การพัฒนาตารางคำนวณสำหรับพื้นที่การถ่ายเทความร้อนของหม้อน้ำอุตสาหกรรม

DEVELOPMENT OF SPREADSHEET FOR HEAT TRANSFER SURFACE OF INDUSTRIAL BOILER

นนท์ปวิธ คลังหิรัญ
NONTPAWIT KLANGHIRAN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2559
KMITL-2016-EN-M-030-106

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การพัฒนาตารางคำนวณสำหรับพื้นที่การถ่ายเทความร้อนของหม้อน้ำอุตสาหกรรม

DEVELOPMENT OF SPREADSHEET FOR HEAT TRANSFER SURFACE OF INDUSTRIAL BOILER

นนท์ปวิธ คลังหิรัญ
NONTPAWIT KLANGHIRAN

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 144054
วัน.เดือน.ปี 25 ต.ค. 2559

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2559
KMITL-2016-EN-M-030-106

DEVELOPMENT OF SPREADSHEET FOR HEAT TRANSFER SURFACE OF INDUSTRIAL BOILER

NONTPAWIT KLANGHIRAN

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEER
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2016

KMITL-2016-EN-M-030-106

COPYRIGHT 2016
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาตารางคำนวณสำหรับพื้นที่การถ่ายเทความร้อนของหม้อน้ำอุตสาหกรรม
นักศึกษา	นายนนท์ปวิธ คลังหิรัญ
รหัสประจำตัว	56601154
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2559
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอสเปรทชีทที่พัฒนาขึ้นสำหรับคำนวณพื้นที่การถ่ายเทความร้อนของหม้อน้ำชนิดท่อไฟ โดยค่าพื้นที่การถ่ายเทความร้อนที่คำนวณได้ จะสัมพันธ์กับการกำหนดพารามิเตอร์ในการออกแบบ เช่น อุณหภูมิน้ำป้อน ความดันไอ ชนิดของเชื้อเพลิง อัตราการผลิตไอน้ำที่ต้องการ ความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางหม้อน้ำ เป็นต้น โดยสเปรทชีทถูกพัฒนาเป็นสองแนวทางคือตรวจสอบสมรรถนะทางความร้อนของหม้อน้ำชนิดท่อไฟใหญ่และลูกผสม กับพัฒนาเพื่อออกแบบหม้อน้ำชนิดท่อไฟ โดยสเปรทชีทที่พัฒนาขึ้นใช้วิธีการคำนวณตามขั้นตอน ดังต่อไปนี้ 1.วิเคราะห์แยกธาตุของเชื้อเพลิงในการบวนการเผาไหม้ เพื่อหาคุณสมบัติของก๊าซไอเสีย 2. ใช้ทฤษฎีการเผาไหม้ เพื่อคำนวณปริมาณเชื้อเพลิงและปริมาณไอเสียที่ผ่านชุดท่อไฟ 3.ใช้ทฤษฎีการนำ การพา และแผ่รังสีความร้อนเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม และวิเคราะห์อัตราการถ่ายเทความร้อนที่จำเป็นต่อการเปลี่ยนสถานะของน้ำ ในกระบวนการคำนวณแบบวนซ้ำ เพื่อตรวจสอบสมรรถนะทางความร้อนและตรวจสอบปัจจัยที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนในหม้อน้ำเพื่อพัฒนาหม้อน้ำให้มีสมรรถนะดีขึ้น ก่อนนำสเปรทชีทดังกล่าวพัฒนาเพื่อสร้างสเปรทชีทออกแบบพื้นที่การถ่ายเทความร้อนหม้อน้ำ จากนั้นตรวจสอบความน่าเชื่อถือของสเปรทชีทโดยสอบเทียบผลการคำนวณของสเปรทชีทกับหม้อน้ำจริง เพื่อประเมินค่าความคลาดเคลื่อนของสเปรทชีทที่พัฒนาขึ้น

Thesis Title	Development of Spreadsheet for Heat Transfer Surface of Industrial Boiler
Student	Mr. Nontpawit Klanghiran
Student ID.	56601154
Degree	Master of Engineering
Spreadsheet	Mechanical engineer
Year	2016
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Jarruwat Chareonsuk

ABSTRACT

This paper presents a spreadsheet developed for heat transfer surface calculation in the fire-tube boiler. The obtained heating surface is related to the pre-defined parameters such as; water input temperature, Steam pressure, fuel type, steam flow rate, length and diameter of the furnace. The spreadsheet procedure involves 1.Ultimate and stoichiometry analyses of selected solid fuel for obtaining flue gas composition, 2.Utilization of combustion theory to obtain the amount of fuel and air under desired thermal throughput 3.Employment of the empirical and analytical models of convection, conduction and radiation mode of heat transfer as appropriate to determine the overall heat transfer and estimate the required surface for boiling mode of heat transfer. With iterative method, a number of tubes would finally be obtained. The predictive performance of this numerical spreadsheet would then be assessed using the measured data from a fire tube boiler.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้เป็นอย่างดี ด้วยความช่วยเหลือ จาก รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ที่คอยให้คำแนะนำและคำปรึกษาในการทำงานมาโดยตลอด ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณคณาจารย์คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้าพร้อมทั้งได้ให้คำปรึกษา คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆที่เป็นประโยชน์ จนทำให้วิทยานิพนธ์นี้ได้บรรลุวัตถุประสงค์ได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณอาจารย์ธวัชชัย นาคพิพัฒน์ ที่คอยให้คำแนะนำ และคำปรึกษาเพิ่มเติมในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จ

ขอขอบคุณบริษัท แอล วาย อินดัสทรี จำกัด และ บริษัท เฟอร์โก อุตสาหกรรม จำกัด ที่ให้โอกาสข้าพเจ้าเข้าไปสำรวจเครื่องจักร และให้ข้อมูลสำคัญสำหรับทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จ

ขอขอบคุณเพื่อน พี่ น้อง ทุกคนที่ให้คำแนะนำและคอยช่วยเหลือในการทำงาน พร้อมมอบกำลังใจให้เสมอมาจนสามารถฟันฝ่าอุปสรรคมาได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้การเลี้ยงดูอย่างดีตลอดมา และยังให้การสนับสนุน ทั้งกำลังทรัพย์ที่เป็นค่าใช้จ่ายในด้านต่างๆ พร้อมกับมอบกำลังใจที่ดี เมื่อยามท้อและเหน็ดเหนื่อย จนทำให้การทำงานสำเร็จไปได้ด้วยดี

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ข้าพเจ้าขอมอบให้กับผู้มีพระคุณทุกท่านซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง

นนท์ปวิธ คลังหิรัญ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ II
กิตติกรรมประกาศ III
สารบัญ IV
สารบัญตาราง VII
สารบัญรูป IX
รายการคำย่อและสัญลักษณ์ XII
บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1
1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย 2
1.3 สมมุติฐานของงานวิจัย 2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย 2
1.5 ขั้นตอนของการศึกษาและพัฒนา 3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3
บทที่ 2 วรรณกรรมและกรอบแนวความคิด 4
2.1 วรรณกรรมปริทัศน์ 4
2.2 หลักการทำงานของหม้อน้ำ 7
2.2.1 หลักการทำงานเบื้องต้นของหม้อน้ำ 7
2.2.2 โครงสร้างทั่วไปของหม้อน้ำ 7
2.2.3 ประเภทของหม้อน้ำ 7
2.2.3.1 หม้อน้ำชนิดท่อไฟ 7
2.2.3.2 หม้อน้ำชนิดท่อน้ำ 10
2.2.3.3 หม้อน้ำชนิดลูกผสม 11
2.3 ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน 12
2.3.1 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม 12
2.3.2 การคำนวณการถ่ายเทความแบบแผ่รังสี 15
2.3.3 การคำนวณการถ่ายเทความร้อนของการไหลของน้ำในท่อน้ำ 15
2.3.4 การคำนวณการถ่ายเทความร้อนแบบการเดือดแบบแอ่ง (Pool boiling) 16
2.3.5 การคำนวณการถ่ายเทความร้อนแบบผ่านผิวด้านนอกท่อทรงกระบอก 16
2.3.6 การคำนวณการถ่ายเทความร้อนแบบการเดือดแบบไหล (Flow boiling) 17

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.4 ทฤษฎีการเผาไหม้ 18
2.4.1 การวิเคราะห์แยกธาตุ และทฤษฎีการเผาไหม้ 18
2.4.2 ทฤษฎีการเผาไหม้การคำนวณปริมาณเชื้อเพลิงและปริมาณไอเสียที่ผ่านชุดท่อไฟ 18
2.4.3 สมดุลเอนธาลปีของการเผาไหม้สำหรับคำนวณอุณหภูมิอะเดียแบติก 19
2.4.4 ประสิทธิภาพของหม้อน้ำ 19
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย 20
3.1 ภาพรวมของการดำเนินงานวิจัย 20
3.2 การสำรวจหม้อน้ำ (Boilers survey) 21
3.2.1 สำรวจหม้อน้ำชนิดท่อน้ำ 21
3.2.2 สำรวจหม้อน้ำชนิดท่อไฟ 23
3.2.3 สำรวจหม้อน้ำชนิดลูกผสม 28
3.3 การพัฒนาสเปรทชีท 31
3.3.1 สเปรทชีทคำนวณการเผาไหม้ 31
3.3.2 สเปรทชีทคำนวณปริมาณความร้อน และประสิทธิภาพของหม้อน้ำ 33
3.3.3 สเปรทชีทคำนวณคุณสมบัติทางความร้อนของน้ำ 34
3.3.4 สเปรทชีทคำนวณสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน 34
3.3.5 สเปรทชีทคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสีในท่อไฟใหญ่ 37
3.4 การพัฒนาสเปรทชีทคำนวณพื้นที่การถ่ายเทความร้อน 39
3.4.1 การพัฒนาสเปรทชีทสำหรับตรวจสอบสมรรถนะหม้อน้ำชนิดท่อไฟ 39
3.4.2 สเปรทชีทคำนวณพื้นที่การถ่ายเทความร้อนของหม้อน้ำ 48
3.4.3 สเปรทชีทตรวจสอบสมรรถนะของหม้อน้ำชนิดลูกผสม 53
3.5 วิธีการตรวจสอบความถูกต้องของสเปรทชีท 56
3.5.1 วิธีการตรวจสอบความถูกต้องของสเปรทชีท 56
บทที่ 4 วิเคราะห์ผลการทดลอง และการประยุกต์ใช้สเปรทชีทเพื่อออกแบบหม้อน้ำ 58
4.1 สเปรทชีททดสอบสมรรถนะทางความร้อนของหม้อน้ำชนิดท่อไฟ 58
4.1.1 การตรวจสอบสมรรถนะของสเปรทชีท 58
4.1.2 วิเคราะห์อิทธิพลของการถ่ายเทความร้อนในแต่ละส่วนของหม้อน้ำ 60
4.2 สเปรทชีทคำนวณพื้นที่การถ่ายเทความร้อนของหม้อน้ำชนิดลูกผสม 64
4.2.1 การตรวจสอบสมรรถนะของสเปรทชีท 64
4.2.2 วิเคราะห์อิทธิพลของการถ่ายเทความร้อนในแต่ละส่วนของหม้อน้ำชนิดลูกผสม... 66
4.3 สเปรทชีทคำนวณพื้นที่การถ่ายเทความร้อนของหม้อน้ำชนิดท่อไฟ 71
4.3.1 การประยุกต์ใช้งานสเปรทชีทเพื่อออกแบบหม้อน้ำ 71

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 5 สรุปผลการพัฒนาสเปรทชีท..... 72
5.1 สรุปผลการตรวจสอบสมรรถนะและความน่าเชื่อถือของสเปรทชีท..... 72
5.1.1 สรุปผลการตรวจสอบสมรรถนะและความน่าเชื่อถือของสเปรทชีท..... 72
5.1.2 สรุปผลการวิเคราะห์อิทธิพลของการถ่ายเทความร้อนจากการคำนวณของ
สเปรทชีทในเทอมของค่า Overall heat transfer coefficient ในแต่ละส่วนของหม้อน้ำ 72
5.2 สรุปผลการวิเคราะห์อิทธิพลของการถ่ายเทความร้อนจากการคำนวณของ
สเปรทชีทในเทอมของค่า Overall heat transfer coefficient ในแต่ละส่วนของหม้อน้ำ 73
5.2.1 สรุปผลการตรวจสอบสมรรถนะและความน่าเชื่อถือของสเปรทชีท..... 73
5.2.2 สรุปผลการวิเคราะห์อิทธิพลของการถ่ายเทความร้อนจากการคำนวณของ
สเปรทชีทในเทอมของค่า Overall heat transfer coefficient ในแต่ละส่วนของหม้อน้ำ 73
5.3 สรุปผลการพัฒนาสเปรทชีทคำนวณพื้นที่การถ่ายเทความร้อนในหม้อน้ำชนิดท่อไฟ..... 74
5.4 ข้อเสนอแนะในการพัฒนาสเปรทชีท..... 75
เอกสารอ้างอิง..... 76
ภาคผนวก..... 78

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

3.1 ข้อมูลของน้ำในหม้อน้ำ และอัตราการใช้เชื้อเพลิง..... 26

3.2 ข้อมูลของไอเสียที่ออกจากหม้อน้ำ..... 26

3.3 ตารางแสดงความสัมพันธ์ของข้อมูลที่ตรวจวัดกับสเปรทชีท..... 27

3.4 ข้อมูลของน้ำในหม้อน้ำ และอัตราการใช้เชื้อเพลิง..... 30

3.5 ตารางแสดงความสัมพันธ์ของข้อมูลที่ตรวจวัดกับสเปรทชีท..... 31

3.6 ตัวอย่างพารามิเตอร์ของน้ำที่ถูกใช้เป็นตัวแปรต้นสำหรับสเปรทชีทตรวจสอบสมรรถนะทางความร้อน..... 40

3.7 ตัวอย่างพารามิเตอร์ของก๊าซร้อนที่ถูกใช้เป็นตัวแปรต้นสำหรับสเปรทชีทตรวจสอบสมรรถนะทางความร้อน..... 41

3.8 ตัวอย่างพารามิเตอร์ของก๊าซร้อนที่ถูกใช้เป็นตัวแปรต้นสำหรับสเปรทชีทคำนวณพื้นที่การถ่ายเทความร้อน..... 49

3.9 ตัวอย่างพารามิเตอร์ของน้ำที่ถูกใช้เป็นตัวแปรต้นสำหรับสเปรทชีทตรวจสอบสมรรถนะทางความร้อน..... 49

4.1 ตารางแสดงปริมาณความร้อนที่ใช้ในการทำให้น้ำเปลี่ยนสถานะในหม้อน้ำชนิดท่อไฟ..... 57

4.2 ตารางเปรียบเทียบผลการทดลองกับค่าจากการคำนวณจากสเปรทชีทตรวจสอบสมรรถนะหม้อน้ำท่อไฟ..... 57

4.3 ปริมาณความร้อนที่คำนวณจากสเปรทชีทในแต่ละส่วนของหม้อน้ำชนิดท่อไฟ..... 58

4.4 ตารางจำแนกความแตกต่างระหว่างสมมติฐานที่ตั้งขึ้น กับปรากฏการณ์จริงในหม้อน้ำชนิดท่อไฟ..... 58

4.5 ค่าการถ่ายเทความร้อนในแต่ละเทอมของสมการสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากหม้อน้ำส่วนท่อไฟใหญ่..... 59

4.6 ผลการทดสอบการเพิ่มค่าของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในท่อไฟใหญ่ในแต่ละเทอม 2 เท่า โดยแสดงผลการเพิ่มของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมเป็น %..... 60

4.7 ค่าการถ่ายเทความร้อนในแต่ละเทอมของสมการสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากหม้อน้ำส่วนท่อไฟเล็กกลับที่ 1..... 61

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่ หน้า

4.8 ค่าการถ่ายเทความร้อนในแต่ละเทอมของสมการสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากหม้อน้ำส่วนท่อไฟเล็กกลับที่ 2 61

4.9 ผลการทดสอบการเพิ่มค่าของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในท่อไฟเล็กกลับที่ 1 ในแต่ละเทอม 2 เท่า โดยแสดงผลการเพิ่มของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมเป็น % 62

4.10 ผลการทดสอบการเพิ่มค่าของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในท่อไฟเล็กกลับที่ 2 ในแต่ละเทอม 2 เท่า โดยแสดงผลการเพิ่มของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมเป็น % 62

4.11 ตารางแสดงปริมาณความร้อนที่ใช้ในการทำให้น้ำเปลี่ยนสถานะในหม้อน้ำชนิดลูกผสม 63

4.12 ตารางเปรียบเทียบผลการทดลองกับค่าจากการคำนวณจากสเปรทชีทตรวจสอบสมรรถนะหม้อน้ำชนิดลูกผสม 63

4.13 ตารางแสดงปริมาณความร้อนที่คำนวณจากสเปรทชีทในแต่ละส่วนของหม้อน้ำชนิดลูกผสม 64

4.14 ตารางจำแนกความแตกต่างระหว่างสมมติฐานที่ตั้งขึ้น กับปรากฏการณ์จริงในหม้อน้ำชนิดลูกผสม 64

4.15 ค่าการถ่ายเทความร้อนในแต่ละเทอมของสมการสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากหม้อน้ำลูกผสมในส่วนของห้องเผาไหม้ของหม้อน้ำชนิดลูกผสม 65

4.16 ผลการทดสอบการเพิ่มค่าของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในห้องเผาไหม้ในแต่ละเทอม 2 เท่า โดยแสดงผลการเพิ่มของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมเป็น % 66

4.17 ค่าการถ่ายเทความร้อนในแต่ละเทอมของสมการสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากหม้อน้ำส่วนท่อไฟใหญ่ 67

4.18 ค่าการถ่ายเทความร้อนในแต่ละเทอมของสมการสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากหม้อน้ำส่วนท่อไฟเล็กกลับที่ 1 67

4.19 ค่าการถ่ายเทความร้อนในแต่ละเทอมของสมการสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากหม้อน้ำส่วนท่อไฟเล็กกลับที่ 2 67

4.20 ผลการทดสอบการเพิ่มค่าของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในท่อไฟใหญ่ในแต่ละเทอม 2 เท่า โดยแสดงผลการเพิ่มของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมเป็น % 68

4.21 ผลการทดสอบการเพิ่มค่าของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในท่อไฟเล็กกลับที่ 1 ในแต่ละเทอม 2 เท่า โดยแสดงผลการเพิ่มของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมเป็น % 69

4.22 ผลการทดสอบการเพิ่มค่าของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในท่อไฟเล็กกลับที่ 2 ในแต่ละเทอม 2 เท่า โดยแสดงผลการเพิ่มของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมเป็น % 69

4.23 อิทธิพลของตัวแปรในการออกแบบหม้อน้ำชนิดท่อไฟ 70

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 สเปรทชีทสำเร็จสำหรับคำนวณคุณสมบัติของหม้อน้ำ AB&CO TT boilers	4
2.2 สเปรทชีทสำเร็จสำหรับตรวจสอบปริมาณการใช้เชื้อเพลิงในหม้อน้ำ	5
2.3 สเปรทชีทสำเร็จสำหรับคำนวณหา properties ของไอน้ำ	6
2.4 สเปรทชีทสำเร็จสำหรับคำนวณหา Properties ของน้ำที่สถานะอิ่มตัว	6
2.5 หม้อน้ำชนิดท่อไฟ	8
2.6 หัวเผาเชื้อเพลิงแข็งติดตั้งไว้ที่ทางเข้าของท่อไฟใหญ่	8
2.7 หม้อน้ำชนิดท่อไฟ	9
2.8 หม้อน้ำชนิดท่อไฟแบบไม่มีกลับ	9
2.9 หม้อน้ำชนิดท่อไฟแบบ 1 กลับ	9
2.10 หม้อน้ำชนิดท่อไฟแบบ 2	10
2.11 หม้อน้ำชนิดท่อน้ำ	11
2.12 หม้อน้ำชนิดท่อน้ำ	11
2.13 หม้อน้ำชนิดลูกผสม	12
2.14 Thermal resistance diagram ของการถ่ายเทความร้อนจากท่อไฟใหญ่	12
2.15 Thermal resistance diagram ของการถ่ายเทความร้อนจากท่อไฟเล็ก	13
2.16 พื้นที่รับรังสีความร้อนในห้องเผาไหม้ เป็นพื้นที่สี่เหลี่ยมขอบร่วมมุม90 องศา	15
2.17 พื้นที่รับรังสีความร้อนในห้องเผาไหม้เป็นพื้นที่สี่เหลี่ยมที่มีขนาดเท่ากันตั้งตรงข้ามกันในแนวตรง	15
2.18 ภาพแสดงที่มาของการคำนวณหาอุณหภูมิอะเดียแบติก	19
3.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	20
3.2 ภายนอกหม้อน้ำชนิดท่อน้ำ	21
3.3 ดรัมและท่อที่เรียงในห้องเผาไหม้ของหม้อน้ำ และช่องลำเลียงเชื้อเพลิง	22

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.4 ทางออกของไอเสียของหม้อน้ำ	22
3.5 เขียนแบบโครงสร้างภายในห้องเผาไหม้ด้วยสเปรทชีทสำหรับใช้ในการออกแบบ	23
3.6 การวัดเส้นผ่านศูนย์กลางในท่อไฟใหญ่	24
3.7 เขียนแบบโครงสร้างหม้อน้ำชนิดท่อไฟด้วยสเปรทชีทสำหรับใช้ในการออกแบบ	25
3.8 ห้องเผาไหม้ของหม้อน้ำชนิดลูกผสม	28
3.9 เขียนแบบโครงสร้างหม้อน้ำชนิดลูกผสมด้วยสเปรทชีทสำหรับใช้ในการออกแบบ	28
3.10 เขียนแบบห้องเผาไหม้ของหม้อน้ำชนิดลูกผสมด้วยสเปรทชีทสำหรับใช้ในการออกแบบ	29
3.11 สเปรทชีทคำนวณคุณสมบัติของก๊าซไอเสีย	32
3.12 สเปรทชีทคำนวณประสิทธิภาพหม้อน้ำ	33
3.13 สเปรทชีทคำนวณคุณสมบัติทางความร้อนของน้ำ	34
3.14 กระบวนการคำนวณค่า Partial pressure	35
3.15 กระบวนการคำนวณค่า mean beam length	36
3.16 สเปรทชีทคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของก๊าซไอเสีย	37
3.17 สเปรทชีทคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของการแผ่รังสีความร้อนในท่อไฟใหญ่	38
3.18 ภาพรวมของสเปรทชีทคำนวณสมรรถนะทางความร้อนหม้อน้ำชนิดท่อไฟ	39
3.19 สเปรทชีทคำนวณอุณหภูมิไอเสียที่ทางเข้าหม้อน้ำ และอุณหภูมิเปลวไฟอะเดียแบติก	42
3.20 แสดงบริเวณการคำนวณการถ่ายเทความร้อนในท่อไฟใหญ่ตามผังงานรูปที่ 3.21	43
3.21 สเปรทชีทคำนวณการถ่ายเทความร้อนในท่อไฟใหญ่	44
3.22 แสดงบริเวณการคำนวณการถ่ายเทความร้อนในท่อไฟใหญ่ตามผังงานรูปที่ 3.23 และ 3.24.	45

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.23 สเปรทชีทคำนวณการถ่ายเทความร้อนในท่อไฟเล็กกลับที่หนึ่ง..... 46

3.24 สเปรทชีทคำนวณการถ่ายเทความร้อนในท่อไฟเล็กกลับที่สอง..... 47

3.25 ภาพรวมสเปรทชีทคำนวณพื้นที่การถ่ายเทความร้อนหม้อน้ำชนิดท่อไฟ..... 48

3.26 สเปรทชีทคำนวณความยาวท่อไฟใหญ่ที่จำเป็นเพื่อคำนวณพื้นที่การถ่ายเทความร้อน..... 50

3.27 สเปรทชีทคำนวณจำนวนท่อที่ใช้ในสเปรทชีทการคำนวณพื้นที่การถ่ายเทความร้อน..... 51

3.28 สเปรทชีทคำนวณพื้นที่การถ่ายเทความร้อนของหม้อน้ำชนิดท่อไฟ..... 52

3.29 ภาพรวมสเปรทชีทตรวจสอบสมรรถนะทางความร้อนหม้อน้ำชนิดลูกผสม..... 53

3.30 พื้นที่รับรังสีความร้อนในห้องเผาไหม้ของหม้อน้ำชนิดลูกผสม (พื้นที่ A-E) 54

3.31 สเปรทชีทคำนวณการถ่ายเทความร้อนในห้องเผาไหม้..... 55

3.32 สเปรทชีทคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้านน้ำ..... 56

3.33 ปริมาณความร้อนที่ต้องการในการทำให้น้ำเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นไออิ่มตัว..... 57

3.34 ปริมาณความร้อนที่ต้องการในการทำให้น้ำเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นไออิ่มตัว..... 57

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

Roman symbols

$(\%\frac{m}{m})_{dry}$	เปอร์เซ็นต์โดยมวลปราศจากความชื้น (%)
$(\%\frac{m}{m})_{ash}$	เปอร์เซ็นต์โดยมวลของขี้เถ้า (%)
A_s	พื้นที่ผิวรับความร้อน (m^2)
AF_{actual}	อัตราส่วนอากาศ-เชื้อเพลิงจริง
AF_{stoi}	อัตราส่วนอากาศ-เชื้อเพลิงทฤษฎี
C_c	แฟกเตอร์ค่าแก้ของแก๊สคาร์บอนได้ ออกไซด์
C_l	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของของเหลว (kJ/kgK)
$\overline{C_p}$	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของไอเสียเชิงโมล $(kJ/kmoleK)$
$C_{p_{avg}}$	ค่าความจุความร้อนจำเพาะเฉลี่ยหม้อน้ำ (kJ/kgK)
C_{sf}	ค่าคงที่ความตึงผิวของเหลว
C_w	แฟกเตอร์ค่าแก้ของไอน้ำ
D_i	เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (m)
D_o	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (m)
eff	ประสิทธิภาพหม้อไอน้ำ (%)
F_p	แฟกเตอร์ค่าแก้ความดันรีดิวส์
g	ค่าความเร่งจากแรงโน้มถ่วง (m/s^2)
g_c	ตัวประกอบการแปลง $(kgm/kgfs^2)$
h	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (W/m^2K)
h_{boiler}	เอนธาลปีของไอน้ำที่ผลิตได้ (kJ/kg)
h_{fg}	เอนธาลปีของการระเหย (kJ/kg)
h_i	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของการพาความร้อนด้านใน (W/m^2K)
h_o	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของการพาความร้อนด้านนอก (W/m^2K)
h_{rad}	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของ การแผ่รังสี (W/m^2K)
$h_{w,input}$	เอนธาลปีของน้ำป้อนเข้าหม้อไอน้ำ (kJ/kg)
k	ค่าสภาพนำความร้อนของวัสดุ (W/m^2)
LHV	ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง (kJ/kg)
$m_{h,perkgfuel}$	องค์ประกอบธาตุไฮโดรเจนในหน่วยกิโลกรัม เชื้อเพลิง (kg_{fuel})
$m_{perkgfuel}$	องค์ประกอบธาตุในหน่วยกิโลกรัม เชื้อเพลิง (kg_{fuel})
$m_{o,perkgfuel}$	องค์ประกอบธาตุออกซิเจนในหน่วยกิโลกรัม เชื้อเพลิง (kg_{fuel})
$\dot{m}_{fluegas}$	อัตราการไหลของแก๊สไอเสีย (kg/s)
$\dot{m}_{fuel}$	อัตราการป้อนเชื้อเพลิง (kg/s)

รายการคำย่อและสัญลักษณ์(ต่อ)

Nu	ตัวเลขนัซเซิลท์
P	ความดัน (kPa)
p_{cr}	ความดันวิกฤติ (kPa)
P_r	ความดันรีดิวส์ (kPa)
Pr_l	ตัวเลขพรันด์เทิลของของเหลว
Q	ปริมาณพลังงานที่ต้องใช้ในการต้มน้ำ (kW)
Q_{actual}	ความร้อนจากเชื้อเพลิงที่ให้หม้อไอน้ำ (kW)
$Q_{com-sat.liq}$	ปริมาณพลังงานที่ใช้ในการ ต้มน้ำจาก สถานะของเหลวเป็นของเหลวอิ่มตัว (kW)
$Q_{sat.liq-sat.vapor}$	ปริมาณพลังงานที่ใช้ในการ ต้มน้ำจาก สถานะของเหลวอิ่มตัวเป็นไออิ่มตัว (kW)
q	ฟลักซ์ความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ (W/m^2)
Re	ตัวเลขเรโนลด์
R_{cond}	ค่าความต้านทานความร้อนการนำความร้อน (m^2K/W)
$R_{conv,i}$	ค่าความต้านทานความร้อนการพาความร้อนด้านใน (m^2K/W)
$R_{conv,o}$	ค่าความต้านทานความร้อนการพาความร้อนด้านนอก (m^2K/W)
R_{rad}	ค่าความต้านทานความร้อนการแผ่รังสี (m^2K/W)
R_{th}	ค่าความต้านทางความร้อน (m^2K/W)
R_{tot}	ค่าความต้านทานความร้อนรวม (m^2K/W)
T	อุณหภูมิ (^oC)
$T_{ambient}$	อุณหภูมิบรรยากาศ (^oC)
T_s	อุณหภูมิผิว (^oC)
T_{surr}	อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมโดยรอบ (^oC)
T_x	ส่วนต่างอุณหภูมิของของเหลวกับ อุณหภูมิอิ่มตัว (^oC)
U	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (W/m^2K)
V_{mois}	ปริมาตรของความชื้นในเชื้อเพลิง (%)
x_{fuel}	ปริมาณธาตุใดๆในเชื้อเพลิงเชิงปริมาตร (%)

Greek symbols

ε	สัมประสิทธิ์การแผ่รังสี
ε_g	สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของแก๊ส
ε_c	สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์
ε_w	สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของไอน้ำ
σ	ค่าคงที่สเตฟานส์-โบล์ทสมัน (W/m^2K^4)
$\sigma_{tension}$	ค่าแรงตึงผิวระหว่างของเหลวกับไอ (N/m)

รายการคำย่อและสัญลักษณ์(ต่อ)

μ_l	ค่าความหนืดของของเหลว $(kg/m \cdot s)$
ρ_l	ความหนาแน่นของของเหลวอิ่มตัว (kg/m^3)
ρ_v	ความหนาแน่นของไออิ่มตัว (kg/m^3)

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การออกแบบ และตรวจสอบหม้อน้ำสำหรับใช้ในอุตสาหกรรม จำเป็นต้องตรวจสอบทั้งทางทฤษฎี และการทดสอบจริง โดยสเปรทชีทคำนวณพื้นที่การถ่ายเทความร้อนของหม้อน้ำ ถูกพัฒนาเพื่อการตรวจสอบสมรรถนะ และออกแบบหม้อน้ำ โดยใช้หลักวิศวกรรมของการถ่ายเทความร้อน การวิเคราะห์การเผาไหม้ของเชื้อเพลิง การวิเคราะห์ไอเสีย และทฤษฎีอุณหพลศาสตร์การเปลี่ยนแปลงสถานะของน้ำ โดยใช้ทฤษฎีดังกล่าวเชื่อมโยงในรูปแบบของสเปรทชีท เป็นสูตรคำนวณสำหรับการออกแบบพื้นที่การถ่ายเทความร้อน และตรวจสอบสมรรถนะทางความร้อนของหม้อน้ำ สาเหตุของปัญหาคือการเลือกหม้อน้ำของผู้ประกอบการโดยไม่ทราบถึงสมรรถนะที่เพียงพอต่อการใช้งาน เป็นสาเหตุให้หม้อน้ำที่เลือกใช้มีสมรรถนะไม่ถูกต้องตามที่ผู้ประกอบการต้องการใช้งาน เนื่องจากขาดความรู้ ความเข้าใจในหลักวิศวกรรม สเปรทชีทดังกล่าวจึงถูกพัฒนาขึ้นให้ผู้ประกอบการ วิศวกร หรือผู้ควบคุมหม้อน้ำใช้ตรวจสอบ โดยค่าพื้นที่การถ่ายเทความร้อนที่คำนวณได้ จะสัมพันธ์กับการกำหนดพารามิเตอร์ในการออกแบบ เช่น ความยาว เส้นผ่านศูนย์กลางท่อไฟใหญ่ เส้นผ่านศูนย์กลางจำนวนท่อไฟเล็ก ชนิดของเชื้อเพลิงที่เลือกใช้ อุณหภูมิน้ำป้อน ปริมาณการผลิตไอน้ำ และความดันไอที่ต้องการ

หลักการที่ใช้สำหรับพัฒนาสเปรทชีทนั้นใช้ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนของการนำ การพาและแผ่รังสีความร้อน ทฤษฎีการเผาไหม้ การวิเคราะห์แยกธาตุแบบแห้ง (Dry basis) หลักทางอุณหพลศาสตร์ของน้ำ การถ่ายเทความร้อนของการเดือดแบบฟอง (Nucleate boiling) และการเดือดแบบไหล (Flow boiling) โดยพัฒนาสเปรทชีทคำนวณสำหรับหม้อน้ำ 2 ชนิดคือ หม้อน้ำชนิดท่อไฟ (Fire-tube boiler) และหม้อน้ำชนิดลูกผสม (Hybrid boiler) โดยแบ่งส่วนการคำนวณในหม้อน้ำชนิดท่อไฟออกเป็น 3 ส่วน คือ ท่อไฟใหญ่ ท่อไฟเล็กกลับแรก และท่อไฟเล็กกลับที่สอง สำหรับหม้อน้ำชนิดลูกผสม แบ่งส่วนการคำนวณออกเป็น 4 ส่วนคือ ห้องเผาไหม้ ท่อไฟใหญ่ ท่อไฟเล็กกลับแรก ท่อไฟเล็กกลับที่สอง โดยสเปรทชีทจะคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของแต่ละส่วนของหม้อน้ำ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจะถูกใช้คำนวณใน 2 แนวทางด้วยกันคือ 1. ออกแบบพื้นที่การถ่ายเทความร้อน 2.ตรวจสอบสมรรถนะทางความร้อนของหม้อน้ำ โดยในแนวทางแรกถูกพัฒนาสำหรับใช้ในเฉพาะหม้อน้ำชนิดท่อไฟ สำหรับแนวทางที่สองนั้น ถูกพัฒนาสำหรับใช้ในหม้อน้ำทั้งสองชนิด รวมสเปรทชีทที่ถูกพัฒนามีทั้งหมด 3 สเปรทชีทด้วยกัน

การคำนวณในสเปรทชีทเป็นแบบวนซ้ำ สเปรทชีทใช้ผลลัพธ์จากการคำนวณในครั้งแรกกลับไปใช้เป็นตัวแปรต้น เพื่อคำนวณใหม่อีกครั้งเพื่อให้ผลลัพธ์ลู่เข้าคำตอบ จากนั้นจึงเปรียบเทียบความแม่นยำจากผลลัพธ์จากการคำนวณ เปรียบเทียบกับผลการทดลองเพื่อตรวจสอบความคลาดเคลื่อนของสเปรทชีท จากนั้นจึงปรับแก้ให้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น

1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 พัฒนาสเปรทชีทสำหรับคำนวณพื้นที่การถ่ายเทความร้อนในหม้อน้ำชนิดท่อไฟ และหม้อน้ำชนิดลูกผสม

1.2.2 ตรวจสอบความน่าเชื่อถือของสเปรทชีทโดยสอบเทียบผลการคำนวณของสเปรทชีทกับหม้อน้ำจริง

1.2.3 ตรวจสอบปัจจัยที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนในหม้อน้ำเพื่อพัฒนาหม้อน้ำให้มีสมรรถนะดีขึ้น

1.3 สมมุติฐานของงานวิจัย

1.3.1 อัตราการไหลของน้ำในหม้อน้ำเป็นการไหลแบบคงที่

1.3.2 อุณหภูมิสำหรับคำนวณการแผ่รังสีความร้อนในหม้อน้ำชนิดท่อไฟใช้อุณหภูมิเปลวไฟแบบอะเดียแบติก

1.3.3 การเดือดของน้ำมีลักษณะเป็นการเดือดแบบแอ่ง (Pool boiling) ในหม้อน้ำชนิดท่อไฟ

1.3.4 การเดือดของน้ำมีลักษณะเป็นการเดือดแบบไหล (Flow boiling) ในห้องเผาไหม้หม้อน้ำลูกผสม

1.3.5 การไหลของน้ำบริเวณรอบ ท่อไฟใหญ่ในหม้อน้ำชนิดท่อไฟ และลูกผสมนั้น เป็นการไหลแบบบังคับ (Forced convection)

1.3.6 อัตราการไหลของก๊าซไอเสียเป็นการไหลแบบคงที่

1.3.7 การเผาไหม้เชื้อเพลิงของหม้อน้ำเป็นการเผาไหม้สมบูรณ์

1.3.8 พื้นที่การถ่ายเทความร้อนในหม้อน้ำนั้นไม่รวมพื้นที่ใน Reversal chamber และ Economizer ของหม้อน้ำ

1.3.9 พื้นที่รับรังสีความร้อนในหม้อน้ำชนิดลูกผสมในส่วนของท่อน้ำในห้องเผาไหม้ เป็นพื้นที่สี่เหลี่ยมขอบร่วมมุม90 องศา กับพื้นที่สี่เหลี่ยมที่มีขนาดเท่ากันตั้งตรงข้ามกันในแนวตรง

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 การพัฒนาสเปรทชีทแบ่งเป็น 2 แนวทางคือ พัฒนาเพื่อตรวจสอบสมรรถนะทางความร้อนหม้อน้ำ และพัฒนาเพื่อออกแบบพื้นที่การถ่ายเทความร้อนหม้อน้ำ

1.4.2 สเปรทชีทคำนวณพื้นที่การถ่ายเทความร้อนในหม้อน้ำชนิดท่อไฟถูกพัฒนาทั้ง 2 แนวทาง สเปรทชีทสำหรับหม้อน้ำชนิดลูกผสมถูกพัฒนาในแนวทางเพื่อการตรวจสอบสมรรถนะเพียงแนวทางเดียว

1.4.3 การทดสอบเทียบสเปรทชีทกับกับหม้อน้ำ สอบเทียบกับหม้อน้ำที่ใช้เชื้อเพลิงแข็งในการเผาไหม้

1.4.4 การคำนวณไม่ครอบคลุมการตรวจสอบความแข็งแรงของหม้อน้ำ

1.5 ขั้นตอนของการศึกษาและพัฒนา

1.5.1 ศึกษาหม้อน้ำในด้านการสร้าง การตรวจสอบ และการใช้งาน จากการเข้ารับการอบรมและจากการตรวจสอบหม้อน้ำในโรงงานอุตสาหกรรมจริง เพื่อศึกษากระบวนการทำงานของหม้อน้ำ อุปกรณ์ในหม้อน้ำ การเผาไหม้ของเชื้อเพลิง (ขั้นตอนระบุอยู่ใน Flow chart บทที่ 3)

1.5.2 ศึกษางานวิจัย และการพัฒนาสเปรทชีทที่มีอยู่ในปัจจุบัน เพื่อนำมาปรับใช้ และเพิ่มเติมฟังก์ชั่นในส่วนที่ควรเพิ่มเติมในการพัฒนาสเปรทชีท (รายละเอียดระบุในบทที่ 2)

1.5.3 แบ่งหม้อน้ำออกเป็นสัดส่วนเพื่อตั้งสมมติฐานของการถ่ายเทความร้อนในแต่ละช่วง จากนั้นนำมาเชื่อมโยงสมการและความสัมพันธ์ในรูปแบบสเปรทชีท

1.5.2 ตรวจวัด และบันทึกค่าพารามิเตอร์ต่างๆในหม้อน้ำจริงลงในสเปรทชีท เพื่อสอบเทียบหาสมรรถนะของสเปรทชีท

1.5.3 บันทึกค่าความคลาดเคลื่อนจากนั้นปรับแก้สเปรทชีทให้มีความแม่นยำยิ่งขึ้น โดยการปรับสมการ และความสัมพันธ์ต่างๆ แล้วตรวจสอบค่าความคลาดเคลื่อนอีกครั้ง

1.5.4 แก้ไขจนกว่าค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าอยู่ในขอบเขตที่สามารถยอมรับได้

1.5.5 วิเคราะห์และสรุปผลการพัฒนาสเปรทชีท

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 ผู้ใช้งานสเปรทชีทสามารถใช้สเปรทชีทเพื่อตรวจสอบสมรรถนะ หรือออกแบบพื้นที่การถ่ายเทความร้อนของหม้อน้ำชนิดท่อไฟ และใช้ตรวจสอบสมรรถนะหม้อน้ำชนิดลูกผสมได้

1.6.2 สเปรทชีทคำนวณพื้นที่การถ่ายเทความร้อนถูกใช้เครื่องมือช่วยเหลือสำหรับผู้ออกแบบหม้อน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

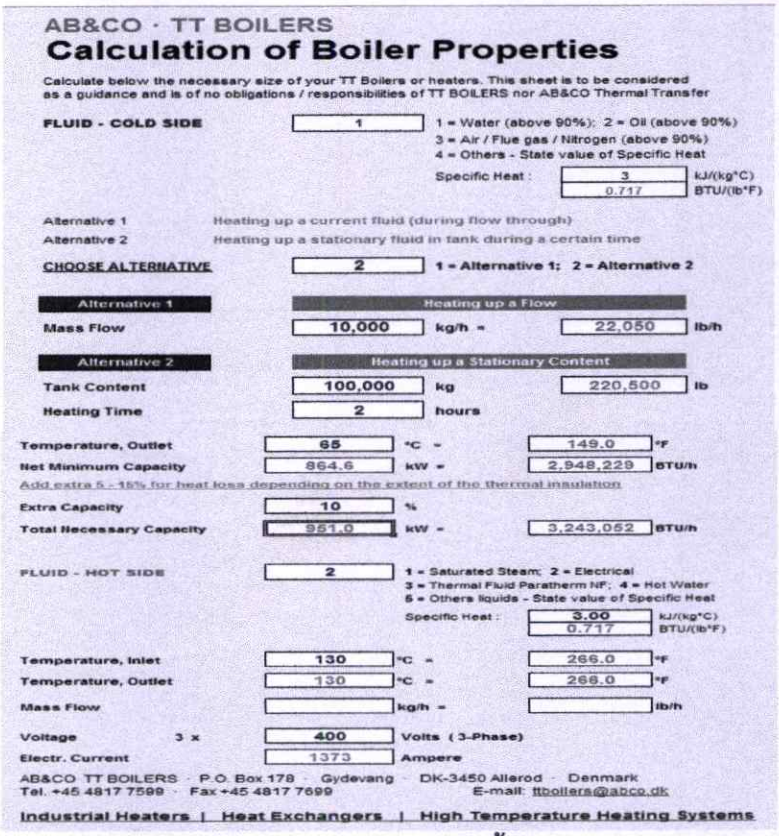
1.6.3 ผู้ใช้สเปรทชีทสามารถตรวจสอบสมรรถนะหม้อน้ำเทียบกับสเปรทชีทได้ เพื่อตรวจสอบการถ่ายเทความร้อนของหม้อน้ำที่เกิดขึ้นจริงเทียบกับการคำนวณในสเปรทชีทผู้ตรวจสอบอัตราสิ้นเปลืองพลังงาน

บทที่ 2
วรรณกรรมและกรอบแนวความคิด

2.1 วรรณกรรมปริทัศน์

โปรแกรมสำหรับคำนวณพารามิเตอร์ต่างๆของหม้อน้ำ เป็นโปรแกรมที่เปิดให้ทดลองใช้จากบริษัทที่ผลิตหม้อน้ำเพื่อจำหน่าย ซึ่งพารามิเตอร์จากการคำนวณนั้นมีไม่เพียงพอสำหรับวิเคราะห์ข้อมูลต่างๆของหม้อน้ำ แม้โปรแกรมดังกล่าวจะอยู่ในรูปของสเปรทชีทแต่ก็ถูกใส่รหัสผ่านเพื่อป้องกันการแก้ไขสูตร และตรวจสอบการเชื่อมโยงของแต่ละเซลล์ทำให้ผู้ใช้งานไม่สามารถทราบถึงความสัมพันธ์ และสมการที่โปรแกรมดังกล่าวเลือกใช้งานได้ทั้งนี้เพื่อบริษัทจะสามารถจำหน่ายโปรแกรมที่มีความครบถ้วนสมบูรณ์กว่า ซึ่งผู้ประกอบการ หรือบริษัทที่เป็นตัวแทนจำหน่ายหม้อน้ำในประเทศไทยจำเป็นต้องซื้อซอฟแวร์ดังกล่าวซึ่งมีราคาแพง ดังนั้นการพัฒนาโปรแกรมคำนวณพื้นที่การถ่ายเทความร้อนในหม้อน้ำจึงพัฒนาเพื่อให้ผู้ประกอบการ วิศวกร และผู้ควบคุมหม้อน้ำ สามารถใช้เพื่อตรวจสอบสมรรถนะของหม้อน้ำ และใช้ออกแบบพื้นที่การถ่ายเทความร้อนของหม้อน้ำได้ จากการค้นคว้าข้อมูลสรุปได้ว่า สเปรทชีท และโปรแกรมจากแต่ละบริษัทมีความเสียเปรียบต่อผู้ใช้งานดังต่อไปนี้

1) โปรแกรมไม่สามารถตรวจสอบข้อมูลและแก้ไขได้ ผู้ใช้งานสามารถกรอกค่าตัวแปรต้นเพียงอย่างเดียว ไม่สามารถตรวจสอบสมรรถนะของโปรแกรมดังกล่าวได้ ตัวอย่างโปรแกรมดังรูปที่ 2.1



AB&CO · TT BOILERS

Calculation of Boiler Properties

Calculate below the necessary size of your TT Boilers or heaters. This sheet is to be considered as a guidance and is of no obligations / responsibilities of TT BOILERS nor AB&CO Thermal Transfer

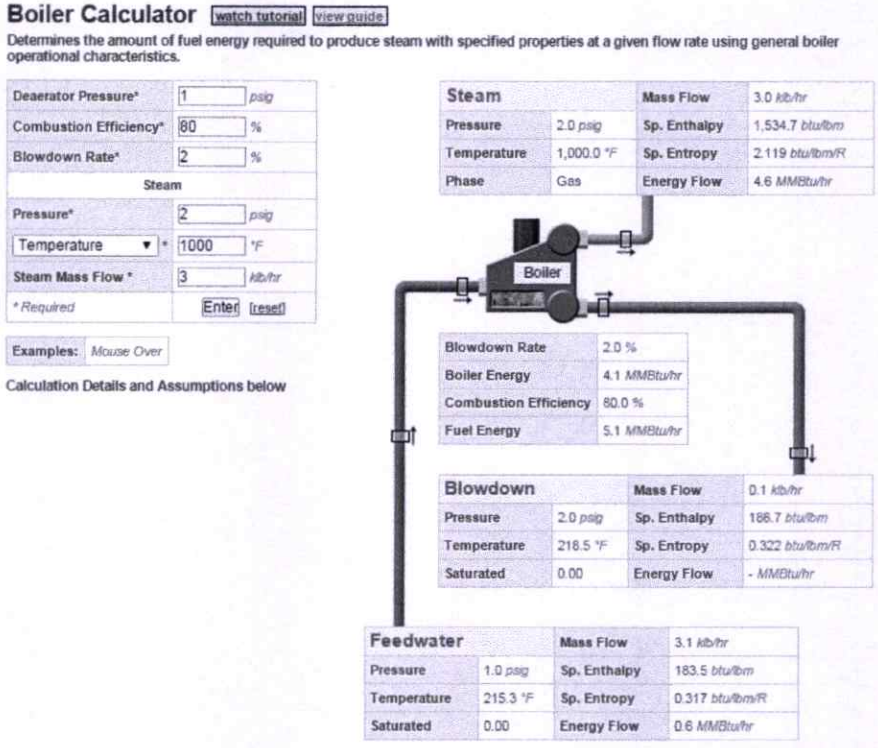
FLUID - COLD SIDE	1	1 = Water (above 90%); 2 = Oil (above 90%); 3 = Air / Flue gas / Nitrogen (above 90%); 4 = Others - State value of Specific Heat	
Specific Heat :	3		kJ/(kg*C)
	0.717		BTU/(lb*F)
Alternative 1	Heating up a current fluid (during flow through)		
Alternative 2	Heating up a stationary fluid in tank during a certain time		
CHOOSE ALTERNATIVE	2	1 = Alternative 1; 2 = Alternative 2	
Alternative 1	Heating up a Flow		
Mass Flow	10,000	kg/h =	22,050 lb/h
Alternative 2	Heating up a Stationary Content		
Tank Content	100,000	kg	220,500 lb
Heating Time	2	hours	
Temperature, Outlet	65	°C =	149.0 °F
Net Minimum Capacity	864.6	kW =	2,948,229 BTU/h
Add extra 5 - 15% for heat loss depending on the extent of the thermal insulation			
Extra Capacity	10	%	
Total Necessary Capacity	951.0	kW =	3,243,052 BTU/h
FLUID - HOT SIDE	2	1 = Saturated Steam; 2 = Electrical; 3 = Thermal Fluid Paratherm NF; 4 = Hot Water; 5 = Others liquids - State value of Specific Heat	
Specific Heat :	3.00		kJ/(kg*C)
	0.717		BTU/(lb*F)
Temperature, Inlet	130	°C =	266.0 °F
Temperature, Outlet	130	°C =	266.0 °F
Mass Flow		kg/h =	lb/h
Voltage 3 x	400	Volts (3-Phase)	
Electr. Current	1373	Ampere	

AB&CO TT BOILERS · P.O. Box 178 · Gydevang · DK-3450 Allerod · Denmark
Tel. +45 4817 7599 · Fax +45 4817 7699 E-mail: ttboilers@abco.dk

Industrial Heaters | Heat Exchangers | High Temperature Heating Systems

รูปที่ 2.1 โปรแกรมสำเร็จสำหรับคำนวณคุณสมบัติของหม้อน้ำ AB&CO TT boilers [1]

2) ข้อมูลที่ต้องการไม่เพียงพอ แม้ว่าโปรแกรมจะถูกจัดรูปแบบให้ใช้งานสะดวก แต่โปรแกรมเดียวนั้นไม่ครอบคลุมถึงพารามิเตอร์ที่จำเป็นสำหรับการตรวจสอบการถ่ายเทความร้อน ตัวอย่างโปรแกรมดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โปรแกรมสำเร็จสำหรับตรวจสอบปริมาณการใช้เชื้อเพลิงในหม้อน้ำ [2]

3) หน่วยของพารามิเตอร์ในโปรแกรมแตกต่างกัน หากใช้งานหลายโปรแกรม จะพบว่าแต่ละโปรแกรมใช้หน่วยที่แตกต่างกัน ส่งผลให้การวิเคราะห์จำเป็นต้องเปลี่ยนหน่วยซึ่งอาจก่อให้เกิดความผิดพลาดได้ ดูตัวอย่างจากการเปรียบเทียบรูปที่ 2.1 และ 2.2 จะสังเกตได้ว่ารูปที่ 2.1 โปรแกรมครอบคลุมทั้งหน่วย SI และ หน่วย อังกฤษ แต่โปรแกรมจากรูปที่ 2.2 ใช้หน่วยอังกฤษเพียงอย่างเดียว หากต้องการคำนวณปริมาณการใช้เชื้อเพลิงจากโปรแกรมที่ 2 ในหน่วย SI นั้นไม่สามารถใช้โปรแกรมดังกล่าวได้ หากใช้ต้องแปลงหน่วยซึ่งก่อให้เกิดข้อผิดพลาด และไม่สะดวกในการใช้งาน

4) โปรแกรมแต่ละโปรแกรมคำนวณแต่ละส่วนของหม้อน้ำ การคำนวณในแต่ละส่วนของหม้อน้ำนั้นไม่ได้แบ่งตามชิ้นส่วนของหม้อน้ำเพียงอย่างเดียว ยังแบ่งเป็นส่วนของการวิเคราะห์ทางความร้อนของทั้งการเผาไหม้ ไอเสีย และการเปลี่ยนสถานะของน้ำ ซึ่งโปรแกรมส่วนใหญ่จะแยกส่วนการคำนวณ ทำให้การวิเคราะห์ผลนั้นต้องวิเคราะห์จากโปรแกรมหลายโปรแกรม ดูตัวอย่างได้จากรูปที่ 2.3 และ 2.4 จะเห็นได้ว่า หากผู้ใช้ต้องการคุณสมบัติสถานะอิ่มตัวของน้ำ และคุณสมบัติต่างๆ ต้องเปิดโปรแกรม 2 ชนิด ซึ่งหากต้องวิเคราะห์ก๊าซก็จำเป็นต้องใช้โปรแกรมอื่น ซึ่งเห็นได้ว่า โปรแกรมที่แยกคำนวณนั้นไม่ครอบคลุมการ

ใช้งาน

Individual Steam Properties Calculator watch tutorial | view guide

Calculates steam and liquid water properties given two properties using the IAPWS Industrial Formulation 1997.

