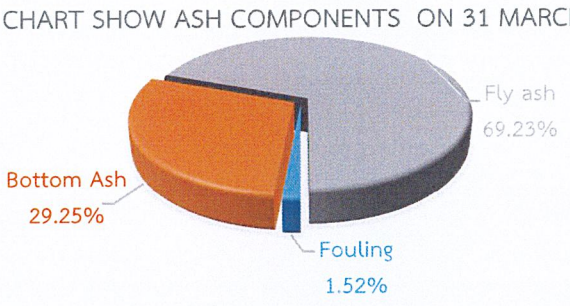
Bluff body and non-second swirler



รูปที่ 6.4 แสดงองค์ประกอบภายในเถ้าของการทดลอง Test No.4

Bluff body and non-second swirler

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.5 แสดงองค์ประกอบภายในเถ้าของการทดลอง Test No.5

Non Bluff body and non-second swirler

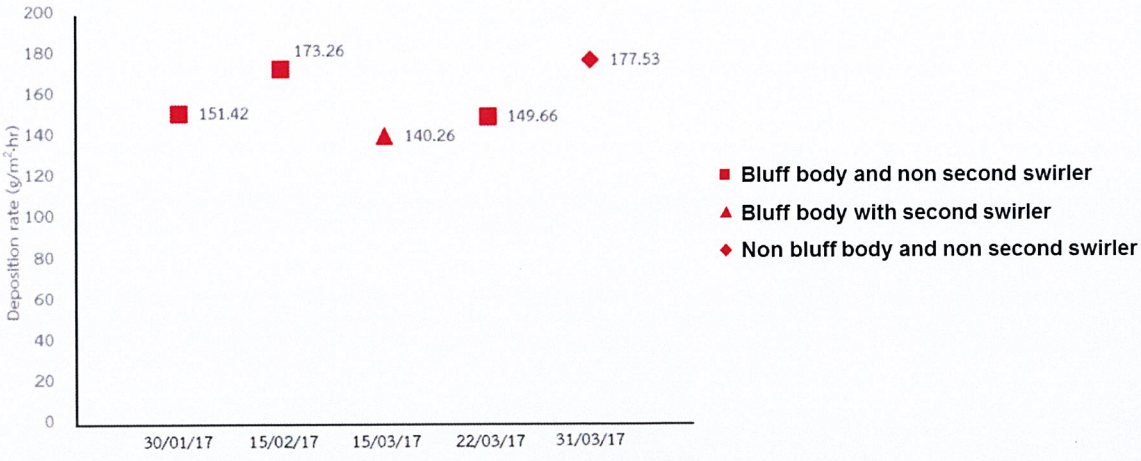
6.2 อัตราการสะสมของเถ้าลอยบนพื้นผิวอุปกรณ์

อัตราการสะสมของเถ้าลอยบนพื้นผิวอุปกรณ์เป็นสิ่งที่บ่งบอกถึงเถ้าลอยที่ลอยมาเกาะบนพื้นผิวชิ้นงานทดสอบต่อพื้นที่ในเวลา 1 ชั่วโมง ทำให้สามารถหาเงื่อนไขหรือย่านในการดำเนินการที่เหมาะสมได้ โดยอัตราการสะสมของเถ้าลอยบนพื้นผิวอุปกรณ์สามารถหาได้จากการชั่งน้ำหนักของเถ้าลอยบนพื้นผิวอุปกรณ์เทียบกับพื้นที่ที่ได้รับความร้อนขนาด 0.094 ตารางเมตร และเวลาในทดลอง 1ชั่วโมง

ตารางที่ 6.2 แสดงอัตราการสะสมของเถ้าลอยบนพื้นผิวอุปกรณ์ในการทดลองแต่ละครั้ง

Test No.	Experiment condition	Fouling (g)	Operating time (hr)	Fouling deposition rate ($g/m^2 \cdot hr$)
1	Bluff body and non second swirler	32	2.27	151.42
2	Bluff body and non second swirler	70	4.33	173.26
3	Bluff body with second swirler	34	2.60	140.26
4	Bluff body and non second swirler	30	2.15	149.66
5	Non bluff body and non second swirler	24	1.45	177.53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.6 แสดงอัตราการสะสมของเถ้าลอยบนพื้นผิวอุปกรณ์ในการทดลองแต่ละครั้ง ($g/m^2 \cdot hr$)

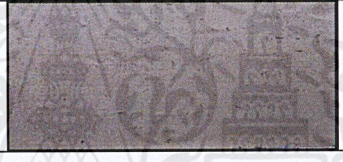
จากผลการทดลองพบว่าอัตราการสะสมของเถ้าลอยบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนที่ได้ทำการออกแบบไว้อยู่ในช่วง 140 – 178 $g/m^2 \cdot hr$ ลักษณะของการเกาะที่เกิดขึ้นนั้นเป็นการเกาะแบบหลวม ซึ่งเกิดจากการที่เถ้าลอยและสแลคที่ลอยอยู่ภายในเตาเผาขณะทำการเผาไหม้ เย็นตัวอย่างรวดเร็วเมื่อมาสัมผัสกับพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันมาก โดยอุณหภูมิสูงสุดของแก๊สร้อนที่วัดได้อยู่ที่ 1257 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิผิวแลกเปลี่ยนความร้อนอยู่ที่ 750 องศาเซลเซียส ดังนั้นเราจึงสามารถบอกได้ว่าการเกาะที่เกิดขึ้นนั้นยังอยู่ในช่วงเวลาแรกเริ่มของการเกาะ ทางผู้จัดทำคาดว่าหากใช้เวลาในการทดลองนานกว่านี้จะทำให้เห็นลักษณะการเกาะที่เกิดขึ้นแตดต่างไปจากเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3 การอ้างอิงเถ้าที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้โดยใช้วิธีการประมวลผลภาพ

