



การวิเคราะห์ความสูญเสียในระบบไอน้ำของบริษัท ลานนา โปรดักส์ จำกัด
Energy loss assessment of the steam system of Lanna Products co., Ltd.

นายดุสิต ทาอาสา รหัสนิสิต 59361737
นายปกรณ์ อีสสระ รหัสนิสิต 59362925
นายอชิตพล สำเภา รหัสนิสิต 59366220

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์
ปีการศึกษา 2562



ใบรองรับปริญญาโท

หัวข้อโครงการ : การวิเคราะห์ความสูญเสียในระบบไอน้ำของบริษัท ลานนา โปรดักส์ จำกัด
Energy loss assessment of the steam system of Lanna
Products co., Ltd.

ผู้ดำเนินโครงการ : นายดุสิต ทาอาสา รหัสบัณฑิต 59361737
: นายปกรณ์ อีสสระ รหัสบัณฑิต 59362925
: นายอชิตพล สำเภา รหัสบัณฑิต 59366220

ที่ปรึกษาโครงการ : ผศ.ดร.อาวุธ ลภีรัตน์กุล


สาขาวิชา : วิศวกรรมเครื่องกล


ภาควิชา : วิศวกรรมเครื่องกล


ปีการศึกษา : 2562

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยแลนนา อนุมัติให้ปริญญาโทฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะกรรมการสอบโครงการวิศวกรรมเครื่องกล


.....ที่ปรึกษาโครงการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาวุธ ลภีรัตน์กุล)


.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยชัย ไกรทอง)


.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ศิษณุภัณฑ์ แคนลา)

หัวข้อโครงการ	: การวิเคราะห์ความสูญเสียในระบบไอน้ำของบริษัท ลานนา โปรดักส์ จำกัด Energy loss assessment of the steam system of Lanna Products co., Ltd.		
ผู้ดำเนินโครงการ	: นายดุสิต ทาอาสา	รหัสนิติ	59361737
	: นายปกรณ์ อิศสระ	รหัสนิติ	59362925
	: นายอชิตพล สำเภา	รหัสนิติ	59366220
ที่ปรึกษาโครงการ	: ผศ.ดร.อาวุธ ลภีรัตนากุล		
สาขาวิชา	: วิศวกรรมเครื่องกล		
ภาควิชา	: วิศวกรรมเครื่องกล		
ปีการศึกษา	: 2562		

บทคัดย่อ

โครงการเล่มนี้เป็นการศึกษาหาแนวทางการประหยัดพลังงานในระบบไอน้ำของโรงงานลานนาโปรดักส์ โดยแยกพิจารณาระบบไอน้ำออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่ 1. ส่วนระบบผลิตไอน้ำ จะทำการตรวจวัดความร้อนสูญเสียของหม้อไอน้ำ โดยอ้างอิงตามมาตรฐาน Japanese : JIS B8222: 1993 Land Boilers and Heat Balance 2. ส่วนระบบท่อส่งจ่ายไอน้ำและน้ำป้อน จะทำการตรวจวัดความร้อนสูญเสียที่ผิวและการรั่วไหลของไอน้ำที่ท่อส่งจ่ายไอน้ำและน้ำป้อน โดยจะมีการนำสมการของ Napier's choke flow เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ผลการตรวจวัด 3. ส่วนระบบอุปกรณ์ที่ใช้ไอน้ำ ในส่วนนี้จะไม่มี การตรวจวัด เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้ไอน้ำของโรงงานลานนาโปรดักส์ ไม่มีการติดตั้งมิเตอร์วัดอัตราการไหลของน้ำ จึงทำให้ไม่ทราบสถานะของไอน้ำ ณ จุดต่างๆ 4. ส่วนการนำความร้อนกลับ จะทำการตรวจวัดการนำกลับของคอนเดนเสทและไอน้ำแฟลช รวมถึงทำการตรวจวัดการรั่วไหลของก๊าดักไอน้ำด้วยเช่นกัน

จากผลการตรวจวัดพบว่าในระบบไอน้ำทั้ง 4 ส่วนของโรงงานลานนาโปรดักส์นั้นมีการสูญเสียพลังงานความร้อน โดยที่เมื่อทำการวิเคราะห์ผลการตรวจวัดจะทำให้ทราบถึงสาเหตุของการสูญเสียต่างๆ ส่งผลให้สามารถเสนอมาตรการประหยัดพลังงานของระบบไอน้ำได้ทั้งหมด 4 มาตรการ ประกอบด้วย 1. มาตรการลดการโบล์ดาวน์น้ำ 2. มาตรการปรับแต่งการเผาไหม้ 3. มาตรการหุ้มฉนวนท่อส่งจ่ายน้ำป้อน 4. มาตรการเปลี่ยนก๊าดักไอน้ำ ซึ่งหลังจากทำการประเมินศักยภาพของมาตรการทั้ง 4 มาตรการ จะพบว่าสามารถลดจำนวนเงินสูญเสียลงได้เป็นจำนวน 83,536.28 บาท/ปี หรือคิดเป็น 9.82 % ของต้นทุนการผลิตไอน้ำ

Project Title : Energy loss assessment of the steam system of Lanna Products co.,Ltd.

Name : Mr. Dusit Taasa Code 59361737
: Mr. Pakorn Itsara Code 59362925
: Mr. A-chitpol Sumbhao Code 59366220

Project Advisor : Assistant Professor Dr. Arwut Lapirattanakun

Department : Mechanical Engineering

Academic Year : 2562

Abstract

This project is a study for the guidelines of the ways to save energy in the steam system of Lanna Products Factory. By considering the steam system into 4 parts, which are 1. The steam production system will measure the heat loss of the steam-boiler by referring to the Japanese standard: JIS B8222: 1993 Land Boilers and Heat Balance, 2. The Distribution was measured the surface heat losses and steam leakage at the steam and feedwater pipelines with the Napier's choke flow equation for helping to analyze the measurement results, 3. The End Use in this part, there will be no measurement since the End Use at the Lanna Products Factory does not have a meter installed to measure the flow of water and therefore not knowing the condition of steam at various points, and 4. In the Recovery, was measured the return of condensate and flash steam, including the leak detection of steam traps as well.

From the measurement results found that in the 4 steam systems of the Lanna Products Factory, there is heat energy loss, When the results of the measurement analyzed, the students were known the case of the various losses. Therefore, the results can be proposed 4 energy saving measure for the steam system, consisting of 1. Water blowdown reduction measures, 2. Combustion adjustment measures, 3. Water supply pipe insulation measures, and 4. Steam trap replacement measures. After evaluating the potential of all 4 measures found that it can reduce the amount of money lost by 83,536.28 baht / year or the steam production cost of 9.82%.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการเรื่อง “การวิเคราะห์ความสูญเสียในระบบไอน้ำของบริษัท ลานนา โปรดักส์ จำกัด” ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความอนุเคราะห์ของบุคคลกรหลายท่าน ซึ่งผู้มีพระคุณท่านแรกใครขอขอบพระคุณคือท่าน ผศ.ดร.อาวุธ ลภีรัตน์กุล อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำการตรวจทานและแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่ทุกขั้นตอนเพื่อให้การเขียนโครงการวิเคราะห์ความสูญเสียในระบบไอน้ำของบริษัท ลานนา โปรดักส์ จำกัด นี้ออกมาสมบูรณ์มากที่สุด

ขอขอบพระคุณกรรมการสอบทั้งสองท่านได้แก่ ผศ.ดร.ขวัญชัย ไกรทอง และ ผศ.ศิษณุภัณฑ์ แคนลา ที่ได้ให้ความรู้คำแนะนำ และแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ของรูปเล่มโครงการ

ขอขอบพระคุณบริษัท ลานนาโปรดักส์ จำกัด ที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำ สถานที่ และให้ประสบการณ์ในการทำงานร่วมกับบุคคลอื่นได้เป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่ได้ให้โอกาสในการศึกษา หาความรู้และการใช้เครื่องมือต่าง ๆ มาประยุกต์ใช้กับโครงการด้วยความเอาใจใส่ทุกขั้นตอน

สุดท้ายนี้ผู้ศึกษาขอขอบคุณบิดามารดาและครอบครัว ซึ่งเปิดโอกาสให้ได้รับการศึกษาเล่าเรียนตลอดจนช่วยเหลือและให้กำลังใจผู้ศึกษาที่ดีเสมอมา ความดีอันเกิดจากการศึกษาค้นคว้าในครั้งนี้ ผู้ศึกษาขอมอบเป็นความกตัญญูทเวที่แต่บิดา มารดา ครูอาจารย์และผู้มีพระคุณทุกท่าน ที่มีส่วนช่วยผลักดันและเป็นกำลังใจ ผู้ศึกษาขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