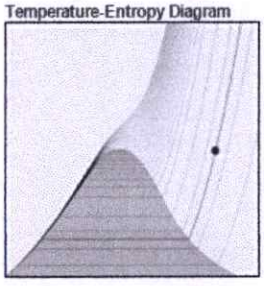
Pressure*	5	psig
Temperature ▼ *	700	°F
* Required	Enter	

Examples: Mouse Over

Steam Properties

		Units
Pressure	5.0	psig
Temperature	700.0	°F
Specific Enthalpy	1,383.7	btu/lbm
Specific Entropy	1.985	btu/lbm/R
Phase / Quality	Gas	
Specific Volume	35.000	ft³/lb

Temperature-Entropy Diagram



Recent Properties (max 20) - [download] - [clear]

Pressure	Temperature	Specific Enthalpy	Specific Entropy	Phase / Quality	Specific Volume
psig	°F	btu/lbm	btu/lbm/R		ft³/lb
5.0	700.0	1,383.7	1.985	Gas	35.000

รูปที่ 2.3 โปรแกรมสำเร็จสำหรับคำนวณหา properties ของไอน้ำ [3]

Saturated Properties Calculator watch tutorial | view guide

Calculates saturated liquid and gas properties for a given pressure or temperature using the IAPWS Industrial Formulation 1997.

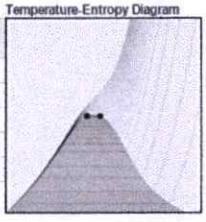
Temperature ▼ *	700	°F
* Required	Enter	

Examples: Mouse Over

Steam Properties

	Saturated Liquid	Evaporation	Saturated Gas	units
Pressure	3,078.2			psig
Temperature	700.0			°F
Specific Enthalpy	823.6	186.7	1,010.3	btu/lbm
Specific Entropy	0.991	0.161	1.152	btu/lbm/R
Specific Volume	0.037	0.043	0.080	ft³/lb

Temperature-Entropy Diagram



Recent Saturation Properties (max 20) - [download] - [clear]

Pressure	Temperature	Specific Enthalpy			Specific Entropy			Specific Volume		
		Saturated Liquid	Evaporation	Saturated Gas	Saturated Liquid	Evaporation	Saturated Gas	Saturated Liquid	Evaporation	Saturated Gas
psig	°F	btu/lbm			btu/lbm/R			ft³/lb		
3,078.2	700.0	823.6	186.7	1,010.3	0.991	0.161	1.152	0.037	0.043	0.080
5.0	227.1	195.4	960.5	1,155.9	0.335	1.399	1.733	0.017	20.365	20.382

รูปที่ 2.4 โปรแกรมสำเร็จสำหรับคำนวณหา Properties ของน้ำที่สถานะอิ่มตัว [4]

จากข้อเสียเปรียบดังกล่าวจะพบได้ว่าหากผู้ใช้งานมีความจำเป็นต้องวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนในหม้อน้ำ ผู้ใช้งานจำเป็นต้องซื้อโปรแกรมสำเร็จจากบริษัทดังกล่าว หรืออีกทางหนึ่งคือผู้ใช้งานต้อง

สร้างโปรแกรมขึ้นมาเอง โดยการพัฒนาสเปรทชีทดังกล่าวนี้เพื่อเป็นตัวต้นแบบสำหรับการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อน สมรรถนะ หรือการเผาไหม้เชื้อเพลิง จากหม้อน้ำ เพื่อพัฒนาเป็นโปรแกรมสำเร็จต่อไป จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ามีโปรแกรมที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนในหม้อน้ำหลายรูปแบบ สำหรับตัวอย่างอ้างอิงของโปรแกรมดังกล่าวจะระบุไว้ที่ท้ายเล่มในส่วนของเอกสารอ้างอิง

2.2 หลักการทำงานของหม้อน้ำ

2.2.1 หลักการทำงานเบื้องต้นของหม้อน้ำ

หม้อน้ำเป็นอุปกรณ์สำหรับผลิตไอน้ำ เพื่อนำไอน้ำไปใช้ประโยชน์ในโรงงานอุตสาหกรรมด้านต่างๆ โดยสามารถผลิตไอน้ำได้ทั้งปริมาณและความดันที่ต้องการ ดังนั้นหม้อน้ำจึงมีหลายประเภทตามความเหมาะสมกับการใช้งาน เช่น หม้อน้ำที่ผลิตไอน้ำอิ่มตัว จะใช้ในการถ่ายเทความร้อนในกระบวนการผลิต และหม้อน้ำที่ผลิตไอน้ำยิ่งยวด ซึ่งมีอุณหภูมิและความดันสูงจะใช้สำหรับเป็นต้นกำลัง เช่น ขับเครื่องกังหันไอน้ำเพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้า เป็นต้น

2.2.2 โครงสร้างทั่วไปของหม้อน้ำ

หม้อน้ำจะต้องประกอบด้วยส่วนประกอบสำคัญดังต่อไปนี้

1) เตาหรือห้องเผาไหม้ เป็นส่วนสำหรับให้เชื้อเพลิงเกิดการเผา ไหม้หรือสันดาปกับอากาศ

2) ส่วนที่เก็บน้ำ เป็นส่วนที่เก็บน้ำไว้ภายในหม้อน้ำ

3) ส่วนที่เก็บไอน้ำ คือ ส่วนที่สะสมไอน้ำที่เกิดจากการผลิตไอน้ำ

การออกแบบหม้อน้ำโดยทั่วไปจะต้องคำนึงถึงรายละเอียดโครงสร้าง และส่วนประกอบต่างๆ เพื่อให้โครงสร้างมีความแข็งแรง สามารถใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพ และมีความปลอดภัย ซึ่งต้องมีการออกแบบให้ สามารถรับความเค้นจากความดันไอน้ำ และอุณหภูมิขณะทำงานได้

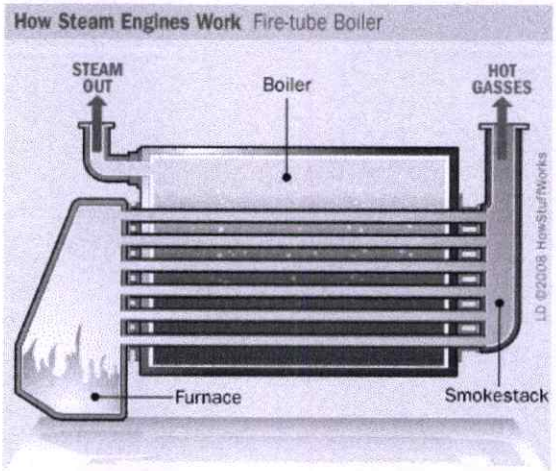
2.2.3 ประเภทของหม้อน้ำ

หม้อน้ำสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ตามลักษณะโครงสร้างคือ หม้อน้ำชนิดท่อไฟ หม้อน้ำชนิดท่อน้ำ และหม้อน้ำชนิดอื่นๆ ซึ่งไม่สามารถจัดอยู่ในหม้อน้ำสองประเภทแรกได้ ซึ่งรายละเอียดของหม้อน้ำแต่ละประเภทมีดังต่อไปนี้

2.2.3.1 หม้อน้ำชนิดท่อไฟ

หม้อน้ำชนิดท่อไฟ (Fire tube boiler) เป็นหม้อน้ำที่มีท่อไฟที่ก๊าซร้อนไหลผ่านอยู่ในท่อ และมีน้ำที่รับความร้อนเพื่อกลายเป็นไอน้ำอยู่ภายนอกท่อ ดังรูปที่ 2.5 หม้อน้ำชนิดท่อไฟมีองค์ประกอบดังต่อไปนี้

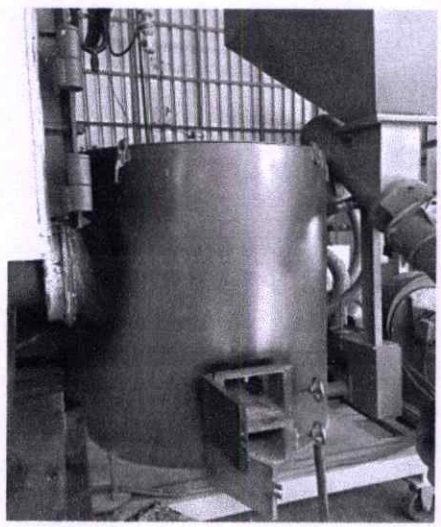
1) เปลือกหม้อน้ำ (Boiler shell) คือเปลือกเหล็กของหม้อน้ำภายในบรรจุน้ำและไอน้ำที่มีความดัน จึงต้องได้รับการออกแบบ และสร้างอย่างแข็งแรง แต่ไม่ได้หมายรวมถึงอิฐ หรือฉนวนความร้อนที่หุ้มหม้อน้ำ เปลือกหม้อน้ำมีทั้งที่ทำด้วยเหล็กกล้าและเหล็กหล่อ แต่ที่ทำด้วยเหล็กหล่อจะเป็นหม้อน้ำขนาดเล็ก ส่วนหม้อน้ำขนาดใหญ่จะทำด้วยแผ่นเหล็กกล้า [5]
2) ผนังหน้าและผนังหลังหม้อน้ำ (End plate or tube sheet) คือ ส่วนที่ปิดหัวปิดท้ายของเปลือกหม้อน้ำ ผนังหม้อน้ำมีทั้งแบบแผ่นเหล็กเรียบ แบบขึ้นรูปเป็นแผ่นโค้ง และแบบขอบโค้ง ผนังหม้อน้ำแบบแผ่นโค้งสามารถรับความดันไอน้ำได้ดี



รูปที่ 2.5 หม้อน้ำชนิดท่อไฟ [6]

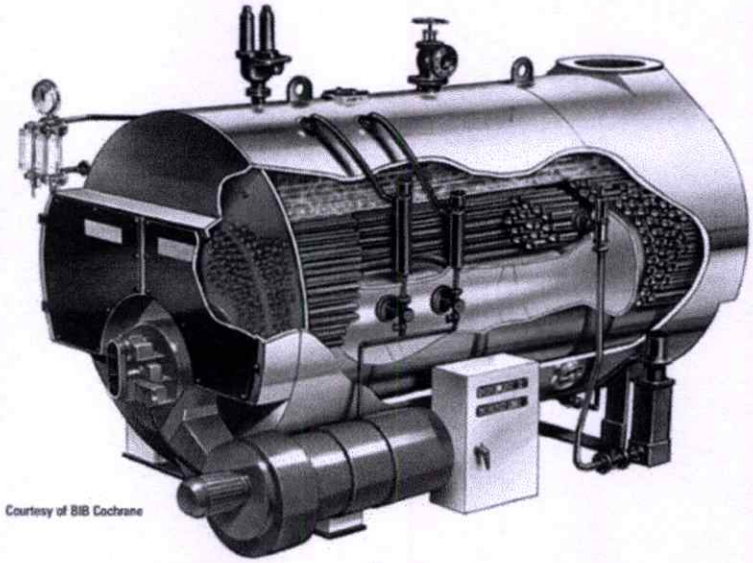
3) เหล็กยึดโยง (Stay) ทำหน้าที่เสริมความแข็งแรงของผนังหม้อน้ำ โดยการดึงผนังหม้อน้ำเอาไว้ อาจจะดึงผนังไว้กับเปลือกหม้อน้ำ หรือดึงระหว่างผนังหน้ากับผนังหลังหม้อน้ำเอาไว้ด้วยกัน มีทั้งแบบ เหล็กแท่งกลม (Stay Rod) แบบหูช้าง (Gusset stay) หรือเป็นท่อกลวง (Stay tube) เพื่อถ่ายเทความร้อนด้วย

4) ท่อไฟใหญ่หรือลูกหมู (Furnace) คือท่อนำก๊าซร้อนที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาดใหญ่มักจะเป็นห้องเผาไหม้ของหม้อน้ำเชื้อเพลิงเหลวหรือก๊าซ มีทั้งแบบขึ้นรูปเป็นลอนที่แข็งกว่าและถ่ายเทความร้อนได้ มากกว่าแบบท่อไฟเรียบ ที่ต้องมีความหนามากกว่าและต้องมีวงแหวนเสริมความแข็งแรง (Reinforce ring) ภายนอก อาจมีการปรับแต่งให้ท่อไฟใหญ่ใช้เชื้อเพลิงแข็งได้โดยการติดตั้งหัวเผาเชื้อเพลิงแข็งไว้ทางด้านทางเข้าของท่อไฟใหญ่ ดูตัวอย่างรูปที่ 2.6

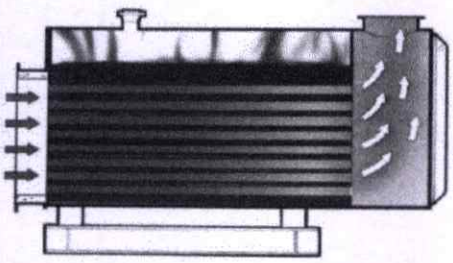


รูปที่ 2.6 หัวเผาเชื้อเพลิงแข็งติดตั้งไว้ที่ทางเข้าของท่อไฟใหญ่(อนุเคราะห์ภาพโดยบริษัท แอลวาย อินดัสทรี จำกัด)

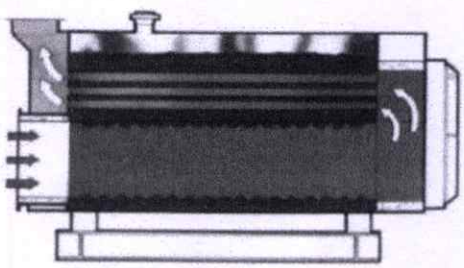
5) ท่อไฟเล็กท่อไฟเล็ก (Fire tube) คือท่อขนาดเล็กที่ให้ก๊าซร้อนไหลผ่านภายในท่อ สำหรับถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำที่อยู่ภายนอกท่อ หม้อน้ำทั่วไปมีการออกแบบท่อไฟเล็กในหม้อน้ำให้ก๊าซร้อนมีทิศทางการไหลกลับไปกลับมาอยู่ภายในหม้อน้ำ เพื่อเพิ่มระยะทางในการแลกเปลี่ยนความร้อน ส่งผลให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสูงของหม้อน้ำสูงขึ้นตามไปด้วย เรียกจำนวนครั้งในการไหลกลับไปกลับมาของก๊าซร้อนในท่อไฟทั้งหมดภายในหม้อน้ำว่า จำนวนกลับ นอกจากนี้ตรงบริเวณหัวและท้ายหม้อน้ำซึ่งเป็นส่วนที่ไฟมีการกลับทิศทางการไหล จะเรียกบริเวณนี้ว่า ห้องไฟกลับ หากห้องไฟกลับนั้นมีน้ำล้อมรอบภายนอก จะเรียกว่า แบบหลังเปียก (Wet back) ในทางกลับกัน หากห้องไฟกลับไม่มีน้ำล้อมรอบ หรือเป็นแบบห้องที่ก่อด้วยอิฐทนไฟยื่นออกไปนอกตัวหม้อน้ำ จะเรียกว่าแบบหลังแห้ง (Dry back) ดูตัวอย่างชนิดท่อไฟเล็กได้ดังรูปที่ 2.7 – 2.10



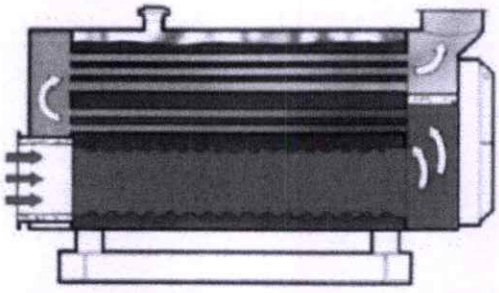
รูปที่ 2.7 หม้อน้ำชนิดท่อไฟ [7]



รูปที่ 2.8 หม้อน้ำชนิดท่อไฟแบบไม่มีกลับ [7]



รูปที่ 2.9 หม้อน้ำชนิดท่อไฟแบบ 1 กลับ [7]



รูปที่ 2.10 หม้อน้ำชนิดท่อไฟแบบ 2 กลับ [7]

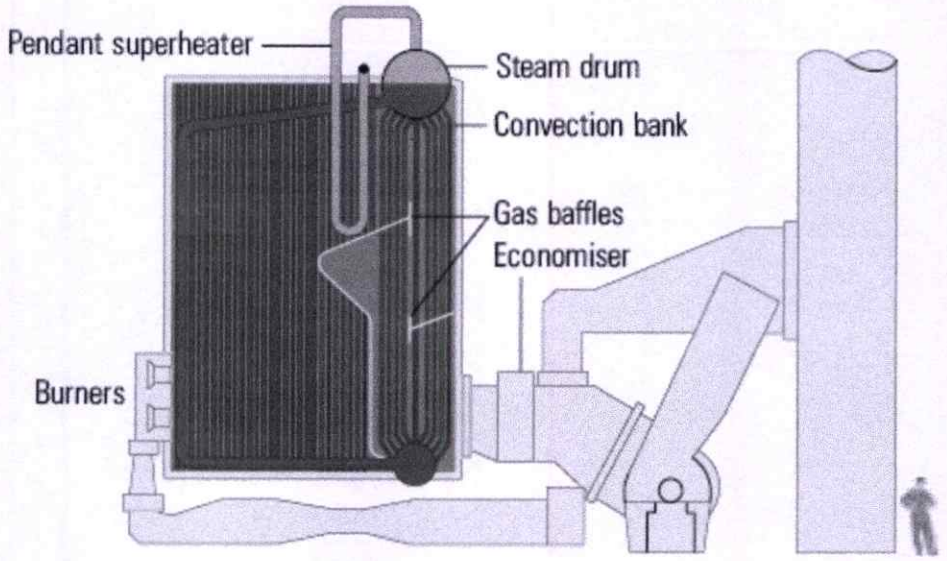
2.2.3.2 หม้อน้ำชนิดท่อน้ำ

หม้อน้ำแบบท่อน้ำ (Water tube boiler) เป็นหม้อน้ำที่มีน้ำอยู่ภายในท่อ รับความร้อนจากก๊าซร้อนที่ไหลผ่านอยู่ภายนอกท่อเพื่อระเหยกลายเป็นไอน้ำ โครงสร้างหลักของหม้อน้ำแบบท่อน้ำดังแสดงในรูปที่ 2.11 และ 2.12 ประกอบด้วย 3 ส่วนดังนี้

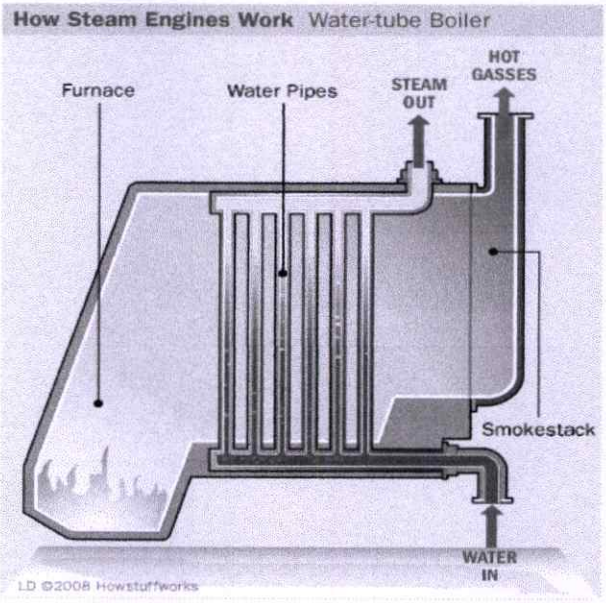
(1) ถังไอ (Steam drum or Upper drum) เป็นโครงสร้างเหล็กทรงกระบอกที่อยู่ด้านบนของหม้อน้ำแบบท่อน้ำ เป็นที่เกิดหรือแยกตัวของไอน้ำที่ระเหยขึ้นมาจากผิวน้ำ โดยปรกติระดับน้ำจะอยู่ประมาณระดับครึ่งหนึ่งของถังไอนี้ ส่วนด้านล่างของถังไอจะเป็นส่วนที่ท่อน้ำจำนวนมากเข้ามาต่อชนเพื่อให้น้ำในท่อน้ำที่ได้รับการถ่ายเทความร้อนเวียนขึ้นมาแยกตัวเป็นไอน้ำ หม้อน้ำแบบท่อน้ำที่ดีจะมี Steam separator หรือ Steam purifier อยู่ในถังไอด้านบน เพื่อแยกน้ำและสิ่งสกปรกออกจากไอน้ำ เพื่อทำให้ไอน้ำแห้งและสะอาดขึ้น

(2) ถังโคลน (Mud drum or Lower drum) เป็นโครงสร้างเหล็กทรงกระบอกที่อยู่ด้านล่างของหม้อน้ำแบบท่อน้ำ มักจะมีขนาดเล็กกว่าถังไอ ถังโคลนทำหน้าที่คล้ายท่อร่วม (Header) ของท่อน้ำ โดยส่วนด้านบนของถังโคลนจะเป็นส่วนที่ท่อน้ำจำนวนมากจากด้านบนเข้ามาต่อชน ในขณะผลิตไอน้ำจะมีการหมุนเวียนของน้ำในท่อมาก ตะกอนหนักจะตกลงสะสมที่ถังโคลนนี้ส่วนตะกอนเบาจะถูกหมุนเวียนไปตามธรรมชาติของความแตกต่างกันของอุณหภูมิน้ำ ดังนั้นน้ำที่ป้อนเข้าหม้อน้ำจะต้องมีความสะอาดมาก เพราะสิ่งสกปรกที่เป็นของแข็ง เช่น ทราย สนิม ขี้เชื่อมโลหะ ฯลฯ จะขัดสีภายในท่อน้ำ เพราะการหมุนเวียนของน้ำในท่อ จนทำให้ท่อน้ำบางลงจนแตกได้

(3) ท่อน้ำ (Water tube) คือท่อที่ให้น้ำไหลผ่านภายในท่อ โดยรับความร้อนจากก๊าซร้อนภายนอกท่อถ่ายเทให้กับน้ำที่อยู่ภายในท่อ ท่อน้ำเป็นส่วนที่รับความร้อนส่วนใหญ่จากก๊าซร้อนจากการเผาไหม้



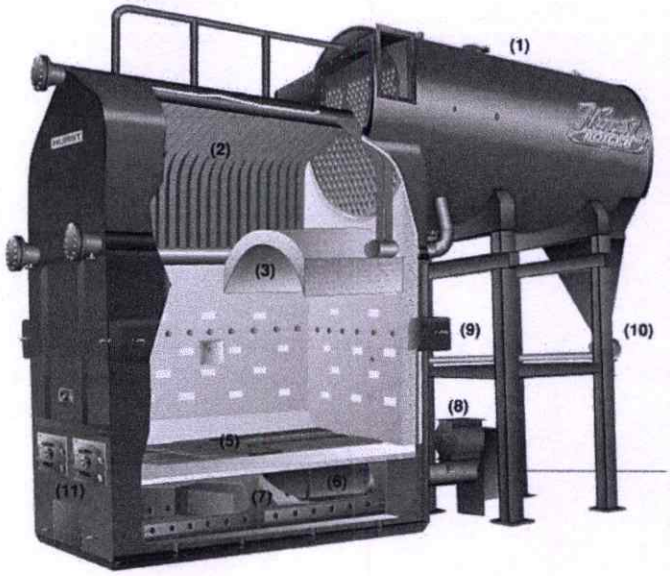
รูปที่ 2.11 หม้อน้ำชนิดท่อน้ำ [8]



รูปที่ 2.12 หม้อน้ำชนิดท่อน้ำ [9]

2.2.3.3 หม้อน้ำชนิดลูกผสม

หม้อน้ำชนิดดังกล่าวเป็นหม้อน้ำที่ถูกผสมระหว่างหม้อน้ำชนิดท่อไฟกับหม้อน้ำชนิดท่อน้ำ โดยมีลักษณะดังรูปที่ 2.13



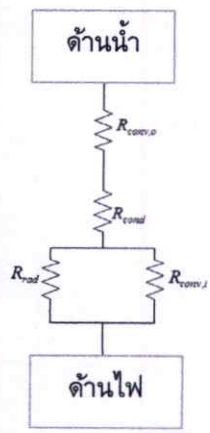
รูปที่ 2.13 หม้อน้ำชนิดลูกผสม [10]

โดยความพิเศษของหม้อน้ำชนิดดังกล่าวคือมีการเพิ่มพื้นที่การถ่ายเทความร้อนโดยติดตั้งห้องเผาไหม้ซึ่งมีท่อน้ำอยู่รอบๆ ทำให้สามารถผลิตไอน้ำได้เพิ่มขึ้น อีกทั้งการบำรุงรักษาง่ายกว่าเนื่องจากขี้เถ้าส่วนใหญ่จะตกค้างอยู่ในห้องเผาไหม้ เมื่อทำความสะอาดสามารถกวาดออกมาได้ง่าย

2.3 ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน

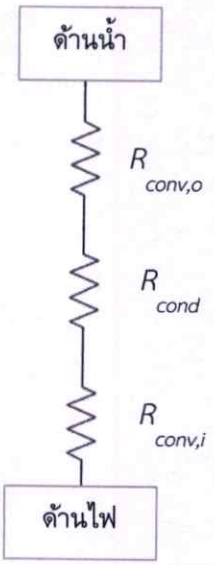
2.3.1 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม

ทฤษฎีการนำ การพา และแผ่รังสีความร้อนเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ความต้านทานความร้อนของการแผ่รังสีจะถูกรวมกับการพาความร้อน เป็นสมมติฐานในห้องเผาไหม้หรือท่อไฟใหญ่สำหรับหม้อน้ำชนิดท่อไฟซึ่งมี Thermal resistance ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 Thermal resistance diagram ของการถ่ายเทความร้อนจากท่อไฟใหญ่

สำหรับในท่อไฟเล็กตั้งสมมติฐานให้มีการถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อน และนำความร้อนเท่านั้น ส่งผลให้ Thermal resistance เป็นลักษณะดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 Thermal resistance diagram ของการถ่ายเทความร้อนจากท่อไฟเล็ก

จากรูปที่ 2.14 สามารถนำผลรวม R_{th} มารวมกันได้ ตัวแปร U คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม โดย หาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\frac{1}{UA_s} = R_{tot} = \frac{1}{\frac{1}{R_{rad}} + \frac{1}{Rconv,o}} + R_{cond} + R_{conv,i} \tag{2.1}$$

$$R_{rad} = \frac{1}{h_{rad} A_s} \tag{2.2}$$

เมื่อนำ R_{rad} แทนค่าลงในสมการที่ (2.1)

$$\frac{1}{U_o \pi D_o} = \frac{\frac{1}{h_o h_{rad}}}{(\frac{1}{h_o} + \frac{1}{h_{rad}})\pi D_o} + \frac{\ln \frac{D_o}{D_i}}{2\pi k} + \frac{1}{h_i \pi D_i} \tag{2.3}$$

สำหรับกรณีของรูปที่ 2.15 จะได้สมการ U ดังต่อไปนี้

$$\frac{1}{U\pi D} = \frac{1}{h_i \pi D_i} + \frac{\ln \frac{D_o}{D_i}}{2\pi k} + \frac{1}{h_o \pi D_o} \tag{2.4}$$

2.3.2 การคำนวณการถ่ายเทความร้อนแบบแผ่รังสี

สำหรับสมการสำหรับหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ซึ่งจะนำไปคำนวณพื้นที่การถ่ายเทความร้อน โดยจากการคำนวณพบว่าตัวแปรที่มีผลต่อค่า สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม คือ h หรือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ถูกใช้ในสเปรทชีทมีทั้งหมด 5 ชนิด คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อนทางด้านไฟ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อนทางด้านน้ำ โดยหาจากความสัมพันธ์ของการพาความร้อนกับการไหลของของไหลในรูปของตัวเลขนัซเซลท์ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของการเดือดแบบฟองแอ่ง (Nucleate pool boiling) สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของน้ำสองสถานะในท่อน้ำที่มีการไหล (Nucleate flow boiling) และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแบบการแผ่รังสี [11] โดยจะเริ่มบรรยายในส่วนของการแผ่รังสีก่อนดังสมการที่ (2.5)

$$h_{rad} = \varepsilon\sigma(T_s^2 - T_{surr}^2)(T_s - T_{surr}) \tag{2.5}$$

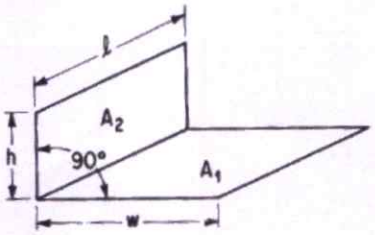
ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของแก๊สไอเสียหาจาก วิธีการถดถอยหลายเชิงแบบกำลังสองน้อยที่สุดโดยใช้พหุนาม (Least Squares Regression by Polynomials) [12] สำหรับสร้างเส้นแนวโน้มจากกราฟความแตกต่างสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน (Delta epsilon) โดยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขดังกล่าวถูกใช้เพื่อคำนวณหาสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของแก๊สไอเสีย [13] ตามสมการที่ (2.6)

$$\varepsilon_g = C_c\varepsilon_{c,1atm} + C_w\varepsilon_{w,1atm} - \Delta\varepsilon \tag{2.6}$$

สำหรับการถ่ายเทความร้อนในหม้อน้ำชนิดลูกผสมจะมีการแผ่รังสีความร้อนไปยังท่อน้ำที่ติดตั้งอยู่ภายในห้องเผาไหม้รอบกำแพง จำเป็นต้องใช้การวิเคราะห์ View factor เนื่องจากสมมติฐานการคำนวณแตกต่างจากในท่อไฟใหญ่ซึ่งการแผ่รังสีในท่อไฟใหญ่มีพื้นผิวรับรังสีเพียงพื้นผิวเดียว โดยสมการที่ใช้วิเคราะห์ view factor [14] มี สองสมการคือ

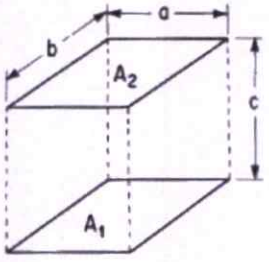
$$F_{1-2} = \frac{1}{W\pi}\left(W\tan^{-1}\frac{1}{W} + H\tan^{-1}\frac{1}{H} - \sqrt{H^2+W^2}\tan^{-1}\sqrt{\frac{1}{H^2+W^2}}\right.$$
$$\left. + \frac{1}{4}\ln\left\{\frac{\left(1+W^2\right)\left(1+H^2\right)}{1+W^2+H^2}\left[\frac{W^2\left(1+W^2+H^2\right)}{\left(1+W^2\right)\left(W^2+H^2\right)}\right]^{W^2}\left[\frac{H^2\left(1+H^2+W^2\right)}{\left(1+H^2\right)\left(H^2+W^2\right)}\right]^{H^2}\right\}\right) \tag{2.7}$$

สำหรับวิเคราะห์การแผ่รังสีของพื้นที่ตั้งฉากกันสองพื้นที่ และสมการสำหรับวิเคราะห์ view factor ของการแผ่รังสีสำหรับพื้นที่สองพื้นที่ที่ขนานกัน



รูปที่ 2.16 พื้นที่รับรังสีความร้อนในห้องเผาไหม้ เป็นพื้นที่สี่เหลี่ยมขอบร่วมมุม90 องศา [14]

$$F_{1-2}=\frac{2}{\pi XY}\left\{\begin{array}{l}\ln\left[\dfrac{\left(1+X^2\right)\left(1+Y^2\right)}{1+X^2+Y^2}\right]^{1/2}+X\sqrt{1+Y^2}\tan^{-1}\dfrac{X}{\sqrt{1+Y^2}}\\+Y\sqrt{1+X^2}\tan^{-1}\dfrac{Y}{\sqrt{1+X^2}}-X\tan^{-1}X-Y\tan^{-1}Y\end{array}\right\} \quad (2.8)$$



รูปที่ 2.17 พื้นที่รับรังสีความร้อนในห้องเผาไหม้เป็นพื้นที่สี่เหลี่ยมที่มีขนาดเท่ากันตั้งตรงข้ามกันในแนวตรง [14]

2.3.3 การคำนวณการถ่ายเทความร้อนของการไหลของน้ำในท่อน้ำ

สำหรับการเลือกใช้สมการเพื่อหาค่า Nusselt number นั้นมีหลักเกณฑ์การพิจารณาสมมติฐานจากพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของของไหลและการถ่ายเทความร้อนเพื่อจำแนกว่า ของไหลดังกล่าวมีลักษณะการถ่ายเทความร้อนเป็นแบบใด โดยกำหนดสมมติฐานให้การถ่ายเทความร้อนไปสู่น้ำในหม้อน้ำมีลักษณะเป็นการเดือดอย่างเต็มที่ (Nucleate pool boiling) และพฤติกรรมการไหลของน้ำในท่อในส่วนของห้องเผาไหม้ หรือท่อไฟใหญ่มีสมมติฐานเป็นการพาความร้อนแบบบังคับ (Force convection) โดยใช้ความสัมพันธ์ของ Gnielinski [15] ในการวิเคราะห์ค่า Nusselt number

$$Nu = \frac{(\frac{f}{8})(\mathrm{Re}-1000)\,\mathrm{Pr}}{1+12.7(\frac{f}{8})^{0.5}(\mathrm{Pr}^{0.667}-1)} \tag{2.9}$$

สำหรับค่า friction factor สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของ Darcy ซึ่งมีสมการดังต่อไปนี้

$$f = (0.79\ln(\mathrm{Re})-1.64)^{-2} \tag{2.10}$$

2.3.4 การคำนวณการถ่ายเทความร้อนแบบการเดือดแบบแอ่ง (Pool boiling)

โดยขอบเขตของการใช้ความสัมพันธ์ดังกล่าวต้องอยู่ในเงื่อนไขว่าค่า Pr ต้องมีค่าอยู่ระหว่าง 0.5 ถึง 2000 และ ค่า Reynold number อยู่ระหว่าง 3,000-5,000,000 และจากสมการความสัมพันธ์การเดือดแบบแอ่งของ Rohsenow [16] มีสมการดังนี้

$$\frac{C_l \Delta T_x}{h_{fg}\,\mathrm{Pr}_l^{1.7}} = C_{sf}\left[\frac{q''}{\mu_l h_{fg}}\sqrt{\frac{g_c \sigma_{tension}}{g(\rho_l-\rho_v)}}\right]^{0.33} \tag{2.11}$$

Rohsenow กล่าวว่าสมการดังกล่าวรูปลักษณ์ของภาชนะ ไม่ส่งผลมากนักต่อการถ่ายเทความร้อนของการเดือดแบบแอ่ง สิ่งที่สำคัญขึ้นอยู่กับพื้นผิวที่น้ำรับความร้อน ไม่ใช่รูปร่างของภาชนะรับความร้อน [16] ดังนั้นการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนของท่อไฟเล็กในแต่ละช่วงจึงสามารถใช้สมการดังกล่าวได้ สำหรับการหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของแบบแอ่ง การหาค่า h_o สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของ Mostinski [17]

$$h_o = 0.00417 q^{0.7} p_{cr}^{0.69} F_p \tag{2.12}$$

$$F_p = 1.8\,\mathrm{Pr}^{0.17} + 4\,\mathrm{Pr}^{1.2} + 10\,\mathrm{Pr}^{10}, \mathrm{Pr} = \frac{P}{P_{cr}} \tag{2.13}$$

2.3.5 การคำนวณการถ่ายเทความร้อนแบบผ่านผิวด้านนอกท่อทรงกระบอก

และในส่วนของหม้อน้ำด้านน้ำ การไหลนั้นตั้งสมมติฐานเป็นการไหลแบบภายนอก (External flow) โดยเลือกใช้ความสัมพันธ์เชิงตัวเลขของ Jakob [18] และ Zukauskas [19] ซึ่งเป็นการถ่ายเทความร้อนผ่านผิวด้านนอกของท่อทรงกระบอก และสื่อกลางที่พาความร้อนสามารถเป็นได้ทั้งสถานะแก๊ส และของเหลว โดยความสัมพันธ์เขียนได้ดังต่อนี้

$$Nu = 0.989\,\mathrm{Re}^{0.330}\,\mathrm{Pr}^{1/3}; 0.4 \le \mathrm{Re} < 4$$

$$Nu = 0.911\,\mathrm{Re}^{0.385}\,\mathrm{Pr}^{1/3}; 4 \le \mathrm{Re} < 40$$

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

$$Nu = 0.683\,\mathrm{Re}^{0.466}\,\mathrm{Pr}^{1/3};40 \le \mathrm{Re} < 4000$$
$$Nu = 0.193\,\mathrm{Re}^{0.618}\,\mathrm{Pr}^{1.3};4000 \le \mathrm{Re} < 40000$$
$$Nu = 0.027\,\mathrm{Re}^{0.805}\,\mathrm{Pr}^{1/3};40000 \le \mathrm{Re} < 400000 \quad (2.14)$$

2.3.6 การคำนวณการถ่ายเทความร้อนแบบการเดือดแบบไหล (Flow boiling)

สำหรับการถ่ายเทความร้อนของการไหลในท่อแนวตั้งสำหรับหม้อน้ำชนิดลูกผสมนั้นเลือกใช้ความสัมพันธ์ของ Jallouk [20] ซึ่งเป็นสมการหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของน้ำ 2 สถานะ โดยสมการนี้ถูกพัฒนามาจากความสัมพันธ์ของการพาความร้อนของ Chen [21] และ สมการความสัมพันธ์ของการเดือดแบบ Nucleate boiling ของ Foster & Zuber [22] โดยสามารถเขียนได้ดังนี้

$$h_{tp} = h_l \frac{0.533}{Co^{0.79}} + 5.08(Bo(10^4))^{0.5}, for(Co > 0.65)$$

$$h_{tp} = h_l \frac{1.876}{Co^{0.79}} + 1.547(Bo(10^4))^{0.5}, for(Co \le 0.65) \quad (2.15)$$

โดยสมมติฐานของการใช้ความสัมพันธ์ดังกล่าวต้องตั้งอยู่ในสมมติฐานว่า การไหลของน้ำจะต้องเป็นการไหลแบบคงตัว ไม่มี slug flow เป็นการไหลแบบเต็มท่อ เป็นการไหลในแนวตั้ง สถานะของน้ำที่ไหลจะต้องอยู่ในสถานะอิ่มตัว หรือ 2 สถานะผสมกัน และฟลักซ์ทางความร้อนมีค่าต่ำกว่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤติ

2.4 ทฤษฎีการเผาไหม้

2.4.1 การวิเคราะห์แยกธาตุ

การวิเคราะห์แยกธาตุ วิเคราะห์เพื่อหาองค์ประกอบโมเลกุลของไอเสีย เพื่อนำมาวิเคราะห์หาคุณสมบัติทางความร้อนของไอเสีย ก่อนนำไปวิเคราะห์ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนไปยังน้ำในหม้อน้ำ จากสมการการเผาไหม้ทางทฤษฎี (Stoicheometric) [23] และสมการการเผาไหม้สัดส่วนอากาศมากกว่าเชื้อเพลิง [24] (Lean combustion)

$$C_cH_hN_nO_oS_s + H_h.O_o. + a(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow bCO_2 + eH_2O + fSO_2 + gN_2 \quad (2.16)$$

โดยองค์ประกอบของเชื้อเพลิงจะมีน้ำเป็นส่วนประกอบ หากจะทำมาวิเคราะห์แยกธาตุจำเป็นที่จะต้องวิเคราะห์เชิงปริมาตรโดยคิดเฉพาะเชื้อเพลิงไม่มีความชื้นสมการต่อไปนี้

$$(\%\frac{m}{m})_{dry} = \frac{(x_{fuel})(100)}{100 - (V_{mois})} \quad (2.17)$$

144054

จะได้องค์ประกอบเชื้อเพลิงแต่ละธาตุซึ่งประกอบด้วย คาร์บอน(C) ไฮโดรเจน(H) ไนโตรเจน(N) ออกซิเจน(O) ซัลเฟอร์(S) และ เถ้า (Ash) จากนั้นนำองค์ประกอบของธาตุดังกล่าวให้อยู่ในหน่วยมวลต่อกิโลกรัมเชื้อเพลิง

$$m_{perkgfuel} = \frac{(\%\frac{m}{m})_{dry}(100 - V_{mois})}{100} \tag{2.18}$$

สำหรับธาตุไฮโดรเจน และออกซิเจนของน้ำที่อยู่ภายในเชื้อเพลิงในหน่วยมวลต่อกิโลกรัมเชื้อเพลิง สามารถหาได้จากสมการ

$$m_{h,perkgfuel} = \frac{V_{mois}(\frac{2}{18})}{100} \tag{2.19}$$

$$m_{o,perkgfuel} = \frac{V_{mois}(\frac{16}{18})}{100} \tag{2.20}$$

การวิเคราะห์แยกธาตุ ทำให้ทราบถึงจำนวนโมลของแต่ละโมเลกุลในไอเสียของการเผาไหม้ทางทฤษฎี และการเผาไหม้จริง

$$C_cH_hN_nO_oS_s + H_h.O_o. + a(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow bCO_2 + eH_2O + fSO_2 + gN_2 + hO_2 \tag{2.21}$$

จากสมการดังกล่าวคือสมการการเผาไหม้แบบสัดส่วนอากาศมากกว่าเชื้อเพลิง (Lean combustion) จะมีออกซิเจนที่เหลือจากการเผาไหม้ในไอเสีย เมื่อดุลสมการเสร็จสมบูรณ์จะทราบสัดส่วนโมล และสัดส่วนมวล ของแต่ละโมเลกุลของไอเสีย นำข้อมูลดังกล่าวมาเขียนสเปรทชีทโดยตัวแปรต้นคืออุณหภูมิของไอเสียซึ่งมาจากการคำนวณ และตัวแปรตามคือคุณสมบัติทั้งเชิงกล และทางความร้อนของไอเสีย

2.4.2 ทฤษฎีการเผาไหม้ การคำนวณปริมาณเชื้อเพลิงและปริมาณไอเสียที่ผ่านชุดท่อไฟ

อัตราการจ่ายเชื้อเพลิงคือปริมาณความร้อนที่ทำให้น้ำมีอุณหภูมิ ความดัน และสถานะที่ต้องการหารด้วยค่าความร้อนทางต่ำของเชื้อเพลิง (Low Heating Value) โดยตั้งสมมติฐานให้การเผาไหม้เชื้อเพลิงจนหมด ดังนั้นอัตราการไหลของไอเสีย หาค่าได้จากสมการดังต่อไปนี้

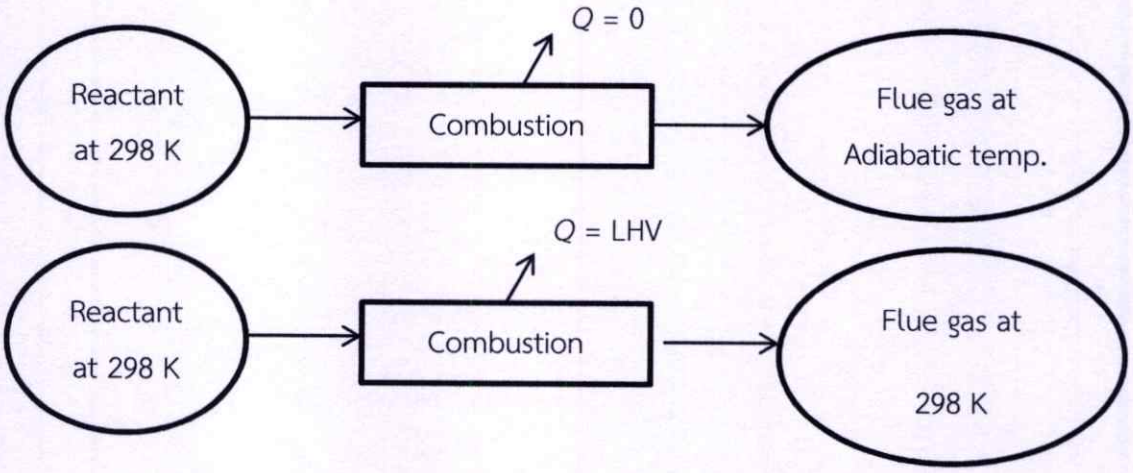
$$\dot{m}_{fuel} = \frac{Q}{LHV} \tag{2.22}$$

$$Q = \frac{Q_{com-sat.liq} + Q_{sat.liq-sat.vapor}}{\frac{eff}{100}} \tag{2.23}$$

$$\dot{m}_{fluegas} = (1 - \frac{(\%\frac{m}{m})_{ash}}{100})[(\dot{m}_{fuel}) + (AF_{actual})(\dot{m}_{fuel})] \tag{2.24}$$

โดยการคำนวณคิดเสมือนการเผาไหม้จริงเพราะฉะนั้นจะมีเถ้าเหลือจากการเผาไหม้ ไม่ถูกเผาไปด้วย จึงต้องมีตัวประกอบค่าแก้สำหรับสมการอัตราการไหลของไอเสีย สำหรับการวิเคราะห์การพาความ

ร้อนภายในท่อไฟ และการวิเคราะห์การแผ่รังสีความร้อนในท่อไฟใหญ่ ตั้งสมมติฐานโดยให้อุณหภูมิเปลวไฟนั้นเป็นเปลวไฟอะเดียแบติก โดยคำนวณแบบวนซ้ำเพื่อหาอุณหภูมิเปลวไฟอะเดียแบติก และอุณหภูมิไอเสียที่ทางเข้าของหม้อน้ำ โดยใช้สมการสมดุลเอนธาลปีของการเผาไหม้ [25]