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาไหม้ประกอบไปด้วย ออกซิเจน คาร์บอนไดออกไซด์ ไนโตรเจนไดออกไซด์ และเถ้า เมื่อเราต้องการทำการวิเคราะห์การเผาไหม้ โดยส่วนใหญ่แล้วเราเลือกที่จะใช้เครื่องวิเคราะห์แก๊สร้อน (Flue Gas Analyzer) แต่ผู้ทำการทดลองได้เล็งเห็นถึงทางเลือกในการวิเคราะห์ความสมบูรณ์ของการเผาไหม้ซึ่งได้นำเสนอในส่วนของวรรณกรรมปริทัศน์ไปแล้วนั้นจึงมีแนวคิดในการนำเถ้าที่เกิดจากการเผาไหม้มาวิเคราะห์หาแนวโน้มของความสมบูรณ์ของการเผาไหม้ โดยใช้ค่าความเข้มสีของภาพที่เถ้าหนักในโหมดขาวดำ (Greyscale) ซึ่งจะแปลงค่าให้อยู่ในรูปของความเข้มสีและมีค่าอยู่ในช่วง 0-255 ดังนี้

ตารางที่ 6.3 แสดงตัวอย่างเถ้าที่อ้างอิงการเผาไหม้สมบูรณ์และไม่สมบูรณ์กับความเข้มสี

	Figure	Intensity
Complete combustion		227.75
Incomplete combustion		33.54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.4 เถ้าหนักที่เกิดขึ้น

ตารางที่ 6.4 แสดงความเข้มสีของเถ้าหนักในการทดลองแต่ละเงื่อนไข

Test No.	Experiment condition	Intensity (0-255)	CO (ppm)	Temperature (°C)
1	Bluff body and non-second swirler	97.19	527	1075
2	Bluff body and non-second swirler	128.02	454	1250
3	Non Bluff body with second swirler	100.19	3200	1147
4	Bluff body and non-second swirler	108.83	496	1146
5	Non Bluff body and non-second swirler	114.22	3829	988

จากผลการทดลองพบว่าเงื่อนไขที่มีการเผาไหม้ที่ใกล้การเผาไหม้สมบูรณ์ที่สุดคือ เงื่อนไข Bluff body and non second swirler โดยดูจากคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ที่ผสมในแก๊สร้อนที่วัดได้จากการทดลอง โดยที่ค่าคาร์บอนมอนอกไซด์จะบ่งบอกถึงคาร์บอนที่ไม่ได้รับการเผาไหม้ที่ผสมในแก๊สร้อน แต่เมื่อนำวิธีการประมวลผลภาพเข้ามาใช้กับพบว่าค่าความเข้มแสงแสดงถึงการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์เมื่อเปรียบเทียบกับเงื่อนไขอื่น จึงทำให้สามารถวิเคราะห์ได้ว่าเมื่อมีการเผาไหม้ที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส เถ้าจะเกิดการตกผลึกใหม่(Recrystallization)ที่เป็นจุดเริ่มต้นของกระบวนการรวมตัวของเถ้า(Ash fusion)ซึ่งเป็นกระบวนการที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้นในระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7

สรุปและขอเสนอแนะ

ในบทนี้จะนำเสนอบทสรุปและข้อเสนอแนะของการออกแบบและการพัฒนาระบบทดสอบการสะสมของเถ้าลอยบนผนังแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับเตาเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผง ที่การดำเนินงานในปีการศึกษา 2559 เพื่อเป็นการสรุปและเสนอแนะแก่ผู้ที่สนใจ

7.1 บทสรุป

การออกแบบและการพัฒนาระบบทดสอบการสะสมของเถ้าลอยบนผนังแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับเตาเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงเป็นการจำลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อศึกษาอัตราการเกาะของเถ้าลอยที่เกิดจากชีวมวลผงที่เผาไหม้ในเตาเผาแบบมีห้องเผาไหม้ช่วย เนื่องจากเตาชนิดนี้เป็นเตาที่มีแนวคิดข้อนข้างใหม่สำหรับภาคอุตสาหกรรม ซึ่งมีประสิทธิภาพด้านการเผาไหม้ถึงร้อยละ 96 อีกทั้งเชื้อเพลิงชีวมวลที่นำมาใช้คือไม้ยางพาราอัดเม็ดซึ่งเป็นเชื้อเพลิงภายในประเทศที่มีความนิยมในช่วงที่ราคาเชื้อเพลิงฟอสซิลมีราคาสูง แต่การนำเชื้อเพลิงไม้ยางพารามาใช้นั้นยังไม่มีการศึกษาในเรื่องของรูปแบบการเกาะของเถ้าลอย ทำให้ผู้ศึกษาได้สนใจในการศึกษาการสะสมของเถ้าลอยบนผนังแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับเตาเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงขึ้น โดยได้ออกแบบระบบสะสมเถ้าลอยขึ้นมา ภายในระบบประกอบด้วย อุปกรณ์ทดสอบ โรตามิเตอร์ หม้อน้ำรถยนต์ เครื่องแยกฟองอากาศ หม้อลม ปั๊มน้ำ ถังเก็บน้ำ วาล์วและข้อต่อ จากนั้นได้จัดทำโปรแกรมการคำนวณการแลกเปลี่ยนความร้อน โดยกำหนดน้ำเข้าที่ 30 องศาเซลเซียสและออกที่ 73 องศาเซลเซียส พบว่าโปรแกรมได้คำนวณอัตราการไหลไว้ที่ 287 ลิตรต่อชั่วโมง แต่การทดลองพบว่าอัตราการไหลที่ใช้จริงเท่ากับ 258 ลิตรต่อชั่วโมง ดังนั้นจึงเกิดความคลาดเคลื่อนร้อยละ10.09 จากนั้นทำการเก็บตัวอย่างเถ้าหนักเพื่อศึกษาแนวโน้มของการเผาไหม้สมบูรณ์โดยใช้การประมวลผลภาพ ในการวิเคราะห์แนวโน้มของการเผาไหม้สมบูรณ์ ซึ่งผู้ศึกษาได้จัดทำตัวอย่างเถ้าที่เผาไหม้สมบูรณ์มีค่าความเข้มสี 227.5และไม่สมบูรณ์มีค่าความเข้มสี 33.54 เพื่อมาทำการเปรียบเทียบแนวโน้มของการเผาไหม้สมบูรณ์ จากผลการทดทองพบว่าค่าความเข้มสีอยู่ในช่วง 97-129 ซึ่งเมื่อเทียบกับค่าคาร์บอนมอนอกไซด์พบว่าค่าความเข้มสีจะมีค่าสวนทางกับค่าคาร์บอนมอนอกไซด์ ทำให้สรุปได้ว่าการประมวลผลภาพสามารถใช้ได้สำหรับการเผาไหม้ที่อุณหภูมิต่ำ(น้อยกว่า1,100องศาเซลเซียส)เท่านั้น เนื่องจากการทดลองเป็นการเผาที่ไหม้ที่อุณหภูมิสูงจึงเกิดกระบวนการตกผลึกใหม่(Recrystallization) ซึ่งเป็นช่วงต้นของการรวมตัวกันของเถ้า(Ash fusion)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.2 ข้อเสนอแนะ