นายดุสิต ทาอาสา

นายปกรณ์ อีสสระ

นายอชิตพล สำเภา

สารบัญ

ใบรองรับปริญญาโท	ก
บทคัดย่อ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญรูปภาพ	ฉ
สารบัญตาราง	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	3
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.4 ขอบเขตโครงการ	3
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน	4
1.6 แผนการดำเนินงาน	5
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	22
2.2.1 มาตรฐาน Japanese : JIS B8222: 1993 Land Boilers and Heat Balance	22
2.2.2 การระบายน้ำหม้อไอน้ำทิ้ง (Blowdown)	32
2.2.3 หลักการประเมินการรั่วไหลของไอน้ำด้วยสมการ Napier's choke flow	32
2.2.4 ไอน้ำแฟลช	33
2.2.5 คุณสมบัติของน้ำและการทดสอบคุณภาพน้ำ	34
2.2.6 ประเภทของหม้อน้ำ	34
2.2.7 โปรแกรม 3E PLUS	39
2.2.8 โปรแกรม testo IRSOFT software	41

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ 3 วิธีการดำเนินโครงการ	42
3.1 ข้อมูลเบื้องต้นของโรงงาน	42
3.2 ข้อมูลเบื้องต้นระบบผลิตไอน้ำ	43
3.2.1 หม้อไอน้ำ	44
3.2.2 อุปกรณ์ปรับปรุงคุณภาพน้ำ	45
3.3.3 อุปกรณ์ดักจับขี้เถ้าลอย (Cyclone)	45
3.3.4 อุปกรณ์ดักจับฝุ่นชนิดเปียก	46
3.3.5 ปล่องระบายก๊าซไอเสีย	47
3.3.6 ระบบป้อนเชื้อเพลิง	47
3.3 ข้อมูลเบื้องต้นระบบส่งจ่ายไอน้ำและน้ำป้อน	48
3.4 ข้อมูลเบื้องต้นระบบการใช้ไอน้ำ	49
3.4.1 เครื่องสกัดน้ำมันหอมระเหย	49
3.5 ข้อมูลเบื้องต้นระบบการนำความร้อนกลับ	50
3.5.1 ถังน้ำป้อนเข้าหม้อน้ำ	50
3.5.2 แผงท่อรับความร้อน (Economizer)	51
3.5.3 กักดักไอน้ำ (Steam trap)	52
3.6 อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัด	53
3.7 ขั้นตอนในการตรวจวัด	55
3.7.1 การตรวจวัดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงในหม้อน้ำ	59
3.7.2 การตรวจวัดความดันไอน้ำที่ใช้งาน	59
3.7.3 การตรวจวัดปริมาณการผลิตไอน้ำที่หม้อน้ำผลิตได้ต่อหนึ่งชั่วโมง	60
3.7.4 การตรวจวัดก๊าซไอเสียของหม้อน้ำ	60
3.7.5 การตรวจวัดคุณภาพน้ำป้อนและน้ำโบลว์ดาวน์	61
3.7.6 การตรวจวัดอัตราการโบลว์ดาวน์	62

สารบัญ (ต่อ)

3.7.7 การตรวจวัดสภาพถนน	62
3.7.8 การตรวจการรั่วไหลของท่อส่งจ่ายไอน้ำ	62
3.7.9 การตรวจวัดกับดักไอน้ำรั่วไหล	63
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานและวิเคราะห์ผล	65
4.1 ผลการตรวจวัดระบบไอน้ำ	65
4.1.1 ส่วนระบบผลิตไอน้ำ	65
4.1.2 ส่วนระบบท่อส่งจ่ายไอน้ำและน้ำป้อน	72
4.1.3 ส่วนของอุปกรณ์ที่ใช้ไอน้ำ	73
4.1.4 ส่วนของการนำความร้อนกลับ	73
4.2 วิเคราะห์ผลการตรวจวัดระบบไอน้ำ	75
4.2.1 ส่วนระบบผลิตไอน้ำ	75
4.2.2 ส่วนของระบบท่อส่งจ่ายไอน้ำและน้ำป้อน	84
4.2.3 ส่วนของอุปกรณ์ที่ใช้ไอน้ำ	87
4.2.4 ส่วนของการนำความร้อนกลับ	87
บทที่ 5 สรุปผลการตรวจวัดและมาตรการประหยัดพลังงาน	89
5.1 สรุปผลการตรวจวัดระบบไอน้ำ	89
5.1.1 ส่วนของระบบผลิตไอน้ำ	89
5.1.2 ส่วนของระบบท่อส่งจ่ายไอน้ำและน้ำป้อน	90
5.1.3 ส่วนของอุปกรณ์ที่ใช้ไอน้ำ	90
5.1.4 ส่วนของการนำความร้อนกลับ	90
5.2 ต้นทุนในการผลิตไอน้ำ	90
5.3 ศักยภาพของมาตรการในการประหยัดพลังงาน	91
5.3.1 ศักยภาพในการลดการโบล์ดาวน์	92
5.3.2 ศักยภาพในการหุ้มฉนวนท่อส่งจ่ายน้ำป้อน	94

สารบัญ (ต่อ)

5.3.3 ศักยภาพในการปรับแต่งการเผาไหม้	95
5.3.4 ศักยภาพในการเปลี่ยนกับดักไอน้ำ	97
5.4 สรุปศักยภาพของมาตรการและความคุ้มค่าในการลงทุน	98
5.5 เปรียบเทียบศักยภาพของมาตรการกับต้นทุนในการผลิตไอน้ำ	99
5.6 เปรียบเทียบประสิทธิภาพหม้อน้ำ	99
5.7 วิธีดำเนินงานตามมาตรการประหยัดพลังงาน	100
5.7.1 มาตรการปรับแต่งการเผาไหม้	100
5.7.2 มาตรการลดอัตราการโบลว์ดาวน์	101
5.7.3 มาตรการหุ้มฉนวนท่อส่งจ่ายไอน้ำและน้ำป้อน	101
5.7.4 มาตรการเปลี่ยนกับดักไอน้ำ	101
บทที่ 6 สรุปผลการศึกษา	102
6.1 สรุปผลการศึกษาระบบไอน้ำของโรงงานลานนาโปรดักส์	102
6.2 ข้อเสนอแนะ	102
บรรณานุกรม	103
ภาคผนวก ก	107
รายการคำนวณ	107
ภาคผนวก ข	119
รูปภาพการตรวจวัด	119
ภาคผนวก ค	128
รายงานการตรวจวัดหม้อน้ำประจำปี	128
ภาคผนวก ง	132
ค่า Emissivity ของวัสดุชนิดต่างๆ	132

สารบัญรูปรูปภาพ

รูปที่ 1.1	แสดงระบบไอน้ำ	2
รูปที่ 2.1	แผนผังการประเมินประสิทธิภาพหม้อน้ำด้วยวิธีทางตรง	7
รูปที่ 2.2	แผนผังการประเมินประสิทธิภาพหม้อน้ำด้วยวิธีทางอ้อม	8
รูปที่ 2.3	แสดงปริมาณความสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบต่าง ๆ ของการประเมินประสิทธิภาพหม้อน้ำด้วยวิธีทางอ้อม	10
รูปที่ 2.4	แสดงอิทธิพลของค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (ก) ความเร็วลมรอบหม้อน้ำขณะทดสอบ (ข) ค่า ความชื้นในเชื้อเพลิง (ค) และค่าปริมาณสัดส่วนซีไถ้าในเชื้อเพลิง (ง) ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพหม้อน้ำชนิดท่อน้ำแบบ FBC ขนาดพิกัด 40 ตันต่อชั่วโมง ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง	11
รูปที่ 2.5	แสดงอิทธิพลของ ชนิดเชื้อเพลิงก๊าซ อุณหภูมิแก๊สไอเสียร้อน (ก) และปริมาณออกซิเจนหลังการเผาไหม้ (ข) ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพหม้อน้ำเชื้อเพลิงก๊าซชนิดท่อน้ำไฟนอน	12
รูปที่ 2.6	การวิเคราะห์ประสิทธิภาพหม้อน้ำเชิงสถิติแบ่งแยกข้อมูลตามประเภทหม้อน้ำ	18
รูปที่ 2.7	การวิเคราะห์ประสิทธิภาพหม้อน้ำเชิงสถิติแบ่งแยกข้อมูลตามชนิดเชื้อเพลิง	19
รูปที่ 2.8	การวิเคราะห์ประสิทธิภาพหม้อน้ำเชิงสถิติแบ่งแยกข้อมูลตามกลุ่มประเทศ	20
รูปที่ 2.9	การวิเคราะห์ประสิทธิภาพหม้อน้ำเชิงสถิติแบ่งแยกข้อมูลตามขนาดพิกัดหม้อน้ำ	21
รูปที่ 2.10	การเกิดไอน้ำแฟลชในถังแฟลช	33
รูปที่ 2.11	โครงสร้างหม้อไอน้ำแบบท่อน้ำ	35
รูปที่ 2.12	โครงสร้างของหม้อน้ำแบบท่อไฟ	37
รูปที่ 2.13	จำนวนกลับของท่อไฟ	37
รูปที่ 2.14	ห้องกลับไฟ	38
รูปที่ 2.15	หม้อน้ำแบบผสม (Hybrid boiler)	38
รูปที่ 2.16	ไอคอนของโปรแกรม 3E PLUS	39
รูปที่ 2.17	กรอกข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดลงในโปรแกรม	40
รูปที่ 2.18	โปรแกรมจะทำการคำนวณค่าพลังงานความร้อนที่สูญเสียออกมา	40

สารบัญรูปรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ 2.19	ไอคอนของโปรแกรม testo IRSOFT software	41
รูปที่ 2.20	โปรแกรมจะทำการวิเคราะห์ประมวลผลภาพถ่ายความร้อน	41
รูปที่ 3.1	ภาพถ่ายด้านหน้าโรงงาน	42
รูปที่ 3.2	แผนผังระบบไอน้ำของโรงงาน	43
รูปที่ 3.3	หม้อน้ำ ผลิตโดยบริษัท แอล เค บอยเลอร์ ขนาด 5 ton/h	44
รูปที่ 3.4	Name Plate หม้อน้ำ	44
รูปที่ 3.5	ถังกรองน้ำอ่อน	45
รูปที่ 3.6	อุปกรณ์ดักจับขี้เถ้าลอย	46
รูปที่ 3.7	อุปกรณ์ดักจับฝุ่นชนิดเปียก	46
รูปที่ 3.8	ปล่องระบายแก๊สไอเสีย	47
รูปที่ 3.9	กะลาปาล์ม	48
รูปที่ 3.10	ท่อลำเลียงเชื้อเพลิง	48
รูปที่ 3.11	ถังพักไอน้ำ 1	49
รูปที่ 3.12	ถังพักไอน้ำ 2	49
รูปที่ 3.13	เครื่องสกัดน้ำมันหอมระเหย	50
รูปที่ 3.14	ถังคอนเดนเสท	51
รูปที่ 3.15	Economizer	51
รูปที่ 3.16	กักตักไอน้ำ	52
รูปที่ 3.17	ตำแหน่งการตรวจวัดของหม้อไอน้ำ	55
รูปที่ 3.18	ขั้นตอนการตรวจวัดและวิเคราะห์ในส่วนของระบบผลิตไอน้ำ	56
รูปที่ 3.19	ขั้นตอนการตรวจวัดและวิเคราะห์ในส่วนของระบบท่อส่งจ่ายไอน้ำและน้ำป้อน	57
รูปที่ 3.20	ขั้นตอนการตรวจวัดและวิเคราะห์ในส่วนของระบบการนำความร้อนกลับ	58
รูปที่ 3.21	ตารางบันทึกข้อมูลระบบไอน้ำ	59
รูปที่ 3.22	เกจวัดความดันที่ถังพักไอน้ำ	59
รูปที่ 3.23	มิเตอร์น้ำป้อน	60
รูปที่ 3.24	ตำแหน่งการวัดองค์ประกอบของก๊าซไอเสีย	60
รูปที่ 3.25	การตรวจสอบค่า TDS และค่า Conductivity	61

สารบัญรูปลูกภาพ (ต่อ)

รูปที่ 3.26	การตรวจสอบค่า pH	61
รูปที่ 3.27	ตัวอย่างการตรวจวัดสภาพนวน	62
รูปที่ 3.28	ตัวอย่างการรั่วไหลของท่อส่งจ่ายไอน้ำ	63
รูปที่ 3.29	ก๊าดักไอน้ำสภาพใช้งานปกติ	63
รูปที่ 3.30	ก๊าดักไอน้ำที่มีการรั่วไหล	64
รูปที่ 4.1	ตำแหน่งการตรวจวัดความร้อนสูญเสียที่ผนังหม้อไอน้ำ	66
รูปที่ 4.2	ผลการตรวจวัดองค์ประกอบของก๊าซไอเสีย	70
รูปที่ 4.3	ท่อน้ำจาก economizer ไปยังถังเก็บน้ำป้อน (อุณหภูมิเฉลี่ยที่ผิวท่ออยู่ที่ 70.9 °C)	72
รูปที่ 4.4	ท่อน้ำจากถังเก็บน้ำป้อนไปยังหม้อไอน้ำ (อุณหภูมิเฉลี่ยที่ผิวท่ออยู่ที่ 72.2 °C)	72
รูปที่ 4.5	ตัวอย่างก๊าดักไอน้ำที่มีการรั่วไหล	74
รูปที่ 4.6	ตัวอย่างก๊าดักไอน้ำที่ปกติ	74
รูปที่ 4.7	ผนังด้านหน้าของหม้อน้ำแบบท่อ	76
รูปที่ 4.8	ผนังประตูห้องเผาไหม้ของหม้อน้ำแบบท่อ	77
รูปที่ 4.9	ผนังด้านซ้ายของหม้อน้ำแบบท่อ	77
รูปที่ 4.10	ผนังด้านขวาของหม้อน้ำแบบท่อ	77
รูปที่ 4.11	ผนังด้านบนของหม้อน้ำแบบท่อ	77
รูปที่ 4.12	ผนังด้านหลังของหม้อน้ำแบบท่อ	78
รูปที่ 4.13	ผนังด้านหน้าของหม้อน้ำแบบท่อไฟ (ด้านซ้าย)	78
รูปที่ 4.14	ผนังด้านหน้าของหม้อน้ำแบบท่อไฟ (ด้านขวา)	78
รูปที่ 4.15	ผนังด้านซ้ายของหม้อน้ำแบบท่อไฟ	79
รูปที่ 4.16	ผนังด้านขวาของหม้อน้ำแบบท่อไฟ	79
รูปที่ 4.17	ผนังด้านหลังของหม้อน้ำแบบท่อไฟ	79
รูปที่ 4.18	ท่อน้ำจาก economizer	85
รูปที่ 4.19	ท่อน้ำจากถังเก็บน้ำป้อนไปยังหม้อไอน้ำ	86

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1	แสดงการเปรียบเทียบวิธีการประเมินประสิทธิภาพหม้อน้ำ	8
ตารางที่ 2.2	ประสิทธิภาพหม้อน้ำในต่างประเทศอ้างอิงจากข้อมูลงานวิจัย	14
ตารางที่ 2.3	สมการหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน	30
ตารางที่ 2.4	แสดงค่ามาตรฐานของคุณภาพน้ำป้อนหม้อน้ำ	34
ตารางที่ 2.5	แสดงค่ามาตรฐานของคุณภาพน้ำในหม้อน้ำ	34
ตารางที่ 3.1	ข้อมูลเบื้องต้นของหม้อน้ำ	43
ตารางที่ 3.2	อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัด	53
ตารางที่ 4.1	ภาพถ่ายความร้อนแบบอินฟราเรดที่ผิวของหม้อน้ำ	66
ตารางที่ 4.2	ผลการตรวจวัดองค์ประกอบของก๊าซไอเสีย	70
ตารางที่ 4.3	ผลการตรวจวัดคุณภาพน้ำ	71
ตารางที่ 4.4	ผลการตรวจวัดอุปกรณ์ที่ใช้ไอน้ำ	73
ตารางที่ 4.5	ผลการตรวจวัดกับดักไอน้ำ	75
ตารางที่ 4.6	การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ความร้อนสูญเสียที่ผิวหรือผนังหม้อน้ำ	76
ตารางที่ 4.7	คำนวณหาปริมาณความร้อนสูญเสียที่ผิวหรือผนังหม้อน้ำ	80
ตารางที่ 4.8	เปรียบเทียบองค์ประกอบของก๊าซไอเสีย	81
ตารางที่ 4.9	เปรียบเทียบคุณภาพน้ำจากการตรวจวัด	82
ตารางที่ 4.10	คำนวณหาประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ	84
ตารางที่ 4.11	การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ความร้อนสูญเสียที่ผิวที่ส่งจ่ายไอน้ำและน้ำป้อน	85
ตารางที่ 4.12	คำนวณหาความร้อนสูญเสีย	86
ตารางที่ 4.13	คำนวณหาอัตราการสูญเสียไอน้ำ	87
ตารางที่ 5.1	แสดงผลการคำนวณต้นทุนไอน้ำ	91
ตารางที่ 5.2	แสดงมาตรการที่ได้มีการกำหนดขึ้นเพื่อปรับปรุงแก้ไขปัญหาของระบบไอน้ำ	92
ตารางที่ 5.3	ศักยภาพในการลดการโบลว์ดาวน์	93
ตารางที่ 5.4	ศักยภาพในการหุ้มฉนวนท่อส่งจ่ายน้ำป้อน	95
ตารางที่ 5.5	ศักยภาพในการปรับแต่งการเผาไหม้	96
ตารางที่ 5.6	ศักยภาพในการเปลี่ยนกับดักไอน้ำ	97
ตารางที่ 5.7	สรุปศักยภาพของมาตรการและความคุ้มค่าในการลงทุน	98
ตารางที่ 5.8	การเปรียบเทียบศักยภาพของมาตรการกับต้นทุนในการผลิตไอน้ำ	99
ตารางที่ 5.9	ตารางเปรียบเทียบประสิทธิภาพของหม้อน้ำ	100