รูปที่ 2.18 ภาพแสดงที่มาของการคำนวณหาอุณหภูมิอะเดียแบติก

จากรูปที่ 2.18 พบว่าจากสมดุลเอนธาลปีการเผาไหม้ หากนำสมการของรูปบนลบด้วยรูปล่าง พจน์เอนธาลปีของสารตั้งต้นจะถูกหักลบออกเหลือแต่เพียงความร้อนเท่ากับอินทิเกรต c_p เชิงโมล เทียบ T ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 2.25

$$Q = LHV = \sum_{i=1}^{n} \int_{298}^{T} \bar{c}_{p,i} dT \qquad (2.25)$$

จากนั้นใช้สมการดังกล่าวนำมาเชื่อมโยงในรูปของสเปรทชีทโดยคำนวณแบบวนซ้ำเพื่อหาอุณหภูมิไอเสียที่ทางเข้าของหม้อน้ำ และอุณหภูมิเปลวไฟอะเดียแบติก ซึ่งจะแสดงไว้ในบทที่ 3 โดยอุณหภูมิไอเสียนั้นคำนวณจากการเผาไหม้จริง มีอัตราส่วนอากาศเกินในระบบ ส่วนอุณหภูมิเปลวไฟอะเดียแบติกนั้นคำนวณจากการเผาไหม้แบบสมบูรณ์

2.4.3 ประสิทธิภาพของหม้อน้ำ

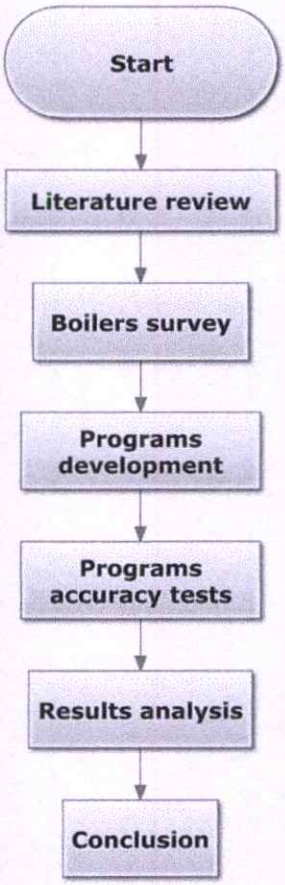
สำหรับการคำนวณประสิทธิภาพหม้อน้ำจริง คำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้ ซึ่งเป็นประสิทธิภาพจากการตรวจวัดจากหม้อน้ำจริง

$$eff = \frac{h_{boiler} - h_{w,input}}{Q_{actual}} x100 \qquad (2.26)$$

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 ภาพรวมของการดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนของการดำเนินการวิจัยในภาพรวมแบ่งออกเป็น ขั้นตอนดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

จากผังงานดังกล่าวจะเห็นได้ว่าขั้นตอนการวิจัยนั้นแบ่งออกเป็น 6 ขั้นตอนด้วยกันซึ่งในขั้นตอนการพัฒนาสเปรทชีท (Spreadsheet development) เป็นขั้นตอนที่แบ่งย่อยผังงานสเปรทชีทออกเป็นสัดส่วนเพื่อความสะดวกในการศึกษาวิธีการพัฒนาสเปรทชีทซึ่งแบ่งออกได้ดังต่อไปนี้

1) สเปรทชีทคำนวณการเผาไหม้
   - คำนวณค่าสัดส่วนมวลของโมเลกุลแต่ละโมเลกุลจากวิธีวิเคราะห์แยกธาตุแบบ dry basis เพื่อนำไปใช้หาคุณสมบัติต่างๆของก๊าซไอเสีย
   - คำนวณอัตราส่วนอากาศเชื้อเพลิงของการเผาไหม้ทางทฤษฎีจากการกรอกค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิง

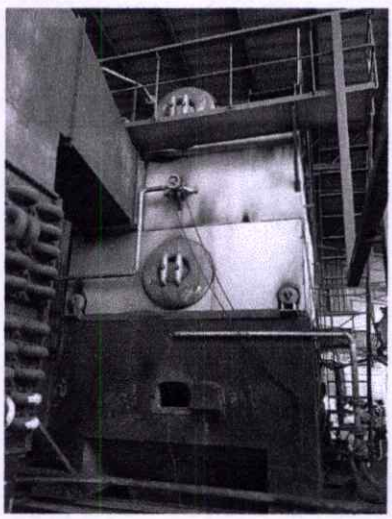
2) สเปรทชีทคำนวณปริมาณความร้อน
   - คำนวณคุณสมบัติทางพลังงานของน้ำที่สถานะของเหลวอิ่มตัว และไอน้ำอิ่มตัว
   - คำนวณประสิทธิภาพหม้อน้ำ
3) สเปรทชีทคำนวณคุณสมบัติทางความร้อนของน้ำ
4) สเปรทชีทคำนวณปริมาณการแผ่รังสีความร้อน แบ่งออกเป็น 2 สเปรทชีทย่อยด้วยกัน
   - สเปรทชีทคำนวณการแผ่รังสีความร้อนในท่อไฟใหญ่ของหม้อน้ำชนิดท่อไฟ
   - สเปรทชีทคำนวณการแผ่รังสีความร้อนในห้องเผาไหม้ของหม้อน้ำชนิดลูกผสม
5) สเปรทชีทคำนวณสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของก๊าซไอเสีย
6) สเปรทชีทคำนวณพื้นที่การถ่ายเทความร้อน
   - พื้นที่การถ่ายเทความร้อนในแต่ละส่วนของหม้อน้ำชนิดท่อไฟ
   - พื้นที่การถ่ายเทความร้อนในห้องเผาไหม้ของหม้อน้ำชนิดลูกผสม
   - คำนวณจำนวนท่อ และความยาวท่อไฟใหญ่
   - คำนวณปริมาณการถ่ายเทความร้อนที่ในแต่ละส่วนของหม้อน้ำ

รายละเอียดของการพัฒนาสเปรทชีทจะถูกเขียนไว้ในหัวข้อ 3.3 ของบทนี้ โดยกล่าวถึงรายละเอียดของการพัฒนาสเปรทชีทในแต่ละสัดส่วนของแต่ละหัวข้อคือ สเปรทชีทคำนวณการเผาไหม้ สเปรทชีทคำนวณปริมาณความร้อน สเปรทชีทคำนวณคุณสมบัติทางความร้อนของน้ำ และของไอเสีย สเปรทชีทคำนวณปริมาณการแผ่รังสีความร้อน สเปรทชีทคำนวณสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของก๊าซไอเสีย และสเปรทชีทคำนวณพื้นที่การถ่ายเทความร้อน

3.2 การสำรวจหม้อน้ำ (Boilers survey)

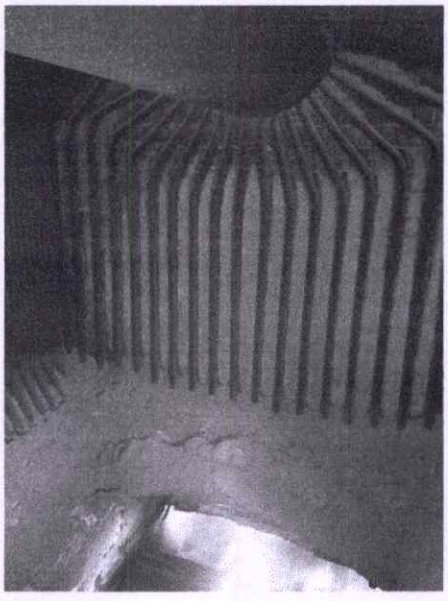
3.2.1 สำรวจหม้อน้ำชนิดท่อน้ำ

ในการศึกษาเบื้องต้นหลังจากการค้นคว้าโปรแกรมคำนวณ และงานวิจัยเกี่ยวกับความสัมพันธ์ของการถ่ายเทความร้อน และการเผาไหม้ จึงสำรวจลักษณะการทำงานของหม้อน้ำจริง ซึ่งหม้อน้ำแรกที่สำรวจ คือหม้อน้ำชนิดท่อน้ำใช้เชื้อเพลิงถ่านหินดังรูปที่ (3.2)

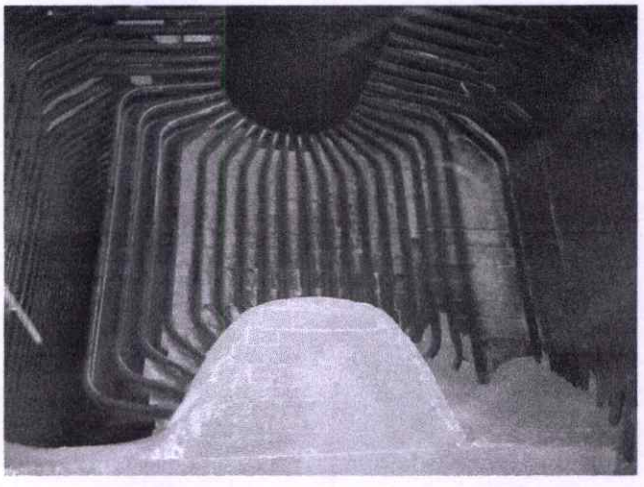


รูปที่ 3.2 ภายนอกหม้อน้ำชนิดท่อน้ำ (อนุเคราะห์ภาพโดยบริษัท เฟอร์โก อินดัสทรี จำกัด)

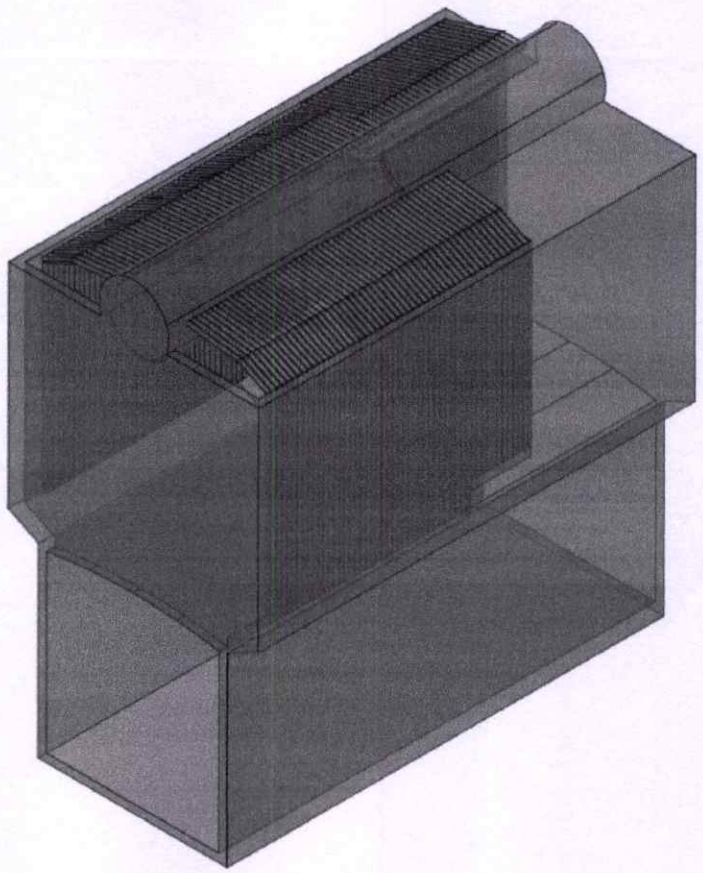
โดยเข้าสำรวจในวันที่ 27 ธันวาคม 2556 เป็นวันที่หม้อน้ำลูกนี้ปิดซ่อมแซม และทำความสะอาด โดยเข้าไปสำรวจอุปกรณ์ และส่วนต่างๆของหม้อน้ำ เพื่อเป็นแนวความคิดสำหรับออกแบบสเปรทชีท โดยหม้อน้ำนี้ติดตั้ง economizer ไว้เพื่อลดอัตราการบริโภคเชื้อเพลิง ภายในหม้อน้ำชนิดนี้จะมีท่อดรัมอยู่ทางด้านบน และท่อน้ำเรียงโดยรอบภายในห้องเผาไหม้ดังรูปที่ (3.3) โดยเชื้อเพลิงจะถูกลำเพียงเข้าทางด้านล่างของรูปที่ (3.3) และเกิดการเผาไหม้ในพื้นที่ดังกล่าว สำหรับทางออกของไอเสียจะถูกลำเลียงโดยลมดูดไปทางด้านหลังโดยทางออกดังกล่าวก็มีท่อน้ำติดตั้งอยู่ดังรูปที่ (3.4) ซึ่งทางออกไอเสียดังกล่าวอยู่ทางด้านซ้ายของภาพ พื้นที่ดังกล่าวถือว่าเป็นพื้นที่รับความร้อนเช่นเดียวกันกับในห้องเผาไหม้จากการสำรวจภายในหม้อน้ำสามารถเขียนแบบออกมาได้ลักษณะดังรูปที่ (3.5)



รูปที่ 3.3 ดรัมและท่อที่เรียงในห้องเผาไหม้ของหม้อน้ำ และช่องลำเลียงเชื้อเพลิง (อนุเคราะห์ภาพโดยบริษัท เฟอร์โก อินดัสทรี จำกัด)



รูปที่ 3.4 ทางออกของไอเสียของหม้อน้ำ (อนุเคราะห์ภาพโดยบริษัท เฟอร์โก อินดัสทรี จำกัด)



รูปที่ 3.5 เขียนแบบโครงสร้างภายในห้องเผาไหม้ด้วยสเปรทชีทสำหรับใช้ในการออกแบบ

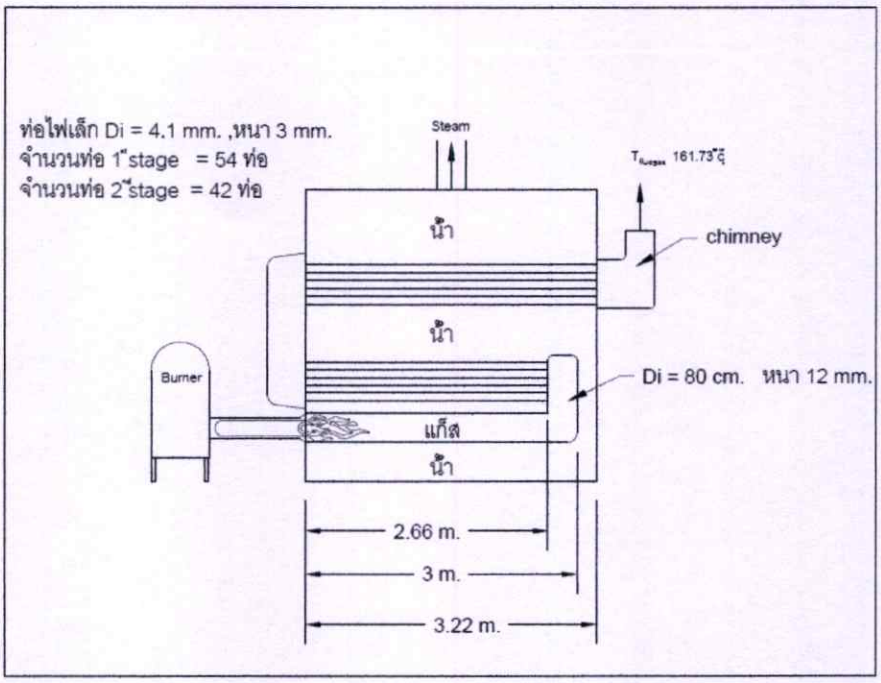
ประโยชน์จากการสำรวจดังกล่าวเพื่อให้เห็นภาพจริงก่อนการเขียนสเปรทชีท ในตอนแรกหม้อน้ำลูกนี้จะถูกใช้สอบเทียบ และเขียนสเปรทชีทสำหรับหม้อน้ำชนิดท่อน้ำ แต่เนื่องจากปัญหาทางการตรวจวัดความหนาของท่อ อีกทั้งไม่มีคู่มือจึงไม่สามารถนำมาทดสอบได้ จึงนำส่วนของ economizer ของหม้อน้ำมาสำรวจเพื่อเขียนสเปรทชีทคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนของน้ำกับไอเสีย เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษา และทดสอบการเขียนสเปรทชีทสำหรับการออกแบบ economizer แต่เนื่องจากผลการทดลองนั้นไม่ทราบความหนาของท่อ รวมถึงอัตราการไหลของน้ำ จึงไม่สามารถนำผลทดสอบมาเทียบกับการคำนวณในส่วนของ economizer และมารวมในสเปรทชีทตรวจสอบและออกแบบหม้อน้ำได้

3.2.2 สำรวจหม้อน้ำชนิดท่อไฟ

การสำรวจหม้อน้ำจาก ชนิดท่อไฟขนาด 3 ตัน ใช้เชื้อเพลิงเป็นขี้เลื่อยอัดแท่งจากบริษัท แอลวายอินดัสทรี จำกัด เป็นหม้อน้ำที่ใช้สอบเทียบกับสเปรทชีทที่พัฒนาขึ้นมา โดยการสำรวจแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือช่วงหยุดการทำงานเพื่อทำความสะอาด กับช่วงวัดประสิทธิภาพหม้อน้ำ ในช่วงที่หม้อน้ำหยุดการทำงาน เป็นการสำรวจภายในหม้อน้ำเพื่อวัดขนาดของท่อไฟใหญ่ ท่อไฟเล็ก และนับจำนวนท่อไฟทั้งหมด ก่อนบันทึกไว้เพื่อใช้เป็นค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นในสเปรทชีทคำนวณ ในการตรวจวัดช่วงแรกนั้นต้องเข้าไปยังท่อไฟใหญ่ในด้านในเพื่อวัดความยาว และเส้นผ่านศูนย์กลาง ดังรูปที่ (3.6)

รูปที่ 3.6 การวัดเส้นผ่านศูนย์กลางในท่อไฟใหญ่

จากการสำรวจพบว่าหม้อน้ำชนิดท่อไฟลูกนี้ มีความยาวท่อไฟใหญ่ 3 เมตร ความยาวท่อไฟเล็กกลับแรก 2.66 เมตร และความยาวท่อไฟเล็กกลับที่ 2 มีความยาว 3.22 เมตร โดยเส้นผ่านศูนย์กลางท่อไฟใหญ่มีขนาด 80 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางท่อไฟเล็กมีขนาด 4 เซนติเมตร ความหนาของท่อไฟใหญ่ และของท่อไฟเล็ก มีขนาด 12.5 และ 3.2 มิลลิเมตรตามลำดับ จำนวนท่อกลับแรก 54 ท่อ และจำนวนท่อกลับที่ 2 จำนวน 42 ท่อ โดยสามารถดูแบบจำลองดังกล่าวได้จากรูปที่ (3.7)



รูปที่ 3.7 เขียนแบบโครงสร้างหม้อน้ำชนิดท่อไฟด้วยสเปรทชีทสำหรับใช้ในการออกแบบ

ในช่วงถัดมาหลังจากตรวจสอบภายในหม้อน้ำแล้ว จึงตรวจสอบในส่วนของประสิทธิภาพหม้อน้ำซึ่งหลักการตรวจวัดเพื่อวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของหม้อน้ำ และประสิทธิภาพการเผาไหม้เชื้อเพลิง จะทำการตรวจวัดและบันทึกข้อมูลเพื่อใช้ประกอบการคำนวณด้วยวิธีดังต่อไปนี้

- ปริมาณน้ำป้อนเฉลี่ย : บันทึกข้อมูลตัวเลขมิเตอร์น้ำป้อนเข้าหม้อน้ำแต่ละวัน และนำมาคำนวณหาปริมาณน้ำป้อนเฉลี่ย
- ชั่วโมงการทำงานของหม้อน้ำ : บันทึกเวลาเปิด-ปิดหม้อน้ำแต่ละวัน และนำมาคำนวณหาระยะเวลาที่หม้อน้ำทำงาน
- อุณหภูมิน้ำป้อนหม้อน้ำเฉลี่ย : ตรวจวัดอุณหภูมิน้ำป้อนที่อยู่ในถังพักน้ำป้อนโดยใช้เครื่องวัดอุณหภูมิแบบดิจิตอล (Digital Thermometer) วัดอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลาต่างๆ ของวัน และนำมาคำนวณหาอุณหภูมิน้ำป้อนเฉลี่ย เปรียบเทียบกับค่าที่อ่านได้จากเกจวัดอุณหภูมิที่ถังพักน้ำป้อน
- ความดันไอน้ำที่ผลิตได้ : บันทึกค่าความดันที่อ่านได้จากเกจวัดความดันที่หม้อน้ำ และตรวจสอบกับค่าความดันที่กำหนดไว้ที่สวิทช์ควบคุมความดัน (Pressure switch) ณ ช่วงเวลาต่างๆ ของวัน และนำมาคำนวณหาความดันไอน้ำเฉลี่ย
- อัตราเชื้อเพลิงที่ป้อนให้หม้อน้ำ : บันทึกจำนวน big pack ของเชื้อเพลิงที่ใช้ในช่วงเวลาที่ทดสอบ 100 ชั่วโมง และนำมาคำนวณหาอัตราการใช้เชื้อเพลิงเฉลี่ย
- อัตราน้ำโบลว์ดาวน์ที่ระบายทิ้ง : ตรวจวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อโบลว์ดาวน์เพื่อนำมาหาค่าอัตราน้ำที่โบลว์ดาวน์

- ปริมาณออกซิเจนในไอเสีย : ตรวจวัดปริมาณออกซิเจนในไอเสียโดยใช้เครื่องวัดและวิเคราะห์ไอเสีย (Flue Gas Analyzer) นำมาคำนวณหาค่าปริมาณออกซิเจนเฉลี่ยในช่วงเวลาที่เกิดการเผาไหม้
- อุณหภูมิไอเสียและอุณหภูมิแวดล้อม : ตรวจวัดอุณหภูมิไอเสียและอุณหภูมิแวดล้อมโดยใช้เครื่องวัดและวิเคราะห์ไอเสีย (Flue Gas Analyzer) นำมาคำนวณหาค่าอุณหภูมิไอเสียเฉลี่ยและอุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยในช่วงเวลาที่เกิดการเผาไหม้
- ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และ ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ : ตรวจวัดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์โดยใช้เครื่องวัดและวิเคราะห์ไอเสีย (Flue Gas Analyzer) นำมาคำนวณหาค่าเฉลี่ยจากไอเสียที่ออกจากหม้อน้ำในช่วงเวลาที่เกิดการเผาไหม้

โดยค่าดังกล่าวถูกวัดโดยทีมทดสอบประสิทธิภาพจากบริษัท โปรเอนเนอร์ยี แอนด์ เอนจิเนียริ่ง จำกัด สำหรับเอกสารดังกล่าวสามารถตรวจสอบได้ที่ภาคผนวกท้ายเล่ม โดยค่าที่ถูกตรวจวัดนั้นมีค่าดังตารางที่ (3.1) และ (3.2) โดยค่าดังกล่าวถูกใช้เป็นค่าเริ่มต้นของการคำนวณในสเปรทชีทเพื่อตรวจสอบสมรรถนะของสเปรทชีททั้งในส่วนของการออกแบบพื้นที่การถ่ายเทความร้อน และตรวจสอบการถ่ายเทความร้อนในแต่ละส่วน ของหม้อน้ำชนิดท่อไฟ

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลของน้ำในหม้อน้ำ และอัตราการใช้เชื้อเพลิง

ข้อมูล	ค่าตรวจวัด/บันทึก	หน่วย
อัตราน้ำป้อนเฉลี่ย	0.392	m^3/hr
อุณหภูมิน้ำป้อนเฉลี่ย	76.367	°C
ความดันไอน้ำเฉลี่ย (P_{abs})	5.113	bar
อัตราน้ำที่โบลว์ดาวน์	14.460*	kg/hr
อัตราเชื้อเพลิงที่ใช้เฉลี่ย	61.135	kg/hr
ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง (Wood Pellet)	17.795	MJ/kg

*เป็นการประเมินค่าจากเส้นผ่านศูนย์กลางท่อโบลว์ดาวน์

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลของไอเสียที่ออกจากหม้อน้ำ

ข้อมูล	ค่าตรวจวัด/บันทึก	หน่วย
% ออกซิเจนในไอเสียเฉลี่ย	10.827	%
% คาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ย	9.640	%
คาร์บอนมอนนอกไซด์เฉลี่ย	267.205	ppm
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์เฉลี่ย	-	ppm
ออกไซด์ของไนโตรเจนเฉลี่ย	-	ppm

อุณหภูมิไอเสียเฉลี่ย	161.733	°C
อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเฉลี่ย	41.163	°C
ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง	4,251	kcal/kg
ค่าความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซเสียที่อุณหภูมิ 161.733 °C	0.3281	kcal/ Nm_3 °C

สำหรับค่าดังกล่าวถูกใช้สำหรับสเปรทชีทคำนวณดังตารางที่ (3.3) ในตารางดังกล่าว แสดงถึงความสัมพันธ์ของตัวแปรต้นกับสเปรทชีทว่าค่าดังกล่าวที่ตรวจวัดจะถูกนำไปใช้ในสเปรทชีทใด การสำรวจข้อมูลทั้ง 2 ขั้นตอนนั้นอาจไม่เพียงพอสำหรับใช้ออกแบบ และสร้างหม้อน้ำเพราะการออกแบบหม้อน้ำทั้งลูกนั้น ต้องคำนึงถึงความแข็งแรงและความปลอดภัย แต่ข้อมูลดังกล่าวสามารถใช้กับสเปรทชีทออกแบบพื้นที่การถ่ายเทความร้อน และสเปรทชีทตรวจสอบสมรรถนะหม้อน้ำได้ เพราะข้อมูลนั้นครบถ้วนสำหรับส่วนของการพัฒนาสเปรทชีทนี้

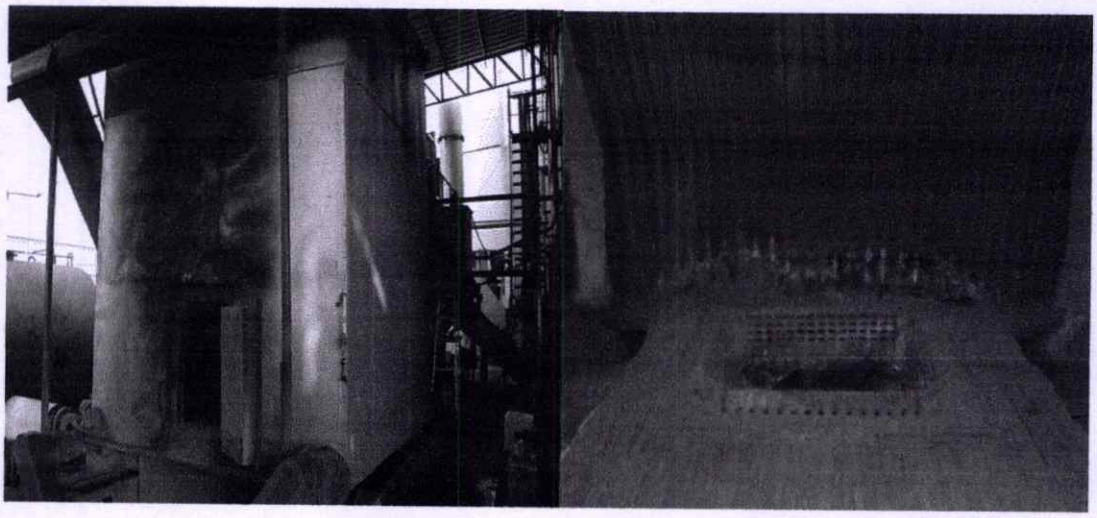
ตารางที่ 3.3 ตารางแสดงความสัมพันธ์ของข้อมูลที่ตรวจวัดกับสเปรทชีท

ข้อมูล	สเปรทชีท
อัตราน้ำป้อนเฉลี่ย (m^3/hr)	คำนวณประสิทธิภาพหม้อน้ำ
อุณหภูมิน้ำป้อนเฉลี่ย (°C)	คำนวณเอนธาลปี และประสิทธิภาพหม้อน้ำ
ความดันไอน้ำเฉลี่ย (bar)	คำนวณเอนธาลปี และประสิทธิภาพหม้อน้ำ
อัตราน้ำที่โบลว์ดาวน์ (kg/hr)	คำนวณเอนธาลปี และประสิทธิภาพหม้อน้ำ
อัตราเชื้อเพลิงที่ใช้เฉลี่ย (kg/hr)	คำนวณประสิทธิภาพหม้อน้ำ
ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง (kJ/kg)	คำนวณประสิทธิภาพหม้อน้ำ
% ออกซิเจนในไอเสียเฉลี่ย (%)	คำนวณการเผาไหม้
% คาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ย (%)	คำนวณการเผาไหม้
คาร์บอนมอนนอกไซด์เฉลี่ย (ppm)	-
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์เฉลี่ย (ppm)	-
ออกไซด์ของไนโตรเจนเฉลี่ย (ppm)	-
อุณหภูมิไอเสียเฉลี่ย (°C)	คำนวณปริมาณการถ่ายเทความร้อน ,คำนวณพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน
อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเฉลี่ย (°C)	คำนวณอุณหภูมิเปลวไฟอะเดียแบติก
ค่าความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซเสียที่อุณหภูมิ 161.733 °C (kcal/ Nm_3 °C)	คำนวณปริมาณการถ่ายเทความร้อน

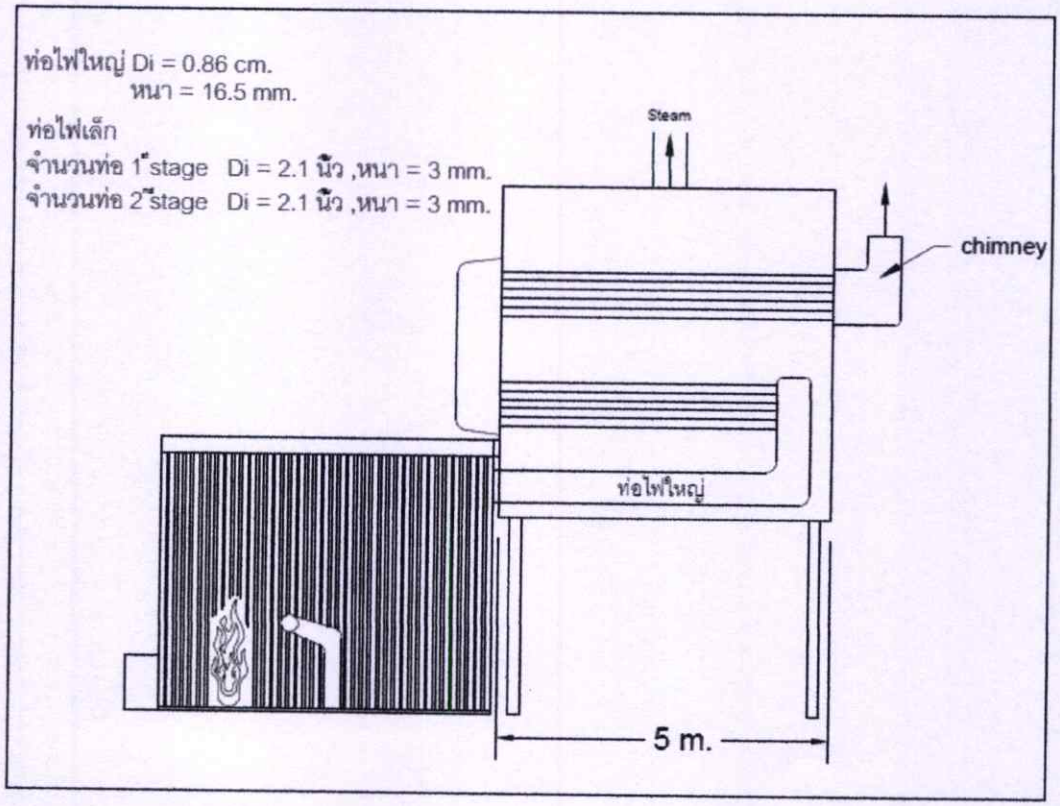
3.2.3 การสำรวจหม้อน้ำชนิดลูกผสม

ความแตกต่างระหว่างหม้อน้ำชนิดท่อน้ำกับท่อไฟ จะเห็นได้ชัดจากหัวข้อที่ผ่านมา แต่สำหรับหม้อน้ำลูกผสมแล้ว จะมีความคล้ายคลึงกับหม้อน้ำทั้งสองแบบ โดยห้องเผาไหม้จะมีลักษณะเป็นกำแพงที่มีท่อน้ำล้อมรอบ และมีช่องให้ไอเสียผ่านดังรูปที่ (3.8) โดยช่องดังกล่าวจะผ่านไปยังท่อ

ไฟใหญ่ และท่อไฟเล็ก ดังนั้นหม้อน้ำชนิดลูกผสมมีความคล้ายคลึงกับหม้อน้ำชนิดท่อไฟ เพียงแต่เพิ่มขนาดของห้องเผาไหม้ขึ้นสำหรับเพิ่มพื้นที่การถ่ายเทความร้อน โดยแบบจำลองข้อหม้อน้ำดังกล่าวสามารถดูตัวอย่างได้ดังรูปที่ (3.9)

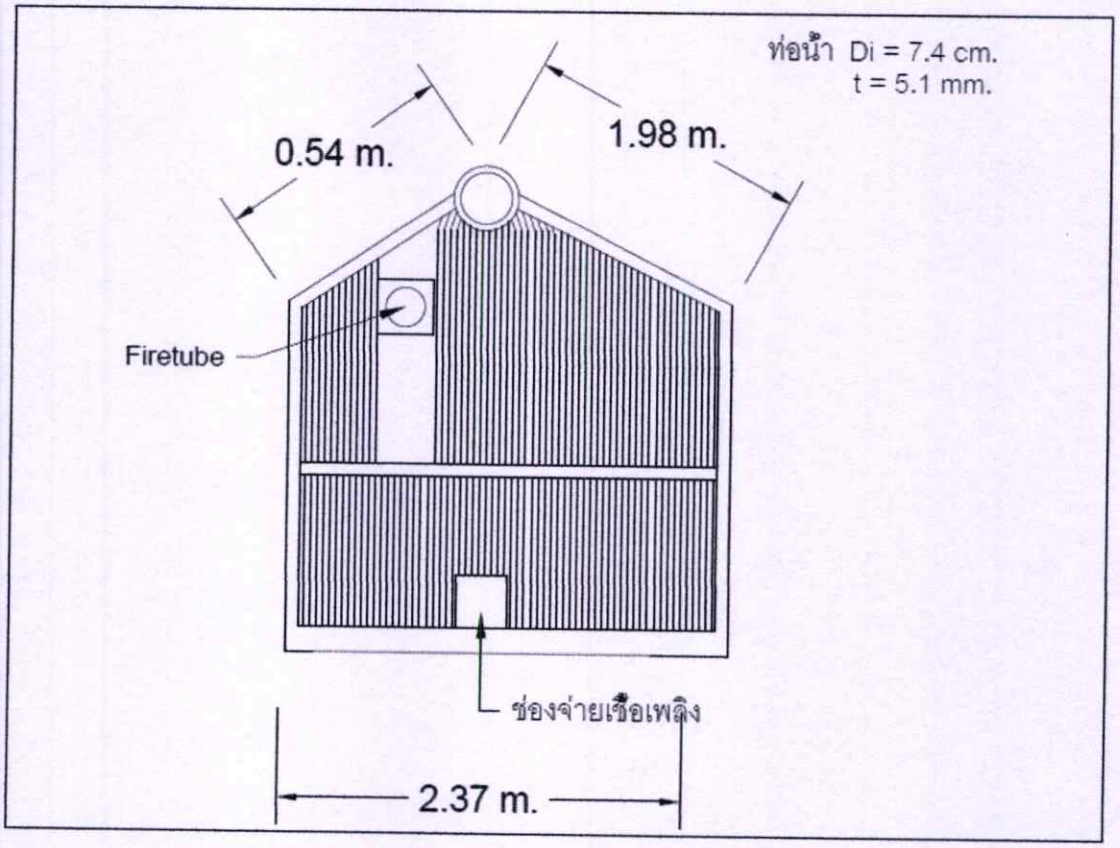


รูปที่ 3.8 ห้องเผาไหม้ของหม้อน้ำชนิดลูกผสม



รูปที่ 3.9 เขียนแบบโครงสร้างหม้อน้ำชนิดลูกผสมด้วยสเปรทชีทสำหรับใช้ในการออกแบบ

การสำรวจหม้อน้ำชนิดดังกล่าวจะแตกต่างจากตอนสำรวจหม้อน้ำชนิดท่อไฟตรงที่ ครั้งนี้มีการตรวจภายในถังเก็บน้ำด้วย ทำให้การวัดความหนามีความแม่นยำกว่าเนื่องจากวัดโดยตรงจากท่อไฟเล็กในถังเก็บน้ำ วัดโดยตรงในท่อไฟใหญ่ รวมถึงท่อน้ำในห้องเผาไหม้ด้วย ต่างกับการสำรวจหม้อน้ำชนิดท่อไฟซึ่งทราบความหนาจากแคตตาล็อก โดยในหม้อน้ำเมื่อถูกใช้งานเป็นระยะเวลาหนึ่งความหนาของท่อที่ถูกความร้อนจะบางลง จากการสำรวจพบว่าหม้อน้ำชนิดลูกผสมนี้นั้น แบ่งออกเป็น 4 ส่วน ด้วยกันคือ ห้องเผาไหม้ ท่อไฟใหญ่ และท่อไฟเล็กอีก 2 กลับ โดยในส่วนแรกห้องเผาไหม้นั้นมีมีขนาดกว้าง 2.37 เมตร ยาว 2.6 เมตร และสูง 4.04 เมตร มีลักษณะดังรูปที่ (3.10) จำนวนท่อน้ำในห้องเผาไหม้ทั้งหมด 182 ท่อ เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 7.4 เซนติเมตร ความหนา 5.2 มิลลิเมตร ความยาวเฉลี่ย 4.32 เมตร สำหรับท่อไฟใหญ่นั้นมีความยาว 5 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 86 เซนติเมตร ความหนา 16.5 มิลลิเมตร และท่อไฟเล็กมีความยาว 5 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 5.4 เซนติเมตร ความหนา 2.5 มิลลิเมตร จำนวนท่อไฟเล็กกลับแรก 57 ท่อ กลับที่สอง 48 ท่อ



รูปที่ 3.10 เขียนแบบห้องเผาไหม้ของหม้อน้ำชนิดลูกผสมด้วยสเปรทชีทสำหรับใช้ในการออกแบบ

การตรวจสอบขั้นตอนที่สองคือนำผลการตรวจวัดอุณหภูมิไอเสีย ปริมาณน้ำป้อน อัตราการโบลว์ดาวน์ ความดันใช้งาน อุณหภูมิน้ำป้อนเฉลี่ย อัตราการป้อนเชื้อเพลิง อุณหภูมิห้องเผาไหม้ และชนิดเชื้อเพลิง

ตารางที่ 3.4 ข้อมูลของน้ำในหม้อน้ำ และอัตราการใช้เชื้อเพลิง

ข้อมูล	ค่าตรวจวัด/บันทึก	หน่วย
อัตราน้ำป้อนเฉลี่ย	2700	m^3/hr
อุณหภูมิน้ำป้อนเฉลี่ย	30	°C
ความดันไอน้ำเฉลี่ย (P_{abs})	7	bar
อัตราน้ำที่โบลว์ดาวน์	1*	%
อัตราเชื้อเพลิงที่ใช้เฉลี่ย	473.75	kg/hr
ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง (Subbituminous)	18.84	MJ/kg
อุณหภูมิไอเสีย	170	°C
อุณหภูมิห้องเผาไหม้	540	°C

* คิดเป็นเปอร์เซ็นของปริมาณน้ำป้อน

ข้อมูลดังกล่าวจะถูกใช้ป้อนเข้าสเปรทชีทเพื่อคำนวณสมรรถนะทางความร้อน ดังตารางที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ของข้อมูลที่ตรวจวัดกับสเปรทชีท

ตารางที่ 3.5 ตารางแสดงความสัมพันธ์ของข้อมูลที่ตรวจวัดกับสเปรทชีท

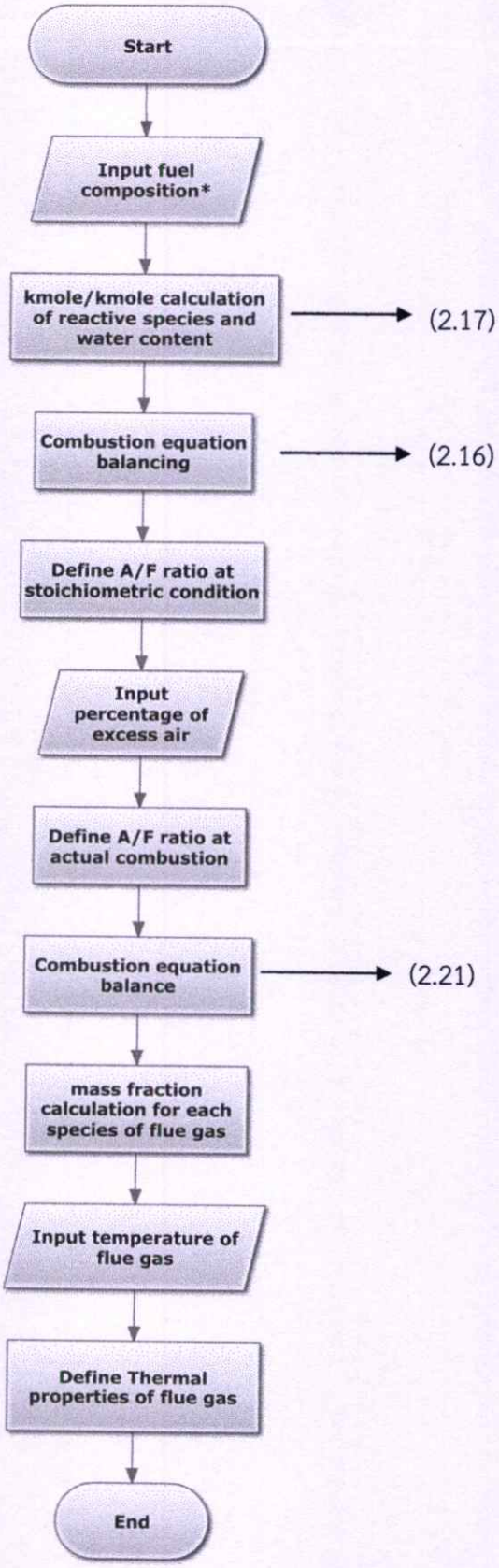
ข้อมูล	สเปรทชีท
อัตราน้ำป้อนเฉลี่ย (m^3/hr)	คำนวณประสิทธิภาพหม้อน้ำ
อุณหภูมิน้ำป้อนเฉลี่ย (°C)	คำนวณเอนธาลปี และประสิทธิภาพหม้อน้ำ
ความดันไอน้ำเฉลี่ย (bar)	คำนวณเอนธาลปี และประสิทธิภาพหม้อน้ำ
อัตราน้ำที่โบลว์ดาวน์ (kg/hr)	คำนวณเอนธาลปี และประสิทธิภาพหม้อน้ำ
อัตราเชื้อเพลิงที่ใช้เฉลี่ย (kg/hr)	คำนวณประสิทธิภาพหม้อน้ำ
ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง (kJ/kg)	คำนวณประสิทธิภาพหม้อน้ำ
อุณหภูมิไอเสียเฉลี่ย (°C)	คำนวณปริมาณการถ่ายเทความร้อน ,คำนวณพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน

3.3 การพัฒนาสเปรทชีท

ในหัวข้อ 3.3 จะแสดงผังการทำงาน (Flow chart) ของแต่ละสเปรทชีทที่ถูกแบ่งไว้ในหัวข้อ 3.1 ผังงานรวมของสเปรทชีทมีความยาวมากเนื่องจากมีหลายที่ทำงานร่วมกันเพราะฉะนั้นจึงแบ่งผังงานดังกล่าวออกมาเพื่อความสะดวกในการทำความเข้าใจ และเชื่อมโยงในแต่ละสเปรทชีท โดยในผังงานจะมีลูกศรชี้บอกถึงสมการที่เกี่ยวข้องกำกับไว้ ซึ่งเชื่อมโยงกับสมการจากบทที่ 2

3.3.1 สเปรทชีทคำนวณการเผาไหม้

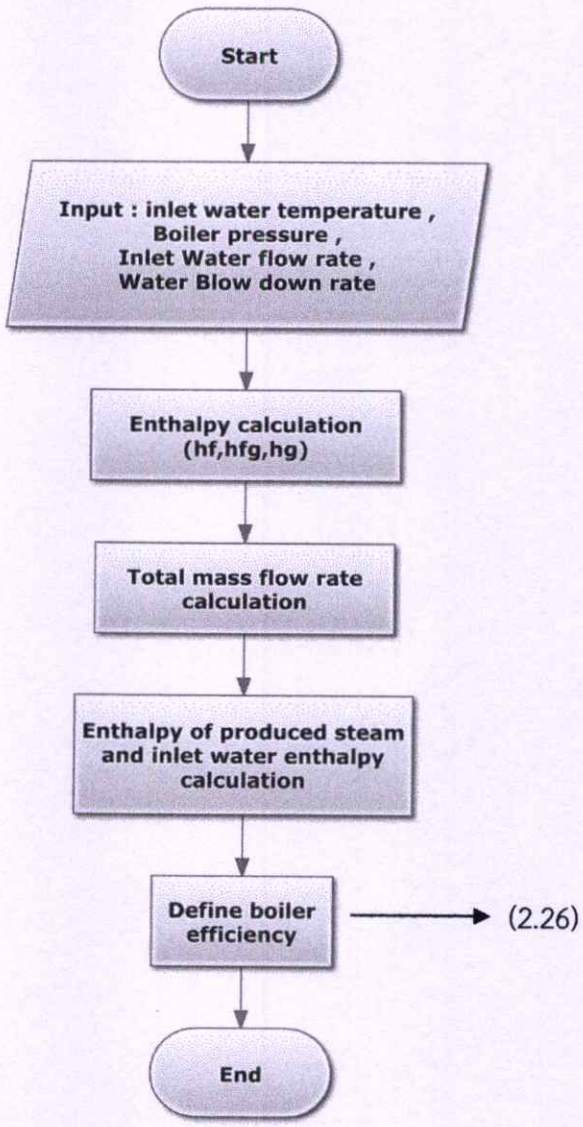
สเปรทชีทที่เกี่ยวข้องกับการเผาไหม้มีทั้งหมด 3 รูปแบบด้วยกันคือ สเปรทชีทคำนวณอัตราส่วนอากาศเชื้อเพลิงทางทฤษฎีกับสเปรทชีทคำนวณค่าสัดส่วนมวลของก๊าซไอเสียแต่ละโมเลกุลจากวิธีวิเคราะห์แยกธาตุแบบ dry basis เพื่อนำไปใช้หาคุณสมบัติต่างๆของก๊าซไอเสีย ทั้ง 2 สเปรทชีทใช้ค่าป้อนเข้าสเปรทชีทเดียวกันคือ องค์ประกอบของเชื้อเพลิง แต่กระบวนการคำนวณต่างกัน สำหรับสเปรทชีทคำนวณอัตราส่วนอากาศเชื้อเพลิงทางทฤษฎีนั้นหลังจากดุลสมการการเผาไหม้แล้วสเปรทชีทจะใช้ค่าจากการดุลสมการ คำนวณหาอัตราส่วนอากาศเชื้อเพลิง แต่สเปรทชีทคำนวณค่าสัดส่วนมวลนั้นจะนำสัมประสิทธิ์ของผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้ไปคำนวณเพื่อหาสัดส่วนมวลต่อ โดยค่าสัดส่วนมวลจะถูกใช้คำนวณหาคุณสมบัติทางความร้อนของไอเสียที่อุณหภูมิต่างๆจากตารางคุณสมบัติของก๊าซ CO_2 , H_2O , S , O_2 , N_2 [25]



รูปที่ 3.11 สเปรทชีทคำนวณคุณสมบัติของก๊าซไอเสีย

3.3.2 สเปรทชีทคำนวณปริมาณความร้อน และประสิทธิภาพของหม้อน้ำ

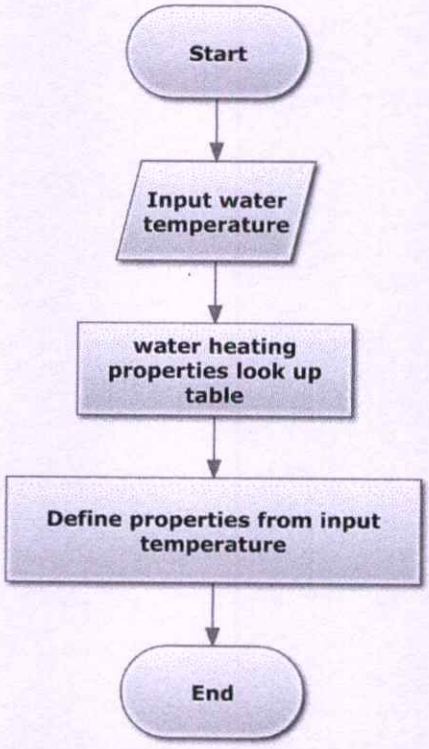
สเปรทชีทในหัวข้อนี้คำนวณคุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของน้ำที่สถานะของเหลวอิ่มตัว ไอน้ำอิ่มตัว คำนวณประสิทธิภาพหม้อน้ำ และอุณหภูมิของน้ำที่สถานะไอน้ำอิ่มตัว โดยค่าที่ป้อนเข้าสเปรทชีทคือ อุณหภูมิน้ำป้อน ความดันของหม้อน้ำ อัตราการไหลของน้ำป้อน และอัตราการโบลว์ดาวน์ โดยค่าดังกล่าวได้จากการสำรวจหม้อน้ำ โดยสเปรทชีทคำนวณคุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของน้ำมีผังการทำงานดังรูปที่ 3.12 โดยค่าเอนธาลปีมาจากตารางอุณหพลศาสตร์ของน้ำ A-4 และ A-5 [26]