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอเกี่ยวข้อแนะนำของระบบพัฒนาระบบทดสอบการสะสมของเถ้าลอยบนผนังแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับเตาเผาเชื้อเพลิงชีวมวลผงและเตาเผาเชื้อเพลิงชีวิตมวลผงแบบมีห้องเผาไหม้ช่วย

1. ระยะในการทดลอง ควรเพิ่มระยะเวลาในการทดลองให้มีระยะในการทดลองนานกว่าเดิม เนื่องจากลักษณะของการเกาะของเถ้าลอยบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นลักษณะในการเกาะในช่วงเวลาเริ่มต้น
2. อุณหภูมิการเผาไหม้ อุณหภูมิในการเผาไหม้มีอุณหภูมิสูงถึงจุดหลอมเหลวของเถ้าทำให้หลอมเหลวกลายเป็นสแลคไปเกาะพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน
3. การสูญเสียเฮด จากการออกแบบระบบยังมีปัญหาเรื่องการสูญเสียของเฮด ควรขยายขนาดท่อให้เป็น1นิ้วก่อนเข้าชิ้นงานเพื่อลดการสูญเสียของเฮด
4. รูปแบบการเกาะ รูปแบบการเกาะที่เกิดขึ้นขึ้นอยู่กับชนิด รูปทรงของอุปกรณ์ทดลองและรูปทรงเตาเผา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

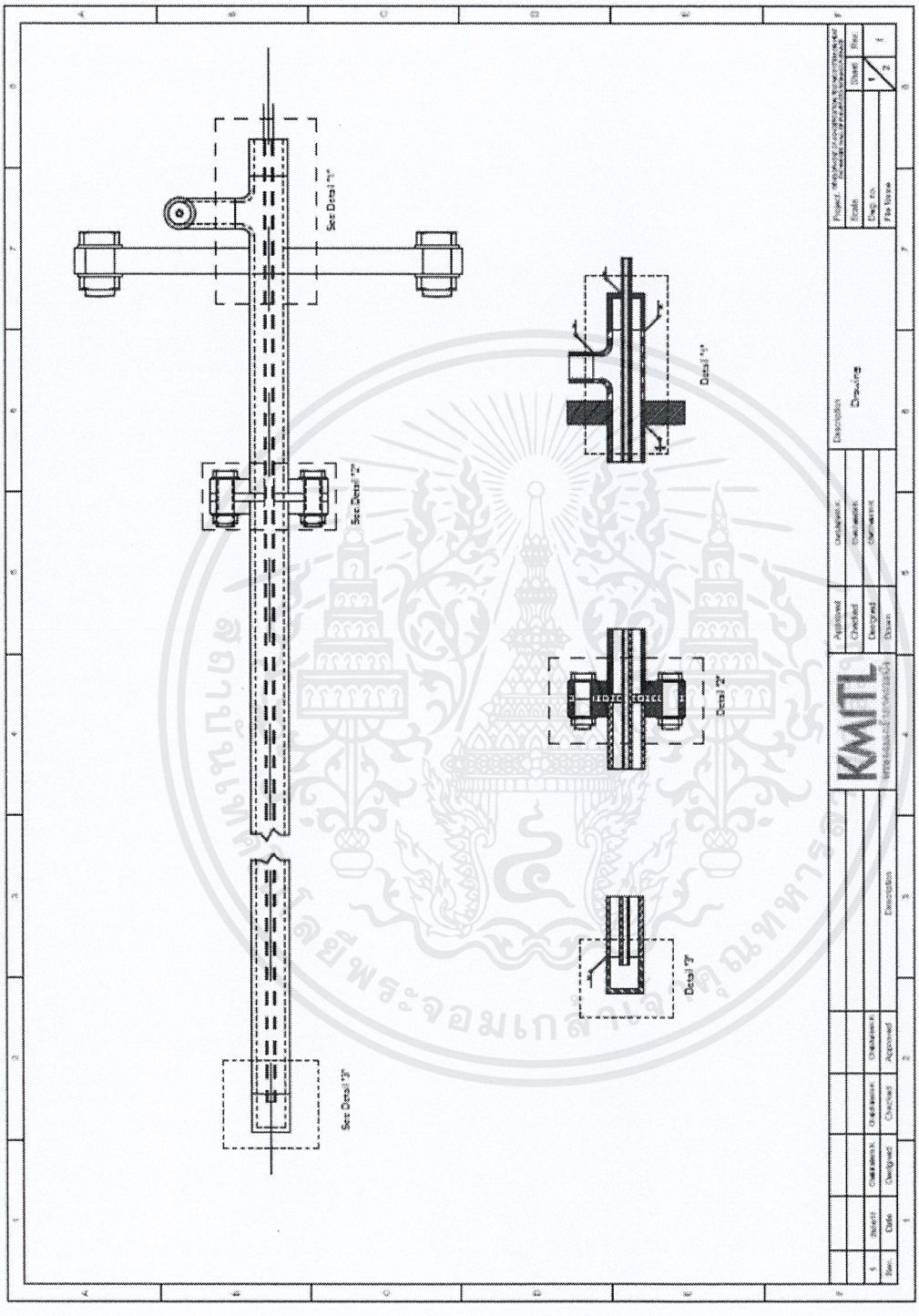
ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

แบบอุปกรณ์ทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.1 แสดงแบบอุปกรณ์ทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

ตารางผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลอง

ตารางบันทึกผลการทดลอง เป็นการบันทึกค่าต่างๆที่ส่งผลกระทบต่อการเกาะของเถ้าลอยบนผนังชิ้นงานทดสอบ สำหรับการทำการทดลองแต่ละครั้งจะทำการบันทึกเงื่อนไขของการทดลอง เวลา แก๊ส ความถี่ในการป้อนเชื้อเพลิง อากาศส่วนเกิน ลมที่ป้อน (อัตราส่วนลมที่ได้รับการออกแบบ) อุณหภูมิที่วัดในตำแหน่งต่างๆ และกิโลวัตต์ความร้อนที่ทำได้ เพื่อนำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ เถ้าที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ (คิดเป็นร้อยละ 2.28 ของเชื้อเพลิงที่ใช้) โดยจะแสดงดังตารางต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข 1 แสดงตารางบันทึกผลการทดลอง วันที่ 30 มกราคม 2560