บทที่ 1

บทนำ

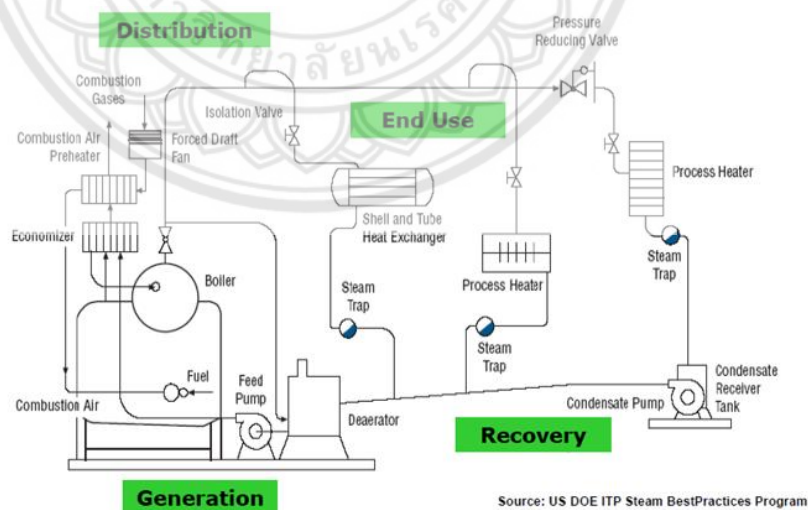
1.1 ที่มาและความสำคัญ

ด้วยภาคอุตสาหกรรมในประเทศไทยมีการใช้พลังงานค่อนข้างมาก ไม่ว่าจะเป็นพลังงานไฟฟ้าหรือพลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิง จากการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายจำแนกตามสาขาเศรษฐกิจ ในปี 2558 พบว่ามีการใช้พลังงานสาขาอุตสาหกรรมถึง 27,803 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ หรือคิดเป็นร้อยละ 35.7 ของการใช้พลังงานในประเทศ นอกจากนี้ยังพบว่า ดัชนีความเข้มการใช้พลังงาน (EI) หรือพลังงานที่ใช้พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ (ktoe) ต่อหน่วยผลิตภัณฑ์มวลรวมภายในประเทศ (Gross domestic product; GDP; billion baht) สำหรับภาคอุตสาหกรรมนั้นสูงมาก และเพื่อให้เป็นไปตามแผนอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ. 2558 – 2579 (Energy Efficiency Plan; EEP 2015) ของประเทศไทย และเป็นไปตามเป้าหมายลดความเข้มการใช้พลังงาน (Energy Intensity; EI) ลงร้อยละ 30 ในปี พ.ศ. 2579 (ค.ศ. 2036) จึงจำเป็นต้องดำเนินการประหยัดพลังงานอย่างเป็นระบบและเป็นรูปธรรมในส่วนของโรงงานควบคุมซึ่งเป็นผู้ใช้พลังงานที่มีนัยสำคัญ

โรงงานอุตสาหกรรมมีการใช้พลังงานเป็นจำนวนมากในการผลิตไอน้ำ และมีจำนวนหม้อน้ำที่ใช้ทำงานอยู่ในปัจจุบันกว่า 15,000 เครื่อง โดยแบ่งเป็นหม้อน้ำแบบท่อไฟ 56% และแบบท่อน้ำ 30% จากจำนวนหม้อน้ำที่มีอยู่มากนี้ทำให้มีการใช้พลังงานและมีการปลดปล่อย CO₂ สูงด้วย ทั้งนี้พบว่ามีการใช้พลังงานในหม้อน้ำสูงถึง 8,100 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ หรือคิดเป็น 29.1% ของพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรม ดังนั้นจึงจำเป็นต้องสนับสนุนส่งเสริมให้โรงงานเหล่านี้มีการประหยัดพลังงานและช่วยลดการปลดปล่อย CO₂ อย่างเป็นรูปธรรมและยั่งยืน

หากกล่าวถึงการใช้พลังงานความร้อนในสาขาอุตสาหกรรมแล้วนั้น การใช้พลังงานส่วนใหญ่จะถูกใช้เพื่อการทำความร้อนและให้ความร้อนแก่เครื่องจักรในกระบวนการผลิต ซึ่งตัวกลางที่นิยมมากที่สุดคือไอน้ำ ดังนั้นหม้อน้ำซึ่งเป็นอุปกรณ์หลักในการผลิตไอน้ำและระบบไอน้ำ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีการตรวจประเมิน โดยเริ่มจากการสำรวจตรวจวัดประสิทธิภาพการเผาไหม้ซึ่งหมายถึง ประสิทธิภาพการ

ปลดปล่อยความร้อนของเชื้อเพลิงหลากหลายชนิดทั้ง เชื้อเพลิงเหลว เชื้อเพลิงก๊าซ และเชื้อเพลิงแข็ง เมื่อทำการวัดประสิทธิภาพการเผาไหม้แล้ว จะต้องทำการประเมินต่อไปอีกว่า ความร้อนดังกล่าวสามารถถ่ายเทไปให้น้ำ เพื่อเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นไอน้ำ ได้ตามอุณหภูมิและความดันที่ต้องการใช้งานหรือไม่ กล่าวคือจะต้องทำการประเมินประสิทธิภาพทางความร้อนของหม้อน้ำ โดยใช้เกณฑ์มาตรฐานอ้างอิง ซึ่งเกณฑ์มาตรฐานจะมีการระบุการได้มาของข้อมูลจากการตรวจวัด และสมการคำนวณไว้อย่างชัดเจน เมื่อได้ประสิทธิภาพในการผลิตไอน้ำแล้วนั้น ยังจะต้องพิจารณาต่อไปอีกถึงการควบคุมดูแลที่เหมาะสมในการใช้งานหม้อน้ำ ตัวอย่างเช่น การควบคุมคุณภาพของน้ำป้อน อุณหภูมิน้ำป้อน คุณภาพของน้ำภายในตัวหม้อน้ำ และการควบคุมอัตราส่วนของการโบล์วดาวน์ เพื่อรักษาคุณภาพน้ำทางเคมีและป้องกันการเกิดตะกรัน รวมถึงการนำน้ำคอนเดนเสทกลับมาใช้ประโยชน์ ทั้งนี้หากไม่ควบคุมดูแลการใช้งานอย่างเหมาะสมก็จะก่อให้เกิดการสูญเสียพลังงานความร้อนได้ เช่น หากเกิดการโบล์วดาวน์มากเกินไปจะทำให้ต้องใช้เชื้อเพลิงเพิ่มมากขึ้น หรือหากโบล์วดาวน์น้อยเกินไปก็จะเกิดปัญหาการสะสมของตะกรันที่ด้านในของหม้อน้ำได้ ซึ่งจะส่งผลต่อการผุกร่อนของท่อส่งจ่ายไอน้ำ ทำให้เกิดการเสียหายของท่อและอุปกรณ์ในระบบส่งจ่ายไอน้ำอีกด้วย ซึ่งหากพิจารณาตามแนวทางการปฏิบัติที่ดีของการใช้งานระบบไอน้ำ อาจแยกพิจารณาระบบไอน้ำได้ออกเป็น 4 ส่วน คือ ส่วนการผลิตไอน้ำ (Generation) ส่วนของระบบท่อส่งจ่ายไอน้ำและน้ำป้อน (Distribution) ส่วนของอุปกรณ์ใช้ไอน้ำ (End Use) และส่วนของการนำความร้อนกลับ (Recovery) ดังแสดงในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 แสดงระบบไอน้ำ [1]