รูปที่ 3.12 สเปรทชีทคำนวณประสิทธิภาพหม้อน้ำ

3.3.3 สเปรทชีทคำนวณคุณสมบัติทางความร้อนของน้ำ

สเปรทชีทคำนวณคุณสมบัติทางความร้อนของน้ำไม่มีความซับซ้อน หากเทียบกับสเปรทชีทอื่นๆ เนื่องจากค่าที่ป้อนในสเปรทชีทมีเพียง อุณหภูมิของน้ำเท่านั้น โดยตารางดังกล่าวจะแสดงคุณสมบัติของน้ำทั้งของเหลว และไอน้ำ โดยการทำงานของสเปรทชีทดังกล่าวเป็นไปตาม รูปที่ (3.13) คุณสมบัติดังกล่าวจะถูกใช้ในสเปรทชีทคำนวณพื้นที่การถ่ายเทความร้อนทุกขั้นตอนในหม้อน้ำ เพราะฉะนั้นมีความสำคัญมาก หากผิดพลาดจะส่งผลต่อค่าที่ใช้ตรวจสอบหรือออกแบบโดยตรง

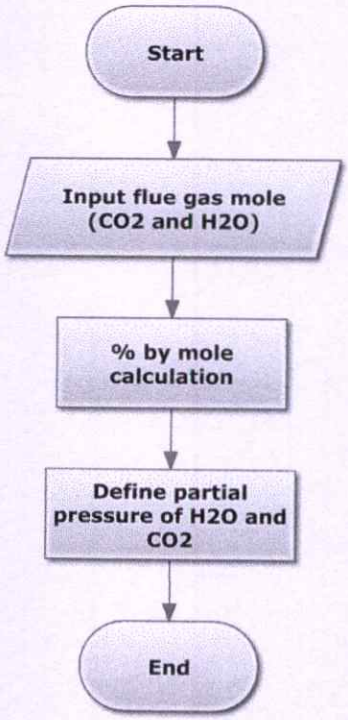


รูปที่ 3.13 สเปรทชีทคำนวณคุณสมบัติทางความร้อนของน้ำ

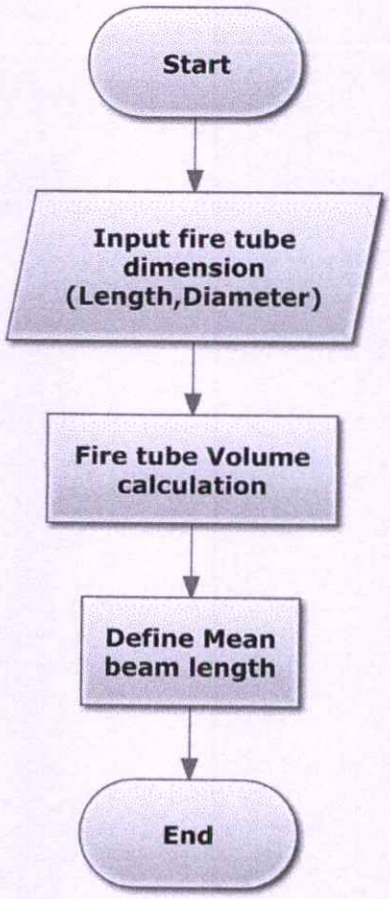
3.3.4 สเปรทชีทคำนวณสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน

สเปรทชีทนี้ใช้คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของก๊าซไอเสียโดยใช้ค่าป้อนเข้าสเปรทชีทเป็นโมลของ CO_2 และ H_2O ในไอเสีย สำหรับคำนวณค่า partial pressure และขนาดของท่อไฟใหญ่เพื่อนำไปคำนวณหาค่า mean beam length โดยตามปกติการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของก๊าซ จำเป็นต้องใช้กราฟ Correction factor ของน้ำ และคาร์บอนไดออกไซด์ และกราฟค่าแก้สัมประสิทธิ์การแผ่รังสี เพื่อช่วยหาค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของก๊าซ โดยสเปรทชีทนี้ได้ใช้วิธีการถดถอยหลายเชิงแบบกำลังสองน้อยที่สุดโดยใช้พหุนาม (Least Squares Regression by Polynomials) สำหรับสร้างเส้นแนวโน้มจากกราฟความแตกต่างสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน (Delta epsilon) และกราฟแก้ (Correction factor) ของน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อปรับใช้ในรูปแบบของสูตรคำนวณ เพื่อความสะดวก และความต่อเนื่องของสเปรทชีท สำหรับผังงานของสเปรทชีทดังกล่าวสามารถดูได้ดัง รูปที่ (3.14) รูปที่ (3.15) และรูปที่ (3.16) โดยแบ่งไว้เพื่อ

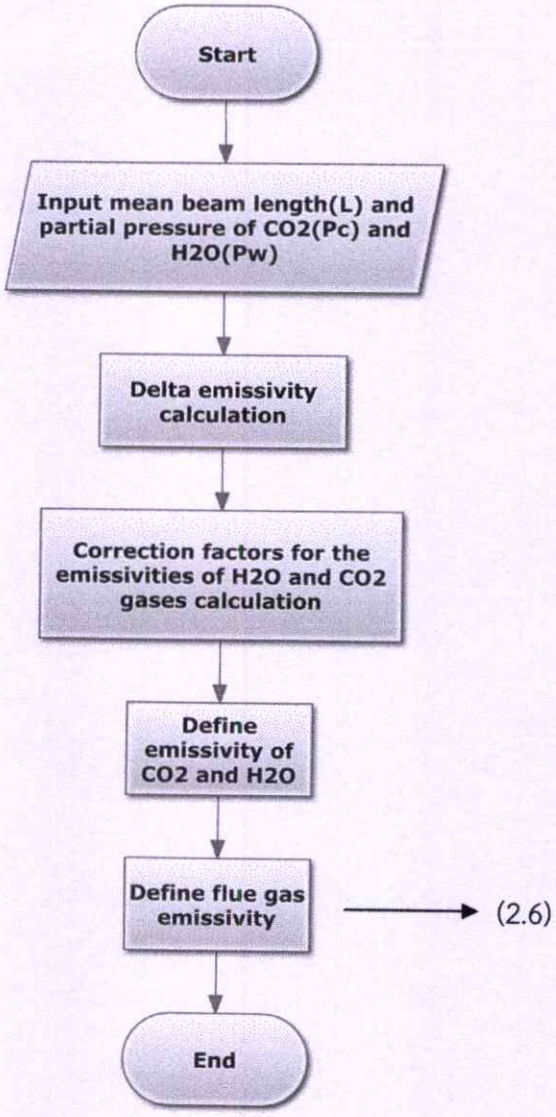
ความสะดวกในการตรวจสอบกระบวนการทำงาน สำหรับกราฟของ Hottel ที่ถูกนำมาใช้แปลงเป็นสมการพหุนามสำหรับคำนวณ



รูปที่ 3.14 กระบวนการคำนวณค่า Partial pressure



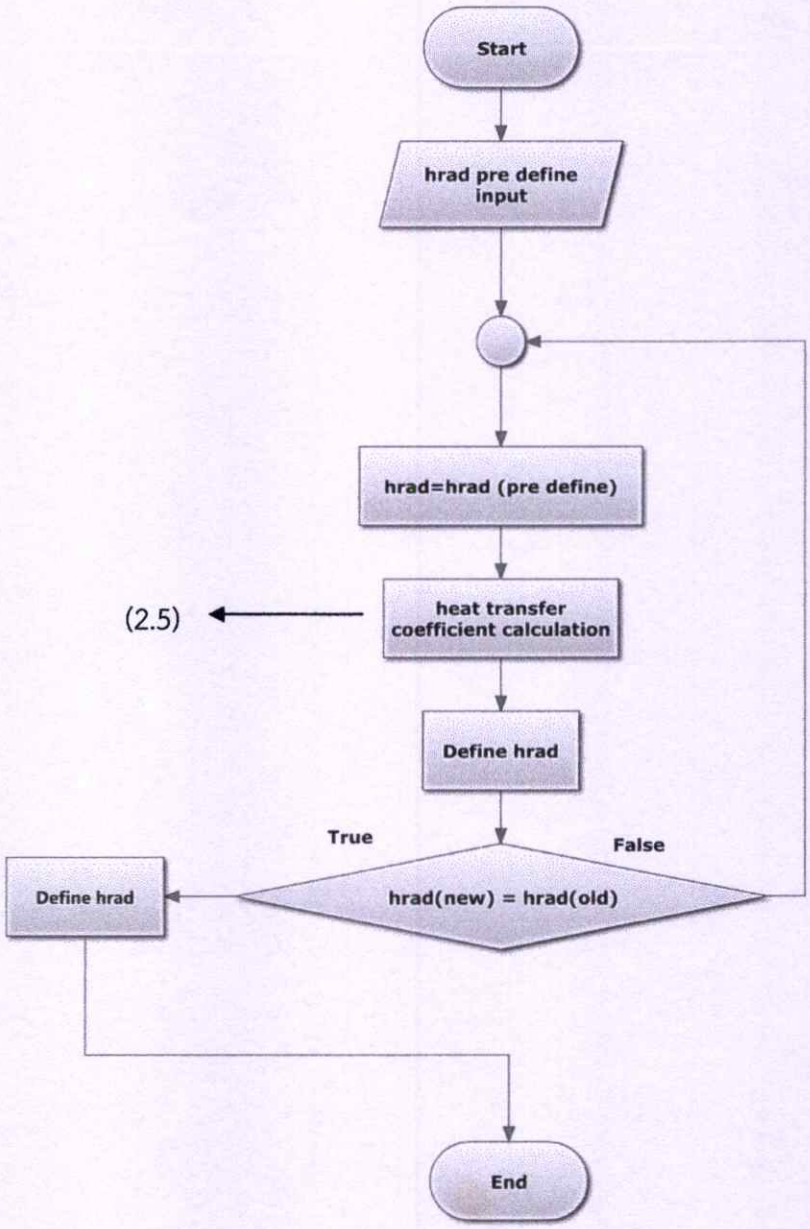
รูปที่ 3.15 กระบวนการคำนวณค่า mean beam length



รูปที่ 3.16 สเปรทชีทคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของก๊าซไอเสีย

3.3.5 สเปรทชีทคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสีในท่อไฟใหญ่

เหตุผลที่แยกสเปรทชีทดังกล่าวออกมาแสดงเพราะว่า ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสีในท่อไฟใหญ่นั้นมีการคำนวณแบบวนซ้ำ จึงแสดงผังงานแยกจากสเปรทชีทคำนวณพื้นที่การถ่ายเทความร้อน ซึ่งจะแสดงในหัวข้อถัดไป โดยค่าที่ใช้เป็นค่าป้อนเข้าคือค่า h_{rad} โดยเป็นค่าที่สุ่มขึ้นมาก่อน และใช้ค่าอุณหภูมิเปลวไฟอะเดียแบติกคำนวณ โดยผลลัพธ์จากการคำนวณนั้นคือ h_{rad} จะถูกนำมาใช้แทนค่าที่ป้อนเข้าจากนั้นทำการคำนวณซ้ำจนกระทั่ง ผลลัพธ์ลู่เข้าคำตอบ โดยสามารถดูการทำงานของสเปรทชีทได้จากรูปที่ (3.17)



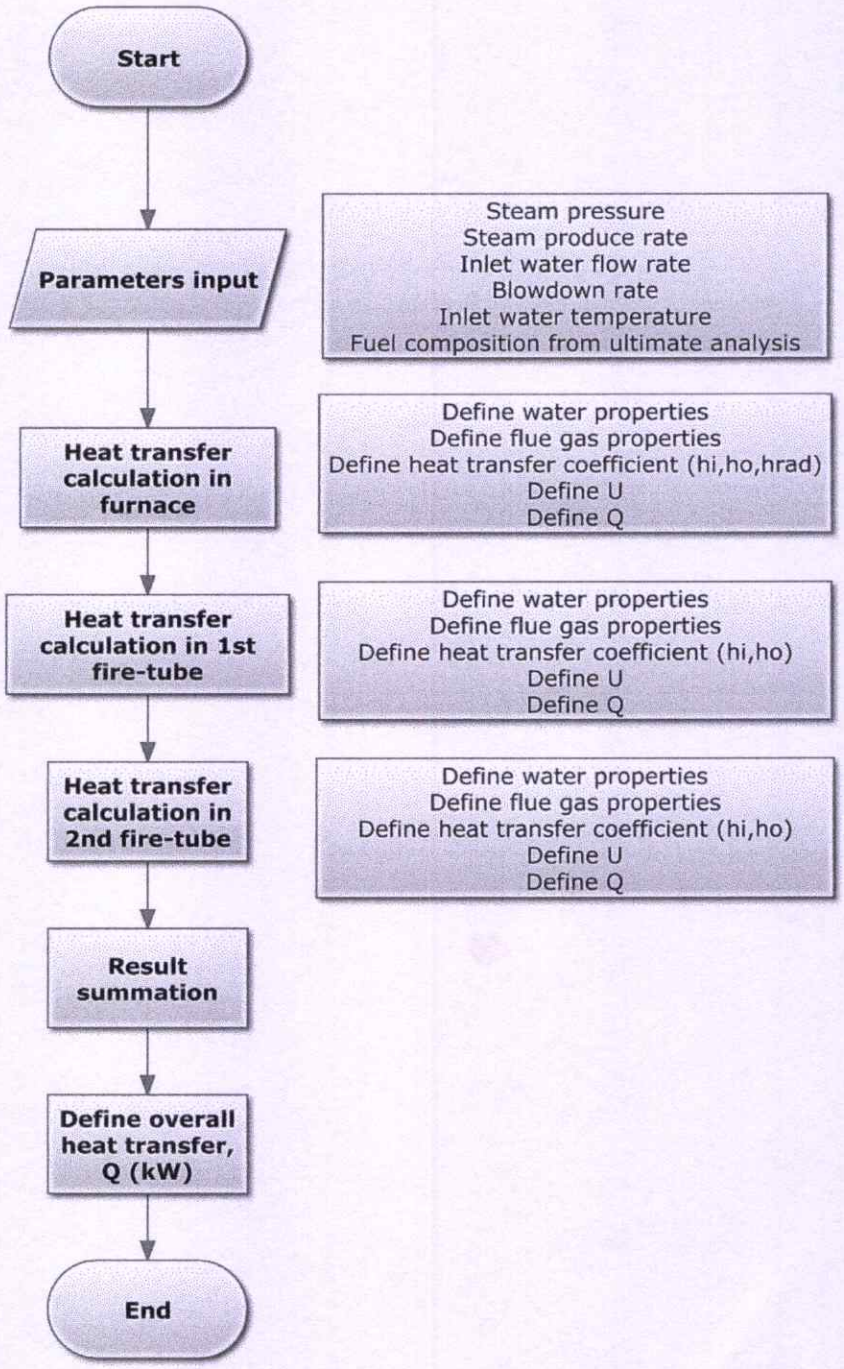
รูปที่ 3.17 สเปรทชีทคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของการแผ่รังสีความร้อนในท่อไฟใหญ่

การคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนค่าหรือค่า h_{rad} จะหยุดคำนวณต่อเมื่อค่าความแตกต่างของ h_{rad} ใหม่กับ h_{rad} เดิมมีค่าใกล้เคียงกันโดยกำหนดค่าความแตกต่างสูงสุดที่รับได้ในการคำนวณแบบวนซ้ำอยู่ที่ 0.0001

3.4 การพัฒนาสเปรทชีทคำนวณพื้นที่การถ่ายเทความร้อน

3.4.1 การพัฒนาสเปรทชีทสำหรับตรวจสอบสมรรถนะหม้อน้ำชนิดท่อไฟ

ในหัวข้อนี้จะอธิบายในส่วนของสเปรทชีทหลักซึ่งโดยสเปรทชีทสำหรับทดสอบสมรรถนะนั้นจะมีภาพรวมของสเปรทชีทโดยแบ่งสัดส่วนการคำนวณตามรูปที่ (3.18) ดังนี้



รูปที่ 3.18 ภาพรวมของสเปรทชีทคำนวณสมรรถนะทางความร้อนหม้อน้ำชนิดท่อไฟ

จากรูปที่ (3.18) จะเห็นได้ว่าการทำงานของสเปรทชีทนั้นแบ่งตามการเดินทางของก๊าซไอเสียในแต่ละช่วงได้แก่ ช่วงท่อไฟใหญ่ ท่อไฟเล็กกลับแรก และท่อไฟเล็กกลับที่สอง การคำนวณในแต่ละส่วนค่าคุณสมบัติทางความร้อนต่างๆจะถูกคำนวณโดยสเปรทชีทย่อยในหัวข้อที่ 3.3 สำหรับค่าตัวแปรต้นสำหรับสเปรทชีทคำนวณสมรรถนะของหม้อน้ำชนิดท่อไฟนั้น มีตัวแปรดังต่อไปนี้ตามตารางที่ (3.6) และ (3.7)

ตารางที่ 3.6 ตัวอย่างพารามิเตอร์ของน้ำที่ถูกใช้เป็นตัวแปรต้นสำหรับสเปรทชีทตรวจสอบสมรรถนะทางความร้อน

Liquid data	
Boiler efficiency, targeted value, %	81.594
inlet liq temp (celcius deg)	76.37*
Pressure (kPa)	511.3*
Inlet Water flow rate (m3/hr)	0.392*
Water Blow down rate (kg/hr)	14.46*
Specific volume of water at inlet liq temp (m3/kg)	0.0010268
Inlet Water flow rate (kg/hr)	381.76
Inlet Water enthalpy (kJ/hr)	122075.23
Enthalpy of produced steam (kJ/hr)	1009737.07
h (kJ/kg)	319.77
T outlet (celcius deg)	152.65
hf (kJ/kg)	643.63
hfg (kJ/kg)	2105.42
hg (kJ/kg)	2749.07
total mass steam flow rate (kg/hr)	367.30

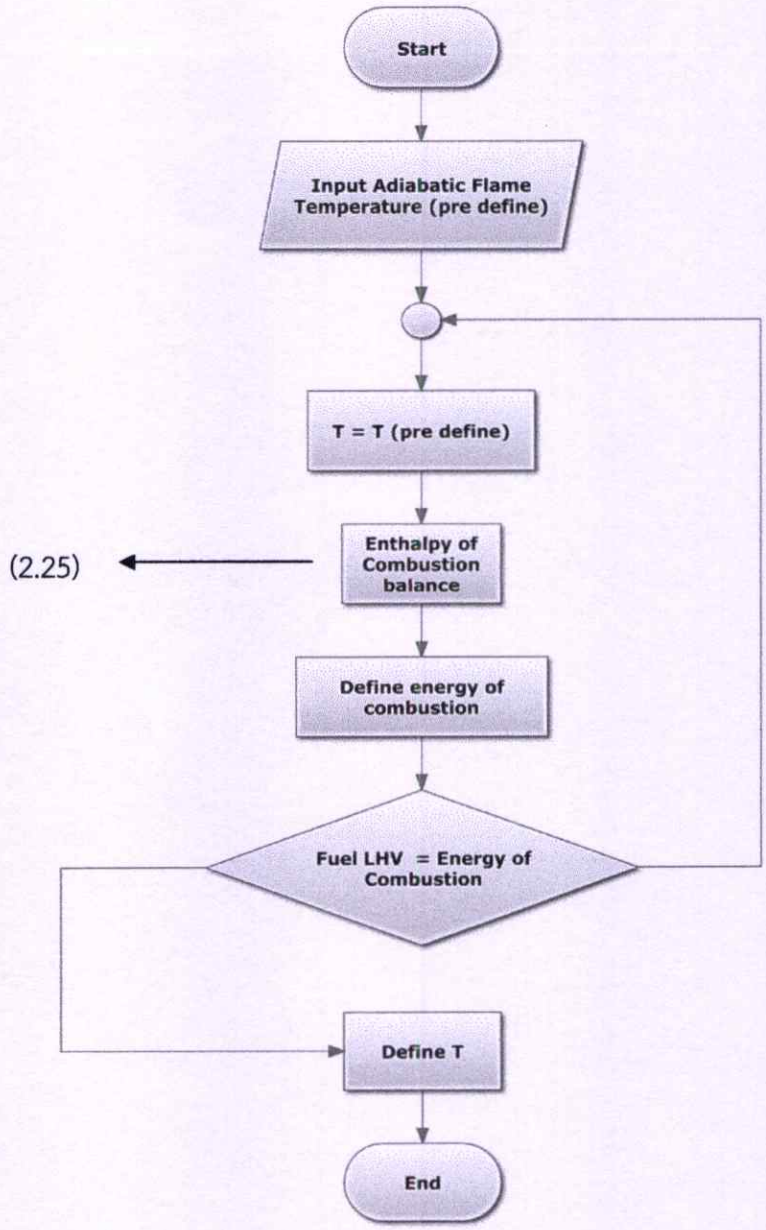
*ค่าจากการสำรวจหม้อน้ำเป็นค่าป้อนเข้าสเปรทชีท

ตารางที่ 3.7 ตัวอย่างพารามิเตอร์ของก๊าซร้อนที่ถูกใช้เป็นตัวแปรต้นสำหรับสเปรทชีทตรวจสอบสมรรถนะทางความร้อน

Hot gas data		
Fuel stoi. A/F ratio		5.806
Excess air,%		120.06
Fuel LHV, kj/kg		17795*
Fuel feed (kg/hr)		61.135*
Total heat fuel->steam (kJ/hr)		1087897.325
Avg. Flue gas Cp (kJ/kg K)		1.187
Thermal throughput, kw		303.77
Fuel feed rate, kg/sec (FFR)		0.017
total flue gas flow rate (kg/s)		0.233
Flue gas temp in furnace (deg. Celcius)		1124.20
flame temp at stoi (deg.Calsius)	2272.56	
Flue gas temp. in chimney (deg. Celsius)		161.73
Flue gas average temp. in Boiler (deg. Celsius)		642.97

*ค่าจากการสำรวจหม้อน้ำเป็นค่าป้อนเข้าสเปรทชีท

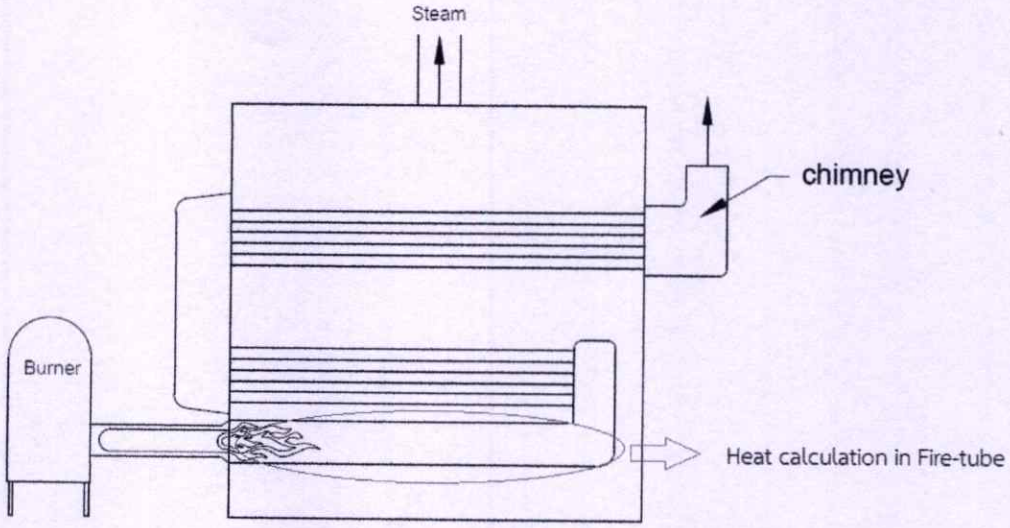
จากตารางที่ 3.7 การคำนวณอุณหภูมิไอเสียที่ทางเข้าหม้อน้ำ และอุณหภูมิเปลวไฟอะเดียแบติกนั้นคำนวณมาจากสมการสมดุลเอนธาลปีของการเผาไหม้ โดยเป็นการคำนวณแบบวนซ้ำ โดยเริ่มจากการสุ่มค่าอุณหภูมิก่อนจากนั้นคำนวณเพื่อหาอุณหภูมิไอเสียที่ทางเข้าหม้อน้ำ และอุณหภูมิเปลวไฟอะเดียแบติก โดยการคำนวณแบบวนซ้ำจะเชื่อมโยงกับสเปรทชีทสเปรทชีทคำนวณการเผาไหม้ในรูปที่ (3.11) ทำงานโดยนำโมลของไอเสียมาคำนวณ โดยการทำงานของสเปรทชีทดังกล่าวเป็นไปตามรูปที่ (3.19)



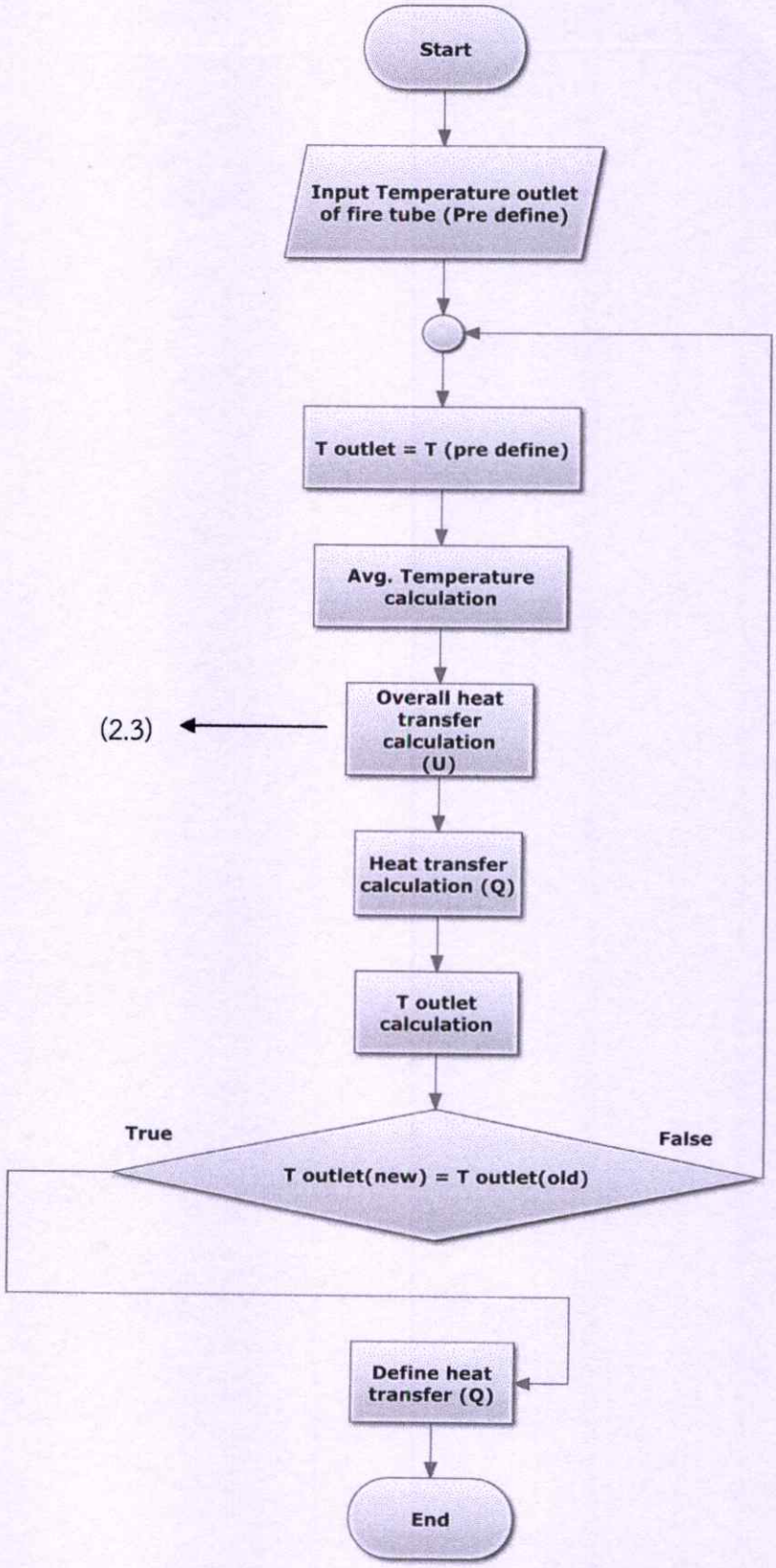
รูปที่ 3.19 สเปรทชีทคำนวณอุณหภูมิไอเสียที่ทางเข้าหม้อน้ำ และอุณหภูมิเปลวไฟอะเดียแบติก

ค่าอุณหภูมิไอเสียที่ทางเข้าหม้อน้ำ และอุณหภูมิเปลวไฟอะเดียแบติกจะหยุดคำนวณต่อเมื่อค่าความแตกต่างของ อุณหภูมิไอเสียที่ทางเข้าหม้อน้ำ และอุณหภูมิเปลวไฟอะเดียแบติก ใหม่กับ อุณหภูมิไอเสียที่ทางเข้าหม้อน้ำ และอุณหภูมิเปลวไฟอะเดียแบติกเดิมมีค่าใกล้เคียงกันโดยกำหนดค่าความแตกต่างสูงสุดที่รับได้ในการคำนวณแบบวนซ้ำอยู่ที่ 0.0001 จากการคำนวณของสเปรทชีทดังกล่าวจะทำให้ได้ค่าป้อนเข้าสำหรับสเปรทชีทคำนวณพื้นที่การถ่ายเทความร้อนในท่อไฟใหญ่ คืออุณหภูมิทางเข้าของท่อไฟ โดยในส่วนของการตรวจสอบสมรรถนะจะเป็นการคำนวณหาค่าความร้อนที่ถูกถ่ายเทในท่อไฟใหญ่ หลักการของสเปรทชีทคือการคำนวณแบบวนซ้ำเพื่อหาค่า อุณหภูมิก๊าซไอเสียที่ทางออกของท่อไฟใหญ่ และอุณหภูมิเฉลี่ยภายในท่อไฟใหญ่ ก่อนนำไปคำนวณเพื่อหาค่าการถ่ายเทความร้อน แล้วจากนั้นนำค่าความร้อน Q (kW) กลับมาหาค่าอุณหภูมิก๊าซไอเสียที่ทางออกของท่อไฟ

ใหญ่อีกครั้ง หลังจากผ่านกระบวนการนี้แบบวนซ้ำ จะทำให้อุณหภูมิ โดยการทำงานเป็นไปตามรูปที่ (3.21) ซึ่งเป็นการคำนวณความร้อนในท่อไฟใหญ่ดังรูปที่ (3.20)

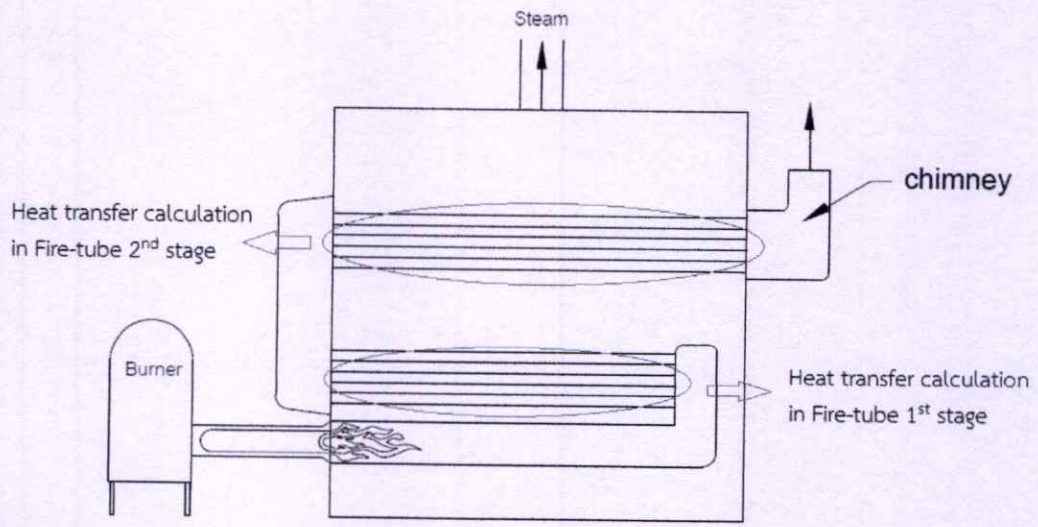


รูปที่ 3.20 แสดงบริเวณการคำนวณการถ่ายเทความร้อนในท่อไฟใหญ่ตามผังงานรูปที่ 3.21

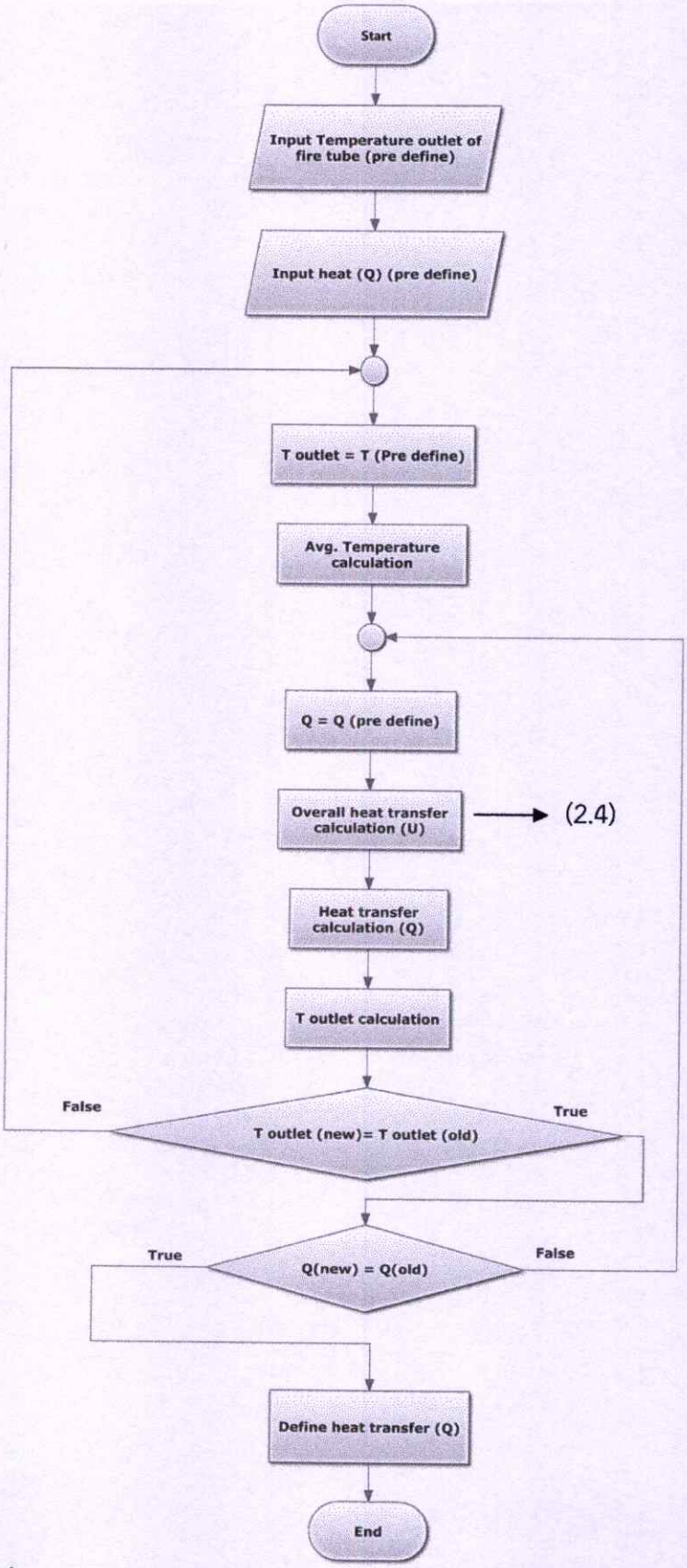


รูปที่ 3.21 สเปรทชีทคำนวณการถ่ายเทความร้อนในท่อไฟใหญ่

ค่า T_{out} จะหยุดคำนวณต่อเมื่อค่าความแตกต่างของ T_{out} ใหม่กับ T_{out} เดิมมีค่าใกล้เคียงกันโดยกำหนดค่าความแตกต่างสูงสุดที่รับได้ในการคำนวณแบบวนซ้ำอยู่ที่ 0.0001 การคำนวณค่า U หรือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมในท่อไฟใหญ่นั้น มีการคำนวณด้วยค่า สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (h) ของการนำความร้อนผ่านเนื้อท่อ การพาความร้อนของทางฝั่งน้ำ การพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนของก๊าซร้อนในท่อไฟ โดยค่า h ของการแผ่รังสีความร้อนนั้นหาได้จากการคำนวณแบบวนซ้ำจากผังงานรูปที่ (3.17) ในหัวข้อ 3.3.5 ที่ผ่านมา ในการคำนวณถัดจากท่อไฟใหญ่เป็นการคำนวณในท่อไฟเล็กกลับแรก โดยผังงานจะมีความแตกต่างจากผังงานแรก เนื่องจากค่าที่ถูกวนซ้ำเพื่อคำนวณใหม่ นอกจากจะเป็นค่าอุณหภูมิที่ทางออกของท่อไฟเล็กแล้ว ยังใช้ค่าการถ่ายเทความร้อนในท่อไฟเล็ก นำไปคำนวณซ้ำในการคำนวณค่า สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากการเดือดแบบ Pool boiling อีกด้วย ทำให้การคำนวณในกลับแรกของท่อไฟเล็กมีความซับซ้อนกว่า โดยผังงานของสเปรทชีทคำนวณการถ่ายเทความร้อนในท่อไฟเล็กกลับที่หนึ่ง เป็นไปตามผังงานรูปที่ (3.23) การคำนวณทั้งสองขั้นตอนที่ผ่านมาใช้ค่าอุณหภูมิที่ทางออกจากท่อไฟเป็นอุณหภูมิเข้าของท่อถัดมา การทำงานของสเปรทชีทจะทำงานเชื่อมโยงกัน เพราะฉะนั้นหากมีข้อผิดพลาดเกิดขึ้น จะส่งผลต่อค่าที่คำนวณทั้งหมด และสเปรทชีทสุดท้ายของการตรวจสอบสมรรถนะทางความร้อนของหม้อน้ำคือสเปรทชีทคำนวณการถ่ายเทความร้อนท่อไฟเล็กกลับที่สอง ความแตกต่างของสเปรทชีทสุดท้ายคือใช้ค่าอุณหภูมิไอเสียจากการตรวจวัดจริงเป็นอุณหภูมิที่ทางออกของท่อไฟเล็กกลับที่สอง การคำนวณในขั้นตอนสุดท้ายจึงไม่มีการคำนวณแบบวนซ้ำ เป็นการคำนวณตามกระบวนการเพื่อหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมเพื่อค่าการถ่ายเทความร้อนในท่อไฟเล็กกลับที่สอง โดยสามารถดูได้จากผังงานรูปที่ (3.24) ขั้นตอนสุดท้ายคือนำค่าการถ่ายเทความร้อนจากสเปรทชีทส่วนมารวมกันแล้วเปรียบเทียบกับค่าการถ่ายเทความร้อนจากการสำรวจหม้อน้ำเพื่อเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น แล้วจึงแก้ไข หรือตรวจสอบความผิดพลาดเพื่อลดค่าความคลาดเคลื่อนดังกล่าว สำหรับรูปประกอบแสดงพื้นที่การคำนวณการถ่ายเทความร้อนในท่อไฟเล็กกลับที่ 1 และ 2 สามารถดูได้ดังรูปที่ (3.22)

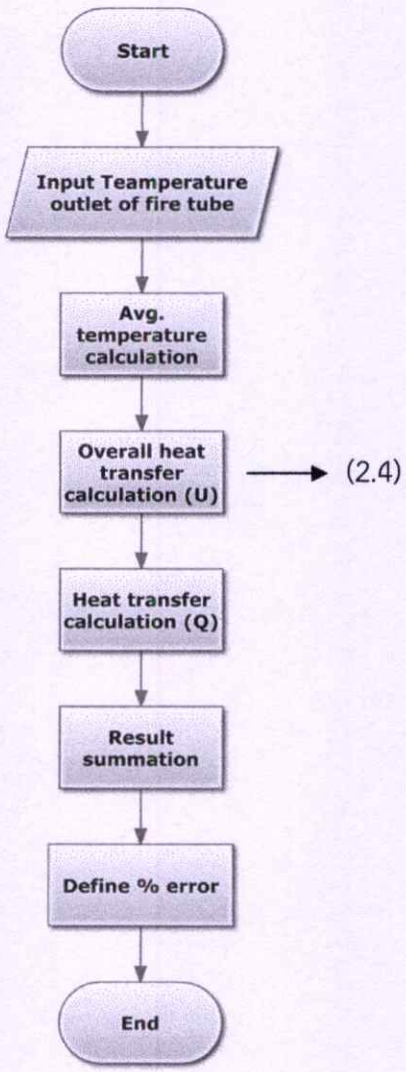


รูปที่ 3.22 แสดงบริเวณการคำนวณการถ่ายเทความร้อนในท่อไฟใหญ่ตามผังงานรูปที่ 3.23 และ 3.24



รูปที่ 3.23 สเปรทชีทคำนวณการถ่ายเทความร้อนในท่อไฟเล็กกลับที่หนึ่ง

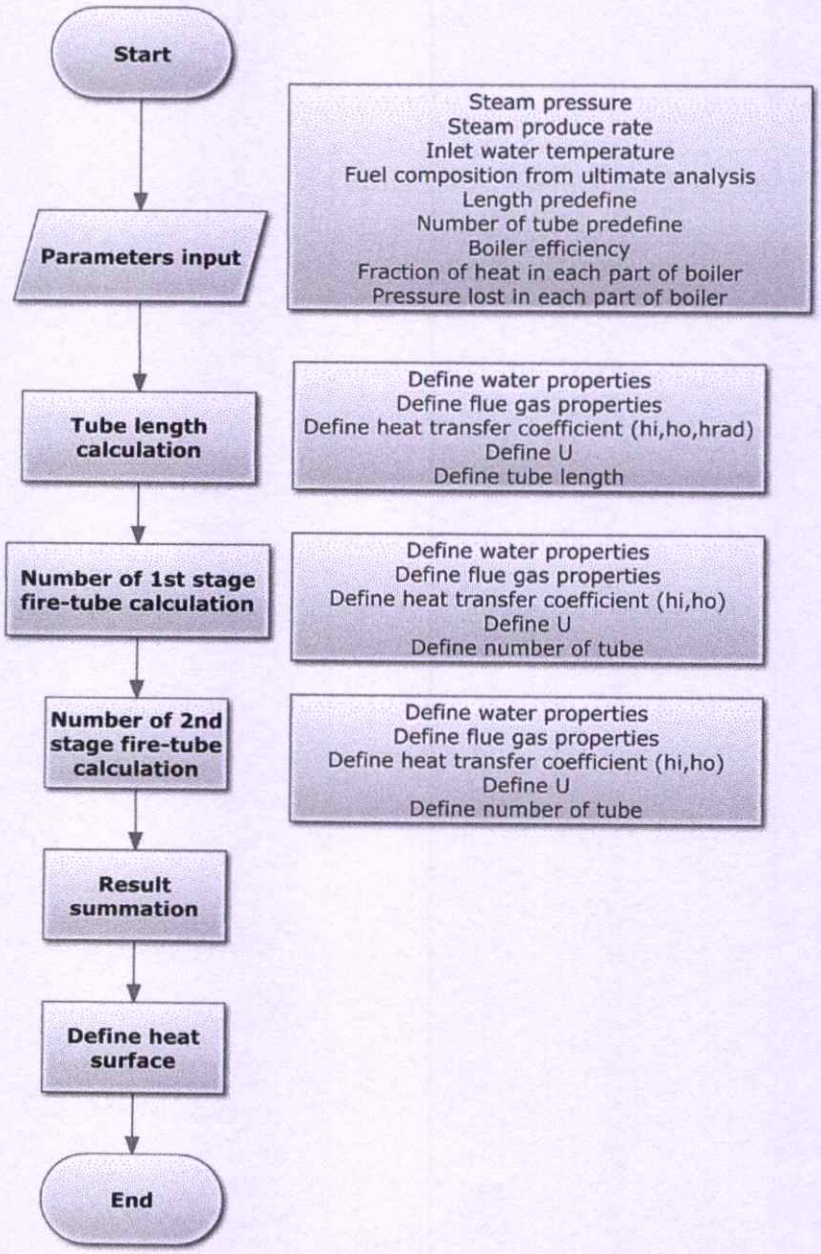
ค่า T_{out} จะหยุดคำนวณต่อเมื่อค่าความแตกต่างของ T_{out} ใหม่กับ T_{out} เดิมมีค่าใกล้เคียงกันโดยกำหนดค่าความแตกต่างสูงสุดที่รับได้ในการคำนวณแบบวนซ้ำอยู่ที่ 0.0001 และค่า Q จะหยุดคำนวณต่อเมื่อค่าความแตกต่างของ Q ใหม่กับ Q เดิม มีค่าใกล้เคียงกันโดยกำหนดค่าความแตกต่างสูงสุดที่รับได้ในการคำนวณแบบวนซ้ำอยู่ที่ 0.0001



รูปที่ 3.24 สเปรทชีทคำนวณการถ่ายเทความร้อนในท่อไฟเล็กกลับที่สอง

ในผังงานสุดท้ายค่า T_{out} คืออุณหภูมิที่ปล่องในขั้นตอนนี้จะไม่มีการคำนวณแบบวนซ้ำ และจะคำนวณหาปริมาณ Q ออกมาโดยตรงก่อนนำมารวมผลกับความร้อนในสองส่วนที่คำนวณผ่านมา เพื่อหาความคลาดเคลื่อน

3.4.2 สเปรทชีทคำนวณพื้นที่การถ่ายเทความร้อนของหม้อน้ำ



รูปที่ 3.25 ภาพรวมสเปรทชีทคำนวณพื้นที่การถ่ายเทความร้อนหม้อน้ำชนิดท่อไฟ

สเปรทชีทต่อไปนี้เป็นการพัฒนาสำหรับการออกแบบหม้อน้ำซึ่งต่างกับหัวข้อที่ 3.4.1 ซึ่งออกแบบเพื่อตรวจสอบสมรรถนะ แต่สิ่งที่เหมือนกันคือสเปรทชีททั้งสองใช้ความสัมพันธ์รวมถึงสมการเดียวกันได้การคำนวณเพียงแต่ผลลัพธ์จากสเปรทชีทแตกต่างกัน ในหัวข้อนี้ สเปรทชีทจะคำนวณความยาวท่อไฟใหญ่ และจำนวนท่อไฟเล็กที่ต้องใช้ ซึ่งทั้งสองตัวแปรจะมีผลโดยตรงกับค่าพื้นที่การถ่ายเทความร้อน จากนั้นจึงนำค่าที่คำนวณได้ไปเปรียบเทียบกับจำนวนพื้นที่การถ่ายเทความ

ร้อนจริงจากการสำรวจ จากตารางที่ (3.8) และ (3.9) แสดงถึงตัวแปรตั้งต้นสำหรับการออกแบบพื้นที่การถ่ายเทความร้อนของหม้อน้ำชนิดท่อไฟด้วยสเปรทชีท

ตารางที่ 3.8 ตัวอย่างพารามิเตอร์ของก๊าซร้อนที่ถูกใช้เป็นตัวแปรต้นสำหรับสเปรทชีทคำนวณพื้นที่การถ่ายเทความร้อน

Hot gas data	
Fuel stoi. A/F ratio	5.806
Excess air,%	120.06*
Fuel LHV, kj/kg	17795*
Avg. Flue gas Cp (kJ/kg K)	1.187
Thermal throughput, kw	301.806
Fuel feed rate, kg/sec (FFR)	0.017
total flue gas flow rate (kg/s)	0.231
Flue gas temp (deg. Celcius)	1124.20
L predifined (m)	3.00*
flame temp at stoi	2272.56