Operating condition Non-Installed second swirler 300 kW , excess air 15 %								Biomass Feeding Table									Date : 30/01/2017			
Time	Duration Time (min)	Fuel		Air rate (kg/s)			ID fan (Hz)	Burner Temperature (˚C)					Furnace Temperature (˚C)	Inlet W Temperature (˚C)	Outlet W Temperature (˚C)	Inlet Water Temperature (˚C)	Outlet Water Temperature (˚C)	Surface Temperature (˚C)	kW	Remark
		LPG (L/min)	Biomass (Hz)	Pri	Se	Ter		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11		
18:41	0	5.5	0.0	0.0	0.0	0.0	13													เริ่มจุดแก๊ส
19:03	22	5.5	0.0	0.0	0.0	0.0	13	31.7	32.3	38.8	37.7	227.5	74	88.1	31.3	31.5	31.3	42.0		
19:07	26	4.5	0.0	0.0	0.0	0.0	13	31.6	32.0	39.5	36.6	224.6	75.2	85.8	33.8	31.6	30.6	41.9		
19:15	34	4.0	0.65	0.009	0.023	0.0	13	34.4	31.6	42.8	47.7	838.6	101.8	178.5	34.4	32.1	41.7	148.5	100	เปลวไฟอยู่แนวตรง มีชาร์ลอย ควันน้อย
19:20	39	3.5	1.14	0.015	0.033	0.00913	13	33.2	30.7	50.3	59.5	814.4	244.9	377.5	50.8	32.3	62.8	219.9	150	
19:25	44	3.5	1.14	0.014	0.033	0.00913	11	37.2	32.1	56.0	70.2	799.5	429.7	433.8	47.4	31.1	64.9	218.3		
19:30	49	3.5	1.14	0.014	0.033	0.00913	11	38.3	32.9	71.9	83.9	842.3	583.5	498.2	59.7	33.9	78.0	240.0		
19:35	54	3.5	1.14	0.014	0.033	0.00913	11	43.1	32.7	84.9	100.9	868.9	638.9	527.9	58.9	33.1	85.5	282.1		
19:40	59	3.0	1.14	0.013	0.033	0.00913	11	48.0	33.3	94.3	113.9	855.3	683.6	550.3	52.5	33.1	80.3	285.8		
19:50	69	3.0	1.56	0.018	0.044	0.011	11	63.0	31.0	136.0	160.0	974.0	878.0	703.0	64.0	33.0	46.0	406.0	200	
19:55	74	3.0	1.56	0. 19	0.044	0.0015	11	71.5	32.0	162.0	180.0	973.0	915.0	753.0	56.0	30.0	51.0	476.0		
20:00	79	2.3	2.07	0.018	0.046	0.0143	11	82.0	33.0	182.0	205.0	1006.0	936.0	782.0	63.0	31.0	52.0	473.0.	250	
20:03	82	2.3	2.07	0.018	0.057	0.0143	11	91.0	32.0	207.0	227.0	991.0	969.0	876.0	66.0	29.0	60.0	525.0		
20:09	88	2.3	2.07	0.023	0.058	0.0143	11	107.0	32.0	236.0	253.0	997.0	1013.0	878.0	70.0	29.0	64.0	574.0		
20:17	96	2.2	2.07	0.023	0.058	0.0143	11	118.0	32.0	257.0	270.0	1000.0	1030.0	898.0	59.0	28.0	67.0	585.0		
20:20	99	2.3	2.46	0.027	0.058	0.0143	11	124.0	32.0	781.0	293.0	979.0	1060.0	935.0	60.0	28.0	73.0	606.0	300	
20:33	112	0.0	2.46	0.028	0.069	0.018	11	484.0	-	779.0	860.0	967.0	1065.0	953.0	84.0	73.0	-	597.0		
20:35	114	0.0	2.46	0.028	0.076	0.04351	11	512.0	-	758.0	831.0	949.0	1075.0	962.0	87.0	72.0	-	-		
21:31	170	0	-	0.026	0.077	0.04316	13	1034	1033	940	1097	1153	1034	89	50	-	-	-		