ดังนั้นในแต่ละส่วนของระบบไอน้ำจำเป็นจะต้องทำการตรวจประเมินอย่างเหมาะสม จึงเป็นที่มาของโครงการนี้ ซึ่งโครงการนี้ได้รับการสนับสนุนและความร่วมมือจากทาง บริษัท ลานนาโปรดักส์ จำกัด ที่ได้ให้คณะผู้จัดทำโครงการเข้าไปตรวจสอบระบบไอน้ำที่มีการใช้งานภายในบริษัท เพื่อเป็นการประเมินประสิทธิภาพการใช้พลังงานในระบบไอน้ำและเป็นการหาแนวทางในการลดพลังงานที่เกิดการสูญเสียในระบบไอน้ำในแต่ละส่วนอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อศึกษาและตรวจวัดความสูญเสียในระบบไอน้ำของโรงงานลานนาโปรดักส์ โดยแยกพิจารณาระบบไอน้ำได้ออกเป็น 4 ส่วน คือ ส่วนการผลิตไอน้ำ (Generation) ส่วนของระบบท่อส่งจ่ายไอน้ำและน้ำป้อน (Distribution) ส่วนของอุปกรณ์ใช้ไอน้ำ (End Use) และ ส่วนของการนำความร้อนกลับ (Recovery)

1.2.2 เพื่อวิเคราะห์และกำหนดมาตรการในการประหยัดพลังงานในระบบไอน้ำของโรงงานลานนาโปรดักส์ โดยแยกพิจารณาระบบไอน้ำได้ออกเป็น 4 ส่วน ส่วนการผลิตไอน้ำ (Generation) ส่วนของระบบท่อส่งจ่ายไอน้ำและน้ำป้อน (Distribution) ส่วนของอุปกรณ์ใช้ไอน้ำ (End Use) และส่วนของการนำความร้อนกลับ (Recovery)

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.3.1 โรงงานลานนาโปรดักส์ ได้รับการตรวจวัดและประเมินความสูญเสียของระบบไอน้ำอย่างถูกต้อง

1.3.2 โรงงานลานนาโปรดักส์ ได้ทราบถึงมาตรการในการปรับปรุงระบบไอน้ำภายในโรงงาน รวมถึงศักยภาพของมาตรการเพื่อเป็นตัวช่วยในการตัดสินใจลงทุนปรับปรุงระบบไอน้ำ

1.4 ขอบเขตโครงการ

1.4.1 การตรวจวัดความสูญเสียของระบบไอน้ำในส่วนของ ระบบผลิตไอน้ำ จะอ้างอิงการตรวจวัดตามมาตรฐาน JIS B8222:1993 โดยเป็นการหาประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำทางอ้อม และประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำที่ได้จากการตรวจวัดจะนำมาเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำที่ได้จากการศึกษางานวิจัย

1.4.2 การตรวจวัดความสูญเสียของระบบไอน้ำในส่วนของ ระบบการส่งจ่ายไอน้ำและน้ำป้อน จะพิจารณาจากการสูญเสียความร้อนที่ผิวของท่อส่งจ่ายไอน้ำและผิวของท่อส่งจ่ายน้ำป้อนโดยใช้ โปรแกรม 3E Plus รวมถึงประเมินการรั่วไหลไอน้ำที่ผิวของท่อส่งจ่ายไอน้ำโดยการใช้สมการของ Napier's Choke Flow

1.4.3 การตรวจวัดความสูญเสียของระบบไอน้ำในส่วนของ อุปกรณ์ที่ใช้ไอน้ำ จะทำการแบ่ง อุปกรณ์ที่ใช้ไอน้ำออกเป็น 3 ประเภท คือ 1. อุปกรณ์ที่ใช้ไอน้ำโดยตรง (Steam cooker) 2. อุปกรณ์ที่ใช้ไอน้ำโดยอ้อม (Steam kettle) และ 3. อุปกรณ์ใช้ไอน้ำที่ใช้ในการผลิตกำลัง (Steam turbine) หาก อุปกรณ์ที่ใช้ไอน้ำไม่มีการติดตั้งเครื่องมือวัดอัตราการไหลของไอน้ำจะไม่ทำการตรวจวัดอุปกรณ์ที่ใช้ไอน้ำ นั้น เนื่องจากไม่ทราบสถานะของไอน้ำ ณ จุดต่างๆ

1.4.4 การตรวจวัดความสูญเสียของระบบไอน้ำในส่วนของ การนำความร้อนกลับ จะพิจารณา จากการรั่วไหลของก๊าดกไอน้ำ

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1.5.1 ศึกษาทฤษฎีรวมถึงข้อมูลรายละเอียดต่างๆของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.5.2 เรียนรู้วิธีการใช้งานอุปกรณ์หรือเครื่องมือในการตรวจวัดระบบไอน้ำทั้ง 4 ส่วน

1.5.3 ทำการตรวจวัดระบบไอน้ำทั้ง 4 ส่วนของโรงงานอุตสาหกรรมที่ได้รับมอบหมาย

1.5.4 วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดและคำนวณหาพลังงานที่สูญเสียในระบบไอน้ำทั้ง 4

ส่วน

1.5.5 หามาตรการในการลดพลังงานที่สูญเสียของระบบไอน้ำ

1.5.6 ทำการประเมินศักยภาพของมาตรการในการลดพลังงานที่สูญเสียของระบบไอน้ำ

1.5.7 สรุปผลการดำเนินงาน

1.5.8 จัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ประสิทธิภาพของเครื่องจักรกลตามหลักการเชิงวิศวกรรม หมายถึง ศักยภาพในการดึงพลังงานมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับพลังงานที่ป้อนให้แก่เครื่องจักรกล [1] เช่น ประสิทธิภาพของปั้มน้ำเป็นการพิจารณาศักยภาพของพลังงานที่น้ำได้รับเมื่อความดันน้ำเพิ่มขึ้นเปรียบเทียบกับพลังงานที่ป้อนให้แก่ปั้มน้ำ ในทำนองเดียวกันหากพิจารณาในด้านประสิทธิภาพของหม้อน้ำสามารถนิยามโดยใช้หลักการเชิงวิศวกรรมเดียวกัน ซึ่งสามารถแบ่งประสิทธิภาพของหม้อน้ำตามวิธีการคำนวณ แบ่งออกเป็นสองประเภทคือ

1. ประสิทธิภาพเชิงความร้อน หมายถึง ดัชนีชี้วัดความสามารถในการแปรรูปพลังงานในการเผาไหม้เชื้อเพลิง เปลี่ยนรูปเป็นพลังงานที่เกิดประโยชน์ [1] เช่น พลังงานในการผลิตไอน้ำ ซึ่งในที่นี้ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ได้จะมีค่าลดลงตามความสูญเสียในระบบที่เกิดขึ้น อาทิ ความสูญเสียไปกับผนังหม้อน้ำและความสูญเสียไปกับแก๊สไอเสียร้อน เป็นต้น

2. ประสิทธิภาพการเผาไหม้ หมายถึง ดัชนีชี้วัดศักยภาพในการเผาไหม้เชื้อเพลิงของหม้อน้ำและความสามารถในการดึงพลังงานจากการเผาไหม้ไปใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด [1] ประสิทธิภาพการเผาไหม้จะมีค่าลดลงตามความสูญเสียในระบบการเผาไหม้ อาทิ ความสูญเสียไปกับการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์และความสูญเสียไปกับคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้ในซีเถ้า เป็นต้น

นอกจากการจำแนกประสิทธิภาพหม้อน้ำตามวิธีการคำนวณแล้ว ในต่างประเทศได้มีการจัดจำแนกประสิทธิภาพหม้อน้ำตามมาตรฐานสากลทั้งในแถบอเมริกา (ASME) ยุโรป (EN, BN) และ เอเชีย (JIS) โดยจำแนกการประเมินประสิทธิภาพของหม้อน้ำตามวิธีการทดสอบ แบ่งออกเป็นสองประเภทคือ การทดสอบประสิทธิภาพหม้อน้ำด้วยวิธีทางตรง (Direct method) และ การทดสอบประสิทธิภาพหม้อน้ำด้วยวิธีทางอ้อม (Indirect method) รายละเอียดดังนี้

1. การประเมินประสิทธิภาพหม้อน้ำด้วยวิธีทางตรง (Direct method)

การประเมินประสิทธิภาพหม้อน้ำด้วยวิธีทางตรง [1] เป็นการประเมินโดยการเทียบอัตราส่วนระหว่างความร้อนที่สะสมในไอน้ำต่อความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง ซึ่งเป็นวิธีการคำนวณโดยง่าย โดยจะต้องทราบข้อมูลอัตราการใช้เชื้อเพลิง อัตราการผลิตไอน้ำ ค่าความร้อนเชื้อเพลิง ความดันไอน้ำ อุณหภูมิน้ำป้อน แผนผังการประเมินประสิทธิภาพหม้อน้ำด้วยวิธีทางตรงดังแสดงในรูปที่ 2.1