*ค่าจากการสำรวจหม้อน้ำเป็นค่าป้อนเข้าของสเปรทชีท

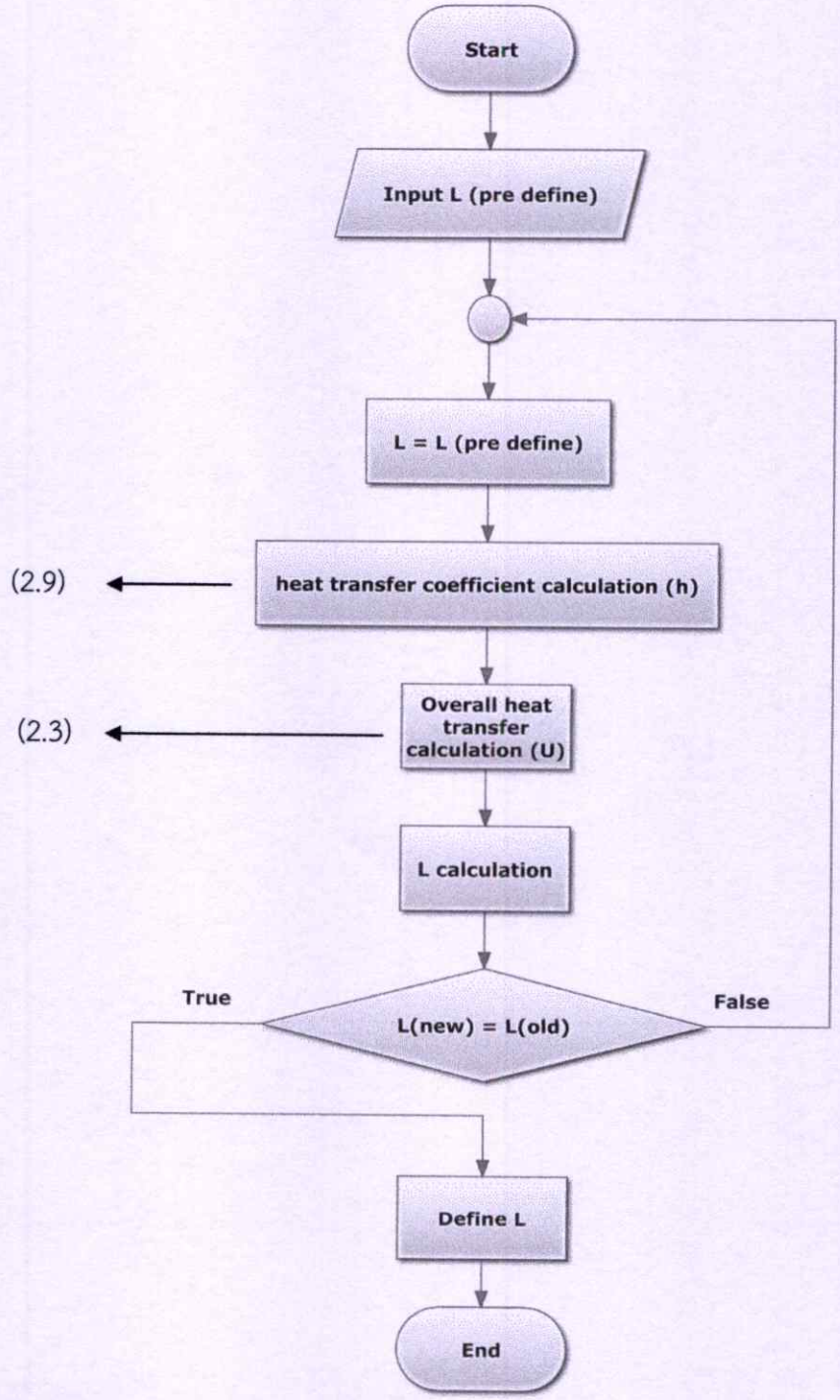
ตารางที่ 3.9 ตัวอย่างพารามิเตอร์ของน้ำที่ถูกใช้เป็นตัวแปรต้นสำหรับสเปรทชีทตรวจสอบสมรรถนะทางความร้อน

Liquid data	
Boiler efficiency, %	81.567*
inlet liq temp (celcius deg)	76.37*
P(kPa)	511.3*
h (kJ/kg)	335.02
T outlet (celcius deg)	152.65
hf (kJ/kg)	643.63
hfg (kJ/kg)	2105.42
total mass flow rate (kg/s)	0.102*

*ค่าจากการสำรวจหม้อน้ำเป็นค่าป้อนเข้าของสเปรทชีท

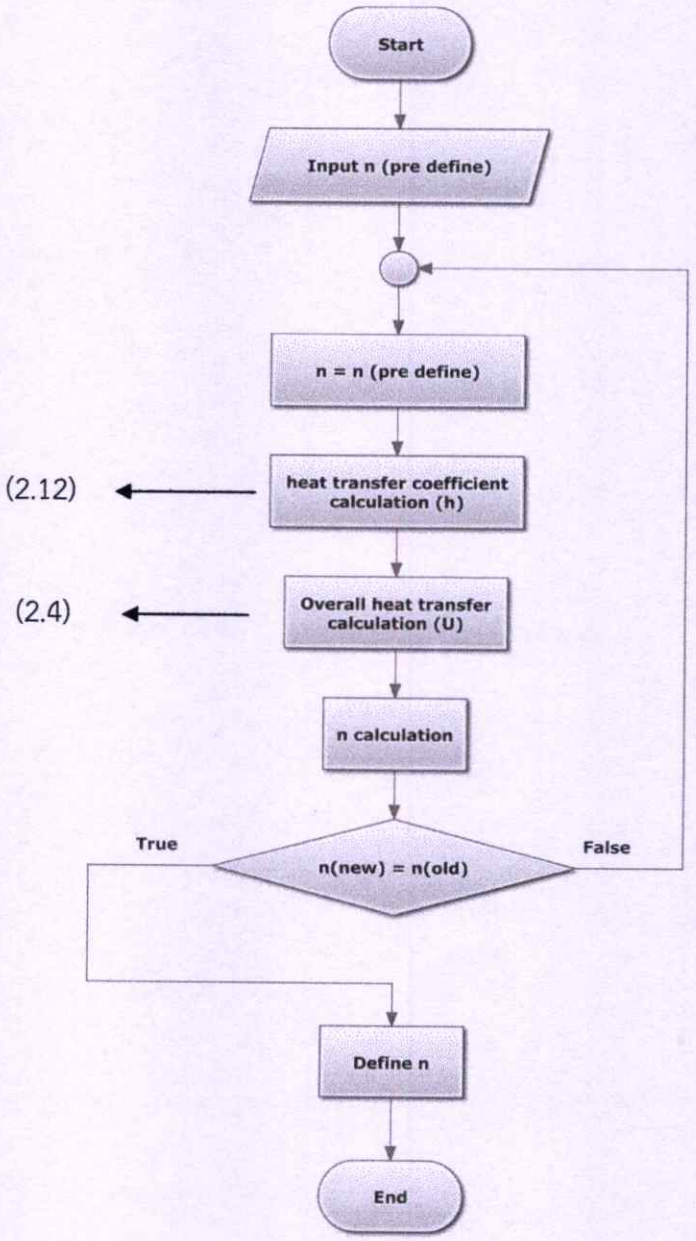
จากตารางที่ (3.6) ค่าที่ป้อนเข้าสเปรทชีทคือเปอร์เซ็นอากาศส่วนเกิน ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง และค่าความยาว L ซึ่งเป็นค่าตั้งต้นที่กำหนดมาก่อนให้สเปรทชีทคำนวณแบบวนซ้ำเพื่อคำนวณหาความ

ยาวในการออกแบบท่อไฟใหญ่ ซึ่งความยาวที่พอเหมาะนั้น ขึ้นอยู่กับการกำหนดอัตราส่วนการออกแบบสัดส่วนทางความร้อน (%) จากการคำนวณเอนธาลปีในตารางที่ (3.7) ว่าการทำความร้อนให้น้ำมีอุณหภูมิ ความดัน และอัตราการผลิตไอ ถึงค่าที่ต้องการนั้นต้องใช้ปริมาณความร้อนเท่าไร โดยการทำงานของสเปรทชีทคำนวณความยาวของท่อไฟใหญ่เป็นไปตามผังงานรูปที่ (3.26) ดังนี้



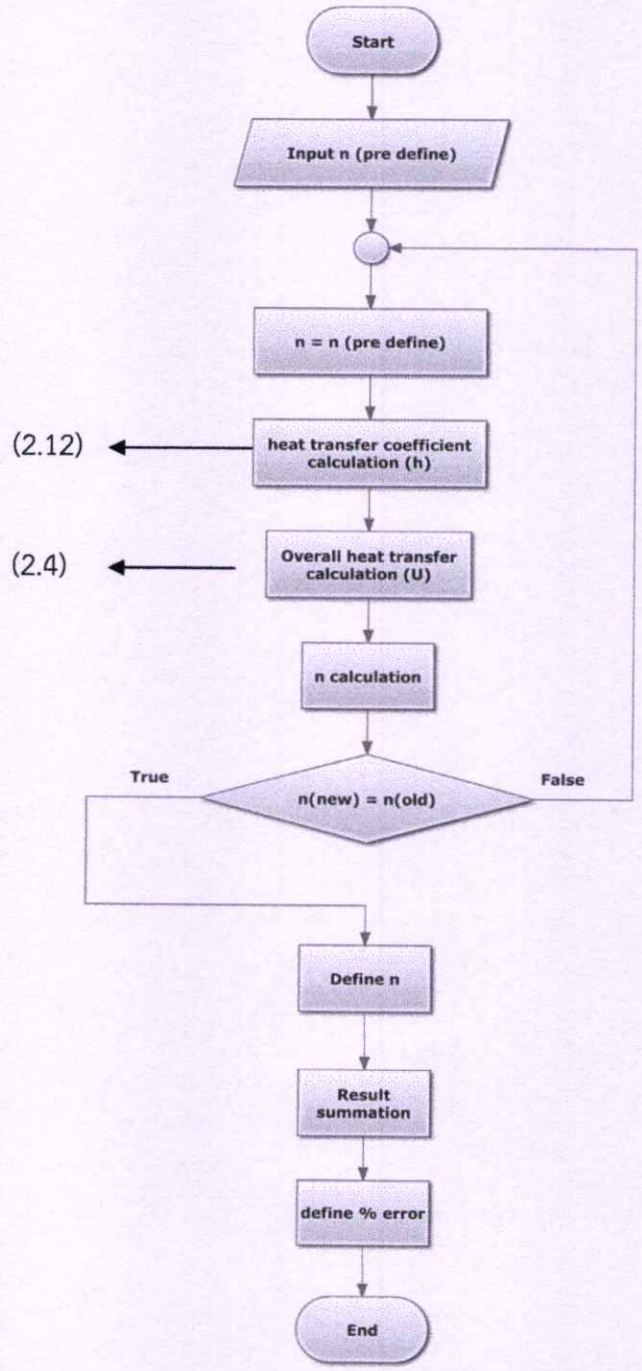
รูปที่ 3.26 สเปรทชีทคำนวณความยาวท่อไฟใหญ่ที่จำเป็นเพื่อคำนวณพื้นที่การถ่ายเทความร้อน

ค่า L จะหยุดคำนวณต่อเมื่อค่าความแตกต่างของ L ใหม่กับ L เดิมมีค่าใกล้เคียงกันโดยกำหนดค่าความแตกต่างสูงสุดที่รับได้ในการคำนวณแบบวนซ้ำอยู่ที่ 0.0001 ในขั้นตอนถัดมาเป็นการคำนวณเพื่อหาจำนวนท่อไฟเล็กที่ใช้ในการออกแบบ โดยกำหนดสัดส่วนความร้อนเช่นเดียวกันกับในสเปรทชีทแรก จากนั้นป้อนค่า จำนวนท่อ (n) ในท่อไฟเล็กกลับที่หนึ่ง เป็นค่าตั้งต้นก่อนคำนวณแบบวนซ้ำเพื่อหาผลลัพธ์ ความแตกต่างของสเปรทชีทแรกกับสเปรทชีทที่สองแต่ต่างกันที่สูตรที่ใช้เนื่องจากสมมติฐานแตกต่างกัน และต่างกันที่ผลลัพธ์ที่หา โดยสามารถดูกระบวนการทำงานของสเปรทชีทได้ในผังงานรูปที่ (3.27)



รูปที่ 3.27 สเปรทชีทคำนวณจำนวนท่อที่ใช้ในสเปรทชีทการคำนวณพื้นที่การถ่ายเทความร้อน

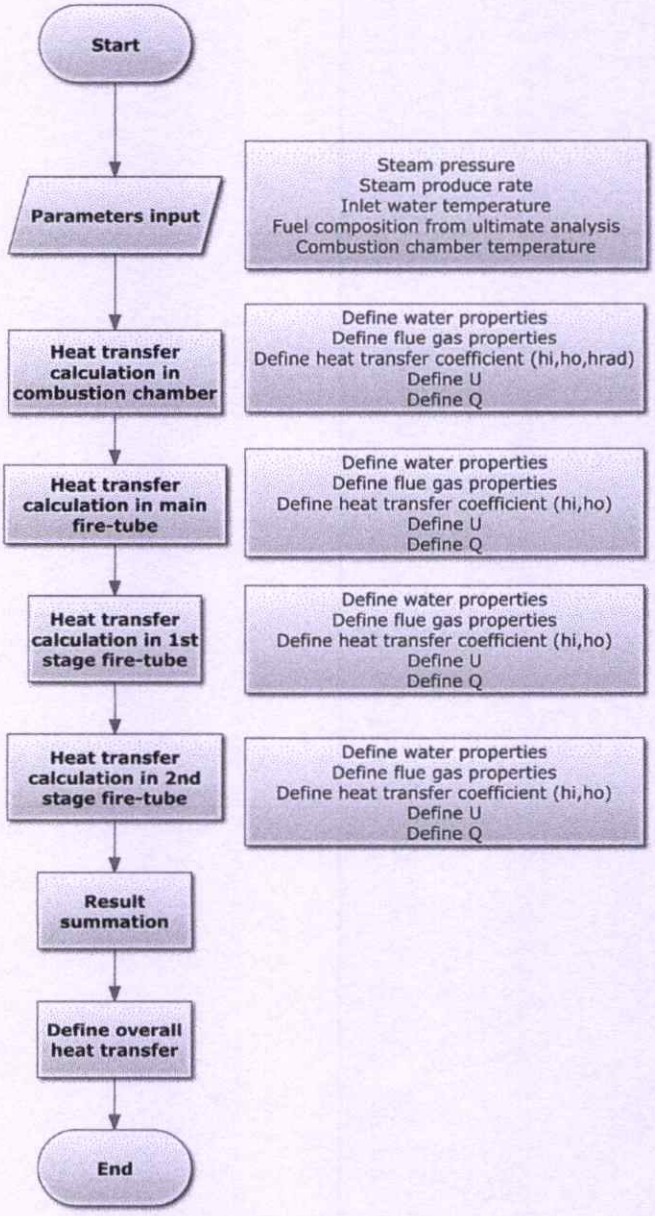
ค่า n จะหยุดคำนวณต่อเมื่อค่าความแตกต่างของ n ใหม่กับ n เดิมมีค่าใกล้เคียงกันโดยกำหนดค่าความแตกต่างสูงสุดที่รับได้ในการคำนวณแบบวนซ้ำอยู่ที่ 0.0001 สเปรทชีทสุดท้ายหลังจากการกำหนดสัดส่วนความร้อนในสเปรทชีทที่ผ่านมาทั้งสองขั้นตอน ความร้อนในส่วนที่เหลือจะถูกนำไปใช้คำนวณจำนวนท่อในท่อไฟเล็กกลับที่สอง โดยสเปรทชีทนี้มีความเหมือนกับสเปรทชีทคำนวณท่อไฟเล็กในกลับที่หนึ่ง สามารถดูได้จากผังงานรูปที่ (3.28)



รูปที่ 3.28 สเปรทชีทคำนวณพื้นที่การถ่ายเทความร้อนของหม้อน้ำชนิดท่อไฟ

ค่า n จะหยุดคำนวณต่อเมื่อค่าความแตกต่างของ n ใหม่กับ n เดิมมีค่าใกล้เคียงกันโดยกำหนดค่าความแตกต่างสูงสุดที่รับได้ในการคำนวณแบบวนซ้ำอยู่ที่ 0.0001

3.4.3 สเปรทชีทตรวจสอบสมรรถนะของหม้อน้ำชนิดลูกผสม

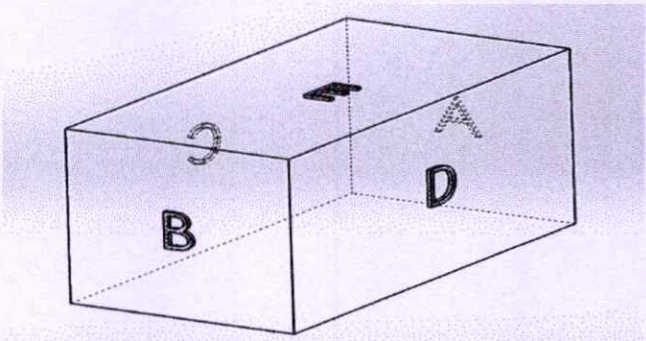


รูปที่ 3.29 ภาพรวมสเปรทชีทตรวจสอบสมรรถนะทางความร้อนหม้อน้ำชนิดลูกผสม

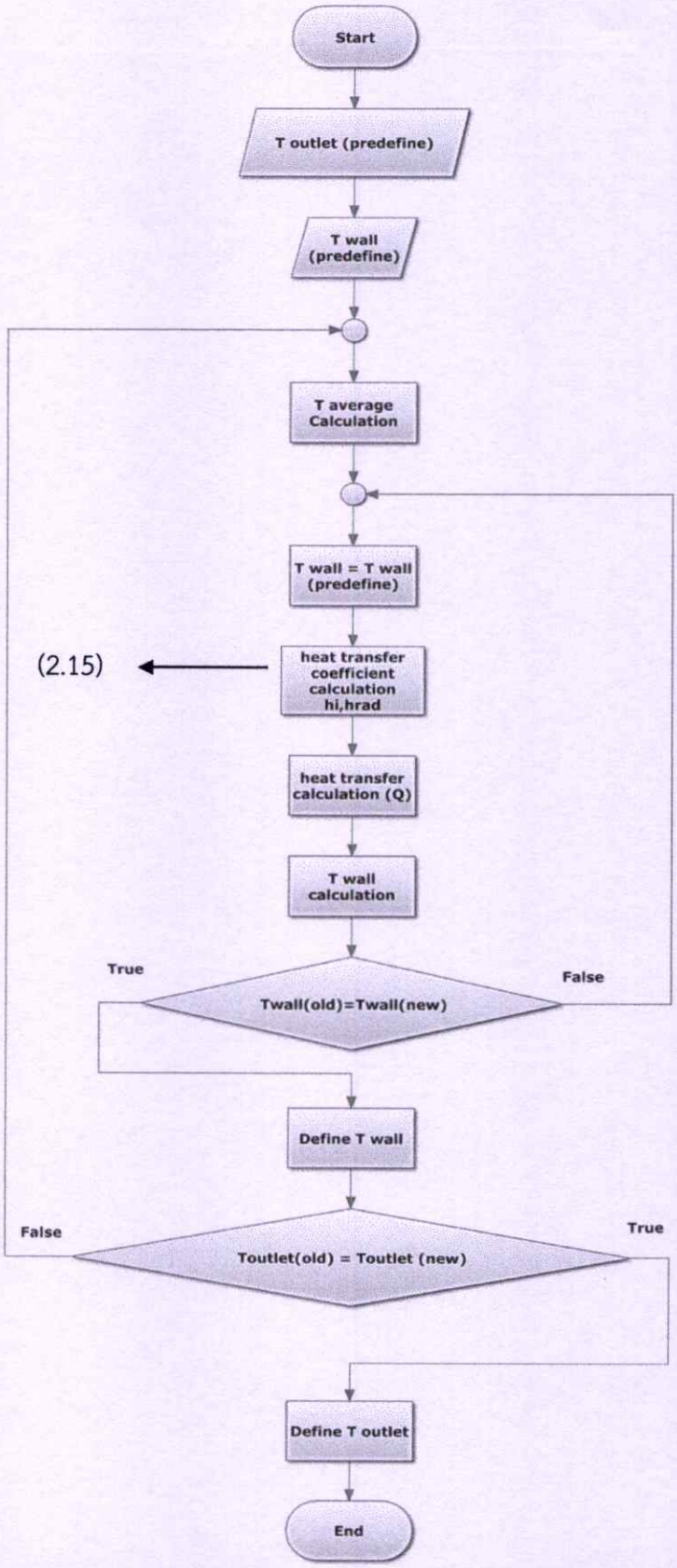
ในหม้อน้ำลูกผสมมีการแบ่งการคำนวณออกเป็น 4 ขั้นตอนคือ การคำนวณความร้อนในห้องเผาไหม้ที่มีท่อน้ำล้อมรอบ ท่อไฟใหญ่ ท่อไฟเล็กกลับที่หนึ่ง และท่อไฟเล็กกลับที่สอง สำหรับสเปรทชีทคำนวณการถ่ายเทความร้อนในท่อไฟเล็กกลับที่หนึ่ง และท่อไฟเล็กกลับที่สอง สามารถดูการทำงานได้จากผังงานรูปที่ (3.23) และ (3.24) ได้เนื่องจากมีการทำงานเหมือนกัน แต่สำหรับท่อไฟ

ใหญ่ และห้องเผาไหม้นั้น มีข้อแตกต่างจากสเปรทชีทที่ผ่านมาเนื่องจาก สมมติฐานของการถ่ายเทความร้อนแตกต่างกัน สเปรทชีทคำนวณการถ่ายเทความร้อนในห้องเผาไหม้นั้นมีลักษณะผังงานเป็นไปตามผังงานรูปที่ (3.31) ซึ่งมีการคำนวณสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนแตกต่างจากในหม้อน้ำชนิดท่อไฟ สิ่งที่แตกต่างกันคือในสเปรทชีทหม้อน้ำชนิดลูกผสมถึงแม้จะมีการคำนวณแบบวนซ้ำโดยกำหนดอุณหภูมิที่ทางออกของแต่ละส่วนของหม้อน้ำเช่นเดียวกัน แต่การวนหาคำตอบนั้นใช้การวนซ้ำย่อยภายในอีก สามารถตรวจสอบผังงานดังกล่าวได้ในผังงานรูปที่ (3.31) ซึ่งเป็นการกำหนดค่าอุณหภูมิผนังเฉลี่ยตั้งต้นของจากผนังที่รับรังสีความร้อน 5 ฝั่งก่อนนำมาคำนวณแบบวนซ้ำเพื่อหาอุณหภูมิผนังเฉลี่ยก่อนคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนเฉลี่ย เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมในการคำนวณหลัก การคำนวณเพื่อหาค่าการถ่ายเทความร้อนในห้องเผาไหม้ มีความแตกต่างของสมมติฐานทำให้การคำนวณการแผ่รังสีความร้อนมีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น หากเปรียบเทียบกับในท่อไฟใหญ่ พื้นที่ผิวทรงกระบอกถือว่าเป็นพื้นที่ผิวเพียงด้านเดียวที่รับรังสี แต่ในห้องเผาไหม้ที่มีท่อน้ำล้อมรอบนั้น ทุกด้านคือพื้นที่รับรังสี ดังรูปที่ (3.30) โดยตั้งสมมติฐานให้เปลวไฟแผ่รังสีคือพื้นที่ตรงพื้นของห้องเผาไหม้ ส่งผลให้สมมติฐานแตกต่างกันกับในท่อไฟใหญ่ และสมมติฐานในท่อไฟใหญ่หม้อน้ำชนิดลูกผสมก็มีความแตกต่าง หากเปรียบเทียบกับหม้อน้ำชนิดท่อไฟ ตรงที่มีการถ่ายเทความความจากการพาความร้อนเท่านั้น ไม่มีการแผ่รังสีเนื่องจากไม่มีเปลวไฟในท่อเหมือนในหม้อน้ำชนิดท่อไฟ ทำให้สมมติฐานแตกต่างกัน โดยการทำงานของสเปรทชีทดังกล่าวเป็นไปตามผังงานรูปที่ (3.21) แตกต่างเพียงสมมติฐานที่ใช้ และสูตรคำนวณในสเปรทชีทเท่านั้น

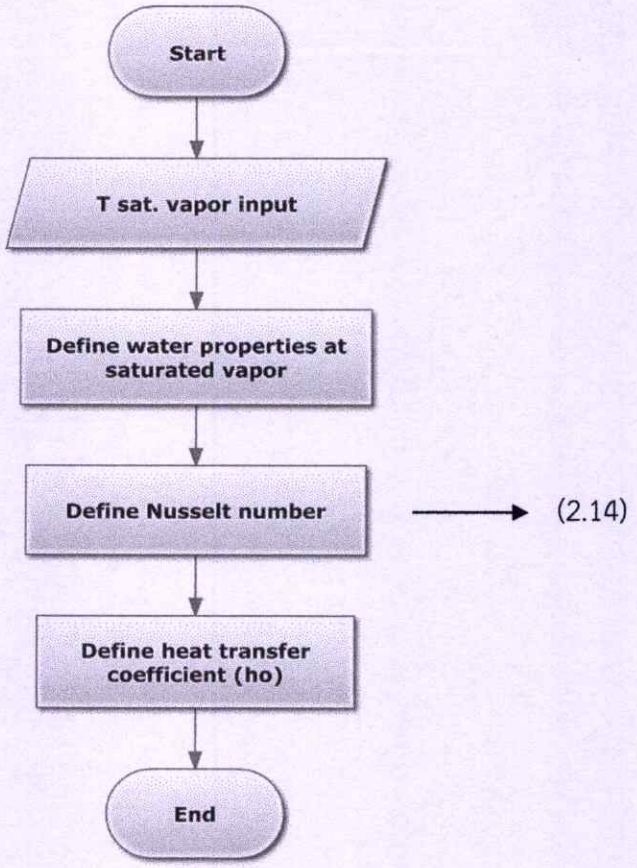
สำหรับการคำนวณคุณสมบัติของน้ำนั้นเป็นไปตามผังงานรูปที่ (3.32) การคำนวณคุณสมบัติของน้ำของทุกสเปรทชีทมีลักษณะเดียวกัน คือใช้ค่าป้อนเข้าคือ อุณหภูมิของน้ำในสถานะไอน้ำอิ่มตัว จากนั้นนำอุณหภูมิดังกล่าวไปคำนวณหาคุณสมบัติเพื่อนำมาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของด้านน้ำ (h_o)



รูปที่ 3.30 พื้นที่รับรังสีความร้อนในห้องเผาไหม้ของหม้อน้ำชนิดลูกผสม (พื้นที่ A-E)



รูปที่ 3.31 สเปรทชีทคำนวณการถ่ายเทความร้อนในห้องเผาไหม้

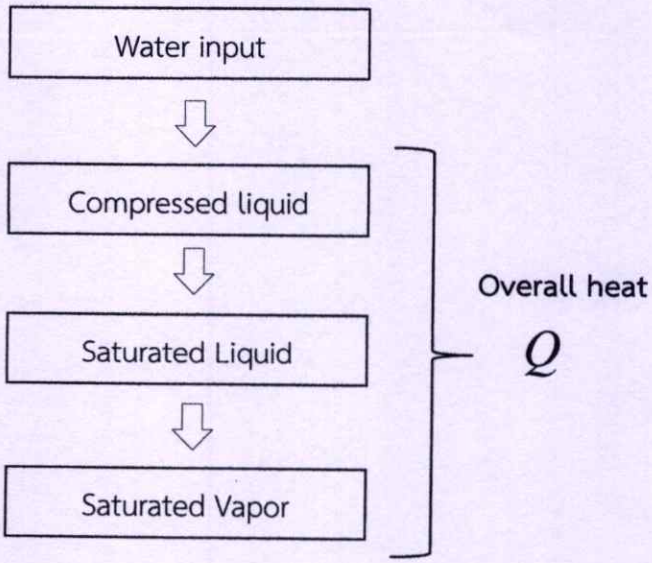


รูปที่ 3.32 สเปรทชีทคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้านน้ำ

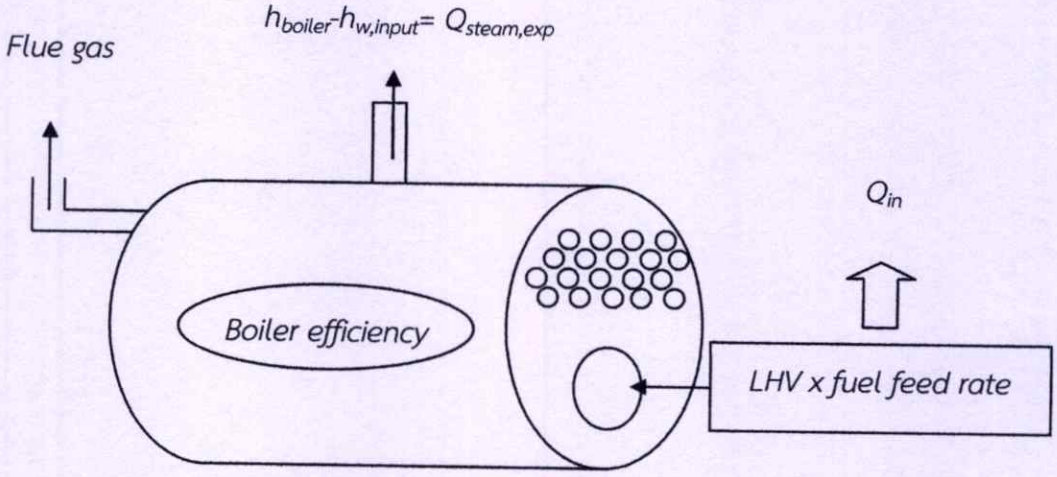
3.5 วิธีการตรวจสอบความถูกต้องของสเปรทชีท

3.5.1 วิธีการตรวจสอบความถูกต้องของสเปรทชีท

การตรวจสอบความถูกต้องของการคำนวณนั้นตรวจสอบจากสเปรทชีทตรวจสอบสมรรถนะทางความร้อนของหม้อน้ำ โดยใช้ผลรวมของปริมาณการถ่ายเทความร้อนแต่ละส่วนของหม้อน้ำที่สเปทชีทคำนวณออกมาได้ ตามผังงานในหัวข้อ 3.3 เทียบกับปริมาณความร้อนที่จำเป็นต้องใช้ในการทำให้น้ำเดือดถึงสถานะไออิ่มตัว โดยนำความร้อนดังกล่าวมาเทียบเพื่อหาเปอร์เซ็นความคลาดเคลื่อนดังรูปที่ (3.33) เพื่อนำมาวิเคราะห์หาถึงสาเหตุของความคลาดเคลื่อนดังกล่าว วิธีการนี้ถูกใช้ทั้งในสเปรทชีทสำหรับตรวจสอบสมรรถนะทั้งในหม้อน้ำชนิดท่อไฟ และลูกผสม โดยปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะของน้ำนั้นแปรผันตามอัตราการผลิตไอจากผู้ใช้งานหม้อน้ำจริง โดยค่าที่ถูกเก็บผลเพื่อนำมาใช้คำนวณปริมาณความร้อนในการเปลี่ยนสถานะน้ำคือ ปริมาณน้ำป้อนหม้อน้ำ กับอัตราการโบลว์ดาวน์หม้อน้ำ โดยปริมาณน้ำป้อนจะถูกนำไปเชื่อมโยงกับตารางเทอโมไดนามิกส์เพื่อหาเอนธาลปีของการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นไอน้ำอิ่มตัว สำหรับอัตราการโบลว์ดาวน์คือปริมาณน้ำที่ถูกทิ้งจากหม้อน้ำ เพราะฉะนั้นหากลบอัตราโบลว์ดาวน์ออกจากปริมาณน้ำป้อน จะได้อัตราการผลิตไอ ซึ่งอัตราการผลิตไอนั้นจะถูกนำไปคูณด้วยเอนธาลปีของการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นไอน้ำอิ่มตัว เพื่อนำค่าดังกล่าวเทียบกับปริมาณความร้อนที่ต้องจ่ายให้กับหม้อน้ำ เพื่อคำนวณหาประสิทธิภาพหม้อน้ำดังรูปที่ (3.34)



รูปที่ 3.33 ปริมาณความร้อนที่ต้องการในการทำให้น้ำเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นไออิ่มตัว



รูปที่ 3.34 การเทียบปริมาณความร้อนที่จ่ายหม้อน้ำเทียบกับพลังงานความร้อนจากไอน้ำ เพื่อหาประสิทธิภาพหม้อน้ำ

การตรวจสอบความถูกต้องด้วยวิธีการดังกล่าว เป็นการตรวจสอบเบื้องต้นว่าผลจากการคำนวณโดยสเปรทชีทนั้น ถูกต้องตามทฤษฎีหรือไม่ สำหรับการตรวจสอบความแม่นยำของสเปรทชีทนั้น ยังมีวิธีอื่น เช่นการตรวจสอบอุณหภูมิในแต่ละส่วนของหม้อน้ำเทียบกับหม้อน้ำจริง แต่ด้วยข้อจำกัดของการทดลองทำให้ไม่สามารถตรวจสอบได้ โดยจะบรรยายไว้ในบทที่ 5 ในหัวข้อที่ 5.4 หลังจากแสดงผลการคำนวณของสเปรทชีท

บทที่ 4
วิเคราะห์ผลการทดลอง และการประยุกต์ใช้สเปรทชีทเพื่อออกแบบหม้อน้ำ

4.1 สเปรทชีททดสอบสมรรถนะทางความร้อนของหม้อน้ำชนิดท่อไฟ

ในหัวข้อนี้ แสดงผลการทดสอบสเปรทชีทตามบทที่ 3 ในหัวข้อที่ 3.4.1 ตามผังงานการทำงานของสเปรทชีท การวิเคราะห์ทดลองมีจุดประสงค์ดังต่อไปนี้

- ตรวจสอบสมรรถนะของสเปรทชีท โดยเทียบการถ่ายเทความร้อนที่ใช้จริง กับการคำนวณจากสเปรทชีทและวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อน
- วิเคราะห์อิทธิพลของการถ่ายเทความร้อน โดยวิเคราะห์จากการคำนวณของสเปรทชีทในเทอมของค่า Overall heat transfer coefficient ในแต่ละส่วนของท่อไฟ

4.1.1 การตรวจสอบสมรรถนะของสเปรทชีท

ตรวจสอบโดยเปรียบเทียบค่าจากการตรวจวัดจริง กับค่าที่คำนวณจากสเปรทชีท สำหรับค่าที่ตรวจวัดจริงคำนวณมาจากตัวแปรต้นซึ่งถูกวัดค่ามาจากหม้อน้ำชนิดท่อไฟ โดยตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณคือ อัตราการโบลว์ดาวน์ ความดันใช้งาน อุณหภูมิน้ำป้อน อัตราการไหลน้ำป้อน ชนิดของเชื้อเพลิง และพารามิเตอร์ของท่อไฟ ค่าดังกล่าวถูกนำมาใช้คำนวณเพื่อหาความความร้อนที่ใช้ในการทำให้น้ำเดือดเป็นไอ จากการทดลองหม้อน้ำชนิดท่อไฟใช้ความร้อนในการทำให้น้ำเดือดดังตารางที่ (4.1)

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงปริมาณความร้อนที่ใช้ในการทำให้น้ำเปลี่ยนสถานะ

Heat required for Com. liq to Sat. liq (kW)	33.04	ของเหลวอัด ---> ของเหลวอิ่มตัว
Heat required for vaporization (kW)	214.81	ของเหลวอิ่มตัว ---> ไออิ่มตัว
Total heat from experiment (kW)	247.86	

จากการคำนวณของสเปรทชีทพบว่า การถ่ายเทความร้อนนั้นต่ำกว่าจากการทดลอง โดยผลการทดลองจะแสดงถึงปริมาณความร้อนในแต่ละส่วนของการคำนวณ และค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นโดยเทียบกับค่าความร้อนจากการทดลองดังตารางที่ (4.2) และ (4.3)

ตารางที่ 4.2 ตารางเปรียบเทียบผลการทดลองกับค่าจากการคำนวณจากสเปรทชีทตรวจสอบสมรรถนะหม้อน้ำท่อไฟ

พื้นที่การถ่ายเทความร้อน	พารามิเตอร์ของท่อไฟ	ปริมาณการถ่ายเทความร้อน(kW)
ท่อไฟใหญ่	ยาว 3 เมตร จำนวน 1 ท่อ	53.54
ท่อไฟเล็กกลับที่ 1	ยาว 2.66 เมตร จำนวน 42 ท่อ	148.20
ท่อไฟเล็กกลับที่ 2	ยาว 3.22 เมตร จำนวน 54 ท่อ	29.92
	Total heat from calculation	231.66
	% error	6.53 %

ตารางที่ 4.3 ปริมาณความร้อนที่คำนวณจากสเปรทชีทในแต่ละส่วนของหม้อน้ำชนิดท่อไฟ

พื้นที่การถ่ายเทความร้อน	ปริมาณการถ่ายเทความร้อน (kW)	สัดส่วนการถ่ายเทความร้อนในแต่ละช่วงของหม้อน้ำ (%)
ท่อไฟใหญ่	53.77	21.60
ท่อไฟเล็กกลับที่ 1	143.33	59.79
ท่อไฟเล็กกลับที่ 2	29.39	12.07
	% total heat from calculation	93.47

จากผลการทดลองพบว่า การถ่ายเทความร้อนที่ถูกคำนวณจากสเปรทชีทนั้น ขาดไปถึง 6.53 % ซึ่งในทางปฏิบัติ ผู้ใช้หม้อน้ำ จำเป็นต้องเพิ่มพื้นที่การถ่ายเทความร้อน โดยเพิ่มจำนวนท่อไฟเล็ก ให้มากขึ้น จึงจะพอสำหรับการผลิตไอตามความต้องการ แต่ในการพัฒนาสเปรทชีท การเกิด error วิเคราะห์สาเหตุได้โดยวิเคราะห์สมมติฐานที่เลือกใช้

การเลือกใช้สมการหาค่า Nusselt number ส่งผลต่อการคำนวณการถ่ายเทความร้อนโดยตรง โดยในเบื้องต้นได้ทำ การทดสอบสเปรทชีทโดยเลือกใช้สมการที่แตกต่างกันทั้งทางด้านน้ำ และด้านก๊าซร้อน การตั้งสมมติฐานส่งผลโดยตรงกับการเลือกใช้สมการ ทำให้การคำนวณการถ่ายเทความร้อนเปลี่ยนแปลง หากสมมติฐานไม่ใกล้เคียงกับปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจริงในหม้อน้ำ โดยสมมติฐานที่เลือกใช้ กับปรากฏการณ์จริงแตกต่างกันดังตารางที่ (4.4) ต่อไปนี้

ตารางที่ 4.4 ตารางจำแนกความแตกต่างระหว่างสมมติฐานที่ตั้งขึ้น กับปรากฏการณ์จริงในหม้อน้ำชนิดท่อไฟ

สมมติฐาน	ปรากฏการณ์จริง	สาเหตุของความคลาดเคลื่อน
อัตราการไหลน้ำป้อนเป็นการไหลแบบคงที่	อัตราการไหลน้ำป้อนเป็นการไหลแบบไม่คงที่	การเติมน้ำเข้าหม้อน้ำ ขึ้นอยู่กับปริมาณความร้อนที่ต้องการ หากมีความต้องการใช้ไอน้ำมากขึ้น จำเป็นต้องป้อนเชื้อเพลิงเพิ่มส่งผลต่อปริมาณน้ำป้อน
น้ำในหม้อน้ำบริเวณพื้นที่ท่อไฟใหญ่เป็น convection heat transfer ในขณะที่ท่อไฟเล็กมีลักษณะการเดือดแบบ Pool boiling	มีการเดือดในลักษณะ Pool boiling และconvection heat transfer บนพื้นที่ท่อใหญ่ และท่อไฟเล็กผสมกัน	การเลือกใช้สมการเป็นสมการเฉพาะของ convection heat transfer กับ Pool boiling และแบ่งเป็นสัดส่วนตามส่วนของพื้นที่การถ่ายเทความร้อน
การเผาไหม้เป็นการเผาไหม้สมบูรณ์โดยเผาไหม้เชื้อเพลิงจนหมด	การเผาไหม้ไม่สม่ำเสมอ เชื้อเพลิงเผาไหม้ไม่หมด	อัตราการไหลของไอเสียจากการคำนวณ ไม่เท่ากับอัตราการไหลจริงในท่อไฟ

พื้นที่การถ่ายเทความร้อนไม่รวม Endplate ของหม้อน้ำ	Endplate เป็นพื้นที่การถ่ายเทความร้อนในหม้อน้ำ	พื้นที่การถ่ายเทความร้อนที่คำนวณจากสเปรทชีทไม่เท่ากับการทดลอง ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อน
การถ่ายเทความร้อนในท่อไฟใหญ่มีการถ่ายเทความร้อนแบบแผ่รังสีความร้อน การพาความร้อนเท่านั้น	การถ่ายเทความร้อนในท่อไฟใหญ่ เปลวไฟมีลักษณะพุ่งชน Endplate ต้องพิจารณาการถ่ายเทความร้อนแบบ Impinging jet ด้วย	เปลวไฟในส่วนปลาย และในส่วนอื่นๆ บางครั้งสัมผัสกับเนื้อท่อโดยตรง ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนมากกว่าสมมติฐานที่ตั้งไว้

4.1.2 วิเคราะห์อิทธิพลของการถ่ายเทความร้อนในแต่ละส่วนของหม้อน้ำ

การถ่ายเทความร้อนในแต่ละส่วนของหม้อน้ำ วิเคราะห์ได้จากเทอมของค่า U หรือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ซึ่งเป็นค่าที่รวมผลของการถ่ายเทความร้อนตั้งแต่ก๊าซร้อน ผ่านผิวท่อ ไปยังด้านน้ำ โดยในหัวข้อนี้ จะจำแนกในแต่ละส่วน เพื่อวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนในแต่ละช่วงของหม้อน้ำ โดยเริ่มจากการวิเคราะห์ในพื้นที่การถ่ายเทความร้อนของท่อไฟใหญ่ในแต่ละเทอม ดังตารางที่ (4.5) โดยเทอมที่มีมีอิทธิพลต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม หมายความว่า เทอมที่ยังสามารถเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนได้ เพื่อเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม โดยเทอมดังกล่าวเป็นเทอมที่มีค่าจากการคำนวณสูงที่สุดเปรียบเทียบกับเทอมอื่นๆ

ตารางที่ 4.5 ค่าการถ่ายเทความร้อนในแต่ละเทอมของสมการสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากหม้อน้ำส่วนท่อไฟใหญ่

$$\frac{1}{U_o} = \pi D_o \left[\frac{1/h_i h_{rad}}{\left(\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_{rad}} \right) \pi D_i} + \frac{\ln\left(D_o / D_i\right)}{2\pi k} + \frac{1}{h_o \pi D_o} \right]$$

เทอมของสมการ	ค่าที่คำนวณได้จากสเปรทชีท	การถ่ายเทความร้อน
Term 1	0.00601	การแผ่รังสีความร้อน และ การพาความร้อน ด้านไฟ
Term 2	0.00006	การนำความร้อนผ่านผิวท่อ
Term 3	0.04301	การพาความร้อน ด้านน้ำ
สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (W/m2K)	7.87	การถ่ายเทความร้อนรวม

จากตารางที่ (4.5) วิเคราะห์ได้ว่า เทอมที่มีอิทธิพลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนคือ เทอม ที่

3 คือฝั่งการถ่ายเทความร้อนทางด้านน้ำ จากตารางที่ (4.5) จะพบว่าค่าในเทอมที่ 3 นั้นมีค่ามากที่สุด จึงเป็นเทอมที่มีอิทธิพลต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม หากต้องการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในบริเวณท่อไฟใหญ่นั้นจึงต้องเพิ่มการถ่ายเทความร้อนทางด้านน้ำ เช่น การติดครีบรอบท่อไฟใหญ่ทางด้านน้ำ เพื่อเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน สำหรับในเทอมที่ 1 ซึ่งเป็นการถ่ายเทความร้อนแบบผสมระหว่างการแผ่รังสี และการพาความความร้อนนั้น จะเห็นได้ว่าค่ามีค่าต่ำกว่าเทอมที่ 3 โดยต่างกันที่ทศนิยม 1 ตำแหน่ง การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนจะยังมีอิทธิพลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความ การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนทางฝั่งก๊าซร้อนนั้นทำได้โดยการติดครีบ แต่ต้องระวังความดันลด (Pressure lost) ที่จะเกิดขึ้นในกรณีที่ติดครีบเพื่อเพิ่มการถ่ายเทความร้อน สำหรับในเทอมที่ 2 เป็นเทอมที่สัมพันธ์ระหว่างความหนาของท่อ กับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมนั้น หากตั้งสมมติฐานให้ความหนาของเขม่าที่จับผิวท่อด้านในเปรียบเสมือนเป็นเนื้อท่อพบว่าหากความหนาของเขม่าหนา 1 มิลลิเมตร ส่งผลให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมลดลง 0.31 % ผลการทดสอบการเพิ่มค่าของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในท่อไฟใหญ่ในแต่ละเทอม สามารถตรวจสอบได้ดังตารางที่ (4.6)

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบการเพิ่มค่าของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในท่อไฟใหญ่ในแต่ละเทอม 2 เท่า โดยแสดงผลการเพิ่มของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมเป็น %

เทอมของสมการ	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (U) หลังจากเพิ่มค่า สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (h) 2 เท่า (W/m^2K) $U_{initial}$ = 7.87 W/m^2K	การเพิ่มขึ้นของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (%)	หมายเหตุ
Term 1	7.90	0.38	เพิ่ม h_i ของการพาความร้อน
Term 1	8.51	6.22	เพิ่ม h_{rad} ของการแผ่รังสี
Term 3	13.86	76.11	เพิ่ม h_o ของการพาความร้อน

สำหรับการวิเคราะห์อิทธิพลของการถ่ายเทความร้อนในส่วนของท่อไฟเล็กกลับที่ 1 และ 2 วิเคราะห์ด้วยเทอมของสมการสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมเช่นเดียวกัน แต่สมการจะแตกต่างกับการคำนวณที่ท่อไฟใหญ่เนื่องจาก สมมติฐานการถ่ายเทความร้อนแตกต่างกัน โดยการวิเคราะห์ในพื้นที่การถ่ายเทความร้อนของท่อไฟเล็กตรวจสอบได้ดังตารางที่ (4.7) และ (4.8)

ตารางที่ 4.7 ค่าการถ่ายเทความร้อนในแต่ละเทอมของสมการสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม จากหม้อน้ำส่วนท่อไฟเล็กกลับที่ 1

$$\frac{1}{U_o} = \pi D_o \left[\frac{1}{h_i \pi D_i} + \frac{\ln\left(D_o / D_i\right)}{2\pi k} + \frac{1}{h_o \pi D_o} \right]$$

เทอมของสมการ	ค่าที่คำนวณได้จากสเปรทชีท	การถ่ายเทความร้อน
Term 1	0.42162	การพาความร้อน ด้านไฟ
Term 2	0.00029	การนำความร้อนผ่านผิวท่อ
Term 3	0.00039	Pool boiling ด้านน้ำ
สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (W/m2K)	15.91	การถ่ายเทความร้อนรวม

ตารางที่ 4.8 ค่าการถ่ายเทความร้อนในแต่ละเทอมของสมการสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม จากหม้อน้ำส่วนท่อไฟเล็กกลับที่ 2

เทอมของสมการ	ค่าที่คำนวณได้จากสเปรทชีท	การถ่ายเทความร้อน
Term 1	0.38939	การพาความร้อน ด้านไฟ
Term 2	0.00002	การนำความร้อนผ่านผิวท่อ
Term 3	0.00122	Pool boiling ด้านน้ำ
สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (W/m2K)	17.20	การถ่ายเทความร้อนรวม

การวิเคราะห์ ผลการคำนวณในท่อไฟเล็กกลับที่ 1 และ 2 สามารถวิเคราะห์พร้อมกันได้เนื่องจากมีสมมติฐานเดียวกัน โดยเทอมที่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมคือเทอมที่ 1 โดยจากผลการคำนวณโดยสเปรทชีทจะเห็นได้ว่า ส่วนที่ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนไม่เต็มสมรรถนะที่สามารถทำได้ เนื่องจากค่าที่คำนวณในเทอมที่ 1 ไปลดสมรรถนะดังกล่าวไว้ การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในเทอมที่ 1 เป็นการถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อนภายในท่อไฟเล็ก การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนสามารถทำได้โดยติดตั้ง ใบบิด หรือครีบเพื่อเพิ่มการถ่ายเทความร้อน จะเพิ่มสมรรถนะของการถ่ายเทความร้อนในท่อไฟเล็กกลับที่ 1 และ 2 ได้ แต่ต้องระวังในเรื่องของความดันลด (Pressure drop) ที่เกิดขึ้นเมื่อติดตั้งครีบดังกล่าว หากเปรียบเทียบการคำนวณในแต่ละเทอมของ ท่อไฟใหญ่ กับท่อไฟเล็ก จะพบว่าแตกต่างกันในเทอมที่ 1 และ 3 โดยในท่อไฟใหญ่จะพบว่าเทอมที่ 3 มีผลกับค่า

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ขณะที่ในท่อไฟเล็กนั้นเทอมที่ 1 จะมีอิทธิพลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมากกว่าเทอมที่ 3 ผลการทดสอบการเพิ่มค่าของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในท่อไฟใหญ่ในแต่ละเทอม สามารถตรวจสอบได้ดังตารางที่ (4.9) และ (4.10)

ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบการเพิ่มค่าของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในท่อไฟเล็กกลับที่ 1 ในแต่ละเทอม 2 เท่าโดยแสดงผลการเพิ่มของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมเป็น %