ตารางที่ ข 2 แสดงตารางบันทึกผลการทดลอง วันที่ 15 กุมภาพันธ์ 2560

Operating condition Non-Installed second swirler 300 kW , excess air 15 %								Biomass Feeding Table									Date : 15/02/2017			
Time	Duration Time (min)	Fuel		Air rate (kg/s)			ID fan (Hz)	Burner Temperature (°C)					Furnace Temperature (°C)	Inlet W Temperature (°C)	Outlet W Temperature (°C)	Inlet Water Temperature (°C)	Outlet Water Temperature (°C)	Surface Temperature (°C)	kW	Remark
		LPG (L/min)	Biomass (Hz)	Pri	Sa	Ter		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11		
19:12	0	3.0	-	0.01	-	-	0													
19:25	13	3.0	-	0.01	-	-	-	29.9	28.5	30.8	30.8	86.1	-	25.6	25.4	25	28.9	33.8		
19:45	33	3.0	0.75	0.01	-	-	12	78.5	87.5	132.0	162.0	663.0	157.0	30.7	26.6	25.4	39.8	86.0		
19:55	43	3.0	0.75	0.01	-	-	12	86.4	96.8	149.0	181.0	815.0	193.0	31.0	27.5	25.3	40.3	92.5		
20:00	48	3.0	0.75	0.01	0.02	-	12	112.0		178.0	221.0	906.0	302.0	31.7	29.8	28.5	43.9	109.9	100	
20:05	53	3.0	0.75													28.6	41.4	117.5		
20:10	58	0.0	1.17	0.01	0.03	-	12	270.0	-	298.2	26.2	471.0	495.0	-	-	29.9	49.1	171.7	150	
20:15	63	3.0	1.17	0.01	0.03	-	12	135.0	444.0	256.0	364.0	621.0	621.0	28.0	30.0	29.0	45.0	155.0		
20:20	68	3.0	1.17	0.01	0.03	-	12	92.0	505.0	155.0	396.0	407.0	633.0	29.0	31.0	30.0	41.0	129.0		
20:25	73	3.0	0.75	0.01	0.03	-	15	108.0	407.0	149.0	352.0	565.0	569.0	29.0	32.0	29.0	43.2	172.0	100	
20:30	78	3.0	0.75	0.01	0.03	-	15	131.0	470.0	173.0	345.0	610.0	614.0	30.0	32.0	28.6	44.2	180.4		
20:35	83	3.0	0.75	0.01	0.03	-	15	125.0	314.0	224.0	439.0	484.0	617.0	35.0	29.0	29.0	43.8	175.0		
20:40	88	3.0	0.75	0.01	0.03	-	15	179.0	271.0	163.0	347.0	435.0	580.0	32.0	31.0	29.0	42.8	180.0		
20:45	93																			ไฟดับ
20:50	98	3.0	0.75	0.01	0.02	-	15	210.0	187.0	204.0	530.0	430.0	542.0	31.0	33.0	30.0	43.0	165.0		
20:55	103	3.0	0.75	0.01	0.02	-	15	271.0	229.0	250.0	618.0	454.0	633.0	31.0	34.0	29.0	44.0	179.0		
21:00	108	3.0	0.75	0.01	0.02	-	15	266.0	295.0	273.0	630.0	552.0	699.0	32.0	34.0	30.0	54.0	258.0	150	
21:05	113	3.0	0.75	0.01	0.02	-	15	472.0	371.0	342.0	395.0	626.0	515.0	34.0	34.0	30.0	51.0	204.0		
21:10	118																			ไฟดับ
21:50	138	3.0	2.09	0.016	0.03	-	15	245.0	455.0	335.0	198.0	745.0	835.0	31.0	37.0	29.0	55.0	285.0	250	
21:55	143	3.0	2.51	0.022	0.05	-	15	262.0	394.0	296.0	215.0	647.0	1025.0	32.0	36.0	33.0	66.0	363.0	300	
22:00	148	3.0	2.51	0.026	0.07	-	15	241.0	536.0	554.0	271.0	792.0	1071.0	38.0	38.0	30.0	70.0	409.0		
22:05	173	3.0	2.51	0.026	0.07	-	15	396.0	329.0	352.0	269.0	594.0	1079.0	-	38.0	30.0	68.0	428.0		
22:10	178	3.0	2.51	0.026	0.07	-	15	351.0	424.0	341.0	347.0	708.0	1086.0	-	38.0	30.0	70.0	449.0		
22:20	188	3.0	2.51	0.026	0.07	-	15	182.0	492.0	392.0	388.0	942.0	1122.0	-	39.0	29.0	73.0	476.0		
22:48	216	3.0	2.51	-	-	-	-	200.0	564.0	577.0	705.0	744.0	1162.0	-	-	30.0	74.7	524.0		
22:56	224	3.0	-	-	-	-	-	249.0	698.0	563.0	790.0	1027.0	1184.0	-	-	29.5	73.4	535.0		

ตารางที่ ข 3 แสดงตารางบันทึกผลการทดลอง วันที่ 15 มีนาคม 2560

Operating condition Installed second swirler 300 kW , excess air 15 %								Biomass Feeding Table									Date : 15/03/2017			
Time	Duration Time (min)	Fuel		Air rate (kg/s)			ID fan (Hz)	Burner Temperature (°C)					Furnace Temperature (°C)	Inlet W Temperature (°C)	Outlet W Temperature (°C)	Inlet Water Temperature (°C)	Outlet Water Temperature (°C)	Surface Temperature (°C)	kW	Remark
		LPG (L/min)	Biomass (Hz)	Pri	Se	Ter		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11		
19:16	0	4.0	-	-	-	-	-	50	48	50	55	180	48	30	29	30	31	-		
19:36	20	4.0	-	-	-	-	-	49	45	52	47	115	53	30	31	31	31	-		
19:40	24	4.0	-	-	-	-	-	51	52	59	56	437	56	30	30	31	31	-		
19:48	32	4.0	-	-	-	-	-	56	65	74	86	720	85	31	30	31	34	-		
19:52	36	4.0	-	-	-	-	-	70	92	108	11	880	173	31	30	30	47	-	150	
19:57	41	4.0	-	-	-	-	-	71	94	121	124	567	386	31	28	31	37	-		
20:00	44																			ไฟดับ
20:38	82	4.0	0.68	0.014	0.030	-	12	130	102	173	142	881	208	31	29	32	44	-	100	
20:43	87	4.0	0.68	0.014	0.030	-	12	158	123	242	216	900	403	31	27	31	40	-		100 L/hr
20:46	90	4.0	1.17	0.014	0.030	-	12	160	123	239	203	937	468	31	28	32	49	-	150	
20:51	95	4.0	1.17	0.014	0.030	-	12	176	138	267	273	1034	585	1	27	30	50	-		160 L/hr
20:53	97	4.0	1.56	0.016	0.039	0.010	12	194	155	294	308	1085	672	36	27	31	51	-	200	เปิดปั๊มหอยโข่ง ; 240 L/hr
20:58	102	4.0	1.56	0.016	0.039	0.010	12	204	167	317	30	1094	810	37	25	34	53	-		
21:01	104	4.0	1.56	0.017	0.039	0.010	12	213	174	344	406	1089	828	40	24	32	55	-		
21:06	109	4.0	1.56	0.020	0.040	0.010	12	238	188	377	444	1133	870	38	20	33	59	-		
21:11	114	4.0	2.09	0.020	0.049	0.012	12	257	213	411	315	1153	974	32	34	33	65	-	250	
21:16	119	4.0	2.09	0.020	0.049	0.012	12	271	221	441	418	1163	998	33	33	31	68	-		
21:22	125	4.0	2.09	0.021	0.049	0.012	12	278	205	444	408	1092	1008	31	33	32	70	-		
21:27	130	4.0	2.44	0.023	0.052	0.009	12	297	222	477	580	1056	1034	30	34	33	65	-	300	260 L/hr
21:31	134	0.0	2.44	0.016	0.060	0.018	12	288	220	460	500	949	1053	30	34	33	68	-		
21:36	139	0.0	2.44	0.016	0.060	0.018	12	243	197	270	398	967	1074	30	33	33	71	-		
21:41	144	0.0	2.44	0.016	0.060	0.018	12	222	188	385	370	871	1089	30	72	33	71	-		
21:51	154	0.0	2.44	0.016	0.060	0.018	12	701	281	455	826	904	1117	30	35	33	78	-		240 L/hr ; T1 เลื่อนไปตรงกลาง
21:57	160	0.0	2.44	0.016	0.060	0.018	12	770	334	944	609	750	1131	31	35	34	75	-		
22:02	165	0.0	2.44	0.016	0.060	0.018	12	724	339	813	680	911	1137	31	35	34	75	-		T3 สลับตำแหน่งกับ T4
22:07	170	0.0	2.44	0.016	0.060	0.018	12	662	299	983	709	799	1147	31	34	32	75	-		T5 วัด T7
22:12	175	0.0	2.44	0.016	0.060	0.018	12	615	295	928	671	435	1136	31	36	31	73	-		
22:22	185	0.0	2.44	0.018	0.078	0.034	12	332	179	655	398	413	680	1167	-	32	74	-		
22:42	205	0.0	2.09	0.020	0.040	0.012	12	772	297	825	374	926	1180	-	-	31	67	-		
23:15	238	0.0	-	0.020	0.060	0.009	15	680	186	710	297	889	1177	-	-	32	75	-		