ประสิทธิภาพหม้อน้ำด้วยวิธีทางตรง (Direct method) คือ $\frac{\text{ความร้อนที่สะสมในไอน้ำ}}{\text{ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง}}$

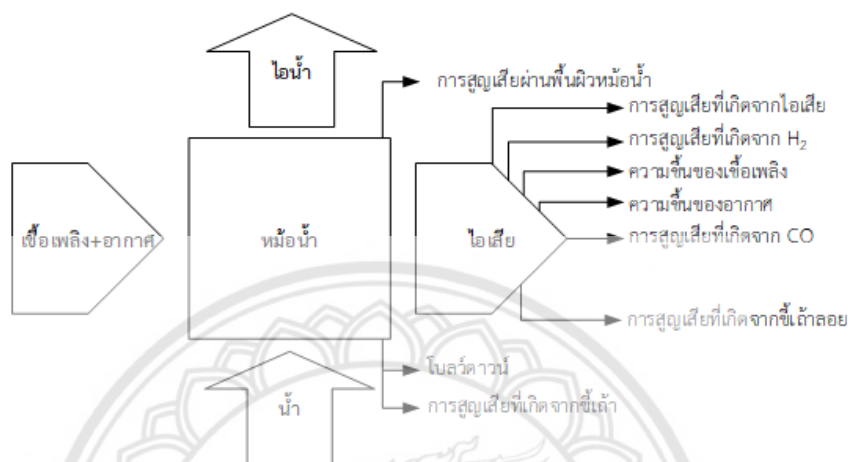


รูปที่ 2.1 แผนผังการประเมินประสิทธิภาพหม้อน้ำด้วยวิธีทางตรง [1]

2. การประเมินประสิทธิภาพหม้อน้ำด้วยวิธีทางอ้อม (Indirect method)

การประเมินประสิทธิภาพหม้อน้ำด้วยวิธีทางอ้อม [1] เป็นการประเมินผลรวมความร้อนสูญเสียที่ออกจากหม้อน้ำ ความร้อนสูญเสียเกิดจากการที่หม้อน้ำไม่สามารถดูดซับพลังงานจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงไปใช้ได้หมด 100 % ซึ่งถือเป็นเรื่องธรรมชาติของเครื่องจักรกลความร้อน แผนผังการประเมินประสิทธิภาพหม้อน้ำด้วยวิธีทางอ้อมดังแสดงในรูปที่ 2.2

ประสิทธิภาพหม้อน้ำด้วยวิธีทางอ้อม (indirect method) คือ 1 – ผลรวมความร้อนสูญเสียของหม้อน้ำ



รูปที่ 2.2 แผนผังการประเมินประสิทธิภาพหม้อน้ำด้วยวิธีทางอ้อม [1]

ในต่างประเทศได้มีการเปรียบเทียบประสิทธิภาพหม้อน้ำระหว่างประเทศในแถบ อเมริกา ยุโรป ญี่ปุ่นและจีน เปรียบเทียบในมิติของ วิธีการทดสอบ วิธีการคำนวณ ค่าความร้อนที่ใช้คำนวณ จำนวนครั้ง ในการทดสอบและวิธีการวิเคราะห์ความผิดพลาดของผลลัพธ์ แสดงตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบวิธีการประเมินประสิทธิภาพหม้อน้ำระหว่างประเทศในแถบ อเมริกา ยุโรป ญี่ปุ่นและจีน [2]

	CONTENT	CHINA		USA	EU	JAPAN
		GB/T 10180	GB/T10184			
Test method & result evaluation	Test method	<ul style="list-style-type: none"> Direct balance method Direct-indirect balance method Indirect balance method 	Direct balance method or indirect balance method	Direct balance method or indirect balance method	Direct balance method or indirect balance method	/
	Calculation method of thermal efficiency	Average value of direct and / or indirect balance thermal efficiency	The indirect balance method is recommended to calculate the thermal efficiency	The indirect balance thermal efficiency is recommended	<ul style="list-style-type: none"> The indirect balance thermal efficiency Direct balance test (the main heat loss should be given) 	/
	Fuel heat value	Low heat value	Low heat value	High heat value	High heat value or low heat value	/
	Times of test	2 times	2 times	At least 1 time	At least 1 time	/
	Uncertainty analysis	/	Error analysis	Uncertainty analysis	Uncertainty analysis	/

จากตารางที่ 2.1 สามารถสรุปได้ว่า

1. ด้านมิติของวิธีการทดสอบพบว่า ทุก ๆ ประเทศที่ระบุตามตาราง ใช้วิธีการทดสอบเหมือนกัน ทั้งวิธีทางตรงและวิธีทางอ้อม

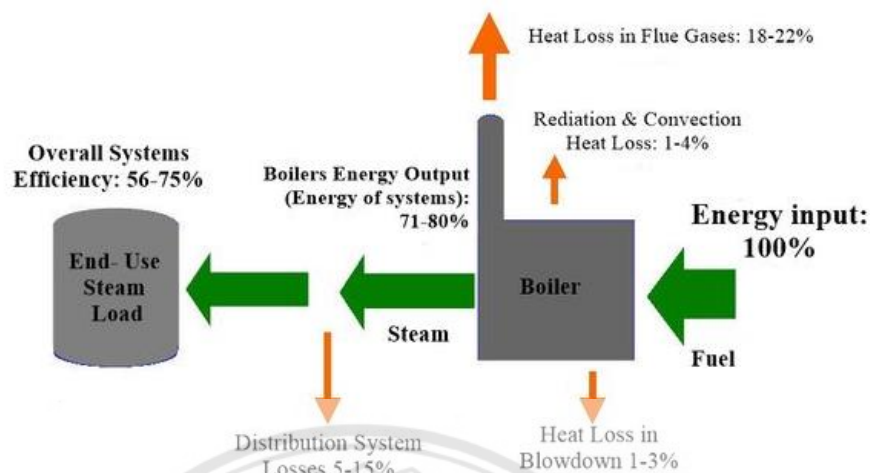
2. ด้านมิติของวิธีการคำนวณประสิทธิภาพเชิงความร้อน พบว่าประเทศจีนใช้ค่าเฉลี่ยจากการทดสอบของวิธีทางตรงหรือทางอ้อมในการคำนวณประสิทธิภาพ (GB/T 10180) แต่ประเทศในแถบอเมริกาแนะนำให้ใช้ค่าเฉลี่ยจากการทดสอบของวิธีทางอ้อมในการคำนวณประสิทธิภาพ ในขณะที่ประเทศในแถบยุโรปแนะนำให้ใช้ค่าเฉลี่ยจากการทดสอบของวิธีทางอ้อมในการคำนวณประสิทธิภาพ เช่นกัน แต่หากใช้ค่าเฉลี่ยจากการทดสอบของวิธีทางตรงต้องระบุข้อมูลค่าความสูญเสียหลักด้วย

3. ด้านมิติของค่าความร้อนที่ใช้คำนวณพบว่าประเทศจีนใช้ค่าความร้อนด้านต่ำในการคำนวณหาประสิทธิภาพ แต่ประเทศในแถบอเมริกาแนะนำให้ใช้ค่าความร้อนด้านสูงในการคำนวณ ในขณะที่ประเทศในแถบยุโรปสามารถใช้ได้ทั้งค่าความร้อนด้านต่ำและด้านสูงในการคำนวณหาประสิทธิภาพ

4. ด้านมิติของจำนวนครั้งในการทดสอบพบว่าประเทศจีนต้องทำการทดสอบประสิทธิภาพจำนวน 2 ครั้ง ในขณะที่ประเทศในแถบอเมริกาและยุโรปแนะนำให้ทำการทดสอบอย่างน้อย 1 ครั้ง

5. ด้านมิติของวิธีการวิเคราะห์ความผิดพลาดของผลลัพธ์ ประเทศจีนเลือกใช้วิธีการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อน (Error analysis) ในขณะที่ประเทศในแถบอเมริกาและยุโรปใช้วิธีการวิเคราะห์ความไม่แน่นอน (Uncertainty analysis)