เทอมของสมการ	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (U) หลังจากเพิ่มค่า สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (h) 2 เท่า (W/m^2K) $U_{initial}$ = 15.91 W/m^2K	การเพิ่มขึ้นของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (%)	หมายเหตุ
Term 1	31.68	49.92	เพิ่ม h_i ของการพาความร้อน
Term 3	15.87	0.05	เพิ่ม h_o ของการพาความร้อน

ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบการเพิ่มค่าของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในท่อไฟเล็กกลับที่ 2 ในแต่ละเทอม 2 เท่า โดยแสดงผลการเพิ่มของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมเป็น %

เทอมของสมการ	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (U) หลังจากเพิ่มค่า สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (h) 2 เท่า (W/m^2K) $U_{initial}$ = 17.2 W/m^2K	การเพิ่มขึ้นของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (%)	หมายเหตุ
Term 1	34.42	49.84	เพิ่ม h_i ของการพาความร้อน
Term 3	17.23	0.16	เพิ่ม h_o ของการพาความร้อน

4.2 สเปรทชีทคำนวณพื้นที่การถ่ายเทความร้อนของหม้อน้ำชนิดลูกผสม

ในหัวข้อนี้ แสดงผลการทดสอบสเปรทชีทตามบทที่ 3 ในหัวข้อที่ 3.4.3 ตามผังงานการทำงานของสเปรทชีท การวิเคราะห์ทดลองมีจุดประสงค์ดังต่อไปนี้

- ตรวจสอบสมรรถนะของสเปรทชีท โดยเทียบสมรรถนะทางความร้อนจริง กับการคำนวณจากสเปรทชีทและวิเคราะห์สาเหตุของความคลาดเคลื่อน
- วิเคราะห์อิทธิพลของการถ่ายเทความร้อน โดยวิเคราะห์จากการคำนวณของสเปรทชีทในเทอมของค่า Overall heat transfer coefficient ในแต่ละส่วนของท่อไฟ

4.2.1 การตรวจสอบสมรรถนะของสเปรทชีท

ตรวจสอบโดยเปรียบเทียบค่าจากการตรวจวัดจริง กับค่าที่คำนวณจากสเปรทชีท สำหรับค่าที่ตรวจวัดจริงคำนวณมาจากตัวแปรต้นซึ่งถูกวัดค่ามาจากหม้อน้ำชนิดลูกผสม โดยตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณคือ อัตราการโบลว์ดาวน์ ความดันใช้งาน อุณหภูมิน้ำป้อน อัตราการป้อนน้ำ ชนิดของเชื้อเพลิง อัตราการใช้เชื้อเพลิง อุณหภูมิห้องเผาไหม้ พารามิเตอร์ของท่อน้ำ และท่อไฟ ค่าดังกล่าวถูกนำมาใช้คำนวณเพื่อหาความความร้อนที่ใช้ในการทำให้น้ำเดือดเป็นไอ จากการทดลองหม้อน้ำชนิดท่อไฟใช้ความร้อนในการทำให้น้ำเดือดดังตารางที่ (4.11) ตามปกติคำนวณอุณหภูมิเปลวไฟอะเดียแบติกในห้องเผาไหม้จากค่า C_p ความร้อน และอัตราการไหลไอเสีย แต่ในหม้อน้ำลูกผสมหากใช้สมมติฐานเหมือนกับหม้อน้ำชนิดท่อไฟ คือใช้อุณหภูมิดังกล่าวในการคำนวณการแผ่รังสี จะส่งผลต่อการประเมินค่า Q เกิดความคลาดเคลื่อนสูงมาก ในกรณีนี้จึงเปลี่ยนสมมติฐานใหม่โดยใช้อุณหภูมิห้องเผาไหม้ตามที่วัดได้จริงจากโรงงานเป็นอุณหภูมิไอเสียตั้งต้น และสำหรับคำนวณการแผ่รังสีความร้อน

ตาราง 4.11 ตารางแสดงปริมาณความร้อนที่ใช้ในการทำให้น้ำเปลี่ยนสถานะในหม้อน้ำชนิดลูกผสม

Heat required for Com. liq to Sat. liq (kW)	408.11	ของเหลวอัด ---> ของเหลวอิ่มตัว
Heat required for vaporization (kW)	1541.84	ของเหลวอิ่มตัว ---> ไออิ่มตัว
Total heat from experiment (kW)	1939.95	

จากการคำนวณของสเปรทชีทพบว่า การถ่ายเทความร้อนนั้นต่ำกว่าจากการทดลอง โดยผลการทดลองจะแสดงถึงปริมาณความร้อนในแต่ละส่วนของการคำนวณ และค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นโดยเทียบกับค่าความร้อนจากการทดลองดังตารางที่ (4.12) และ (4.13)

ตารางที่ 4.12 ตารางเปรียบเทียบผลการทดลองกับค่าจากการคำนวณจากสเปรทชีทตรวจสอบสมรรถนะหม้อน้ำชนิดลูกผสม

พื้นที่การถ่ายเทความร้อน	พารามิเตอร์ของท่อ	ปริมาณการถ่ายเทความร้อน(kW)
ห้องเผาไหม้ (water wall)	ท่อน้ำยาว 5 เมตร จำนวน 182 ท่อ	1462.54
ท่อไฟใหญ่	ยาว 5 เมตร จำนวน 1 ท่อ	22.46
ท่อไฟเล็กกลับที่ 1	ยาว 5 เมตร จำนวน 57 ท่อ	382.12
ท่อไฟเล็กกลับที่ 2	ยาว 5 เมตร จำนวน 48 ท่อ	107.88
	Total heat from calculation	1975.00
	% error	1.81 %

ตารางที่ 4.13 ตารางแสดงปริมาณความร้อนที่คำนวณจากสเปรทชีทในแต่ละส่วนของหม้อน้ำชนิดลูกผสม

พื้นที่การถ่ายเทความร้อน	ปริมาณการถ่ายเทความร้อน (kW)	สัดส่วนการถ่ายเทความร้อนในแต่ละช่วงของหม้อน้ำ (%)
ห้องเผาไหม้(water wall)	1462.54	75.39
ท่อไฟใหญ่	22.46	1.16
ท่อไฟเล็กกลับที่ 1	382.12	19.70
ท่อไฟเล็กกลับที่ 2	107.88	5.56
	% total heat from calculation	101.81

จากผลการทดลองพบว่า การถ่ายเทความร้อนที่ถูกคำนวณจากสเปรทชีทนั้น มีความคลาดเคลื่อน 2.40 % ซึ่งตามหลักแล้วถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่รับได้ ผลการคำนวณใกล้เคียงกับการถ่ายเทความร้อนจริง แต่ในการพัฒนาสเปรทชีทไม่มีสิ่งใดสมบูรณ์แบบ เพราะฉะนั้นจึงต้องวิเคราะห์ว่าสาเหตุใดทำให้ผลการคำนวณจากสเปรทชีทจึงมีการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าความร้อนจากการตรวจวัดจริง

ผลจากการเลือกใช้สมการหาค่า Nusselt number ส่งผลต่อการคำนวณการถ่ายเทความร้อนโดยตรง โดยในเบื้องต้นได้ทดสอบสเปรทชีทโดยเลือกใช้สมการที่แตกต่างกันทั้งทางด้านน้ำ และด้านก๊าซร้อน การตั้งสมมติฐานส่งผลโดยตรงกับการเลือกใช้สมการ ตารางที่ (4.14) จะจำแนกสมมติฐานที่สเปรทชีทเลือกใช้เทียบกับปรากฏการณ์จริงในหม้อน้ำชนิดลูกผสม

ตารางที่ 4.14 ตารางจำแนกความแตกต่างระหว่างสมมติฐานที่ตั้งขึ้น กับปรากฏการณ์จริงในหม้อน้ำชนิดลูกผสม

สมมติฐาน	ปรากฏการณ์จริง	สาเหตุของความคลาดเคลื่อน
อัตราการไหลน้ำป้อนเป็นการไหลแบบคงที่	อัตราการไหลน้ำป้อนเป็นการไหลแบบไม่คงที่	การเติมน้ำป้อนเข้าหม้อน้ำขึ้นอยู่กับปริมาณความร้อนที่ต้องการ หากมีความต้องการใช้ไอน้ำมากขึ้น จำเป็นต้องป้อนเชื้อเพลิงเพิ่มส่งผลต่อปริมาณน้ำป้อน
น้ำที่ไหลในท่อในห้องเผาไหม้ตั้งสมมติฐานการเดือดของน้ำเป็น flow boiling	น้ำไม่มีการไหลตลอดเวลาจะเป็น flow boiling ในช่วงการเติมน้ำเข้าหม้อน้ำเท่านั้น	การคำนวณค่า h_o ในกรณีของ flow boiling ใช้ความสัมพันธ์แตกต่างจากสมมติฐานอื่น ส่งผลต่อค่า h_o ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อน
น้ำในหม้อน้ำบริเวณพื้นที่ท่อไฟใหญ่เป็น convection heat transfer ในขณะที่ท่อไฟเล็กมีลักษณะการเดือดแบบ	มีการเดือดในลักษณะ Pool boiling และconvection heat transfer บนพื้นที่ท่อใหญ่และท่อไฟเล็กผสมกัน	การเลือกใช้สมการเป็นสมการเฉพาะของ convection heat transfer กับ Pool boiling และ

Pool boiling		แบ่งเป็นสัดส่วนตามส่วนของพื้นที่การถ่ายเทความร้อน
การเผาไหม้เป็นการเผาไหม้สมบูรณ์โดยเผาไหม้เชื้อเพลิงจนหมด	การเผาไหม้ไม่สม่ำเสมอเชื้อเพลิงเผาไหม้ไม่หมด	อัตราการไหลของไอเสียจากการคำนวณ ไม่เท่ากับอัตราการไหลจริงในท่อไฟของหม้อน้ำ
การถ่ายเทความร้อนในห้องเผาไหม้มีการถ่ายเทความร้อนแบบแผ่รังสี และการพาความร้อนแบบบังคับ	การถ่ายเทความร้อนส่วนใหญ่ในห้องเผาไหม้เป็นการแผ่รังสีความร้อน การพาความร้อนไม่เกิดอย่างสมบูรณ์ทุกๆท่อ เนื่องจากการติดตั้งท่อไม่ได้ติดตั้งในแนวที่รับการพาความร้อนโดยตรง	ส่งผลโดยตรงต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมในห้องเผาไหม้ โดยหากพิจารณาการถ่ายเทความร้อนแบบเดียว ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนสูง
พื้นที่รับรังสีความร้อนในห้องเผาไหม้ เป็นพื้นที่สี่เหลี่ยมขอบร่วมมุม90 องศา กับพื้นที่สี่เหลี่ยมที่มีขนาดเท่ากันตั้งตรงข้ามกันในแนวตรง	พื้นที่รับรังสีความร้อนในห้องเผาไหม้ ไม่ได้เป็นพื้นที่สี่เหลี่ยมขอบร่วมมุม90 องศา กับพื้นที่สี่เหลี่ยมที่มีขนาดเท่ากันตั้งตรงข้ามกันในแนวตรง	เปลวไฟไม่ได้มีพื้นที่แผ่รังสีที่แน่นอน ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนได้

4.2.2 วิเคราะห์อิทธิพลของการถ่ายเทความร้อนในแต่ละส่วนของหม้อน้ำชนิดลูกผสม

เช่นเดียวกันกับสเปรทชีทอื่นๆ การถ่ายเทความร้อนในแต่ละส่วนของหม้อน้ำชนิดลูกผสม วิเคราะห์ได้จากเทอมของค่า U หรือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ซึ่งเป็นค่าที่รวมผลของการถ่ายเทความร้อนจากการเผาไหม้ ผ่านผิวท่อ ไปยังด้านน้ำ โดยในหัวข้อนี้ จะจำแนกในแต่ละส่วน เพื่อวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนในแต่ละช่วงของหม้อน้ำ โดยเริ่มจากการวิเคราะห์ในพื้นที่การถ่ายเทความร้อนของท่อไฟใหญ่ในแต่ละเทอมดังตารางที่ (4.15) โดยเทอมที่มีมีอิทธิพลต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม หมายความว่า เทอมที่ยังสามารถเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนได้ เพื่อเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม โดยเทอมดังกล่าวเป็นเทอมที่มีค่าจากการคำนวณสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับเทอมอื่นๆ

ตารางที่ 4.15 ค่าการถ่ายเทความร้อนในแต่ละเทอมของสมการสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากหม้อน้ำลูกผสมในส่วนของห้องเผาไหม้ของหม้อน้ำชนิดลูกผสม

$$\frac{1}{U_o} = \pi D_o \left[\frac{1/h_i h_{rad}}{\left(\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_{rad}}\right)\pi D_i} + \frac{\ln\left(D_o / D_i\right)}{2\pi k} + \frac{1}{h_o \pi D_o} \right]$$

เทอมของสมการ	ค่าที่คำนวณได้จากสเปรทชีท	การถ่ายเทความร้อน
Term 1	0.20147	การแผ่รังสีความร้อน และ การพาความร้อน ในห้องเผาไหม้
Term 2	0.00030	การนำความร้อนผ่านผิวท่อ
Term 3	0.00691	การพาความร้อน ด้านน้ำในท่อ
สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (W/m2K)	24.00	การถ่ายเทความร้อนรวม

จากตารางที่ (4.15) วิเคราะห์ได้ว่า อิทธิพลของการถ่ายเทความร้อนอยู่ที่เทอมที่ 1 คือฝั่งของการเผาไหม้ การแผ่รังสี และการพาความร้อนจากการเผาไหม้ ส่งผลอย่างมากต่อการถ่ายเทความร้อนในห้องเผาไหม้ เพราะฉะนั้นหากต้องการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนต้องเพิ่มทางฝั่งการเผาไหม้ เช่นการเพิ่มปริมาณเชื้อเพลิง สำหรับการติดครีบนั้นจะช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนไม่มาก เนื่องจากจากการทดสอบสเปรทชีทพบว่าการถ่ายเทความร้อนในห้องเผาไหม้นั้น มีการถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสีถึง 65 % ในขณะที่การถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อนนั้นมีเพียง 35 % อีกทั้งในปรากฏการณ์จริง การพาความร้อนนั้นไม่ได้พาความร้อนโดยตรงผ่านทุกท่อ เนื่องจากการติดตั้งท่อนั้นติดตั้งติดผนัง ทำให้ท่อหลายท่อไม่ได้ปะทะกับลมร้อนโดยตรง ทำให้การคำนวณการถ่ายเทความร้อนแบบการพาความร้อนในสเปรทชีท มีค่าสูงกว่าที่ควรจะเป็น และสำหรับในส่วนของการแผ่รังสีความร้อน พื้นที่รับรังสีความร้อนในห้องเผาไหม้ เป็นพื้นที่สี่เหลี่ยมขอบร่วมมุม90 องศา กับพื้นที่สี่เหลี่ยมที่มีขนาดเท่ากันตั้งตรงข้ามกันในแนวตรง ทำให้ที่แท้จริงแล้วการถ่ายเทความร้อนของการแผ่รังสีจากสเปรทชีทควรน้อยกว่าที่ควรจะเป็น การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนในส่วนนี้น่าสนใจเป็นอย่างมาก หากสเปรทชีทใช้ความสัมพันธ์ที่ถูกต้อง ตรงกับปรากฏการณ์จริงการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนจึงจะมีความสมบูรณ์ สำหรับผลการทดสอบการเพิ่มค่าของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในห้องเผาไหม้ในแต่ละเทอม สามารถตรวจสอบได้ดังตารางที่ (4.16)

ตารางที่ 4.16 ผลการทดสอบการเพิ่มค่าของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในห้องเผาไหม้ในแต่ละเทอม 2 เท่า โดยแสดงผลการเพิ่มของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมเป็น %

เทอมของสมการ	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (U) หลังจากเพิ่มค่า สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (h) 2 เท่า (W/m^2K) $U_{initial}$ = 24 W/m^2K	การเพิ่มขึ้นของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (%)	หมายเหตุ
Term 1	32.3	34.58	เพิ่ม h_i ของการพาความร้อนไอเสีย
Term 1	38.43	60.14	เพิ่ม h_{rad} ของการแผ่รังสีความร้อน

Term 3	24.33	1.38	เพิ่ม h_o ของการพาความร้อนด้านน้ำ

จากผลการทดสอบพบว่า หากการพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน จะส่งผลให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในห้องเผาไหม้เพิ่มขึ้น 30-60% ตารางที่ (4.17) (4.18) และ (4.19) เป็นตารางแสดงการถ่ายเทความร้อนในแต่ละเทอมในส่วนอื่นของหม้อน้ำชนิดลูกผสมซึ่งมีผลดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.17 ค่าการถ่ายเทความร้อนในแต่ละเทอมของสมการสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากหม้อน้ำส่วนท่อไฟใหญ่

$$\frac{1}{U_o} = \pi D_o \left[\frac{1}{h_i \pi D_i} + \frac{\ln\left(D_o / D_i\right)}{2\pi k} + \frac{1}{h_o \pi D_o} \right]$$

เทอมของสมการ	ค่าที่คำนวณได้จากสเปรทชีท	การถ่ายเทความร้อน
Term 1	0.04216	การพาความร้อน ด้านไฟ
Term 2	0.00007	การนำความร้อนผ่านผิวท่อ
Term 3	0.01985	การพาความร้อน ด้านน้ำ
สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (W/m2K)	5.74	การถ่ายเทความร้อนรวม

ตารางที่ 4.18 ค่าการถ่ายเทความร้อนในแต่ละเทอมของสมการสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากหม้อน้ำส่วนท่อไฟเล็กกลับที่ 1

เทอมของสมการ	ค่าที่คำนวณได้จากสเปรทชีท	การถ่ายเทความร้อน
Term 1	0.11934	การพาความร้อน ด้านไฟ
Term 2	0.00271	การนำความร้อนผ่านผิวท่อ
Term 3	0.00015	Pool boiling ด้านน้ำ
สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (W/m2K)	44.17	การถ่ายเทความร้อนรวม

ตารางที่ 4.19 ค่าการถ่ายเทความร้อนในแต่ละเทอมของสมการสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากหม้อน้ำส่วนท่อไฟเล็กกลับที่ 2

เทอมของสมการ	ค่าที่คำนวณได้จากสเปรทชีท	การถ่ายเทความร้อน
Term 1	0.11302	การพาความร้อน ด้านไฟ

Term 2	0.00001	การนำความร้อนผ่านผิวท่อ
Term 3	0.00036	Pool boiling ด้านน้ำ
สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (W/m2K)	47.60	การถ่ายเทความร้อนรวม

ในท่อไฟใหญ่ของหม้อน้ำชนิดลูกผสมใช้สมมติฐานที่แตกต่างกันกับหม้อน้ำชนิดท่อไฟ โดยในหม้อน้ำชนิดท่อไฟใหญ่ สมมติฐานของด้านไฟเป็นการถ่ายเทความร้อนแบบการแผ่รังสีกับการพาความร้อน เนื่องจากในหม้อน้ำชนิดท่อไฟนั้นมีเปลวไฟจากหัวเผายิงไฟออกมาทำให้เกิดการแผ่รังสีความร้อนในท่อไฟ แต่ในหม้อน้ำชนิดลูกผสมนั้นเปลวไฟจะอยู่ในห้องเผาไหม้ ทำให้ในท่อไฟใหญ่มีเพียงไอเสียที่ไหลผ่านจึงมีสมมติฐานเป็นการพาความร้อนเพียงชนิดเดียว สำหรับสมมติฐานอื่นๆเช่นทางด้านน้ำและท่อไฟเล็กกลับที่ 1 และ 2 ตั้งสมมติฐานเดียวกันกับหม้อน้ำชนิดท่อไฟ จากตารางที่ 4.17 หากเปรียบเทียบกับตารางที่ 4.5 ซึ่งเป็นผลการถ่ายเทความร้อนภายในท่อไฟใหญ่ของหม้อน้ำชนิดท่อไฟจะพบว่าแตกต่างกัน เนื่องจากค่าในเทอมที่ 1 และ 3 นั้นมีอิทธิพลต่อการถ่ายเทความร้อนในท่อไฟใหญ่ ในท่อไฟใหญ่การถ่ายเทความร้อนคิดเป็นเพียง 1.16 % ต่อการถ่ายเทความร้อนทั้งหมด ดังตารางที่ 4.13 ดังนั้นท่อไฟใหญ่ในหม้อน้ำชนิดลูกผสมยังสามารถเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้อีก โดยผลการทดสอบการเพิ่มค่าของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในห้องเผาไหม้ในแต่ละเทอม สามารถตรวจสอบได้ดังตารางที่ 4.20

ตารางที่ 4.20 ผลการทดสอบการเพิ่มค่าของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในท่อไฟใหญ่ในแต่ละเทอม 2 เท่า โดยแสดงผลการเพิ่มของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมเป็น %

เทอมของสมการ	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (U) หลังจากเพิ่มค่า สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (h) 2 เท่า (W/m^2K) $U_{initial}$ = 5.74 W/m^2K	การเพิ่มขึ้นของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (%)	หมายเหตุ
Term 1	8.69	51.39	เพิ่ม h_i ของการพาความร้อนไอเสีย
Term 3	6.83	19.05	เพิ่ม h_o ของการพาความร้อนด้านน้ำ

จากอิทธิพลดังกล่าวในตารางที่ (4.20) จะพบว่าการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนด้านไฟมีผลกว่าทางด้านน้ำ แต่ใช่ว่าการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนทางด้านน้ำจะไม่มีผลใดๆ เพราะฉะนั้นหากต้องการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อไฟใหญ่สามารถทำได้โดยการติดตั้งครีบทางด้านน้ำ และติดตั้งใบบิดในท่อไฟเพื่อเพิ่มการถ่ายเทความร้อน สำหรับตาราง (4.21) และ (4.22) ทางด้านล่างนี้ แสดงการผลการทดสอบการเพิ่มค่าของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในห้องเผาไหม้ในแต่ละเทอม ในท่อไฟเล็กกลับที่ 1 และ 2 ในหม้อน้ำชนิดลูกผสม

ตารางที่ 4.21 ผลการทดสอบการเพิ่มค่าของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในท่อไฟเล็กกลับที่ 1 ในแต่ละเทอม 2 เท่า โดยแสดงผลการเพิ่มของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมเป็น %

เทอมของสมการ	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (U) หลังจากเพิ่มค่า สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (h) 2 เท่า (W/m^2K) $U_{initial}$ = 44.17 W/m^2K	การเพิ่มขึ้นของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (%)	หมายเหตุ
Term 1	86.32	95.43	เพิ่ม h_i ของการพาความร้อนไอเสีย
Term 3	44.2	0.07	เพิ่ม h_o ของการพาความร้อนด้านน้ำ

ตารางที่ 4.22 ผลการทดสอบการเพิ่มค่าของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในท่อไฟเล็กกลับที่ 2 ในแต่ละเทอม 2 เท่า โดยแสดงผลการเพิ่มของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมเป็น %

เทอมของสมการ	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (U) หลังจากเพิ่มค่า สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (h) 2 เท่า (W/m^2K) $U_{initial}$ = 47.6 W/m^2K	การเพิ่มขึ้นของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (%)	หมายเหตุ
Term 1	94.86	99.35	เพิ่ม h_i ของการพาความร้อนไอเสีย
Term 3	47.75	0.32	เพิ่ม h_o ของการพาความร้อนด้านน้ำ

จากตารางที่ (4.21) และ (4.22) จะเห็นได้ว่า อิทธิพลของการถ่ายเทความร้อนอยู่ในเทอมที่ 1 ของการพาความร้อนไอเสีย โดยการเพิ่มค่า h_i สองเท่าส่งผลมากต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม การติดตั้งใบบิดเพื่อเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อจะช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้ แต่ข้อควรระวังของการทดลองเพิ่มค่า h_i และ h_o ในสเปรทชีทคือ ในความเป็นจริงแล้วการเพิ่มเพียง 1.1-1.3 เท่าก็เพียงพอต่อการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในหม้อน้ำแล้ว การทดสอบดังกล่าวต้องระวังในส่วนของการคำนวณค่าอุณหภูมิที่ทางออกของท่อไฟซึ่งเป็นการคำนวณแบบวนซ้ำ หากไม่กำหนดขอบเขตการ

คำนวณไว้ จะส่งผลให้ค่าความร้อนที่คำนวณออกมาสูงเกินความเป็นจริง และทำให้ผลการคำนวณคลาดเคลื่อน การทดลองเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเป็นการแสดงให้ทราบถึงอิทธิพลของการถ่ายเทความร้อนในแต่ละเทอมซึ่งหากต้องการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนจริงๆจำเป็นต้องมีสมการความสัมพันธ์การเพิ่มการถ่ายเทความร้อน เช่นสมการความสัมพันธ์ของการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนจากการติดครีบหรือใบบิดเพิ่ม เพื่อตรวจสอบการเพิ่มของการถ่ายเทความร้อนที่แม่นยำ และต้องพัฒนาในส่วนของการคำนวณอุณหภูมิเปลวไฟ และอุณหภูมิไอเสียในห้องเผาไหม้ด้วย เพราะในด้านการตรวจสอบหม้อน้ำสามารถใช้ค่าจากการวัดอุณหภูมิห้องเผาไหม้จากหม้อน้ำจริงได้ แต่สำหรับการออกแบบนั้นไม่สามารถนำค่าดังกล่าวมาเทียบได้ เพราะฉะนั้นหากต้องการพัฒนาสเปรทชีทสำหรับการออกแบบหม้อน้ำชนิดลูกผสมด้วยนั้นต้องแก้ไขในส่วนของสูตรคำนวณอุณหภูมิห้องเผาไหม้

4.3 สเปรทชีทคำนวณพื้นที่การถ่ายเทความร้อนของหม้อน้ำชนิดท่อไฟ

ในหัวข้อนี้ แสดงวิธีการตรวจสอบสมรรถนะของสเปรทชีทตามบทที่ 3 ในหัวข้อที่ 3.4.2 ตามผังงานการทำงานของสเปรทชีท โดยมีจุดประสงค์ดังต่อไปนี้

- พัฒนาสเปรทชีทดังกล่าวเพื่อเป็นเครื่องมือสำหรับออกแบบหม้อน้ำ
- พัฒนาสเปรทชีทเพื่อออกแบบพื้นที่การถ่ายเทความร้อนของหม้อน้ำ
- ใช้ผลการวิเคราะห์สเปรทชีท และปัจจัยที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนในหัวข้อ 4.1 และ 4.2 สำหรับเป็นต้นแบบในการพัฒนาสเปรทชีทคำนวณพื้นที่การถ่ายเทความร้อน

4.3.1 การประยุกต์ใช้งานสเปรทชีทเพื่อออกแบบหม้อน้ำ

ในหัวข้อนี้จะตรวจสอบสมรรถนะของสเปรทชีทโดยเทียบระหว่างพื้นที่การถ่ายเทความร้อนจริงในหม้อน้ำ กับการออกแบบที่ถูกคำนวณโดยสเปรทชีท โดยการผังงานของสเปรทชีทจะแตกต่างจากสเปรทชีทตรวจสอบสมรรถนะทางความร้อนของหม้อน้ำ แต่ใช้สมการความสัมพันธ์ของแต่ละตัวแปร และสมมติฐานเดียวกัน การคำนวณด้วยสเปรทชีทนี้จะแตกต่างกับสเปรทชีทตรวจสอบสมรรถนะทางความร้อน เนื่องจากตัวแปรที่ป้อนกับสเปรทชีทมีความแตกต่างกับสเปรทชีทในหัวข้อ 4.1 และ 4.2 เพราะผลลัพธ์ของการคำนวณถูกกำหนดโดยค่า ความร้อน(Q) เป็น % เพื่อแบ่งสัดส่วนความร้อนในแต่ละส่วนของหม้อน้ำ และกำหนดค่า ความดันลด (Pressure drop) ที่สามารถรับได้ในแต่ละส่วน โดยค่าความดันลดจะส่งผลต่อความเร็วที่แก๊สวิ่งผ่านภายในท่อ ส่งผลต่อค่า ตัวเลขนัชเซลท์ (Nesselt number) โดยตรงส่งผลให้พื้นที่การถ่ายเทความร้อนที่คำนวณได้จากสเปรทชีท โดยสรุปออกมาได้ดังตารางที่ (4.23) โดยตารางดังกล่าวแสดงตัวแปรที่จำเป็นต้องคอยปรับค่าหลังจากป้อนตัวแปรตามตาราง ในบทที่ 3 ตารางที่ (3.6) และ (3.7) เพื่อใช้ในการออกแบบพื้นที่การถ่ายเทความร้อน

ตารางที่ 4.23 อิทธิพลของตัวแปรในการออกแบบหม้อน้ำชนิดท่อไฟ

ตัวแปร	อิทธิพลของตัวแปร
สัดส่วนการถ่ายเทความร้อน (%)	ปริมาณพลังงานทั้งหมดที่ใช้สำหรับต้มน้ำนั้น จะถูกแบ่งเป็นสัดส่วนความร้อนในแต่ละส่วนของหม้อน้ำ การปรับสัดส่วนการถ่ายเทความร้อน ส่งผลต่ออุณหภูมิเฉลี่ยของ

	หม้อน้ำส่วนนั้นๆ ทำให้คุณสมบัติของไอเสียเปลี่ยนแปลงไปส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (U) และมีผลต่อการคำนวณพื้นที่การถ่ายเทความร้อน ทั้งในท่อไฟใหญ่ และท่อไฟเล็ก
ความดันลด (Pa)	ความดันลดแปรผันตรงกับความเร็วในท่อไฟ หากกำหนดความดันลดสูง ความเร็วในท่อจะสูงตามทำให้ตัวเลขนัซเซลท์ (Nusselt number) สูงการถ่ายเทความร้อนยิ่งดี พื้นที่การถ่ายเทความร้อนที่ถูกออกแบบโดยสเปรทชีทจะมีพื้นที่น้อยลงตาม ความดันลดที่เพิ่มขึ้น การออกแบบจำเป็นต้องกำหนดค่าความดันลดสูงสุดที่เหมาะสมในแต่ละส่วนของหม้อน้ำ

สเปรทชีทคำนวณพื้นที่การถ่ายเทความร้อนถูกพัฒนาเพื่อเป็นเครื่องมือช่วยเหลือในการออกแบบหม้อน้ำ จากการกำหนดสัดส่วนทางความร้อน จากนั้นจึงกำหนดค่าความดันลด โดยค่าความดันลดสเปรทชีทพิจารณาการสูญเสียความดันหลักเพียงเท่านั้น (Major loss) ซึ่งหากพิจารณาภายในหม้อน้ำโดยละเอียดต้องพิจารณาในส่วนของการสูญเสียรอง (Minor loss) หลังจากกำหนดค่าดังกล่าวแล้ว จึงพิจารณาผลลัพธ์ดังต่อไปนี้คือ ความยาวท่อไฟใหญ่ มีผลต่อขนาดหม้อน้ำในแนวยาว และจำนวนท่อไฟเล็กกลับที่ 1 และ 2 โดยสามารถตรวจสอบความเหมาะสมของการออกแบบจำนวนท่อไฟเล็กได้จาก ASME Section 1 PG 52.2 [27] เป็นมาตรฐานของการเว้นระยะระหว่างท่อไฟเล็กแต่ละท่อเพื่อพิจารณาความเหมาะสมของขนาดหม้อน้ำ และในการออกแบบจำเป็นต้องพิจารณาถึงความแข็งแรง และวัสดุที่เลือกใช้ด้วย ซึ่งสเปรทชีทดังกล่าวยังไม่ครอบคลุมถึงเรื่องดังกล่าว เพราะฉะนั้นสเปรทชีทคำนวณการถ่ายเทความร้อนจึงเป็นเครื่องมือสำหรับช่วยเหลือการออกแบบซึ่งจะถูกพัฒนาต่อไปในอนาคตเพื่อให้สเปรทชีทครอบคลุมถึงส่วนอื่นของการออกแบบหม้อน้ำ

บทที่ 5
สรุปผลการพัฒนาสเปรทชีท

ในบทนี้จะกล่าวถึงการสรุปผลจากการพัฒนาสเปรทชีททั้งหมด 3 สเปรทชีทคือ สเปรทชีทตรวจสอบสมรรถนะทางความร้อนของหม้อน้ำชนิดท่อไฟ และหม้อน้ำชนิดลูกผสม กับสเปรทชีทคำนวณพื้นที่การถ่ายเทความร้อน

5.1 สรุปผลการพัฒนาสเปรทชีทตรวจสอบสมรรถนะทางความร้อนของหม้อน้ำชนิดท่อไฟ

5.1.1 สรุปผลการตรวจสอบสมรรถนะและความน่าเชื่อถือของสเปรทชีท

จากการตรวจสอบสมรรถของสเปรทชีทพบว่า การคำนวณความร้อนจากสเปรทชีทมีความคลาดเคลื่อนกับการถ่ายเทความร้อนในหม้อน้ำอยู่ 6.53 % ซึ่งสาเหตุของความคลาดเคลื่อนดังกล่าวเกิดจากสมมติฐานที่เลือกใช้ไม่ตรงกับปรากฏการณ์จริงในหม้อน้ำ และการแบ่งสัดส่วนในหม้อน้ำไม่ถูกต้อง เนื่องจากการคำนวณไม่รวมพื้นที่การถ่ายเทความร้อนที่ endplate ของหม้อน้ำ ซึ่งหากเป็นหม้อน้ำชนิดหลังเปียกพื้นที่ดังกล่าวถือเป็นพื้นที่รับความร้อนเช่นกัน การเพิ่มการคำนวณในพื้นที่ดังกล่าวจะลดความคลาดเคลื่อนลงได้ ในหม้อน้ำชนิดท่อไฟ หากใช้เชื้อเพลิงเป็นเชื้อเพลิงแข็ง อัตราการไหลของไอเสียนั้นจะไม่คงที่ โดยอัตราการไหลของก๊าซขึ้นอยู่กับพัดลม 2 ชนิดคือ พัดลมเป่า (Force draft fan) และ พัดลมดูดเขม่า (Soot blower หรือ Induce draft fan) ซึ่งจะต้องวิเคราะห์ถึงการสูญเสียความร้อนจากอากาศส่วนเกินที่ถ่ายเทความร้อนออกไปทางปล่องไอเสียด้วย หากวิเคราะห์อย่างละเอียด จะทำให้ทราบสาเหตุของความคลาดเคลื่อน และวิเคราะห์แนวทางการปรับแก้ให้มีความคลาดเคลื่อนลดลง

5.1.2 สรุปผลการวิเคราะห์อิทธิพลของการถ่ายเทความร้อน จากการคำนวณของสเปรทชีทในเทอมของค่า Overall heat transfer coefficient ในแต่ละส่วนของหม้อน้ำ

การถ่ายเทความร้อนในหม้อน้ำชนิดท่อไฟเกิดขึ้นในท่อไฟเล็กกว่า 70% และมีการถ่ายเทความร้อนในท่อไฟใหญ่ 30 % จากผลการวิเคราะห์อิทธิพลของการถ่ายเทความโดยการถ่ายเทความร้อนในท่อไฟใหญ่นั้นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของด้านน้ำ (h_o) มีอิทธิพลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมในท่อไฟใหญ่ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมขึ้นอยู่กับเทอมดังกล่าว โดยแนวทางการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อไฟใหญ่สามารถทำได้ เช่น การติดตั้งครีบทางด้านนอกของท่อไฟใหญ่เพื่อเพิ่มการถ่ายเทความร้อน โดยจากผลการทดสอบเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวในด้านน้ำสองเท่าส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมเพิ่ม 44.8 % สำหรับในท่อไฟเล็กทั้งสองกลับนั้นอิทธิพลของการถ่ายเทความร้อนตรงกันข้ามกับในท่อไฟใหญ่ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของด้านไฟ (h_i) มีอิทธิพลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในด้านไฟ เช่นการติดตั้งใบบิด จะเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้ดี จากการทดสอบเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้านไฟเป็นสองเท่า พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมเพิ่ม 49.92 % ในท่อไฟเล็กกลับแรก และเพิ่ม 49.84 ในท่อไฟเล็กกลับที่สอง

5.2 สรุปผลการพัฒนาสเปรทชีทตรวจสอบสมรรถนะทางความร้อนของหม้อน้ำชนิดลูกผสม

5.2.1 สรุปผลการตรวจสอบสมรรถนะและความน่าเชื่อถือของสเปรทชีท

จากการตรวจสอบสมรรถของสเปรทชีทพบว่า การคำนวณความร้อนจากสเปรทชีทมีความคลาดเคลื่อนกับการถ่ายเทความร้อนในหม้อน้ำอยู่ 1.81 % มีความคลาดเคลื่อนอยู่ในขอบเขตที่สามารถรับได้ ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ที่เลือกใช้สำหรับหม้อน้ำชนิดลูกผสมสามารถใช้คำนวณสมรรถนะทางความร้อนในหม้อน้ำชนิดลูกผสมได้ การพัฒนาในแนวทางต่อไปคือเลือกใช้ความสัมพันธ์ที่ใกล้เคียงกับปรากฏการณ์จริงมากขึ้น เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของสเปรทชีท และความแม่นยำในการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนในแต่ละส่วนของหม้อน้ำ โดยเพิ่มการคำนวณในส่วนประกอบอื่นๆ อย่างอีโคโนไมเซอร์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ติดตั้งเพื่อให้ความร้อนกับน้ำป้อนเพื่อลดปริมาณการใช้เชื้อเพลิง และการแบ่งสัดส่วนการคำนวณให้มีความละเอียดยิ่งขึ้น หรือใช้สเปรทชีทดังกล่าวเป็นต้นแบบสำหรับพัฒนาเป็นสเปรทชีทที่สามารถคำนวณทิศทางของการแผ่รังสีความร้อนของเปลวไฟในห้องเผาไหม้ให้มีปรากฏการณ์ใกล้เคียงกับหม้อน้ำจริงมากยิ่งขึ้น เพื่อตรวจสอบการเพิ่มของการถ่ายเทความร้อนที่แม่นยำ และพัฒนาในส่วนของการคำนวณอุณหภูมิเปลวไฟ และอุณหภูมิไอเสียในห้องเผาไหม้ด้วย เพราะในด้านการตรวจสอบหม้อน้ำสามารถใช้ค่าจากการวัดอุณหภูมิห้องเผาไหม้จากหม้อน้ำจริงได้ แต่สำหรับการออกแบบนั้นไม่สามารถนำค่าดังกล่าวมาเทียบได้ เพราะฉะนั้นหากต้องการพัฒนาสเปรทชีทสำหรับการออกแบบหม้อน้ำชนิดลูกผสมด้วยนั้นต้องแก้ไขในส่วนของสูตรคำนวณอุณหภูมิห้องเผาไหม้

5.2.2 สรุปผลการวิเคราะห์อิทธิพลของการถ่ายเทความร้อน จากการคำนวณของสเปรทชีทในเทอมของค่า Overall heat transfer coefficient ในแต่ละส่วนของหม้อน้ำ

การถ่ายเทความร้อนทั้งหมดกว่า 75 % เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้ หากการถ่ายเทความร้อนในห้องเผาไหม้ไม่ดีจะส่งผลต่อการผลิตไอ โดยการถ่ายเทความร้อนในห้องเผาไหม้นั้นตั้งสมมติฐานให้เป็นการถ่ายเทความร้อนแบบแผ่รังสี กับการพาความร้อนโดยจากผลการคำนวณโดยสเปรทชีทพบว่าในห้องเผาไหม้ การถ่ายเทความร้อนทั้งหมด แบ่งสัดส่วนเป็นการแผ่รังสีความร้อน 65% และการพาความร้อน 35% แสดงว่าการถ่ายเทความร้อนในห้องเผาไหม้เป็นผลจากการแผ่รังสีความร้อนส่วนมาก จากสมมติฐานที่ใช้รวมถึงการคำนวณ view factor ของการถ่ายเทความร้อน ไม่ได้ใช้ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ที่เหมือนกับปรากฏการณ์จริง แต่จากผลการคำนวณโดยสเปรทชีทบอกถึงสัดส่วนของถ่ายเทความร้อนว่าส่วนใหญ่เป็นการแผ่รังสี หากใช้ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ที่ใกล้เคียงกับปรากฏการณ์จริงมากยิ่งขึ้น คาดการณ์ว่าการถ่ายเทความร้อนในห้องเผาไหม้จะสูงกว่า 65% และสำหรับการพาความร้อนในห้องเผาไหม้นั้น สมมติฐานที่ตั้งไว้ในการคำนวณเป็นแบบการพาความร้อนแบบบังคับ ในปรากฏการณ์จริงห้องเผาไหม้ที่มีขนาดใหญ่ การพาความร้อนแบบบังคับนั้น ไม่ได้ถ่ายเทผ่านผิวท่อน้ำทุกท่อ เนื่องจากการติดตั้งท่อน้ำแนวตั้งขนานกับกำแพง หากใช้ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมกับปรากฏการณ์จริง คาดการณ์ว่าการถ่ายเทความร้อนในห้องเผาไหม้นั้นส่วนใหญ่จะเป็นการแผ่รังสีความร้อนมากกว่าการพาความร้อน การวิเคราะห์อิทธิพลของการถ่ายเทความร้อนนั้นพบว่าอิทธิพลของการถ่ายเทความร้อนอยู่ที่เทอมของ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้านไฟ

(h_i) โดยการทดสอบเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแบบแผ่รังสี และการพาความร้อนเพียงอย่างใดอย่างหนึ่งเป็นสองเท่านั้น เพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมเพิ่มขึ้น 60.14 % และ 34.58 % ตามลำดับ สำหรับในท่อไฟใหญ่นั้น จะแตกต่างกับกรณีของหม้อน้ำชนิดท่อไฟเนื่องจากมีการพาความร้อนเพียงอย่างเดียวโดยอิทธิพลต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมในท่อไฟใหญ่นั้นขึ้นอยู่กับทางด้านไฟมากกว่าด้านน้ำ โดยจากการทดสอบเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนทางด้านไฟ (h_i) และด้านน้ำ (h_o) ด้านใดด้านหนึ่ง เป็นสองเท่าพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากการเพิ่มค่า h_i และ h_o เพิ่ม 51.39 % และ 19.05 % ตามลำดับ การติดตั้งใบบิดภายในท่อไฟใหญ่ และครีบบนส่วนของท่อไฟใหญ่จะเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้ สำหรับท่อไฟเล็กอิทธิพลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนนั้นอยู่ที่ด้านไฟเช่นเดียวกับหม้อน้ำชนิดท่อไฟ แต่เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนส่วนใหญ่อยู่ในห้องเผาไหม้ ทำให้การทดสอบเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้านไฟเป็นสองเท่านั้น ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมเพิ่มขึ้นถึง 95-99 % การทดสอบดังกล่าวจะทำให้สเปรทชีทคำนวณความร้อนออกมาเกินกำหนด เพราะฉะนั้นผู้ใช้งานสเปรทชีทต้องระวัง เพราะผลการคำนวณจะคลาดเคลื่อนในส่วนของท่อไฟเล็ก ผู้พัฒนาแนะนำว่าให้ทดสอบเพียงแค่ 1.1-1.4 เท่าของ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในด้านไฟเดิม ก็เพียงพอแล้ว เพราะความร้อนส่วนใหญ่ในหม้อน้ำอยู่ในห้องเผาไหม้กว่า 75 % การทดสอบเพิ่มค่า h_i จะทำให้ความร้อนแสดงผลเกินขีดจำกัด และทำให้สเปรทชีทเกิดความผิดพลาดได้

5.3 สรุปผลการพัฒนาสเปรทชีทคำนวณพื้นที่การถ่ายเทความร้อนในหม้อน้ำชนิดท่อไฟ

การพัฒนาสเปรทชีทเพื่อทดสอบสมรรถนะทางความร้อนเป็นส่วนหนึ่งของการพัฒนาเพื่อใช้สำหรับการออกแบบ จากการนำสูตรที่ใช้ในสเปรทชีททดสอบสมรรถนะมาประยุกต์สำหรับการออกแบบนั้นพบว่า นอกจากขนาดของหม้อน้ำ ความดันไอ อุณหภูมิน้ำป้อน ชนิดเชื้อเพลิง ประสิทธิภาพหม้อน้ำ อัตราการผลิตไอ เพื่อเป็นตัวแปรตั้งต้นสำหรับคำนวณจำนวนท่อไฟเล็กแล้ว ค่าที่ส่งผลกับผลการคำนวณคือ สัดส่วนความร้อน (%) และความดันลด (Pressure drop) การกำหนดสัดส่วนทางความร้อนมีผลต่อจำนวนท่อ และการกำหนดความดันลดส่งผลต่อความเร็วไอเสีย ส่งผลต่อการคำนวณจำนวนท่อ ซึ่งในขั้นตอนแรกของการพัฒนาสเปรทชีทออกแบบพื้นที่การถ่ายเทความร้อนนั้น ออกแบบให้สัดส่วนความร้อนเป็นเพียงตัวแปรเดียวที่ส่งผลต่อจำนวนท่อ แต่จากการพัฒนา และศึกษาเพิ่มเติมพบว่า หากไม่พิจารณาในผลจากความดันลด จะส่งผลให้ไม่มีค่าใดมากำหนดความเร็วของไอเสีย ส่งผลให้ผลการคำนวณแบบวนซ้ำไม่ลู่เข้าหาคำตอบ จึงต้องใช้ค่าความดันลดสูงสุดที่สามารถรับได้ ในแต่ละส่วนของหม้อน้ำ เพื่อควบคุมความเร็วของไอเสีย ซึ่งผู้พัฒนาให้ความคิดเห็นว่า การกำหนดค่าดังกล่าวควรใช้สเปรทชีทจำลองการไหลในการทดสอบค่าความดันลดที่เหมาะสมทั้งการสูญเสียหลัก(Major loss) และการสูญเสียรอง (Minor loss) จึงจะสามารถคำนวณพื้นที่การถ่ายเทความร้อนที่เหมาะสมได้อย่างถูกต้อง เนื่องจากสเปรทชีทคำนวณออกมาเพียงจำนวนท่อที่จำเป็น แต่สิ่งที่ต้องพิจารณาเพิ่มคือการเว้นระยะของท่อแต่ละท่อซึ่งการเว้นระยะดังกล่าวต้องเป็นไปตามมาตรฐาน ASME Section 1 PG 52.2 [27] การพัฒนาสเปรทชีทคำนวณการถ่ายเทความร้อนนั้นเป็นเครื่องมือสำหรับออกแบบเพียงส่วนหนึ่งเท่านั้น การออกแบบทั้งหมดต้องใช้เครื่องมือ และมาตรฐานการออกแบบ เพื่อการออกแบบหม้อน้ำจะมีความถูกต้อง และปลอดภัยสำหรับการใช้งาน

5.4 ข้อเสนอแนะในการพัฒนาสเปรทชีท

การตรวจสอบสมรรถนะของสเปรทชีทนั้นนอกจากการเทียบผลการคำนวณกับปริมาณความร้อนที่ใช้จริงแล้วยังมีอีกส่วนหนึ่งที่ต้องตรวจสอบเพิ่มเติมนั่นก็คือ อุณหภูมิของแต่ละส่วนในหม้อน้ำจากการคำนวณ เพราะเป็นปัจจัยหลักในการออกแบบหม้อน้ำ กล่าวคือการแบ่งสัดส่วนการถ่ายเทความร้อนในแต่ละส่วนอย่างเหมาะสม จะทำให้การออกแบบหม้อน้ำสมบูรณ์ยิ่งขึ้น โดยวิธีการตรวจสอบอีกวิธีหนึ่งคือการวัดอุณหภูมิในแต่ละส่วนของหม้อน้ำ ทั้งชนิดท่อไฟ และลูกผสม เพื่อนำอุณหภูมิดังกล่าว มาเทียบกับสเปรทชีท จะสามารถหาความคลาดเคลื่อนได้ละเอียดยิ่งขึ้น โดยหาความคลาดเคลื่อนในแต่ละส่วนของหม้อน้ำได้ จากผลการคำนวณจะเห็นได้ว่า ในหม้อน้ำชนิดท่อไฟการถ่ายเทความร้อนส่วนมากจะเกิดในท่อไฟเล็กกลับที่ 1 ในขณะที่หม้อน้ำชนิดลูกผสม การถ่ายเทความร้อนส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่ห้องเผาไหม้ ในปัจจุบันสเปรทชีทดังกล่าว สามารถคำนวณหาปริมาณความร้อนทั้งหมดที่ถ่ายเทในหม้อน้ำได้อย่างใกล้เคียงกับการทดลอง แต่ยังไม่สามารถคำนวณได้อย่างละเอียดในแต่ละส่วนของหม้อน้ำได้เนื่องจากข้อจำกัดในการทำวิจัย ผู้จัดทำไม่สามารถเจาะหม้อน้ำเพื่อติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิในแต่ละส่วนของหม้อน้ำได้ เนื่องจากเป็นหม้อน้ำของผู้ประกอบการ ผู้จัดทำจึงเพิ่มเติมขอเสนอแนะดังกล่าวนี้ เพื่อเป็นแนวทางสำหรับพัฒนาให้สเปรทชีทมีสมรรถนะที่ดีขึ้น โดยในงานวิจัยต่อไป ผู้จัดทำเสนอแนวทางว่า ควรทำให้สเปรทชีทนี้แบ่งสัดส่วนทางความร้อนในหม้อน้ำให้ใกล้เคียงกับหม้อน้ำจริงมากที่สุด เพื่อผู้ใช้งานสามารถวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของหม้อน้ำได้ ก่อนจะพัฒนาเป็นโปรแกรมสำเร็จสำหรับออกแบบหม้อน้ำอุตสาหกรรมต่อไปในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

[1] AB&CO TT Boilers. "**Calculation of Boiler Properties.**" [Online]. Available : http://www.abco.dk/ABCO_TT_BOILERS_Properties.xls. 2015.