ตารางที่ ข 4 แสดงตารางบันทึกผลการทดลอง วันที่ 22 มีนาคม 2560

Operating condition Non-Installed second swirler 300 kW , excess air 15 %								Biomass Feeding Table									Date : 22/03/2017			
Time	Duration Time (min)	Fuel		Air rate (kg/s)			ID fan (Hz)	Burner Temperature (°C)					Furnace Temperature (°C)	Inlet W Temperature (°C)	Outlet Water Temperature (°C)	Inlet Water Temperature (°C)	Outlet Water Temperature (°C)	Surface Temperature (°C)	kW	Remark
		LPG (L/min)	Biomass (Hz)	Pri	Se	Ter		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11		
20:45	0	4.0	-	-	-	-	12	33.8	32.6	36.3	36.5	98.0	28.0	-	29.3	30.0	31.0	-		
20:55	10	4.0	-	-	-	-	12	33.0	33.0	34.0	34.0	301.0	43.0	-	30.0	30.0	32.0	-		
21:00	15	4.0	-	-	-	-	12	33.0	34.0	35.0	35.0	350.0	55.0	-	30.0	30.0	32.0	-		
21:05	20	4.0	-	-	-	-	12	34.0	35.0	36.0	37.0	343.0	65.0	-	30.0	31.0	32.0	-		
21:11	26	4.0	0.7	0.012	-	-	10	35.0	37.0	37.0	38.0	270.0	73.0	-	25.0	29.0	31.0	-	100	เริ่มป้อนเชื้อเพลิงแต่ยังไม่เป็นเปลว @21:12 เปลวเริ่มมา
21:15	30	4.0	0.7	0.012	-	-	10	37.0	37.0	37.0	40.0	319.0	77.0	-	30.0	31.0	34.0	-		
21:20	35	4.0	1.17	0.012	-	-	10	37.6	38.3	41.8	50.2	813.9	105.3	-	31.6	32.6	36.9	-		
21:25	40	4.0	1.17	0.012	-	-	10	44.8	45.7	54.8	78.4	873.3	233.3	-	22.6	28.1	41.1	-		
21:30	45	4.0	1.17	0.012	0.029	0.007	10	54.3	53.4	66.1	106.2	930.0	428.1	-	25.4	32.6	45.8	-	150	
21:35	50	4.0	1.17	0.012	0.029	0.007	10	60.1	64.7	79.6	126.8	983.6	614.6	-	20.9	32.3	48.8	-		140L/hr
21:40	55	4.0	1.17	0.012	0.029	0.007	10	66.1	81.2	94.4	147.7	980.5	685.5	-	19.7	28.6	50.3	-		300L/hr
21:45	60	4.0	1.17	0.012	0.029	0.007	10	75.5	84.7	122.3	190.7	1040.3	748.8	-	14.3	28.8	43.0	-		
21:50	65	4.0	1.17	0.016	0.039	0.010	10	83.4	92.5	134.9	206.1	1035.2	759.3	-	13.9	29.2	43.7	-	200	240L/hr
21:55	70	4.0	1.17	0.016	0.039	0.010	10	98.2	105.9	160.3	241.6	1084.3	850.5	-	56.0	32.3	53.6	-		
22:00	75	4.0	1.17	0.016	0.039	0.010	10	114.9	135.2	191.2	277.6	1090.1	900.7	-	53.4	29.0	51.7	-		260L/hr
22:05	80	4.0	2.09	0.020	0.049	0.012	10	127.2	153.1	212.4	301.8	1076.8	928.6	-	54.8	29.6	55.2	-	250	เปิดปั๊มหอยโข่ง
22:10	85	4.0	2.09	0.020	0.049	0.012	10	162.5	164.4	294.5	379.4	1101.6	988.2	-	94.4	36.8	59.0	-		
22:15	90	4.0	2.09	0.020	0.049	0.012	10	199.0	198.8	343.7	426.3	1099.4	1014.2	-	54.3	31.0	56.0	-		
22:20	95	4.0	2.41	0.023	0.060	0.0092	10	203.1	198.8	351.0	431.3	1107.3	1025.0	-	54.6	32.0	60.0	-	300	
22:25	100	4.0	2.41	0.023	0.060	0.0092	10	194.2	201.0	380.4	448.7	1141.1	1060.4	-	64.7	32.3	62.7	-		280L/hr
22:30	105	4.0	2.41	0.023	0.060	0.0092	10	190.0	209.0	399.0	462.0	1168.0	1082.0	-	62.0	30.0	62.0	-		
22:35	110	-	2.41	0.023	0.060	0.0092	10	198.4	214.6	427.7	483.3	1125.9	1063.4	-	66.2	34.1	61.6	-		ดับแก๊ส
22:40	115	-	2.41	0.023	0.060	0.0092	10	218.9	232.2	451.7	508.2	1121.3	1083.7	-	63.4	34.9	72.3	-		
22:45	120	-	2.41	0.023	0.060	0.0092	10	238.9	248.7	490.8	514.2	1117.8	1095.0	-	54.4	31.4	75.3	-		200L/hr
22:50	125	-	2.41	0.023	0.060	0.0092	10	238.4	267.8	473.8	533.1	1143.0	1120.5	-	64.1	34.4	72.6	-		
23:00	135	-	2.41	0.023	0.060	0.0092	10	251.0	280.9	509.2	562.1	1118.6	1125.6	-	65.9	34.3	71.2	-		
23:05	140	-	2.41	0.023	0.060	0.0092	10	315.4	314.6	536.3	603.7	1006.1	1141.5	-	64.9	34.6	73.0	-		220L/hr
23:10	145	-	2.41	0.023	0.060	0.0092	10	283.3	317.0	489.3	559.7	1010.7	1140.0	-	65.5	31.6	73.8	-		
23:15	150	-	2.41	0.023	0.060	0.0092	10	267.0	312.1	476.4	-	879.9	1146.3	1120.3	60.8	30.2	73.8	-		
23:20	155	-	-	0.023	0.060	0.0092	10	248.8	285.8	437.9	-	689.0	904.6	748.2	65.6	33.3	49.5	-		หยุดป้อนเชื้อเพลิง