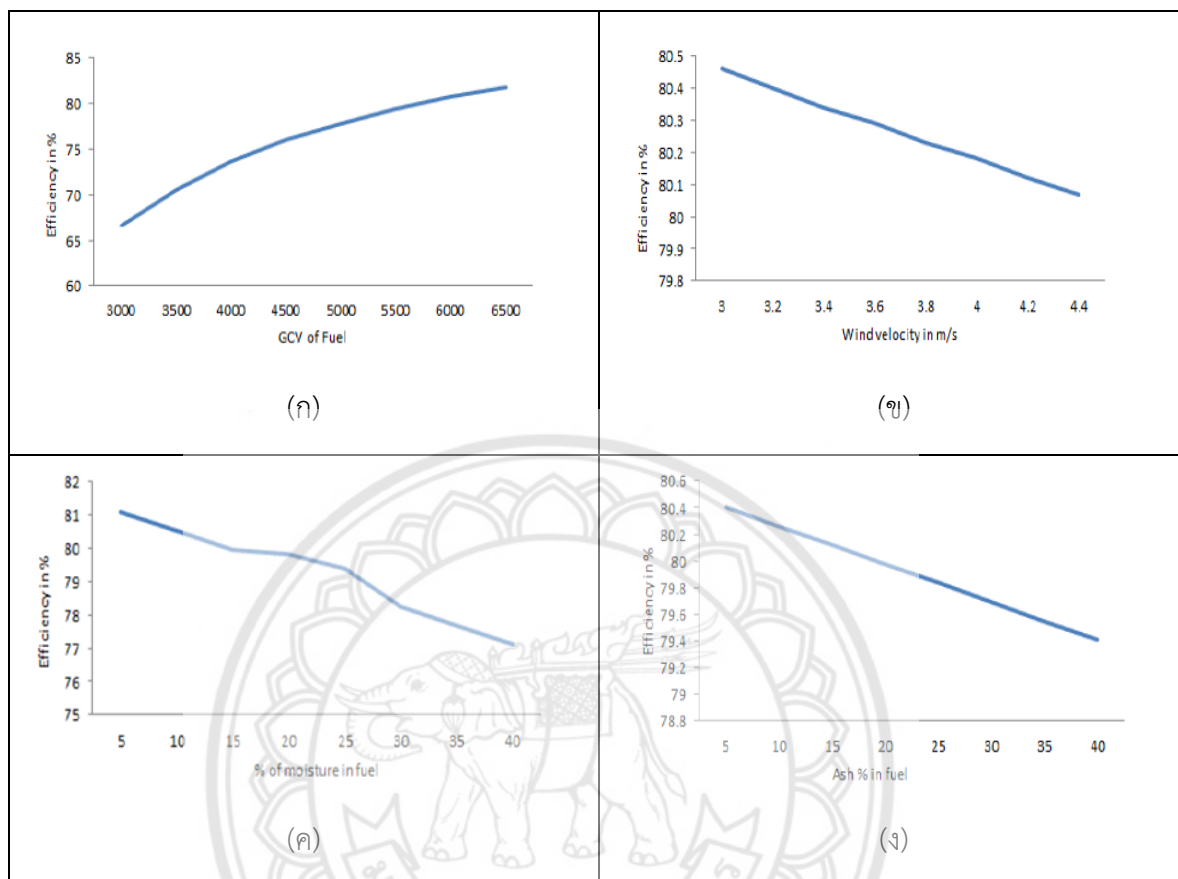
โดยทั่วไปแล้วการประเมินประสิทธิภาพหม้อน้ำด้วยวิธีทางตรงหรือวิธีทางอ้อม ผลที่ได้ควรจะมีค่าใกล้เคียงกันหากไม่มีความสูญเสีย มีเครื่องมือวัดแม่นยำและวิธีการทดสอบที่ถูกต้อง ซึ่งทั้งสองวิธีมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน โดยข้อเสียของการประเมินประสิทธิภาพหม้อน้ำด้วยวิธีทางตรงคือหากไม่มีเครื่องมือวัดที่ถูกต้องและแม่นยำ ทั้งการวัดอัตราการผลิตไอน้ำและอัตราการป้อนเชื้อเพลิง ผลการคำนวณประสิทธิภาพด้วยวิธีทางตรงจะมีโอกาสเกิดความผิดพลาดสูง ในขณะที่การประเมินประสิทธิภาพหม้อน้ำด้วยวิธีทางอ้อมมีข้อเสียตรงต้องประเมินความสูญเสียในหลายๆส่วน จึงจำเป็นต้องใช้เครื่องมือวัดหลายชนิดที่ต้องมีความแม่นยำและถูกต้อง ทั้งนี้ในโครงการนี้เลือกการประเมินประสิทธิภาพหม้อน้ำด้วยวิธีทางอ้อมเป็นหลัก จากการศึกษาในงานวิจัยพบว่าปริมาณความสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบต่าง ๆ ของการประเมินประสิทธิภาพหม้อน้ำด้วยวิธีทางอ้อม แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงปริมาณความสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบต่าง ๆ ของการประเมินประสิทธิภาพหม้อน้ำด้วยวิธีทางอ้อม [3]

จากรูปที่ 2.3 เป็นการประเมินประสิทธิภาพด้วยวิธีทางอ้อมของหม้อน้ำเชื้อเพลิงแข็งแบบท่อน้ำ จะเห็นได้ว่าได้ประสิทธิภาพหม้อน้ำมีค่าอยู่ระหว่าง 71-80% ปริมาณความสูญเสียที่มากที่สุดคือความสูญเสียไปกับแก๊ส ไอดีร้อนประมาณ 18-22% ในขณะที่ความสูญเสียด้านผนังหม้อน้ำและด้านการโบล์ดวอนมีค่าน้อยประมาณ 1-4% ในงานวิจัยนี้ได้ประเมินประสิทธิภาพโดยรวมของระบบครอบคลุมทั้งหม้อน้ำ ระบบส่งจ่ายและอุปกรณ์ใช้ไอน้ำ พบว่ามีประสิทธิภาพโดยรวมของระบบประมาณ 56-75%

ค่าประสิทธิภาพของหม้อน้ำที่ประเมินด้วยวิธีทางอ้อมจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับหลายๆ ปัจจัยอย่าง อาทิ ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง ความเร็วลมรอบหม้อน้ำขณะทดสอบ ค่าความชื้นในเชื้อเพลิง และค่าปริมาณสัดส่วนขี้เถ้าในเชื้อเพลิง เป็นต้น โดยจากงานวิจัยของประเทศอินเดีย [4] ได้มีการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยดังกล่าวที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของหม้อน้ำ ทำการทดสอบตรวจวัดหม้อน้ำชนิดท่อน้ำแบบ FBC ขนาดพิกัด 40 ตันต่อชั่วโมง ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง ผลการทดสอบแสดงดังรูป 2.4 (ก-ง)

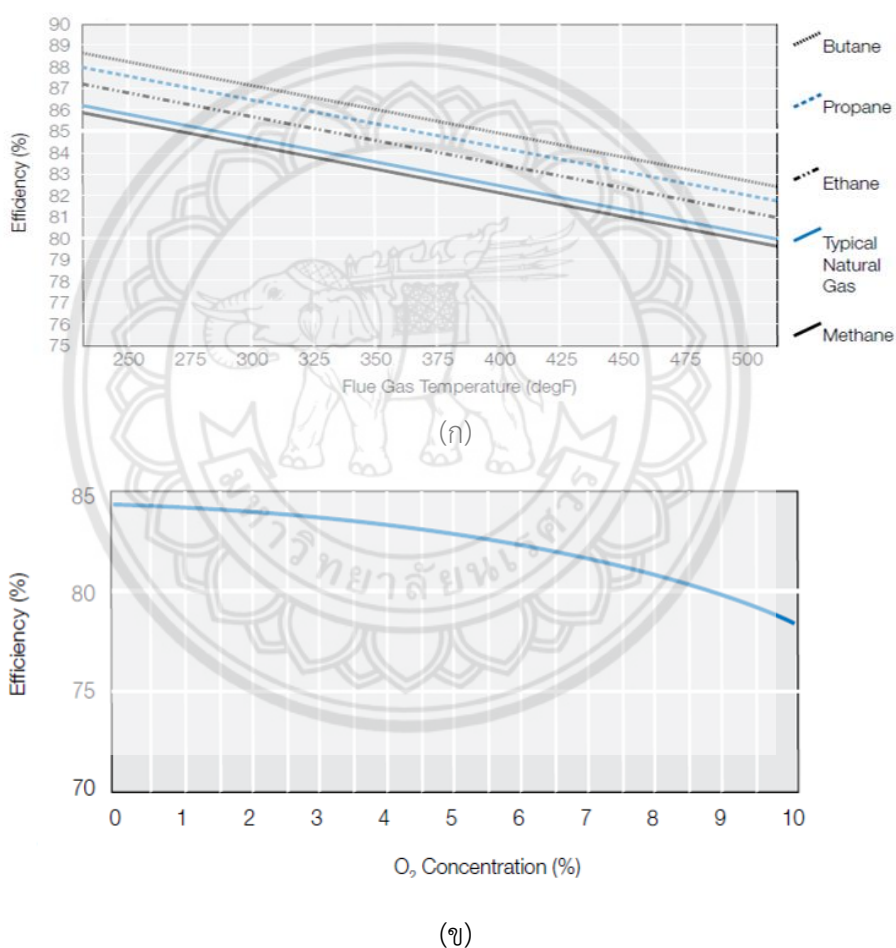


รูปที่ 2.4 แสดงอิทธิพลของค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (ก) ความเร็วลมรอบหม้อน้ำขณะทดสอบ (ข) ค่าความชื้นในเชื้อเพลิง (ค) และค่าปริมาณสัดส่วนขี้เถ้าในเชื้อเพลิง (ง) ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพหม้อน้ำชนิดท่อน้ำแบบ FBC ขนาดพิกัด 40 ตันต่อชั่วโมง ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง [4]