[2] US Department of Energy . "**Steam System Modeler Tool(SSMT) Boiler Calculator.**" [Online].Available:https://www4.eere.energy.gov/manufacturing/tech_deployment/amo_steam_tool/equipBoiler. 2015.

[3] US Department of Energy . "**Steam System Modeler Tool(SSMT) Saturated Properties Calculator.**" [Online]. Available : https://www4.eere.energy.gov/manufacturing/tech_deployment/amo_steam_tool/propSaturated. 2015.

[4] US Department of Energy . "**Steam System Modeler Tool(SSMT) Saturated Properties Calculator.**" [Online]. Available : https://www4.eere.energy.gov/manufacturing/tech_deployment/amo_steam_tool/propSaturated. 2015.

[5] US Department of Energy . "**Steam System Modeler Tool(SSMT) Saturated Properties Calculator.**" [Online]. Available : https://www4.eere.energy.gov/manufacturing/tech_deployment/amo_steam_tool/propSaturated. 2015.

[6] HowStuffWorks . "**How Steam Engines Work Fire-tube Boiler.**" [Online]. Available : http://s.hswstatic.com/gif/steam-boiler-ft-a.gif. 2015.

[7] กรมโรงงาน กระทรวงอุตสาหกรรม. "**คู่มือการใช้งานและการดูแลรักษาหม้อน้ำ โครงการถ่ายทอดเทคโนโลยีด้านความปลอดภัยแก่สถานประกอบการ : ความปลอดภัยในการใช้งานหม้อน้ำ.**" [Online]. Available : http://php.diw.go.th/safety/wp-content/uploads/2015/01/boiler2.pdf. 2015. P.1-4 – 1-5

[8] Spirax Sarco . "**Water-tube Boiler.**" [Online]. Available : http://www2.spiraxsarco.com/images/resources/steam-engineering-tutorials/3/3/Fig_3_3_1.gif. 2015.

[9] HowStuffWorks . "**How Steam Engines Work Water-tube Boiler.**" [Online]. Available : http://s.hswstatic.com/gif/steam-boiler-wt-b.gif. 2015.

[10] Powerhouse Boiler equipment . "**Hurst boiler – Hybrid Solid Fuel.**" [Online]. Available : http://www.powerhouse.com/wp-content/uploads/2012/04/hurst-boiler-hybrid-solid-fuel-1.jpg. 2015

[11] Yunus A. Cengel, "The Thermal Resistance Concept", Heat transfer, Second edition, Mc-Graw-Hill, 2002, p. 130

[12] วรสิทธิ์ กาญจนกิจเกษม, *"การประมาณค่าในช่วงและการวิเคราะห์การถดถอย"*, ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข, พิมพ์ครั้งที่ 1, โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย:สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2557, 175-177

[13] Dunkle, R.V.: "Geometric Mean Beam Lengths for Radiant Heat Transfer Calculations," J., Heat Transfer, vol. 86, p. 75, Febuary 1964.

[14]] Hottel, H.C., 1931, "Radiant heat transmission between surfaces separated by non-absorbing media," *Trans. ASME,* vol. 53, FSP-53-196, pp. 265-273.

[15] Gnielinski, V., 1976, New Equation for Heat and Mass Transfer in Turbulent Pipe and Channel Flow, *Int. Chemical Engineering* v. 16, 359-368.

[16] Rohsenow, W.M. , : A Method of Correlation of Maximum Heat Flux Data for Surface Boiling Liquids, Trans. ASME, vol.74, p. 969, 1952.

[17] Mostinski, I. L., "Application of the Rule of Corresponding States for Calculation of Heat Transfer and Critical Heat Flux," Teploenergetika (Moscow, Russ. Fed.), vol. 4, 1963, pp. 66–71.

[18] M. Jakob. Heat Transfer. Vol. 1. New York: John Wiley & Sons, 1949.

[19] A. Zukauskas. "Heat Transfer from Tubes in Cross Flow." In Advances in Heat Transfer, ed. J. P. Hartnett and T. F. Irvine, Jr. Vol. 8. New York: Academic Press, 1972.

[20] Jallouk, P.A. , "Two-phase flow pressure drop and heat transfer characteristics of refrigerants in vertical tubes," Dissertation presented for the Doctor of Philosophy Degree, The University of Tennessee, Dec. 1974.

[21] Chen, J.C. "A correlation for boiling heat transfer to saturated fluids in convective flow," I&EC Process Design and Development, Vol. 5, No. 3, July 1966, pp. 322-329.

[22] [Foster, H.K and Zuber, N. , "Dynamic of vapor bubble and boiling heat transfer," AIChE Journal, Vol. 1, 1955, pp. 531-535.]

[23] [S.R. Turn, "Combustion and Thermochemistry", An Introduction to Combustion,

Second edition, Singapore : McGraw-Hill, 2000, p. 13-15.]

[24] S.R. Turn, "Combustion and Thermochemistry", An Introduction to Combustion, Second edition, Singapore : McGraw-Hill, 2000, p. 19-20,27-28.

[25] Louis Theodore, "Appendix B", Heat Transfer Applications for the Practicing Engineer, John Wiley & Sons, Inc., 2011, p. 624-626

[26] Yunus A. Cengel ,Michael A. Boles. "Appendix 1", Thermodynamics , Mc-Graw-Hill, 2011, p. 890-893

[27] ASME Section I PG 52.2

ภาคผนวก ก

รายงานตรวจสอบประสิทธิภาพหม้อน้ำ บริษัท แอล วาย อินดัสทรี จำกัด

รายงานสรุปผลการตรวจวัดประสิทธิภาพหม้อไอน้ำหลังปรับปรุง

บริษัท แอล.วาย. อินดัสตรีส์ จำกัด

(เชื้อเพลิง Wood Pellet)

ดำเนินการโดย

บริษัท โปร เอ็นเนอร์ยี แอนด์ เอ็นจิเนียริ่ง จำกัด

24 เมษายน 2558

ผลการต หม้อไอน้ำ

ข้อมูลสถานประกอบการ

สถานประกอบการ	บริษัท แอล.วาย. อินดัสตรีส์ จำกัด
ที่อยู่	124 ถนนพระยาสุเรนทร์ ตำบลบางชัน อำเภอคลองสามวา
	จังหวัดกรุงเทพฯ รหัสไปรษณีย์ 10510
	โทรศัพท์ 02 5170768 โทรสาร 02 5174888
ผลิตภัณฑ์ที่ผลิต	สายเทป เชือกสำหรับเสื้อผ้ากีฬา

ข้อมูลเบื้องต้นของหม้อไอน้ำ

ผู้ผลิต	BABCOCK-HANSA
รุ่น	-
ชนิดหม้อไอน้ำ	Fire Tube Boiler
ขนาดหม้อไอน้ำ	3 ตัน/ชั่วโมง (หม้อไอน้ำหมายเลข 1)
ชนิดเชื้อเพลิง	Biomass (Wood Pellet)
วันที่ทำการตรวจวัด	20 เม.ย. 2558

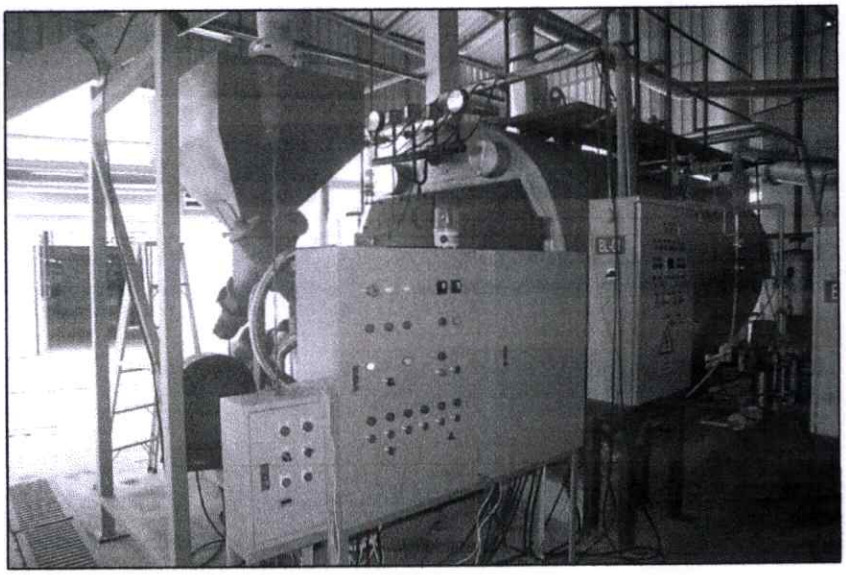
หลักการตรวจวัดและวิเคราะห์ผล

หลักการตรวจวัดเพื่อวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ และประสิทธิภาพการเผาไหม้เชื้อเพลิง จะทำการตรวจวัดและบันทึกข้อมูลเพื่อใช้ประกอบการคำนวณ ดังนี้

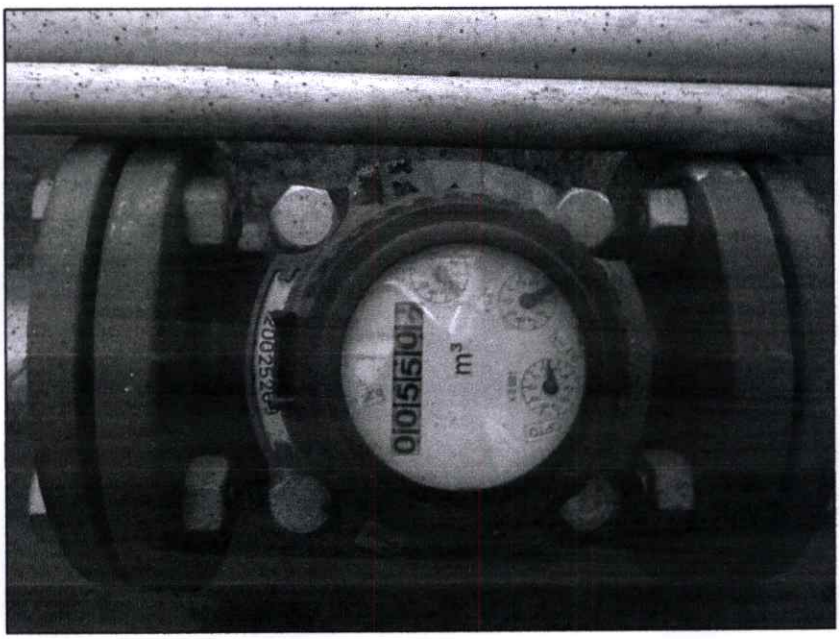
- ปริมาณน้ำป้อนเฉลี่ย : บันทึกข้อมูลตัวเลขมิเตอร์น้ำป้อนเข้าหม้อไอน้ำแต่ละวัน และนำมาคำนวณหาปริมาณน้ำป้อนเฉลี่ย
- ชั่วโมงการทำงานของหม้อไอน้ำ : บันทึกเวลาเปิด-ปิดหม้อไอน้ำแต่ละวัน และนำมาคำนวณหาระยะเวลาที่หม้อไอน้ำทำงาน
- อุณหภูมิน้ำป้อนหม้อไอน้ำเฉลี่ย : ตรวจวัดอุณหภูมิน้ำป้อนที่อยู่ในถังพักน้ำป้อนโดยใช้เครื่องวัดอุณหภูมิแบบดิจิตอล (Digital Thermometer) วัดอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลาต่างๆ ของวัน และนำมาคำนวณหาอุณหภูมิน้ำป้อนเฉลี่ย เปรียบเทียบกับค่าที่อ่านได้จากเกจวัดอุณหภูมิที่ถังพักน้ำป้อน
- ความดันไอน้ำที่ผลิตได้ : บันทึกค่าความดันที่อ่านได้จากเกจวัดความดันที่หม้อไอน้ำ และตรวจสอบกับค่าความดันที่กำหนดไว้ที่สวิทช์ควบคุมความดัน (Pressure switch) ณ ช่วงเวลาต่างๆ ของวัน และนำมาคำนวณหาความดันไอน้ำเฉลี่ย
- อัตราเชื้อเพลิงที่ป้อนให้หม้อไอน้ำ : บันทึกจำนวน big pack ของเชื้อเพลิงที่ใช้ในช่วงเวลาที่ทดสอบ 100 ชั่วโมง และนำมาคำนวณหาอัตราการใช้เชื้อเพลิงเฉลี่ย
- อัตราน้ำโบลว์ดาวน์ที่ระบายทิ้ง : ตรวจวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อโบลว์ดาวน์เพื่อนำมาหาค่าอัตราน้ำที่โบลว์ดาวน์จากกราฟ
- ปริมาณออกซิเจนในไอเสีย : ตรวจวัดปริมาณออกซิเจนในไอเสียโดยใช้เครื่องวัดและวิเคราะห์ไอเสีย (Flue Gas Analyzer) นำมาคำนวณหาค่าปริมาณออกซิเจนเฉลี่ยในช่วงเวลาที่เกิดการเผาไหม้
- อุณหภูมิไอเสียและอุณหภูมิแวดล้อม : ตรวจวัดอุณหภูมิไอเสียและอุณหภูมิแวดล้อมโดยใช้เครื่องวัดและวิเคราะห์ไอเสีย (Flue Gas Analyzer) นำมาคำนวณหาค่าอุณหภูมิไอเสียเฉลี่ยและอุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยในช่วงเวลาที่เกิดการเผาไหม้
- ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และ ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ : ตรวจวัดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์โดยใช้เครื่องวัดและวิเคราะห์ไอเสีย (Flue Gas Analyzer) นำมาคำนวณหาค่าเฉลี่ยจากไอเสียที่ออกจากหม้อไอน้ำในช่วงเวลาที่เกิดการเผาไหม้

<u>หมายเหตุ</u> ในการคำนวณประสิทธิภาพการเผาไหม้ของหม้อไอน้ำ จะใช้ค่าตรวจวัดและวิเคราะห์ไอเสียที่ตรวจวัดในช่วง Low Fire เนื่องจากกระบวนการผลิตของโรงงานมีความต้องการใช้ไอน้ำปริมาณน้อย ทำให้หม้อไอน้ำทำงานในโหมด Low Fire เกือบตลอดเวลา

หม้อไอน้ำเชื้อเพลิงชีวมวล (หลังปรับปรุง)

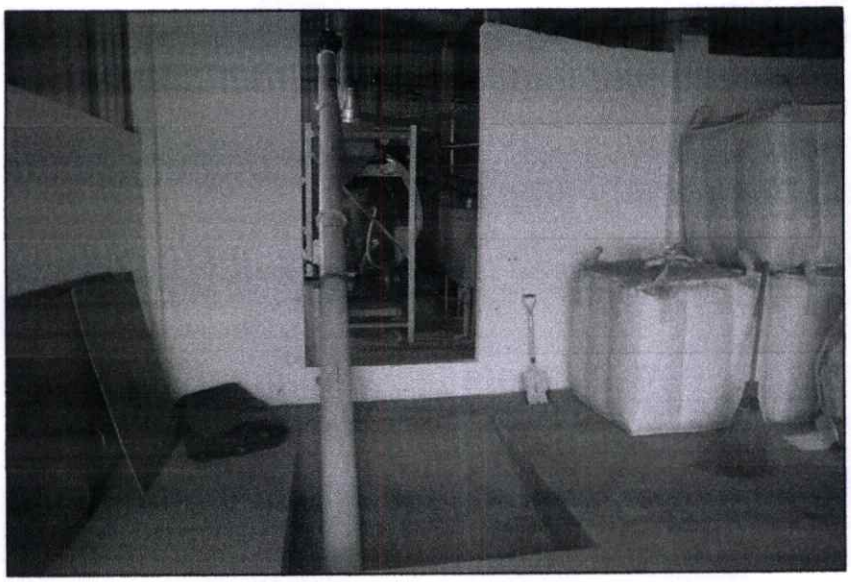


ตู้ควบคุมการทำงานหม้อไอน้ำ

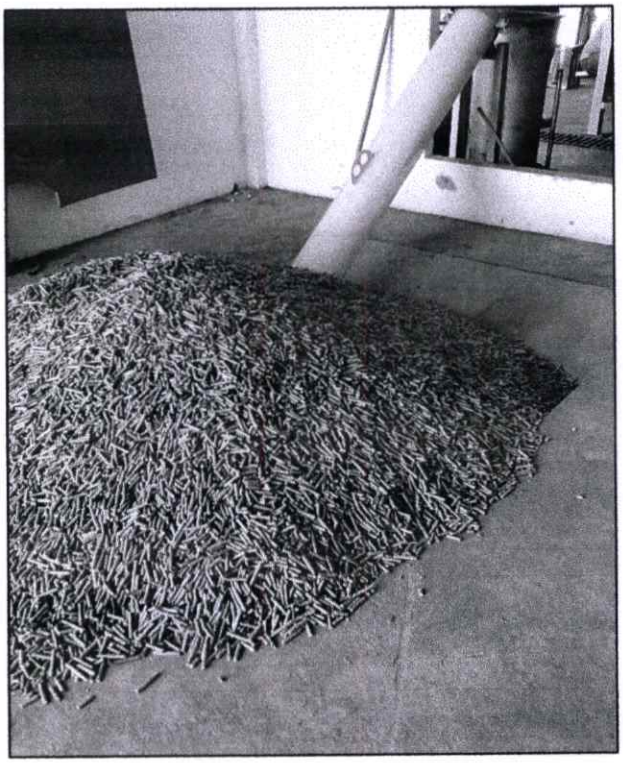


มิเตอร์บันทึกปริมาณน้ำป้อนเข้าหม้อไอน้ำ

เชื้อเพลิงชีวมวล (wood pellet)

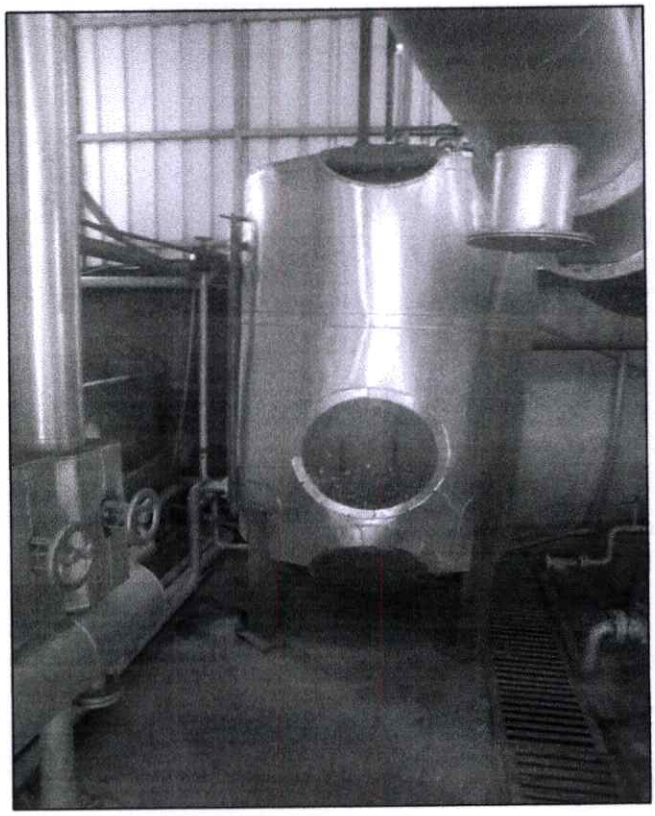


Big Pack บรรจุเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด ขนาด 1,000 kg

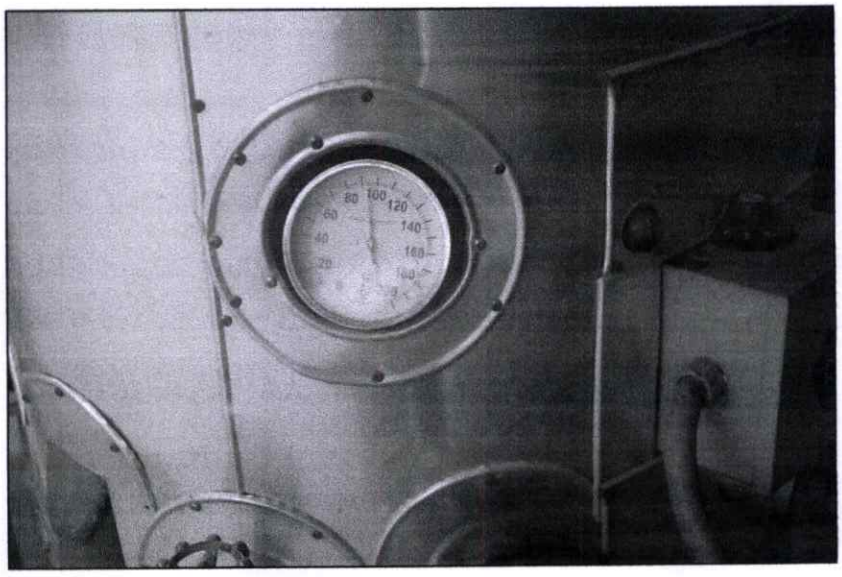


ที่บรรจุเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดรอป้อนเข้าถังพัก

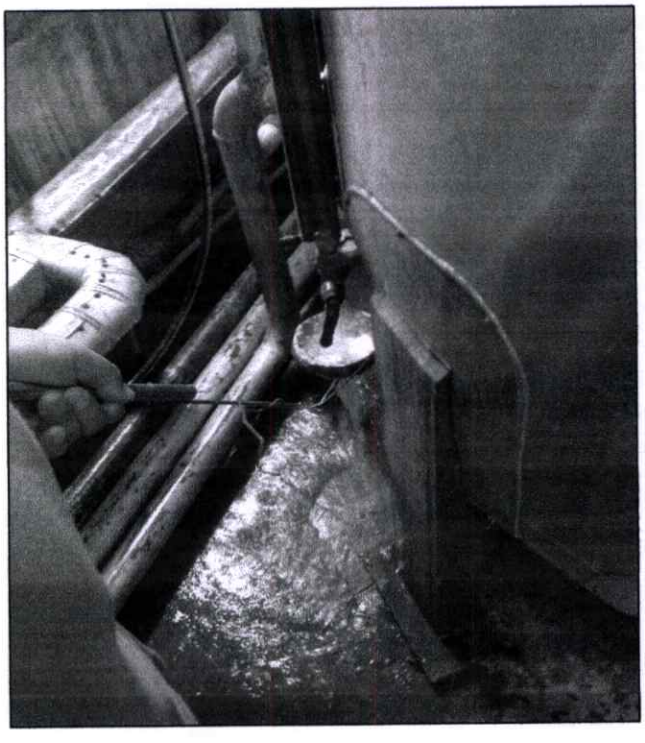
ถังพักเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดก่อนป้อนเข้าห้องเผาไหม้



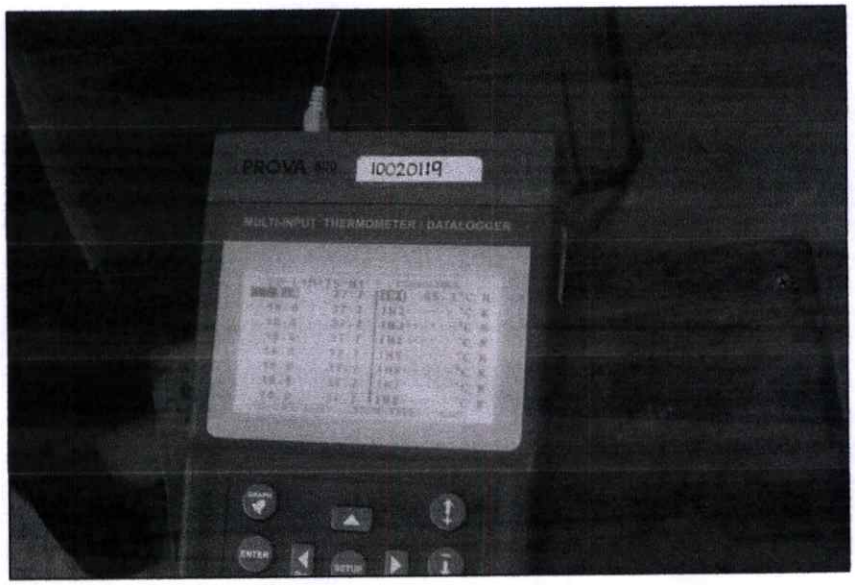
ถังพักน้ำป้อนหม้อไอน้ำ



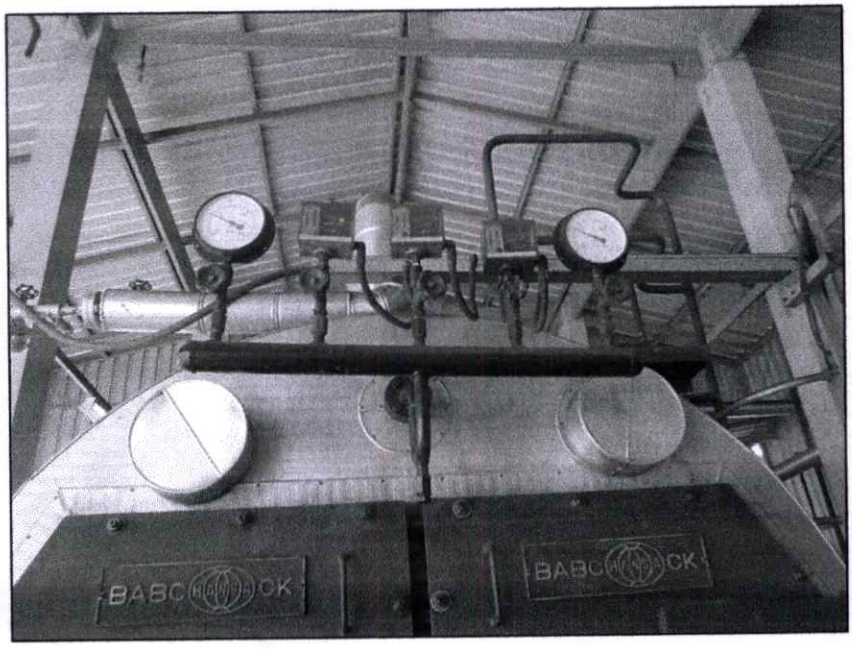
เกจวัดอุณหภูมิที่ถังพักน้ำป้อน



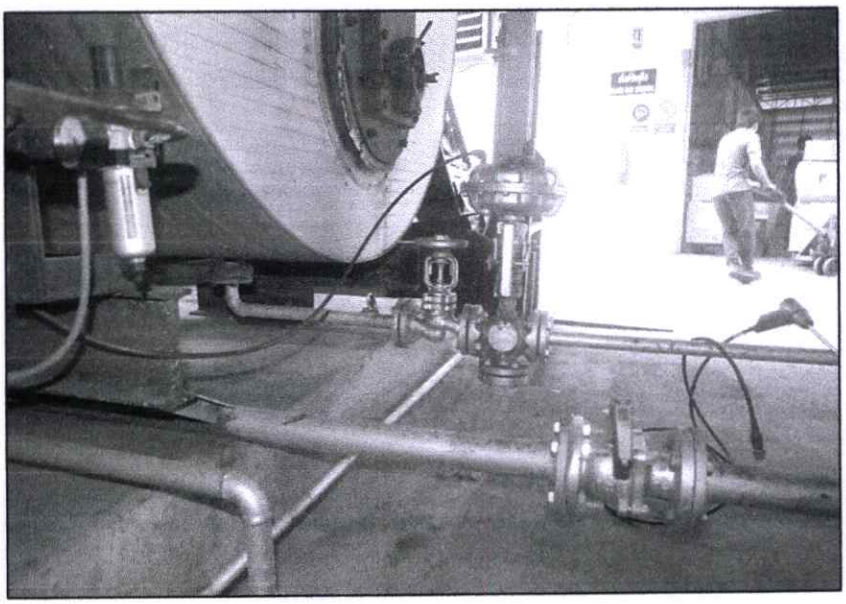
การตรวจวัดอุณหภูมิน้ำป้อนในถังพักน้ำป้อน



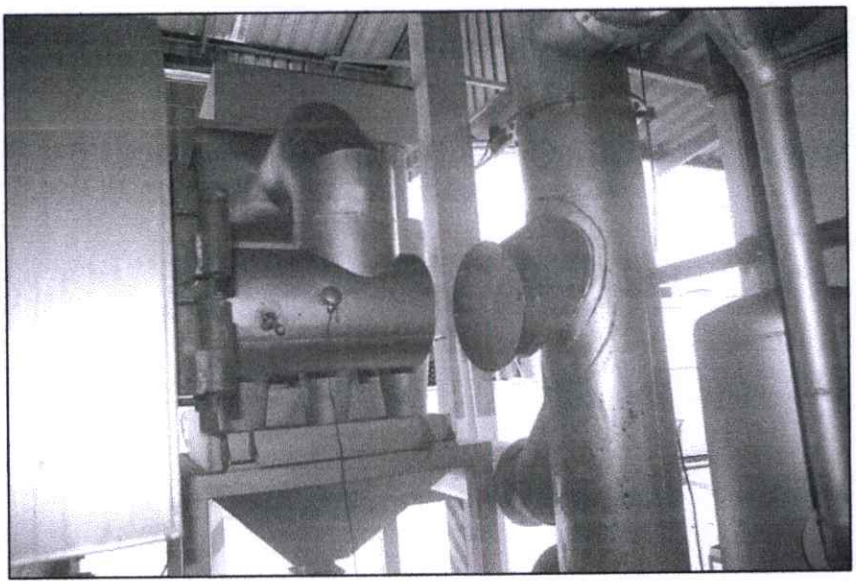
การบันทึกอุณหภูมิน้ำป้อนในถังพักด้วย Digital Thermometer



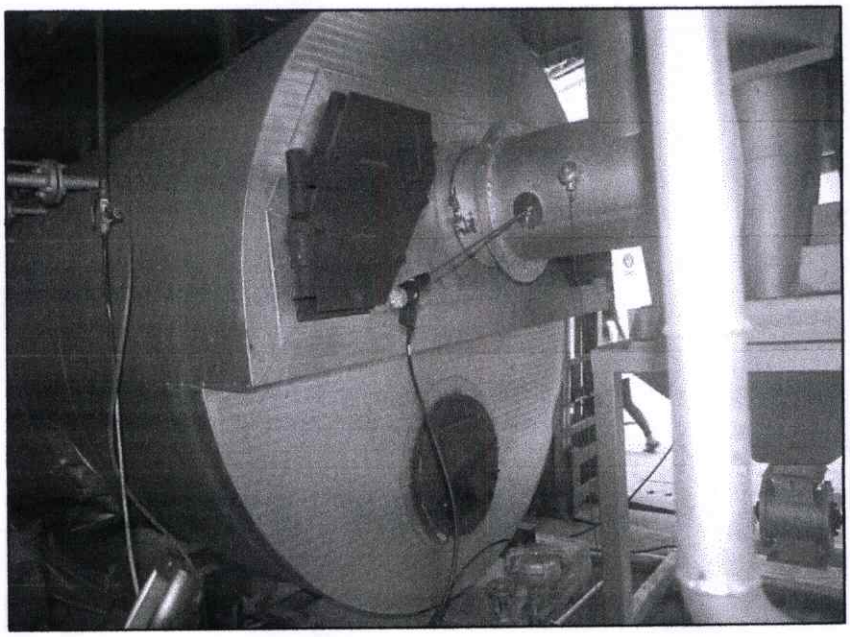
Pressure Switch และเกจวัดความดันไอน้ำที่หม้อไอน้ำ



ท่อโบลว์ดาวน์ของหม้อไอน้ำ (ขนาด 1")



ตำแหน่งตรวจวัดไอเสียที่ปล่อยจากหม้อไอน้ำ (ก่อนเข้าไซโคลน)



การติดตั้งเครื่องวัดประสิทธิภาพการเผาไหม้ (Flue Gas Analyzer)

บันทึกข้อมูลที่ตรวจวัดได้จากเครื่องวัดและวิเคราะห์ไอเสีย (Flue Gas Analyzer)

<u>การคำนวณค่าประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ (Boiler Efficiency)</u>

ประสิทธิภาพหม้อไอน้ำคำนวณโดยใช้วิธี Direct Method

ประสิทธิภาพหม้อไอน้ำ = (เอนธาลปีของไอน้ำที่ผลิตได้ – เอนธาลปีของน้ำป้อนเข้าหม้อไอน้ำ) x 100
ความร้อนจากเชื้อเพลิงที่ให้กับหม้อไอน้ำ

ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์

ข้อมูล	ค่าตรวจวัด/บันทึก	หน่วย
อัตราน้ำป้อนเฉลี่ย	0.392	m^3/hr
อุณหภูมิน้ำป้อนเฉลี่ย	76.367	°C
ความดันไอน้ำเฉลี่ย (P_{abs})	5.113	bar
อัตราน้ำที่โบลว์ดาวน์	14.460	kg/hr
อัตราเชื้อเพลิงที่ใช้เฉลี่ย	61.135	kg/hr
ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง (Wood Pellet)	17.795	MJ/kg

การคำนวณ

อัตราน้ำป้อนเข้าหม้อไอน้ำ	=	0.392	m^3/hr
อุณหภูมิน้ำป้อน	=	76.367	°C
ค่าปริมาตรจำเพาะของน้ำที่อุณหภูมิ 76.367 °C	=	0.001027	m^3/kg
อัตราน้ำป้อนเข้าหม้อไอน้ำ	=	0.392/0.001027	
	=	381.574	kg/hr
เอนธาลปีของน้ำที่อุณหภูมิ 76.367 °C	=	319.651	kJ/kg
เอนธาลปีของน้ำป้อนเข้าหม้อไอน้ำ	=	381.574 x 319.651	
	=	121,970.421	kJ/hr
ปริมาณไอน้ำที่ผลิตได้	=	อัตราน้ำป้อน – อัตราน้ำที่โบลว์ดาวน์	
	=	381.574 - 14.460	
	=	367.114	kg/hr

อุณหภูมิของไอน้ำที่ความดัน 5.113 bar	=	152.69	°C
เอนธาลปีของไอน้ำที่อุณหภูมิ 152.69 °C	=	2,749.623	kJ/kg
เอนธาลปีของไอน้ำที่ผลิตได้	=	367.114 x 2,749.623	
	=	1,009,424.834	kJ/hr
ความร้อนจากเชื้อเพลิงที่ให้กับหม้อไอน้ำ	=	61.135 x 17,795	
	=	1,087,884.734	kJ/hr

ประสิทธิภาพหม้อไอน้ำ

$$= \frac{(\text{เอนธาลปีของไอน้ำที่ผลิตได้} - \text{เอนธาลปีของน้ำป้อนเข้าหม้อไอน้ำ})}{\text{ความร้อนจากเชื้อเพลิงที่ให้กับหม้อไอน้ำ}} \times 100$$

$$= \frac{(1009,424.834 - 121,970.421)}{1,087,884.734} \times 100$$

= 81.567 %

หมายเหตุ ประสิทธิภาพหม้อไอน้ำหลังปรับปรุงมีค่ามากกว่าก่อนปรับปรุง 4.255% โดยอุณหภูมิไอเสียที่ปล่อยออกจากหม้อไอน้ำหลังปรับปรุงมีค่าลดลงจาก 174.10 °C เป็น 161.73 °C

การคำนวณค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้ (Combustion Efficiency)

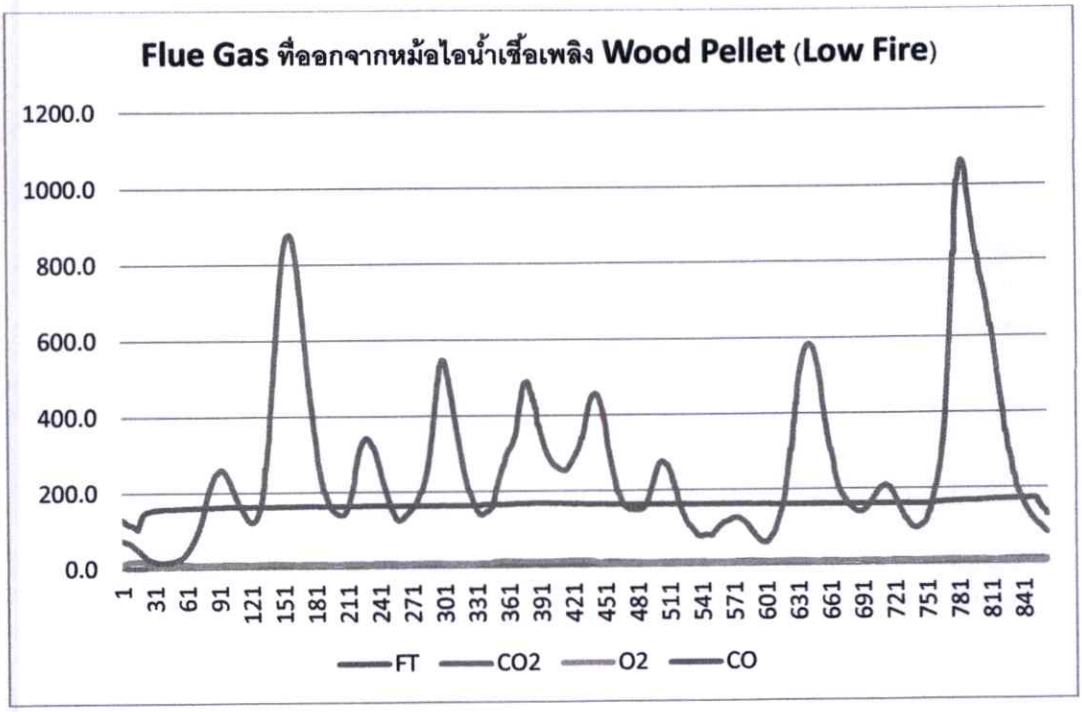
ประสิทธิภาพการเผาไหม้ = 100 – ร้อยละของความร้อนที่สูญเสียไปกับไอเสีย

โดยจะคำนวณหาปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปกับไอเสียจากสมการของ Rosin สำหรับเชื่อเพลิงแข็ง

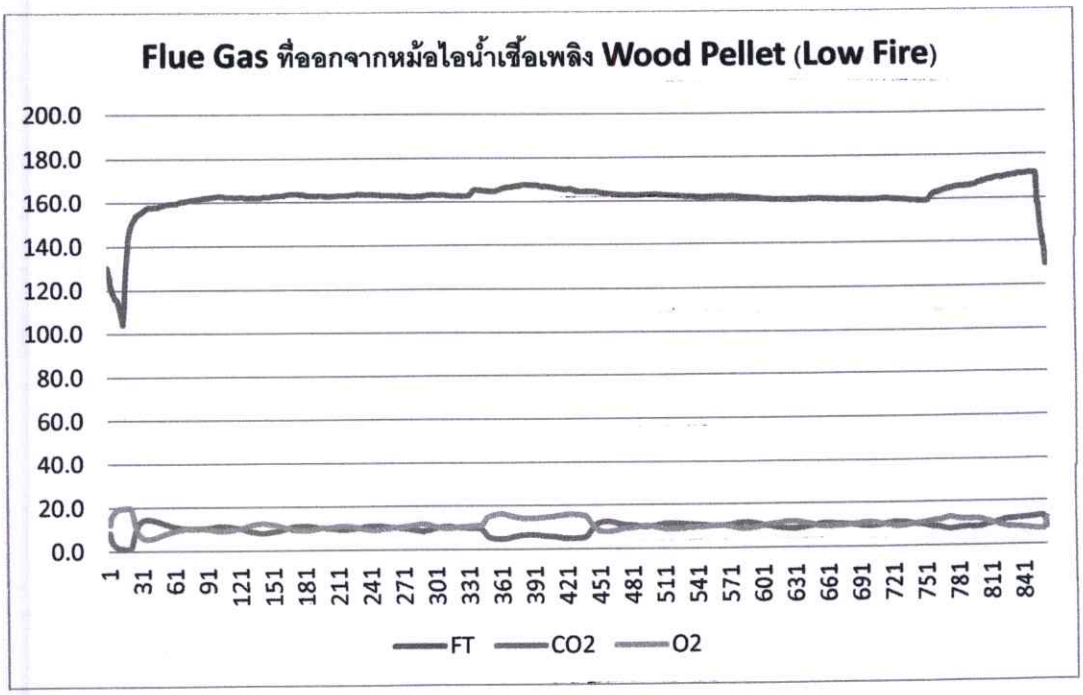
ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์

ข้อมูล	ค่าตรวจวัด/บันทึก	หน่วย
% ออกซิเจนในไอเสียเฉลี่ย	10.827	%
% คาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ย	9.640	%

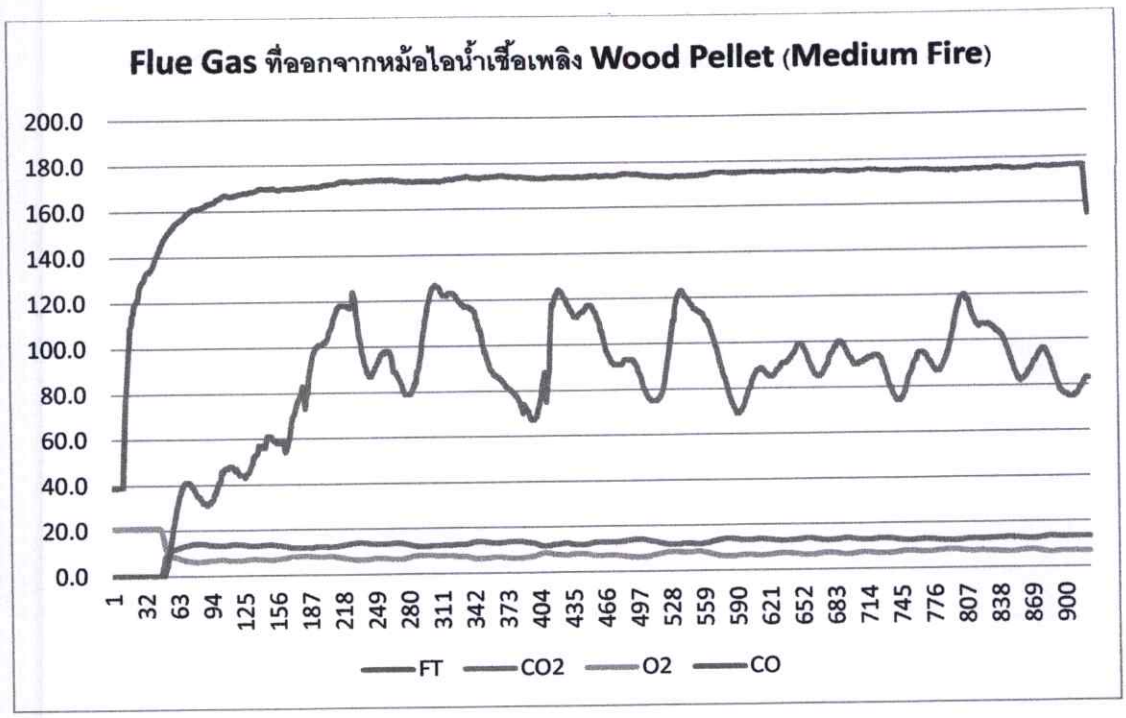
คาร์บอนมอนนอกไซด์เฉลี่ย	267.205	ppm
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์เฉลี่ย	-	ppm
ออกไซด์ของไนโตรเจนเฉลี่ย	-	ppm
อัตราเชื้อเพลิงที่ใช้เฉลี่ย	61.135	kg/hr
อุณหภูมิไอเสียเฉลี่ย	161.733	°C
อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเฉลี่ย	41.163	°C
ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง	4,251	kcal/kg
ค่าความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซเสียที่อุณหภูมิ 161.733 °C	0.3281	kcal/ Nm_3 °C



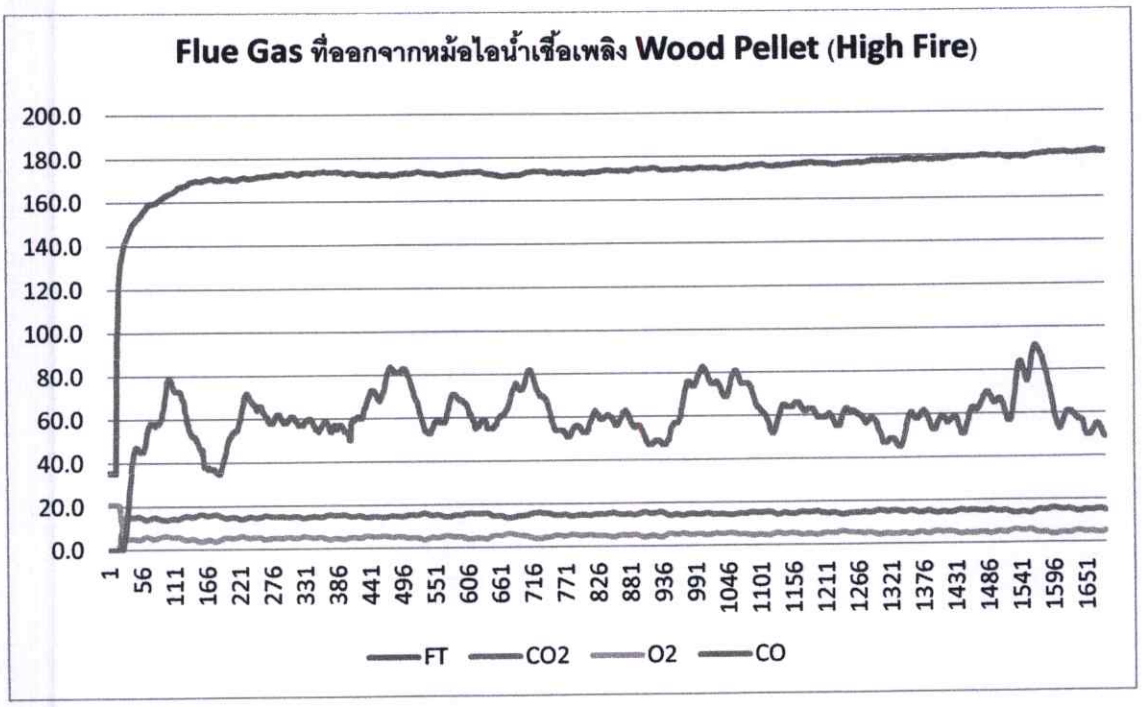
กราฟแสดงปริมาณ CO, O_2 , CO_2 และอุณหภูมิไอเสีย (Low fire)



กราฟแสดงปริมาณ O_2 , CO_2 และอุณหภูมิไอเสีย (Low fire)



กราฟแสดงปริมาณ CO, O_2 , CO_2 และอุณหภูมิไอเสีย (Medium fire)



กราฟแสดงปริมาณ CO, O_2 , CO_2 และอุณหภูมิไอเสีย (High fire) ช่วงเริ่มเปิดเครื่อง

การคำนวณ

ปริมาณอากาศโดยทฤษฎี (A_{os}) = (1.01 x LHV/1,000) + 0.5

= (1.01 x 4,251/1,000) + 0.5

= 4.794 Nm^3/kg fuel

ปริมาณก๊าซเสียโดยทฤษฎี (G_{os}) = (0.89 x LHV/1000) + 1.65

= (0.89 x 4,251/1,000) + 1.65

= 5.433 Nm^3/kg fuel

อัตราส่วนของอากาศ (M) = $21/(21-O_2)$

= 21/(21-10.827)

= 2.064

ปริมาณอากาศที่ใช้จริง (A) = MA_{os}

= 2.064 x 4.794

= 9.895 Nm^3/kg fuel

ปริมาณก๊าซเสียจริง (G) = $G_{os} + (M-1)A_{os}$

= 5.433 + ((2.064-1) x 4.794)

= 10.535 Nm^3/kg fuel

ปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปกับก๊าซเสียที่ปล่องไฟ (L_g) = $G \times Cp_g \times (T_g - T_a)$

= 10.535 x 0.3281 x (161.733 - 41.163)

= 416.721 kcal/kg fuel

ปริมาณความร้อนรวมของเชื้อเพลิง (Q_f)

= อัตราเชื้อเพลิงที่ป้อนหม้อไอน้ำ x ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง

= 61.135 x 4,251

= 259,886.463 kcal/hr

ปริมาณความร้อนรวมที่สูญเสียไปกับก๊าซเสีย (Q_l)

= อัตราเชื้อเพลิงที่ป้อนหม้อไอน้ำ x ปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปกับก๊าซเสียที่ปล่องไฟ