ตารางที่ ข 5 แสดงตารางบันทึกผลการทดลอง วันที่ 31 มีนาคม 2560

Operating condition Non-Installed second swirler 300 kW & non bluff body, excess air 15 %								Biomass Feeding Table											Date : 31/03/2017			
Time	Duration Time (min)	Fuel		Air rate (kg/s)			ID fan (Hz)	Burner Temperature (°C)					Furnace Temperature (°C)	Inlet Wet Temperature (°C)	Outlet Wet Temperature (°C)	Inlet Water Temperature (°C)	Outlet Water Temperature (°C)	Wall Temperature (°C)	kW	Remark
		LPG (L/min)	Biomass (Hz)	Pri	Se	Ter		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11		
20:25	0	4.0	-	-	-	-	9.99	66.0	31.8	62.7	72.7	162.2	144.4	-	-	31.0	31.3	31.7		80L/h
20:30	5	4.0	-	-	-	-	9.99	47.6	27.4	48.2	51.5	242.2	39.0	-	-	32.0	31.9	31.9		
20:35	10	4.0	-	-	-	-	9.99	37.0	32.1	42.2	43.5	280.0	50.8	-	-	30.9	32.1	32.9		
20:40	15	4.0	-	-	-	-	9.99	36.7	29.2	43.8	40.2	274.8	53.3	-	-	28.7	33.1	32.9		
20:45	20	4.0	-	-	-	-	9.99	34.7	30.1	46.5	46.6	353.9	60.9	-	-	29.8	32.4	33.4		
20:50	25	4.0	-	-	-	-	9.99	58.0	35.7	59.4	60.4	363.3	67.2	-	-	29.6	31.9	33.9		
20:53	28	4.0	0.75	0.005	0.022	-	9.99	63.0	29.3	63.7	60.9	344.6	72.6	-	-	29.6	32.7	34.1	100	
20:58	33	4.0	0.75	0.005	0.022	-	9.99	74.6	28.8	73.1	75.0	718.1	98.9	-	-	29.2	39.9	52.0		
21:01	36	4.0	0.73	0.010	0.022	-	9.99	87.0	87.7	90.4	89.3	734.6	218.8	-	-	28.7	48.5	96.1		
21:06	41	4.0	1.15	0.012	0.036	-	9.99	93.2	29.7	100.9	102.4	794.2	403.6	-	-	29.8	52.0	135.1		
21:11	46	4.0	1.15	0.012	0.036	-	9.99	112.2	54.0	124.1	143.5	791.3	651.7	-	-	31.3	68.1	233.2		
21:16	51	4.0	1.17	0.012	0.032	0.010	9.99	103.0	98.0	119.9	133.4	786.2	762.9	-	-	30.0	63.1	311.6	150	140L/h
21:21	56	4.0	1.17	0.012	0.032	0.010	9.99	101.6	87.7	125.9	137.7	722.9	812.5	-	-	30.2	64.0	358.3		
21:26	61	4.0	1.58	0.012	0.042	0.013	9.99	99.8	90.5	129.5	141.8	762.8	891.6	-	-	30.2	66.9	400.1	200	
21:31	66	4.0	1.58	0.012	0.042	0.013	9.99	102.6	68.6	143.5	154.3	739.0	922.7	-	-	29.6	66.3	496.4		
21:36	71	4.0	2.05	0.012	0.052	0.016	9.99	104.4	209.5	149.4	159.6	822.0	915.8	-	-	30.9	62.1	519.4	250	
21:41	76	4.0	2.05	0.012	0.052	0.016	9.99	109.2	212.4	156.4	162.4	851.6	935.7	-	-	29.2	66.4	579.5		
21:44	79	4.0																		ไฟดับ
21:56	91	4.0	1.19	0.023	0.034	-	11.99	112.6	147.0	136.9	157.4	420.2	520.2	-	-	31.9	45.6	340.8	150	140 L/h
22:00	95	4.0	1.19	0.014	0.033	-	10.02	115.8	137.6	137.6	166.2	510.4	666.6	-	-	30.8	45.8	365.9		
22:04	99	4.0	2.05	0.019	0.063	0.014	10.02	119.0	148.2	153.3	170.1	838.3	812.5	-	-	30.6	64.9	462.3	250	
22:09	104	4.0	2.05	0.019	0.063	0.014	10.02	122.4	150.2	158.6	175.1	782.3	925.4	-	-	30.6	72.0	515.4		
22:14	109	4.0	2.46	0.019	0.064	0.015	10.02	123.3	149.0	171.9	184.2	835.3	988.0	-	-	31.1	63.6	618.2	300	220L/h
22:19	114	4.0	2.46	0.019	0.064	0.015	10.02	119.7	190.3	182.6	190.8	834.0	864.4	-	-	32.6	67.3	742.5		
22:24	119	4.0	2.46	0.019	0.064	0.015	10.02	127.6	198.3	188.2	190.7	801.2	893.6	-	-	31.0	65.2	726.1		
22:29	124	4.0	2.46	0.019	0.064	0.015	10.02	139.7	223.7	197.3	191.5	771.4	933.6	-	-	31.4	63.7	770.0		
22:31	126	4.0																		ไฟดับ
22:37	132	4.0	2.46	0.022	0.064	0.015	10.02	122.2	183.6	175.2	188.8	751.6	804.3	-	-	31.0	57.6	595.6		
22:40	135	4.0																		ไฟดับ

ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ ข 6 แสดงอัตราการป้อนเชื้อเพลิง ณ วันที่ 30 มกราคม 2560

Experiment Condition Non-Installed second swirler 300 kW with bluff body			
Date : 30 Jan 2017			
Time	Duration time(min)	Biomass feeding rate (1/s)	Used fuel (kg)
18:41	0	0.0	-
19:03	22	0.0	0.31
19:07	26	0.0	0.62
19:15	34	0.65	1.79
19:20	39	1.14	2.85
19:25	44	1.14	2.85
19:30	49	1.14	2.85
19:35	54	1.14	2.85
19:40	59	1.14	5.70
19:50	69	1.56	3.76
19:55	74	1.56	3.76
20:00	79	2.07	2.92
20:03	82	2.07	5.83
20:09	88	2.07	7.78
20:17	96	2.07	2.92
20:20	99	2.46	14.83
20:33	112	2.46	2.28
20:35	114	2.46	63.88
21:31	170	-	-
		Sum	127.80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข 7 แสดงอัตราการป้อนเชื้อเพลิง ณ วันที่ 15 กุมภาพันธ์ 2560

Operation Condition Installed second swirler 300 kW			
Date : 15 Feb 2017			
test time	duration time(min)	Biomass(1/s)	used fuel (kg)
19:12	0	-	-
19:25	13	-	-
19:45	33	0.75	4.02
19:55	43	0.75	2.01
20:00	48	0.75	2.01
20:05	53	0.75	2.01
20:10	58	1.17	2.92
20:15	63	1.17	2.92
20:20	68	1.17	2.92
20:25	73	0.75	2.01
20:30	78	0.75	2.01
20:35	83	0.75	2.01
20:40	88	0.75	2.01
20:45	93	-	-
20:50	98	0.75	2.01
20:55	103	0.75	2.01
21:00	108	0.75	2.01
21:05	113	0.75	2.01
21:10	118	-	-
21:30	138	2.09	24.52
21:55	163	2.51	5.81
22:00	168	2.51	5.81
22:05	173	2.51	5.81
22:10	178	2.51	11.62
22:20	188	2.51	32.54
22:48	216	2.51	9.30
22:56	224	2.51	109.26
0:30	318	-	-
		Sum	220.76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข 8 แสดงอัตราการป้อนเชื้อเพลิง ณ วันที่ 15 มีนาคม 2560

Experiment Condition Installed second swirler 300 kW and bluff body			
Date : 15 Mar 2017			
Time	Duration time(min)	Biomass feeding rate (1/s)	Used fuel (kg)
19:16	0	-	-
19:36	20	-	-
19:40	24	-	-
19:48	32	-	-
19:52	36	-	-
19:57	41	-	-
20:00	44	-	-
20:38	82	0.68	1.86
20:43	87	0.68	1.12
20:46	90	1.17	2.92
20:51	95	1.17	1.17
20:53	97	1.56	3.76
20:58	102	1.56	1.50
21:01	104	1.56	3.76
21:06	109	1.56	3.76
21:11	114	2.09	4.90
21:16	119	2.09	5.89
21:22	125	2.09	4.90
21:27	130	2.44	4.53
21:31	134	2.44	5.66
21:36	139	2.44	5.66
21:41	144	2.44	11.32
21:51	154	2.44	6.79
21:57	160	2.44	5.66
22:02	165	2.44	5.66
22:07	170	2.44	5.66
22:12	175	2.44	11.32
22:22	185	2.44	22.64
22:42	205	2.09	32.37
23:15	238	-	-
		Sum	152.81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข 9 แสดงอัตราการป้อนเชื้อเพลิง ณ วันที่ 22 มีนาคม 2560

Experiment Condition Non-Installed second swirler 300 kW with bluff body			
Date : 22 Mar 2017			
Time	Duration time(min)	Biomass feeding rate (1/s)	Used fuel (kg)
20:45	0	-	-
20:55	10	-	-
21:00	15	-	-
21:05	20	-	-
21:11	26	0.7	1.52
21:15	30	0.7	1.90
21:20	35	1.17	2.92
21:25	40	1.17	2.92
21:30	45	1.17	2.92
21:35	50	1.17	2.92
21:40	55	1.17	2.92
21:45	60	1.17	2.92
21:50	65	1.17	2.92
21:55	70	1.17	2.92
22:00	75	1.17	2.92
22:05	80	2.09	4.90
22:10	85	2.09	4.90
22:15	90	2.09	4.90
22:20	95	2.41	5.60
22:25	100	2.41	5.60
22:30	105	2.41	5.60
22:35	110	2.41	5.60
22:40	115	2.41	5.60
22:45	120	2.41	5.60
22:50	125	2.41	11.19
23:00	135	2.41	5.60
23:05	140	2.41	5.60
23:10	145	2.41	5.60
23:15	150	2.41	5.60
23:20	155	-	-
		Sum	111.54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข 10 แสดงอัตราการป้อนเชื้อเพลิง ณ วันที่ 31 มีนาคม 2560

Experiment Condition Non-Installed second swirler 300 kW and bluff body			
Date : 31 Mar 2017			
Time	Duration time(min)	Biomass feeding rate (1/s)	Used fuel (kg)
20:25	0	-	-
20:30	5	-	-
20:35	10	-	-
20:40	15	-	-
20:45	20	-	-
20:50	25	-	-
20:53	28	0.75	2.01
20:58	33	0.75	1.21
21:01	36	0.73	1.97
21:06	41	1.15	2.87
21:11	46	1.15	2.87
21:16	51	1.17	2.92
21:21	56	1.17	2.92
21:26	61	1.58	3.80
21:31	66	1.58	3.80
21:36	71	2.05	4.82
21:41	76	2.05	2.89
21:44	79	-	-
21:56	91	1.19	2.37
22:00	95	1.19	2.37
22:04	99	2.05	4.82
22:09	104	2.05	4.82
22:14	109	2.46	5.70
22:19	114	2.46	5.70
22:24	119	2.46	5.70
22:29	124	2.46	2.28
22:31	126	-	-
22:37	132	2.46	3.42
22:40	135	-	-
		Sum	69.27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้