= 61.135 x 416.721

= 25,476.368 kcal/hr

ร้อยละของความร้อนที่สูญเสียไปกับไอเสีย

= ปริมาณความร้อนรวมที่สูญเสียไปกับก๊าซเสีย x 100

ปริมาณความร้อนรวมของเชื้อเพลิง

= 25,476.368/259,886.463 x 100

= 9.803 %

ประสิทธิภาพการเผาไหม้

= 100 – ร้อยละของความร้อนที่สูญเสียไปกับไอเสีย

= 100 - 9.803

= 90.197 %

<u>หมายเหตุ</u> ประสิทธิภาพการเผาไหม้เชื้อเพลิง Wood Pellet ของหม้อไอน้ำหลังปรับปรุงมีค่าน้อยกว่าก่อนปรับปรุงที่ใช้เชื้อเพลิงน้ำมันเตา(ชนิด A) 3.776 %

ภาคผนวก ข
ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

ME-NETT2015

The 29th Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand

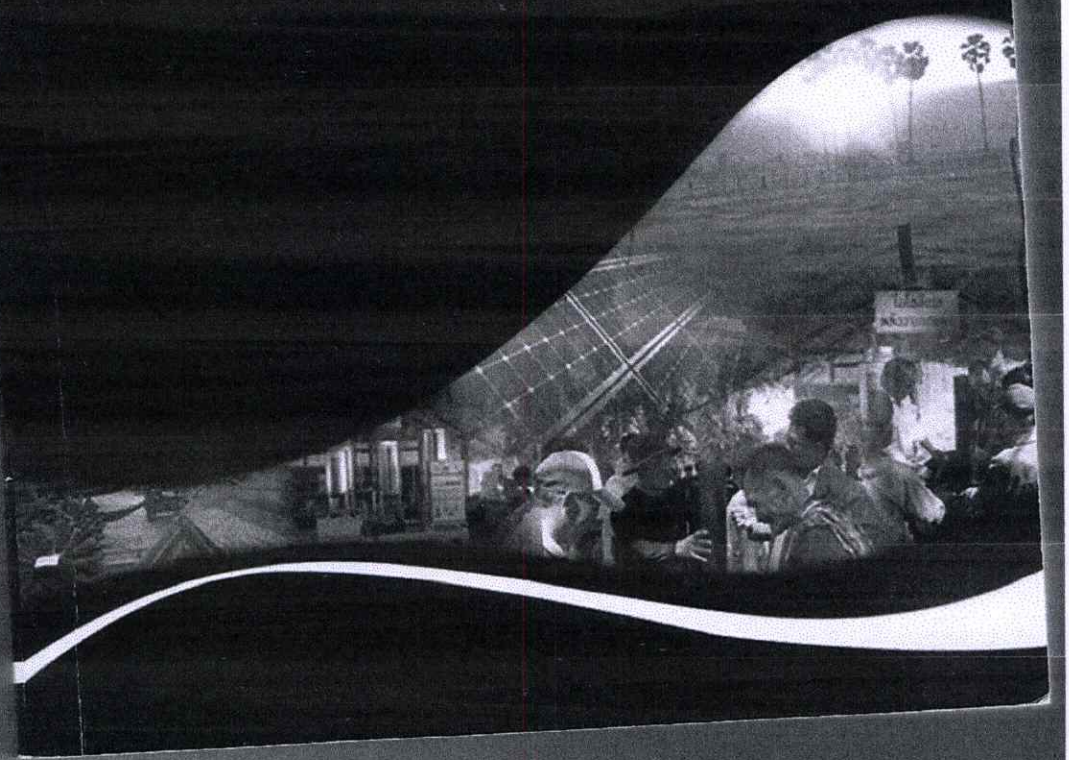
The Greenery Resort Khao Yai, Pak Chong, Nakhon Ratchasima

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกล แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 29

The 29th Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand

1 - 3 กรกฎาคม 2558 ณ โรงแรมเดอะกรีนเนอรี่ รีสอร์ท เขาใหญ่ อ.ปากช่อง จ.นครราชสีมา

งานวิจัยเพื่อท้องถิ่นไทย



TSF07

การพัฒนาโปรแกรมสำหรับการคำนวณพื้นที่การถ่ายเทความร้อนในหม้อไอน้ำชนิดท่อไฟ

A development of spreadsheet program for heat surface calculation in fire-tube boiler

นนท์ปวิธ คลังหิรัญ[1], จารุวัตร เจริญสุข*

[1] สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1 เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย 10520
*ติดต่อ: โทรศัพท์ : 023 264 197, โทรสาร : 023 264 198, E-mail : kcjarruw@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอโปรแกรมแบบสเปรทชีทที่พัฒนาขึ้นสำหรับคำนวณพื้นที่การถ่ายเทความร้อนของหม้อน้ำชนิดท่อไฟ โดยค่าพื้นที่การถ่ายเทความร้อนที่คำนวณได้ จะสัมพันธ์กับการกำหนดพารามิเตอร์ในการออกแบบ เช่น ความยาว เส้นผ่านศูนย์กลางท่อไฟใหญ่ เส้นผ่านศูนย์กลางและจำนวนท่อไฟเล็ก และกำลังการผลิตของไอน้ำที่ต้องการ เป็นต้น โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นใช้วิธีการคำนวณตามขั้นตอน ดังต่อไปนี้ 1.วิเคราะห์แยกธาตุของเชื้อเพลิงในการบวนการเผาไหม้ เพื่อหาคุณสมบัติของก๊าซไอเสีย 2. ใช้ทฤษฎีการเผาไหม้ เพื่อคำนวณปริมาณเชื้อเพลิงและปริมาณไอเสียที่ผ่านชุดท่อไฟ 3.ใช้ทฤษฎีการนำ การพา และแผ่รังสีความร้อน เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม และวิเคราะห์อัตราการถ่ายเทความร้อนที่จำเป็นต่อการเปลี่ยนสถานะของน้ำ ในกระบวนการคำนวณแบบวนซ้ำ จะทำให้ได้มาซึ่งจำนวนของท่อไฟเล็กในหม้อไอน้ำในที่สุด ความแม่นยำของโปรแกรม วัดผลจากวิธีการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนจากการคำนวณ กับประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนหม้อไอน้ำจริง เพื่อประเมินค่าความคลาดเคลื่อนของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น จากผลการทดสอบพบว่าประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำจากการคำนวณมีค่า 76 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพจากการตรวจวัดจากหม้อไอน้ำจริง 81.567 เปอร์เซ็นต์แล้วพบว่า ความคลาดเคลื่อนของโปรแกรมเท่ากับ 6.82 เปอร์เซ็นต์ โดยความคลาดเคลื่อนดังกล่าวเป็นผลจากการเผาไหม้จริง ซึ่งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของเชื้อเพลิง ส่งผลต่อความแม่นยำของโปรแกรมได้ หากเทียบกับการเผาไหม้ในทางทฤษฎี สมมติฐานของโปรแกรม กับการดำเนินการใช้หม้อน้ำจริงมีความแตกต่างกัน

คำหลัก: หม้อไอน้ำชนิดท่อไฟ, พื้นที่ถ่ายเทความร้อน, โปรแกรมเชิงตัวเลข

Abstract

This paper presents a spreadsheet program developed for heat transfer surface calculation in the fire-tube boiler. The obtained heating surface is related to the pre-defined parameters such as; the length and diameter of the furnace, the length and diameter of fire tube and required steam generation capacity etc. The program procedure involves 1) Ultimate and stoichiometry analyses of selected solid fuel for obtaining flue gas composition, 2) Utilization of combustion theory to obtain the amount of fuel and air under desired thermal throughput 3) Employment of the empirical and analytical models of convection, conduction and radiation mode of heat transfer as appropriate to determine the overall heat transfer and estimate the required surface for boiling mode of heat transfer. With iterative method, a number of tubes would finally be obtained. The predictive performance of this numerical program would then be assessed using the measured data from a fire tube boiler. The results showed that the efficiency of the boiler from the calculation is 76 percent compared with measured boiler efficiency is 81.567 percent. An error percentage is 6.82 percent because actual combustion depends on fuel compositions affected of program accuracy if compare with combustion in theory. A program assumptions are different if compare with actual boiler operation.

Keywords: Fire-tube boiler, Heat transfer surface, Numerical Program.

รายการสัญลักษณ์

$(\%\frac{m}{m})_{dry}$	เปอร์เซ็นต์โดยมวลปราศจากความชื้น
$(\%\frac{m}{m})_{ash}$	เปอร์เซ็นต์โดยมวลของขี้เถ้า
x_{fuel}	ปริมาณธาตุใด ๆในเชื้อเพลิงเชิงปริมาตร
LHV	ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง
V_{mois}	ปริมาตรของความชื้นในเชื้อเพลิง
$m_{perkgfuel}$	องค์ประกอบธาตุในหน่วยกิโลกรัมเชื้อเพลิง
$m_{h,perkgfuel}$	องค์ประกอบธาตุไฮโดรเจนในหน่วยกิโลกรัม เชื้อเพลิง
$m_{o,perkgfuel}$	องค์ประกอบธาตุออกซิเจนในหน่วยกิโลกรัม เชื้อเพลิง
$\dot{m}_{fluegas}$	อัตราการไหลของแก๊สไอเสีย
$\dot{m}_{fuel}$	อัตราการป้อนเชื้อเพลิง
AF_{actual}	อัตราส่วนอากาศ-เชื้อเพลิงจริง
AF_{stoi}	อัตราส่วนอากาศ-เชื้อเพลิงทฤษฎี
ΔT	ส่วนต่างอุณหภูมิ
$T_{ambient}$	อุณหภูมิบรรยากาศ
A_s	พื้นที่ผิวรับความร้อน
R_{th}	ค่าความต้านทางความร้อน
R_{tot}	ค่าความต้านทานความร้อนรวม
R_{rad}	ค่าความต้านทานความร้อนการแผ่รังสี
$R_{conv,o}$	ค่าความต้านทานความร้อนการพาความร้อนด้านนอก
$R_{conv,i}$	ค่าความต้านทานความร้อนการพาความร้อนด้านใน
R_{cond}	ค่าความต้านทานความร้อนการนำความร้อน
Q	ปริมาณพลังงานที่ต้องใช้ในการต้มน้ำ
$Q_{com-sat.liq}$	ปริมาณพลังงานที่ใช้ในการ ต้มน้ำจากสถานะของเหลวเป็นของเหลวอิ่มตัว
$Q_{sat.liq-sat.vapor}$	ปริมาณพลังงานที่ใช้ในการ ต้มน้ำจากสถานะของเหลวอิ่มตัวเป็นไออิ่มตัว
Q_{actual}	ความร้อนจากเชื้อเพลิงที่ให้หม้อไอน้ำ
eff	ประสิทธิภาพหม้อไอน้ำ
h_{boiler}	เอนธาลปีของไอน้ำที่ผลิตได้
$h_{w,input}$	เอนธาลปีของน้ำป้อนเข้าหม้อไอน้ำ
h_{fg}	เอนธาลปีของการระเหย
$C_{p_{avg}}$	ค่าความจุความร้อนจำเพาะ
U	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม
h	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน
h_{rad}	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของการแผ่รังสี
h_o	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของการพาความร้อนด้านนอก
h_i	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของการพาความร้อนด้านใน
k	ค่าสภาพนำความร้อนของวัสดุ
D_o	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก
D_i	เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน
Nu	ตัวเลขนัซเซิลท์
Re	ตัวเลขเรโนลด์
ε	สัมประสิทธิ์การแผ่รังสี
σ	ค่าคงที่สเตฟานส์-โบล์ทสมัน
T_s	อุณหภูมิผิว
T_{surr}	อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมโดยรอบ
ε_g	สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของแก๊ส
ε_c	สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์
ε_w	สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของไอน้ำ
$\Delta\varepsilon$	ส่วนต่างสัมประสิทธิ์การแผ่รังสี
C_c	แฟกเตอร์ค่าแก้ของแก๊สคาร์บอนได้ออกไซด์
C_w	แฟกเตอร์ค่าแก้ของไอน้ำ
C_l	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของของเหลว
Pr_l	ตัวเลขพรันด์เทิลของของเหลว
ΔT_x	ส่วนต่างอุณหภูมิของของเหลวกับอุณหภูมิอิ่มตัว
C_{sf}	ค่าคงที่ความตึงผิวของเหลว
q	ฟลักซ์ความร้อนต่อหน่วยพื้นที่
μ_l	ค่าความหนืดของของเหลว
g_c	ตัวประกอบการแปลง
$\sigma_{tension}$	ค่าแรงตึงผิวระหว่างของเหลวกับไอ

g	ค่าความเร่งจากแรงโน้มถ่วง
ρ_l	ความหนาแน่นของของเหลวอิ่มตัว
ρ_v	ความหนาแน่นของไออิ่มตัว
P	ความดัน
p_{cr}	ความดันวิกฤติ
P_r	ความดันรีดิวส์
F_p	แฟกเตอร์ค่าแก้ความดันรีดิวส์

1.บทนำ

การพัฒนาโปรแกรมคำนวณพื้นที่การถ่ายเทความร้อนในหม้อไอน้ำ ถูกพัฒนาเพื่อใช้สำหรับการออกแบบหม้อไอน้ำในส่วนของพื้นที่การถ่ายเทความร้อนทั้งในด้านน้ำ และด้านไฟ โดยที่ค่าของพื้นที่การถ่ายเทความร้อนจากการคำนวณ จะสัมพันธ์กับการกำหนดตัวแปรในการออกแบบหม้อไอน้ำ เช่น ความยาว เส้นผ่านศูนย์กลางท่อไฟใหญ่ เส้นผ่านศูนย์กลางและจำนวนท่อไฟเล็ก และกำลังการผลิตของไอน้ำที่ต้องการ โดยโปรแกรมดังกล่าวนำเสนอในรูปแบบของสเปรทชีท เพื่อเป็นต้นแบบของโปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับใช้งาน ในโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้หม้อไอน้ำเป็นเครื่องจักรต้นกำลัง หรือโรงไฟฟ้า รวมถึงใช้ในงานออกแบบหม้อไอน้ำ องค์ความรู้ที่ใช้ในการพัฒนาโปรแกรมใช้ การวิเคราะห์แยกธาตุของเชื้อเพลิงในการบวนการเผาไหม้ เพื่อหาคุณสมบัติของก๊าซไอเสีย [1] ใช้ทฤษฎีการเผาไหม้ เพื่อคำนวณปริมาณเชื้อเพลิงและปริมาณไอเสียที่ผ่านชุดท่อไฟ [2] ใช้ทฤษฎีการนำ การพา และแผ่รังสีความร้อน เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม และวิเคราะห์อัตราการถ่ายเทความร้อนที่จำเป็นต่อการเปลี่ยนสถานะของน้ำ [3] โดยตั้งสมมติฐานให้การถ่ายเทความร้อนไปสู่น้ำในหม้อไอน้ำมีลักษณะเป็น Nucleate pool boiling และพฤติกรรมการไหลของน้ำในท่อในส่วนของห้องเผาไหม้มีลักษณะเป็นการพาความร้อนแบบบังคับผสมกับการเดือด [4] นอกจากนี้ได้นำระเบียบวิธีเชิงตัวเลข เช่น วิธีการถดถอยหลายเชิงแบบกำลังสองน้อยที่สุด (Multiple Least Squares Regression) [5] สำหรับสร้างเส้นแนวโน้มจากกราฟค่าแก้ สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ วิธีการประมาณค่าในช่วงด้วยเส้นตรง (Linear Spline Interpolation) [6] สำหรับสร้างเส้นแนวโน้มจากกราฟความแตกต่างสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน (Delta epsilon) โดยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขดังกล่าวถูกใช้เพื่อคำนวณหาสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของแก๊สไอเสีย การพัฒนาโปรแกรมการคำนวณดังกล่าวเป็นคำนวณแบบวนซ้ำ เพื่อหาจำนวนท่อไฟเล็กที่เหมาะสมที่สุดในการออกแบบหม้อไอน้ำ ตามกำลังการผลิตไอน้ำที่ต้องการ ดังนั้นความแม่นยำของโปรแกรมวัดผลจากวิธีการเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนจากโปรแกรม กับพื้นที่ถ่ายเทความร้อนหม้อไอน้ำจริง เพื่อประเมินค่าประสิทธิภาพหม้อไอน้ำ เพื่อใช้ตรวจสอบความคลาดเคลื่อนของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น เพื่อปรับแก้โปรแกรมให้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น ก่อนพัฒนาเป็นโปรแกรมสำเร็จรูปในอนาคตต่อไป

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การวิเคราะห์แยกธาตุ (Dry basis)

การวิเคราะห์แยกธาตุ วิเคราะห์เพื่อหาองค์ประกอบโมเลกุลของไอเสีย เพื่อนำมาวิเคราะห์หาคุณสมบัติทางความร้อนของไอเสีย ก่อนนำไปวิเคราะห์ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนไปยังน้ำในหม้อไอน้ำ จากสมการการเผาไหม้ทางทฤษฎี (Stoicheometric) และสมการการเผาไหม้สัดส่วนอากาศมากกว่าเชื้อเพลิง (Lean combustion)

$$C_cH_hN_nO_oS_s + H_h.O_o. + a(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow bCO_2 + eH_2O + fSO_2 + gN_2 \quad (1)$$

องค์ประกอบของเชื้อเพลิงจะมีน้ำเป็นส่วนประกอบ หากจะทำมาวิเคราะห์แยกธาตุจำเป็นที่จะต้องวิเคราะห์เชิงปริมาตรโดยคิดเฉพาะเชื้อเพลิงไม่มีความชื้นสมการต่อไปนี้ [1]

$$(\%\frac{m}{m})_{dry} = \frac{(x_{fuel})(100)}{100-(V_{mois})} \quad (2)$$

จะได้องค์ประกอบเชื้อเพลิงแต่ละธาตุซึ่งประกอบด้วยคาร์บอน(C) ไฮโดรเจน(H) ไนโตรเจน(N) ออกซิเจน(O) ซัลเฟอร์(S) และ เถ้า (Ash) จากนั้นนำองค์ประกอบของธาตุดังกล่าวให้อยู่ในหน่วย มวลต่อกิโลกรัมเชื้อเพลิง [1]

$$m_{perkgfuel} = \frac{(\%\frac{m}{m})_{dry}(100-V_{mois})}{100} \quad (3)$$

และสำหรับธาตุไฮโดรเจน และออกซิเจนของน้ำที่อยู่ภายในเชื้อเพลิงในหน่วยมวลต่อกิโลกรัมเชื้อเพลิงสามารถหาได้จากสมการ [1]

$$m_{h,perkgfuel} = \frac{V_{mois}(\frac{2}{18})}{100} \quad (4)$$

$$m_{o,perkgfuel} = \frac{V_{mois}(\frac{16}{18})}{100} \quad (5)$$

การวิเคราะห์แยกธาตุ ทำให้ทราบถึงจำนวนโมลของแต่ละโมเลกุลในไอเสียของการเผาไหม้ทางทฤษฎี และการเผาไหม้จริง

$$C_cH_hN_nO_oS_s + H_h.O_o. + a(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow bCO_2 + eH_2O + fSO_2 + gN_2 + hO_2 \quad (6)$$

สมการดังกล่าวคือสมการการเผาไหม้แบบอากาศเกิน (Lean combustion) จะมีออกซิเจนที่เหลือจากการเผาไหม้ในไอเสีย เมื่อดุลสมการเสร็จสมบูรณ์จะทราบสัดส่วนโมล และสัดส่วนมวล ของแต่ละโมเลกุลของไอเสีย ใช้ข้อมูลดังกล่าวมาเขียนโปรแกรมโดยตัวแปรต้นคืออุณหภูมิของไอเสียซึ่งมาจากการคำนวณ และตัวแปรตามคือคุณสมบัติทั้งเชิงกล และทางความร้อนของไอเสีย

2.2 ทฤษฎีการเผาไหม้ การคำนวณปริมาณเชื้อเพลิงและปริมาณไอเสียที่ผ่านชุดท่อไฟ

อัตราการจ่ายเชื้อเพลิงคือปริมาณความร้อนที่ทำให้น้ำมีอุณหภูมิ ความดัน และสถานะที่ต้องการหารด้วยค่าความร้อนทางต่ำของเชื้อเพลิง (Low Heating Value) โดยตั้งสมมติฐานให้การเผาไหม้เชื้อเพลิงจนหมด ดังนั้นอัตราการไหลของไอเสีย หาค่าได้จากสมการดังต่อไปนี้ [1][2]

$$\dot{m}_{fuel} = \frac{Q}{LHV} \quad (7)$$

$$Q = \frac{Q_{com-sat.liq} + Q_{sat.liq-sat.vapor}}{\frac{eff}{100}} \quad (8)$$

$$\dot{m}_{fluegas} = (1 - \frac{(\%\frac{m}{m})_{ash}}{100})[(\dot{m}_{fuel}) + (AF_{actual})(\dot{m}_{fuel})] \quad (9)$$

โดยการคำนวณคิดเสมือนการเผาไหม้จริงเพราะฉะนั้นจะมีเถ้าเหลือจากการเผาไหม้ ไม่ถูกเผาไปด้วยจึงต้องมีตัวประกอบค่าแก้สำหรับสมการอัตราการไหลของไอเสีย สำหรับอุณหภูมิของไอเสีย และเปลวไฟแอเดียแบติคหาได้โดยสมการ [1]

จาก $$Q = \dot{m}C_{P_{avg}}\Delta T \quad (10)$$

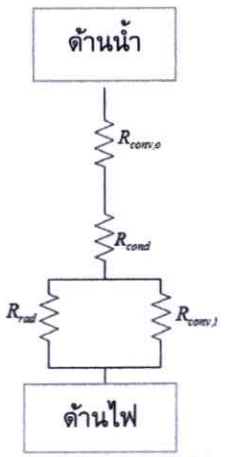
$$T_{fluegas} = \frac{Q}{\dot{m}_{fluegas@excessair}C_{P_{avg}}} + T_{ambient} \quad (11)$$

$$T_{flame} = \frac{Q}{\dot{m}_{fluegas@stoic}C_{P_{avg}}} + T_{ambient} \quad (12)$$

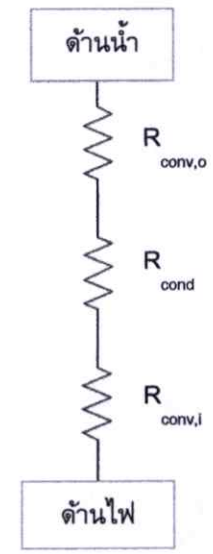
อุณหภูมิของไอเสียจะนำมาวิเคราะห์การพาความร้อน สำหรับอุณหภูมิเปลวไฟจะนำมาใช้วิเคราะห์การแผ่รังสีความร้อน ซึ่งสำหรับการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนวิเคราะห์เพื่อหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อย่อยถัดไป

2.3 ทฤษฎีการนำ การพา และแผ่รังสีความร้อน เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม

ความต้านทานความร้อนของการแผ่รังสีจะถูกรวมกับการพาความร้อน



รูปที่ (1) Thermal resistance diagram ของการถ่ายเทความร้อนจากห้องเผาไหม้ไปยังท่อน้ำ



รูปที่ (2) Thermal resistance diagram ของการถ่ายเทความร้อนจากท่อไฟไปยังด้านน้ำ

จากรูปที่ (1) สามารถนำผลรวม R_{th} มารวมกันได้ ตัวแปร U คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม โดย หาได้จากสมการดังต่อไปนี้ [10]

$$\frac{1}{UA_s} = R_{tot} = \frac{1}{\frac{1}{R_{rad}} + \frac{1}{R_{conv,o}}} + R_{cond} + R_{conv,i} \quad (13)$$

$$R_{rad} = \frac{1}{h_{rad} A_s} \quad (14)$$

เมื่อนำ R_{rad} แทนค่าลงในสมการที่ *(24)*

$$\frac{1}{U_o \pi D_o} = \frac{\frac{1}{h_o h_{rad}}}{(\frac{1}{h_o} + \frac{1}{h_{rad}})\pi D_o} + \frac{\ln \frac{D_o}{D_i}}{2\pi k} + \frac{1}{h_i \pi D_i} \quad (15)$$

สำหรับกรณีของรูปที่ (2) จะได้สมการดังต่อไปนี้

$$\frac{1}{U\pi D} = \frac{1}{h_i \pi D_i} + \frac{\ln \frac{D_o}{D_i}}{2\pi k} + \frac{1}{h_o \pi D_o} \quad (16)$$

สำหรับสมการสำหรับหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ซึ่งจะนำไปคำนวณพื้นที่การถ่ายเทความร้อน โดยจากการคำนวณพบว่าตัวแปรที่มีผลต่อค่า สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม คือ h หรือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน [10]

$$h_{rad} = \varepsilon\sigma(T_s^2 - T_{surr}^2)(T_s - T_{surr}) \quad (17)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของแก๊สไอเสียหาจาก วิธีการถดถอยหลายเชิงแบบกำลังสองน้อยที่สุด (Multiple Least Squares Regression) [5] สำหรับสร้างเส้นแนวโน้มจากกราฟค่าแก้ สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ วิธีการประมาณค่าในช่วงด้วยเส้นตรง (Linear Spline Interpolation) [6] สำหรับสร้างเส้นแนวโน้มจากกราฟความแตกต่างสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน (Delta epsilon) โดยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขดังกล่าวถูกใช้เพื่อคำนวณหาสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของแก๊สไอเสีย [14]

$$\varepsilon_g = C_c \varepsilon_{c,1atm} + C_w \varepsilon_{w,1atm} - \Delta\varepsilon \quad (18)$$

สำหรับค่า h_o และ h_i ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากการพาความร้อน คำนวณจากสมการ [11]

$$h = \frac{k}{D} Nu \quad (19)$$

สำหรับการเลือกใช้สมการ Nusselt number นั้นมีหลักเกณฑ์การพิจารณาหลายตัวแปร เช่น พฤติกรรมการไหลของของไหลเพื่อจำแนกว่า ของไหลดังกล่าวมีลักษณะเป็นแบบใด จากการวิเคราะห์อัตราการถ่ายเทความร้อนที่จำเป็นต่อการเปลี่ยนสถานะของน้ำ โดยตั้งสมมติฐานให้การถ่ายเทความร้อนไปสู่น้ำในหม้อไอน้ำมีลักษณะเป็นการเดือดอย่างเต็มที่ (Nucleate pool boiling) และพฤติกรรมการไหลของน้ำในท่อในส่วนของห้องเผาไหม้มีลักษณะเป็นการถ่ายเทความร้อนแบบบังคับผสมกับการเดือด [4] สำหรับพฤติกรรมของแก๊สไอเสียในห้องเผาไหม้นั้นตั้งสมมติฐานว่า เป็นการพาความร้อนแบบบังคับ (Force convection) การเขียนโปรแกรมมีความจำเป็นที่ต้องทดสอบพฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อนที่แตกต่างกันเพื่อนำมาเปรียบเทียบหาสมการที่เหมาะสมที่สุดในการเขียนโปรแกรม โดยนำค่าพื้นผิวรับความร้อนที่ได้จากโปรแกรมไปเทียบกับหม้อน้ำจริง โดยสมการความสัมพันธ์ก่อตัวการเดือดของน้ำ Rohsenow มีสมการดังนี้[3]

$$\frac{C_l \Delta T_x}{h_{fg} \Pr_l^{1.7}} = C_{sf}[\frac{q}{\mu_l h_{fg}} \sqrt{\frac{g_c \sigma_{tension}}{g(\rho_l - \rho_v)}}]^{0.33} \quad (20)$$

สมการดังกล่าวรูปลักษณ์ของภาชนะ ไม่ส่งผลมากนักต่อการเดือดของน้ำ สิ่งที่สำคัญขึ้นอยู่กับพื้นผิวที่น้ำรับความร้อน ไม่ใช่รูปร่างของภาชนะรับความร้อน [3] จากคำนวณจะใช้สมการดังกล่าวในการหา ฟลักซ์ความร้อนที่จำเป็นที่ทำให้น้ำเดือด จนผลิตไอน้ำได้ตามความต้องการ สำหรับการเดือดของน้ำที่มีการไหลอยู่ในท่อ มีสมการดังต่อไปนี้

$$(\frac{Q}{A})_{total} = (\frac{Q}{A})_{boiling} + (\frac{Q}{A})_{forcedconvection} \quad (21)$$

สำหรับการเดือดของน้ำไหลในท่อเรียบ Rohsenow และ Griffith เสนอว่า ผลของการพาความร้อนแบบบังคับสามารถใช้ความสัมพันธ์ Dittus-Boelter ในการคำนวณได้ [4] สำหรับความสัมพันธ์ Dittus-Boelter [12]ใช้สมมติฐานเป็นการไหลแบบปั่นป่วนเต็มที่ดังต่อไปนี้

$$Nu_d = 0.023 \mathrm{Re}_d^{0.8} \Pr^{0.3} \quad (22)$$

Re คือ Reynold number ของการไหลภายในท่อและ Pr คือ Prundtl number ค่า Pr หาจากการเปิดตารางการถ่ายเทความร้อน ส่วน Re เป็นฟังก์ชั่นก์ของ ความเร็ว, ความหนืดจลน์, ความหนาแน่นของไหล และ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ สำหรับการคำนวณการพาความร้อน

เพียงอย่างเดียวเลือกใช้สมการที่ (22) แต่หากเป็นการผสมกันของการเดือดและการพาแบบบังคับนั้น Rohsenow และ Griffith แนะนำว่า ควรเปลี่ยนจาก 0.023 เป็น 0.019 [4] สำหรับสมการที่ (23) การหาค่า h_o จากด้านน้ำสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของ *Mostinski* [13]

$$h_o = 0.00417 q^{0.7} p_{cr}^{0.69} F_p \qquad (23)$$

$$F_p = 1.8P_r^{0.17} + 4P_r^{1.2} + 10P_r^{10}, P_r = \frac{P}{P_{cr}} \qquad (24)$$

และในส่วนของหม้อไอน้ำด้านน้ำซึ่งไหลท่วมท่อ การไหลนั้นตั้งสมมติฐานเป็นการไหลแบบภายนอก (External flow) โดยเลือกใช้ความสัมพันธ์เชิงตัวเลขของ Jakob [15] และ Zukauskas [16] ซึ่งเป็นการถ่ายเทความร้อนผ่านผิวด้านนอกของท่อทรงกระบอก และสื่อกลางที่พาความร้อนสามารถเป็นได้ทั้งสถานะแก๊ส และของเหลว โดยความสัมพันธ์เขียนได้ดังต่อนี้

$$Nu = 0.989\,\mathrm{Re}^{0.330}\,\mathrm{Pr}^{1/3}; 0.4 \le \mathrm{Re} < 4$$
$$Nu = 0.911\,\mathrm{Re}^{0.385}\,\mathrm{Pr}^{1/3}; 4 \le \mathrm{Re} < 40$$
$$Nu = 0.683\,\mathrm{Re}^{0.466}\,\mathrm{Pr}^{1/3}; 40 \le \mathrm{Re} < 4000$$
$$Nu = 0.193\,\mathrm{Re}^{0.618}\,\mathrm{Pr}^{1.3}; 4000 \le \mathrm{Re} < 40000$$
$$Nu = 0.027\,\mathrm{Re}^{0.805}\,\mathrm{Pr}^{1/3}; 40000 \le \mathrm{Re} < 400000 \qquad (25)$$

สำหรับการคำนวณประสิทธิภาพหม้อน้ำจริง คำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้ ซึ่งเป็นประสิทธิภาพจากการตรวจวัดจากหม้อไอน้ำจริง

$$eff = \frac{h_{boiler} - h_{w,input}}{Q_{actual}} x100 \qquad (26)$$

4.การวิเคราะห์ผล

4.1 การทำงานของโปรแกรม

โปรแกรมถูกพัฒนาในรูปแบบของสเปรทชีทเพื่อวิเคราะห์อัตราการถ่ายเทความร้อนที่จำเป็นต่อการเปลี่ยนสถานะของน้ำ ในกระบวนการคำนวณแบบวนซ้ำ การทำงานของโปรแกรมเป็นไปตามแผนผัง flow chart ดังที่แสดงในรูปที่ (3)

4.2 วิธีการวิเคราะห์ผล

การวิเคราะห์ความแม่นยำของโปรแกรมทำโดยการตรวจหม้อไอน้ำ 2 ครั้ง โดยครั้งที่หนึ่งตรวจขณะที่หม้อไอน้ำหยุดการทำงาน หลังจากหม้อไอน้ำเริ่มเย็นลงแล้วสามารถเข้าไปวัดพารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆดังต่อไปนี้ คือ ความยาว เส้นผ่านศูนย์กลาง ความหนาของท่อไฟใหญ่-ท่อไฟเล็ก จำนวนท่อในหม้อไอน้ำ รูปแบบการวางท่อไฟเล็ก เส้นผ่านศูนย์กลางของหม้อน้ำ โดยจากการตรวจวัดดังกล่าว สามารถทราบพื้นที่รับความร้อนของหม้อไอน้ำจริง ข้อมูลเหล่านี้จะนำมาใช้เปรียบเทียบกับการคำนวณจากโปรแกรม โดยหากการคำนวณจากโปรแกรมนั้นใช้พื้นที่การถ่ายเทความร้อนน้อยกว่า พื้นที่ถ่ายเทความร้อนในหม้อน้ำทั้งหมด บ่งชี้ว่าหม้อน้ำดังกล่าวสามารถใช้งานได้ในย่านที่ผู้ใช้โปรแกรมตั้งพารามิเตอร์ไว้ สำหรับการตรวจครั้งที่สองคือตรวจในขณะที่หม้อไอน้ำกำลังทำงานโดยวัดพารามิเตอร์ต่างๆ ดังต่อไปนี้คือ ความดัน อัตราการผลิตไอ อุณหภูมิของไอเสีย คุณภาพของแก๊สไอเสีย อัตราการป้อนเชื้อเพลิงจริง ชนิดของเชื้อเพลิง ตัวแปรเหล่านี้จะเป็นตัวแปรต้นในการคำนวณหาประสิทธิภาพจริงของหม้อน้ำ

4.3 ผลการวิเคราะห์โปรแกรม

4.3.1 วิเคราะห์โดยเปลี่ยนแปลงค่า n_{pre}

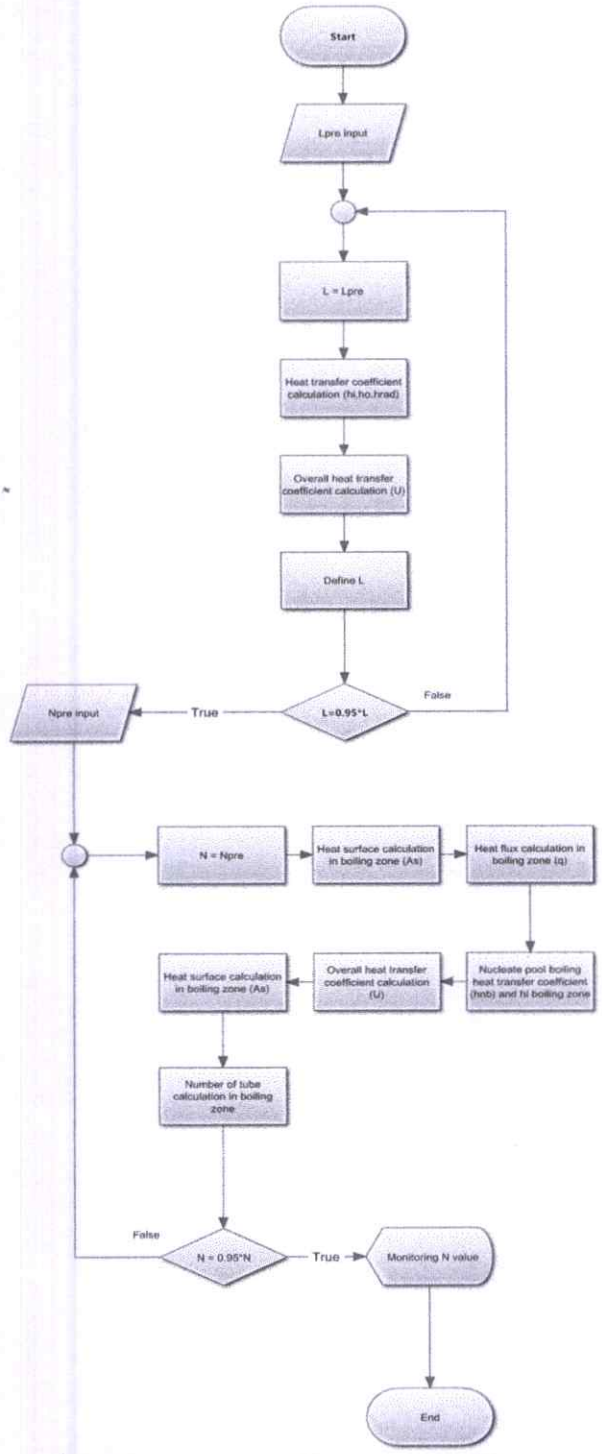
ตารางที่ 1 ตารางแสดงจำนวนท่อที่เหมาะสมในการใช้งานจากการคำนวณครั้งแรกโดยโปรแกรม

N_{pre}	U(W/m^2K)	As(m^2)	N	%error
5	177.0156	3.034	6.566	84.37
10	101.828	5.2754	11.413	72.83
15	73.6797	7.2908	15.774	62.44
20	58.564	9.1725	19.84	52.76
42	32.39	16.584	35.882	14.56
50	28.1811	19.062	41.2413	1.80
54	26.502	20.270	43.854	4.41
100	16.2029	33.154	71.73	70.78

กำหนด พารามิเตอร์คงที่ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ของท่อไฟ

	L(m)	ID(m)	Thickness (mm)	N
ท่อไฟใหญ่	3	0.8	16.5	1
ท่อไฟเล็ก1^{st}	2.66	0.41	4	54
ท่อไฟเล็ก2^{nd}	3	0.41	4	42



รูปที่ (3) Flow chart แสดงวิธีการทำงานของโปรแกรม

ตารางที่ 4 ตารางข้อมูลสำหรับวิเคราะห์แก๊สไอเสีย

ข้อมูล	ค่าตรวจวัด/บันทึก	หน่วย
% ออกซิเจนในไอเสียเฉลี่ย	10.827	%
% คาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ย	9.640	%
คาร์บอนมอนนอกไซด์เฉลี่ย	267.205	ppm
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์เฉลี่ย	-	ppm
ออกไซด์ของไนโตรเจนเฉลี่ย	-	ppm
อัตราเชื้อเพลิงที่ใช้เฉลี่ย	61.135	kg/hr
อุณหภูมิไอเสียเฉลี่ย	161.733	°C
อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเฉลี่ย	41.163	°C
ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง	4,251	kcal/kg
ค่าความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซเสียที่อุณหภูมิ 161.733 °C	0.3281	kcal/ Nm_3°C

ตารางที่ 5 ข้อมูลสำหรับวิเคราะห์ประสิทธิภาพหม้อไอน้ำ

ข้อมูล	ค่าตรวจวัด/บันทึก	หน่วย
อัตราน้ำป้อนเฉลี่ย	0.392	m^3/hr
อุณหภูมิน้ำป้อนเฉลี่ย	76.367	°C
ความดันไอน้ำเฉลี่ย (P_{abs})	5.113	bar
อัตราน้ำที่โบลว์ดาวน์	14.460	
อัตราเชื้อเพลิงที่ใช้เฉลี่ย	61.135	kg/hr
ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง (Wood Pellet)	17.795	kg/hr MJ/kg
ประสิทธิภาพหม้อไอน้ำ	81.567	Percent

โดยข้อมูลหม้อไอน้ำจากตารางที่ 4 และ 5 ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทเอกชน [17] เพื่อนำมาใช้เทียบกับโปรแกรมคำนวณ จากตารางที่ 1 พบว่าการตั้งค่า n_{pre} ที่ 50 มีความคลาดเคลื่อนต่ำที่สุดอยู่ที่ 1.8 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจึงเลือกใช้ค่า n_{pre} คงที่ เท่ากับ 50 เพื่อลดปริมาณรอบของการคำนวณแบบวนซ้ำ ให้มีจำนวนรอบน้อยที่สุด เพื่อความรวดเร็วในการคำนวณ

4.3.2 วิเคราะห์โดยเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพหม้อน้ำ

ตารางที่ 6 ตารางแสดงจำนวนท่อที่เหมาะสมในการใช้งานจากการคำนวณครั้งแรกโดยโปรแกรม

Efficiency	U(W/m^2K)	As(m^2)	N	%error
50	53	33.9	9.12	78.29
60	45.75	38.85	20.01	52.36
70	40	45.98	35.44	15.62
80	35.4	57.7	60.76	44.67
90	31.67	88.44	127.31	203.12

จากผลการเปรียบเทียบพบว่า ผลการคำนวณครั้งแรกของการเปลี่ยนแปลงค่าประสิทธิภาพ มีความคลาดเคลื่อนสูง

ซึ่งสามารถแก้ไขด้วยการคำนวณแบบวนซ้ำ เพื่อหาประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำจากการคำนวณของโปรแกรม

4.3.3 วิเคราะห์โดยเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพหม้อน้ำด้วยกรรมวิธีการคำนวณแบบวนซ้ำ

ตารางที่ 7 ตารางแสดงจำนวนท่อที่เหมาะสมในการใช้งานจากการคำนวณแบบวนซ้ำ

Efficiency	U(W/m^{2}K)	As(m^2)	N	%error
50	22884	29.67	0.02	99.95
60	1615	29.91	0.565	98.65
70	155	33.85	9.08	78.38
75	51	45.24	33.8	19.52
76	41.03	50	44.1	5
78	26.05	64.53	75.6	80
80	16.31	90.5	131.89	214.02

จากผลการคำนวณแบบวนซ้ำพบว่าประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำจากการคำนวณมีค่า 76 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งหากเทียบกับประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำจริงนั้น ประสิทธิภาพอยู่ที่ 81.567 เปอร์เซ็นต์ เพราะฉะนั้นความคลาดเคลื่อนของโปรแกรมเท่ากับ 6.82 เปอร์เซ็นต์ โดยความคลาดเคลื่อนดังกล่าวอาจเป็นผลจาก ประสิทธิภาพการเผาไหม้จริง ซึ่งส่งผลโดยตรงกับองค์ประกอบของเชื้อเพลิง ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนได้ หากเทียบกับการเผาไหม้ในทางทฤษฎี ซึ่งสมมติฐานของโปรแกรม กับการดำเนินการใช้หม้อน้ำจริงอาจแตกต่างกัน เพราะฉะนั้นผู้วิจัยจำเป็นต้องพัฒนาโปรแกรมให้มีความใกล้เคียงกับการดำเนินการใช้หม้อไอน้ำจริงให้มากที่สุด

5.บทสรุป

จากการคำนวณพบว่าโปรแกรมยังมีความผิดพลาดสูงถึง 6.82 เปอร์เซ็นต์ซึ่ง ตามหลักวิศวกรรมแล้วถือว่ายังมากเกินไป มีความจำเป็นต้องปรับเปลี่ยนสมมติฐานการคำนวณให้เหมือนกับ การผลิตไอน้ำของหม้อไอน้ำให้มากที่สุด โดยการพัฒนาโปรแกรมดังกล่าวนั้น เป็นประโยชน์สำหรับการผลิตหม้อไอน้ำ การตรวจสอบหม้อไอน้ำ และการใช้หม้อไอน้ำ โดยสิ่งที่สำคัญที่สุดก็คือความปลอดภัย ซึ่งหากโปรแกรมเลือกใช้สมการความสัมพันธ์ที่ใกล้เคียงกับพฤติกรรมของการทำงานจริง จะสร้างความมั่นใจให้ทั้งผู้ใช้งาน และผู้ผลิตหม้อไอน้ำ ซึ่งโปรแกรมดังกล่าวจำเป็นต้องพัฒนาให้มีความแม่นยำสูงที่สุด วิธีที่ทำให้เกิดความแม่นยำสูงสุดนั้น การพัฒนาโปรแกรมต้องควบคู่กับการตรวจสอบหม้อไอน้ำ จึงจะทำให้การพัฒนาเป็นไปอย่างสมบูรณ์ โปรแกรมที่มีความสมบูรณ์คือโปรแกรมที่สามารถใช้กับหม้อไอน้ำต่างชนิด ต่างประเภทเชื้อเพลิงได้ ซึ่งทางผู้วิจัยได้วางแผนต่อไปว่าจะนำโปรแกรมมาพัฒนาสำหรับหม้อไอน้ำชนิดท่อน้ำ และหม้อไอน้ำแบบผสม ก่อนพัฒนาเป็นโปรแกรมสำเร็จรูปเพื่อสะดวกในการใช้งานเพื่อวิศวกรผู้ตรวจสอบ และผู้ผลิต สามารถสร้าง และซ่อมบำรุงหม้อไอน้ำให้มีประสิทธิภาพ ปลอดภัย ลดอุบัติเหตุจากการใช้หม้อไอน้ำลงได้ ถือเป็นความสำเร็จที่ผู้วิจัยตั้งเป้าหมายไว้

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอบคุณ รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข อาจารย์ที่ปรึกษาผู้คอยให้คำแนะนำทั้งทางทฤษฎี และการเขียนโปรแกรม ขอบคุณอาจารย์ธวัชชัย นาคพิพัฒน์ จากบริษัท Ferko industry จำกัด ที่ให้โอกาสได้ตรวจสอบหม้อไอน้ำจริงตามมาตรฐานอุตสาหกรรม ขอบคุณบริษัท L Y industry จำกัด ที่ให้โอกาสตรวจหม้อน้ำชนิดท่อไฟสำหรับใช้เปรียบเทียบกับโปรแกรม ขอบคุณ ทีมตรวจวัดประสิทธิภาพจาก บริษัท โปร เอ็นเนอร์ยี แอนด์ เอ็นจิเนียริ่ง จำกัด สำหรับรายงานการตรวจวัดประสิทธิภาพหม้อไอน้ำที่ บริษัท L Y industry จำกัด

7. เอกสารอ้างอิง

[1] S.R. Turn, "Combustion and Thermochemistry", An Introduction to Combustion, Second edition, Singapore:McGraw-Hill, 2000, p. 13-15.

[2] S.R. Turn, "Combustion and Thermochemistry", An Introduction to Combustion, Second edition, Singapore:McGraw-Hill, 2000, p. 19-20.

[3] Rohsenow, W.M.,: A Method of Correlation of Maximum Heat Flux Data for Surface Boiling Liquids, Trans. ASME, vol.74, p. 969, 1952.

[4] Rohsenow, W.M., and P.Griffith, "Correlation of Maximum Heat Flux Data for Boiling of Saturated Liquids, AIChE-ASME Heat Transfer, Trans. ASME, vol 80, p.711, 1958.

[5] วรสิทธิ์ กาญจนกิจเกษม, "การประมาณค่าในช่วงและการวิเคราะห์การถดถอย", ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข, พิมพ์ครั้งที่ 1, โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2557, 187-188

[6] วรสิทธิ์ กาญจนกิจเกษม, "การประมาณค่าในช่วงและการวิเคราะห์การถดถอย", ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข, พิมพ์ครั้งที่ 1, โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2557, 159

[7] J.P. Holman, "Steady-state Conduction-one Dimension", Heat transfer, Fourth edition, Tosho PRINTING CO., LTD. TOKYO JAPAN:Mc-Graw-Hill, 1976, p. 25-27

[8] J.P. Holman, "Steady-state Conduction-one Dimension", Heat transfer, Fourth edition, Tosho PRINTING CO., LTD. TOKYO JAPAN:Mc-Graw-Hill, 1976, p.29

[9] J.P. Holman, "The Overall Heat-transfer Coefficient", Heat transfer, Fourth edition, Tosho PRINTING CO., LTD. TOKYO JAPAN:Mc-Graw-Hill, 1976, p. 29-30

[10] Yunus A. Cengel, "The Thermal Resistance Concept", Heat transfer, Second edition, Mc-Graw-Hill, 2002, p. 130

[11] Yunus A. Cengel, "FUNDAMENTALS OF CONVECTION", Heat transfer, Second edition, Mc-Graw-Hill, 2002, p. 336

[12] Dittus,F.W.m and L.M.K. Boelter: Univ.Calif. (Berkeley) Pub. Eng., vol. 2, 1930, p.443

[13] Mostinski, I. L., "Application of the Rule of Corresponding States for Calculation of Heat Transfer and Critical Heat Flux," Teploenergetika (Moscow, Russ. Fed.), vol. 4, 1963, pp. 66–71.

[14] Dunkle, R.V.: "Geometric Mean Beam Lengths for Radiant Heat Transfer Calculations," J., Heat Transfer, vol. 86, p. 75, Febuary 1964.

[15] M. Jakob. Heat Transfer. Vol. I. New York: John Wiley & Sons, 1949.

[16] A. Zukauskas. "Heat Transfer from Tubes in Cross Flow." In Advances in Heat Transfer, ed. J. P. Hartnett and T. F. Irvine, Jr. Vol. 8. New York: Academic Press, 1972.

[17] บริษัท โปร เอ็นเนอร์ยี แอนด์ เอ็นจิเนียริ่ง จำกัด, รายงานสรุปผลการตรวจวัดประสิทธิภาพหม้อไอน้ำหลังปรับปรุง บริษัท แอล.วาย. อินดัสตรีส์ จำกัด (เชื้อเพลิง Wood Pellet). กรุงเทพมหานคร:บริษัท โปร เอ็นเนอร์ยี แอนด์ เอ็นจิเนียริ่ง จำกัด, 2558. (เอกสารไม่ตีพิมพ์)