จากรูปที่ 2.4 (ก-ง) จะเห็นได้ว่าอิทธิพลของค่าความร้อนเชื้อเพลิงส่งผลต่อประสิทธิภาพของหม้อน้ำดังรูปที่ 2.4 (ก) พบว่าประสิทธิภาพหม้อน้ำมีค่าสูงขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของค่าความร้อนของเชื้อเพลิง เนื่องจากมีปริมาณความร้อนป้อนเข้าสู่หม้อน้ำมากขึ้น เป็นการเพิ่มศักยภาพในการผลิตพลังงาน ในทางตรงกันข้ามประสิทธิภาพหม้อน้ำจะมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของความเร็วลมรอบหม้อน้ำขณะทดสอบ ค่าความชื้นในเชื้อเพลิงและค่าปริมาณสัดส่วนขี้เถ้าในเชื้อเพลิง ดังรูปที่ 2.4 (ข-ง) เนื่องจากหากความเร็วลมรอบหม้อน้ำเพิ่มสูงขึ้นทำให้เกิดการพาความร้อนออกจากผิวหม้อน้ำเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้เกิดความสูญเสียความร้อนที่ผิวหม้อน้ำมากขึ้น ส่วนถ้าค่าความชื้นในเชื้อเพลิงมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงลดลงและเกิดการสูญเสียความร้อนไปกับการระเหยความชื้นในเชื้อเพลิง จึงส่งผลให้ได้ประสิทธิภาพหม้อน้ำลดลง ส่วนกรณีถ้าปริมาณสัดส่วนขี้เถ้าในเชื้อเพลิงมีค่าเพิ่มขึ้นหมายถึงสัดส่วน

องค์ประกอบที่ไม่เกิดการเผาไหม้มากขึ้น ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงจะมีค่าน้อยลง ซึ่งจะส่งผลต่อการลดลงของประสิทธิภาพหม้อน้ำ

ส่วนกรณีหม้อน้ำใช้เชื้อเพลิงก๊าซ ค่าประสิทธิภาพหม้อน้ำส่วนใหญ่แล้วจะแปรผันตรงกับ ชนิดเชื้อเพลิงก๊าซ อุณหภูมิแก๊สไอเสียร้อนและปริมาณออกซิเจนหลังการเผาไหม้ เป็นต้น โดยจากงานวิจัยของอเมริกา [5] ได้มีการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยดังกล่าวที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของหม้อน้ำ ทำการทดสอบตรวจวัดหม้อน้ำเชื้อเพลิงก๊าซชนิดท่อน้ำไฟนอน ผลการทดสอบแสดงดังรูป 2.5 (ก-ข)



รูปที่ 2.5 แสดงอิทธิพลของ ชนิดเชื้อเพลิงก๊าซ อุณหภูมิแก๊สไอเสียร้อน (ก) และปริมาณออกซิเจนหลังการเผาไหม้ (ข) ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพหม้อน้ำเชื้อเพลิงก๊าซชนิดท่อน้ำไฟนอน [5]

จากรูปที่ 2.5 (ก-ข) จะเห็นได้ว่าอิทธิพลของอุณหภูมิแก๊สไอเสียร้อนส่งผลต่อประสิทธิภาพหม้อน้ำ ดังรูปที่ 2.5 (ก) ประสิทธิภาพหม้อน้ำลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิแก๊สไอเสียร้อน สาเหตุมาจากมีความร้อนสูญเสียไปกับแก๊สไอเสียร้อนเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้พบว่าเชื้อเพลิงก๊าซชนิด Butane เมื่อเผาไหม้ในหม้อน้ำชนิดนี้แล้ว จะได้ค่าประสิทธิภาพหม้อน้ำสูงกว่าเชื้อเพลิงก๊าซชนิด Propane, Ethane, Natural gas และ Methane ตามลำดับ ในขณะที่เมื่อพิจารณาการเพิ่มขึ้นของปริมาณออกซิเจนหลังการเผาไหม้ รูปที่ 2.5 (ข) พบว่าประสิทธิภาพหม้อน้ำมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณออกซิเจนหลังการเผาไหม้ แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมการเผาไหม้ที่ใช้อากาศส่วนเกินมากเกินไปจนความจำเป็นทำให้เป็นการลดอุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง

ด้วยเหตุที่โครงการนี้พิจารณาเลือกวิธีการทดสอบหม้อน้ำด้วยวิธีทางอ้อม ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาผลของประสิทธิภาพหม้อน้ำที่ได้จากงานวิจัยในต่างประเทศจำนวน 33 บทความ โดยได้รวบรวมและเปรียบเทียบเป็นข้อมูลสรุปจัดจำแนกตามประเภทหม้อน้ำ ชนิดเชื้อเพลิง ประเทศที่ทำการศึกษาและขนาดพิกัดหม้อน้ำ แสดงตามตารางที่ 2.2



ตารางที่ 2.2 ประสิทธิภาพหม้อน้ำในต่างประเทศอ้างอิงจากข้อมูลงานวิจัย

ลำดับ ที่	ประเภทหม้อน้ำ	ชนิดเชื้อเพลิง	ประเทศ	ขนาดพิกัดหม้อ น้ำ (Ton/hr)	ประสิทธิภาพ หม้อน้ำด้วยวิธี ทางอ้อม (%)	เอกสารอ้างอิง
1	Fire Tube	diesel	Malaysia	3	77	[6]
2	Water Tube	Bituminous Coal	India	80	80	[7]
3	Fire tube	Coal	India	6	55	[8]
4	Fire tube	Furnace oil	India	10	81	[9]
5	Fire tube	Husk	India	6	68	[10]
6	Water Tube	Bagasse	South Africa	100	63	[11]
7	Water Tube	Coal	South Africa	70	83	[11]
8	Fire tube	Diesel	Malaysia	3	77	[12]
9	Water Tube	Indian Lignite Coal	India	80	78	[13]
10	Water Tube	Lignite coal	India	40	78	[14]
11	Water Tube	bituminous coal	India	40	80	[15]
12	Water Tube	natural gas	USA	18	78	[16]
13	Fire tube	natural gas	USA	5	82	[16]
14	Water Tube	Coal	USA	270	88	[17]
15	Water Tube	Oil	USA	270	89	[17]
16	Water Tube	Coal Fired	India	370	84	[18]
17	Fire tube	Coal	India	3	70	[19]
18	Fire tube	Rice Husk	India	4	63	[20]
19	Water Tube	coal	South African	150	90	[21]

ลำดับ ที่	ประเภทหม้อน้ำ	ชนิดเชื้อเพลิง	ประเทศ	ขนาดพิกัดหม้อ น้ำ (Ton/hr)	ประสิทธิภาพ หม้อน้ำด้วยวิธี ทางอ้อม (%)	เอกสารอ้างอิง
20	Water Tube	50%Most bagasse	South African	150	87	[21]
21	Water Tube	Coal	India	10	67	[22]
22	Water Tube	Biomass	India	35	69	[23]
23	Water Tube	Coal	India	100	85	[24]
24	Water Tube	Dry Bagasse	India	22	75	[25]
25	Water Tube	Dry Bagasse	India	120	67	[26]
26	Water Tube	Moist. Bagasse	India	120	74	[26]
27	water tube	Bagasse	Pakistan	35	78	[27]
28	water tube	Coal	India	30	80	[28]
29	Water Tube	coal	China	35	87	[29]
30	Water Tube	bituminous	India	193	82	[30]
31	Fire Tube	diesel	Nigeria	0.8	69	[31]
32	Fire Tube	Indian Coal	India	3	71	[32]
33	combination tube	solid biomass	India	20	76	[33]

นำข้อมูลจากตารางที่ 2.2 มาวิเคราะห์ต่อในเชิงสถิติ โดยแบ่งการวิเคราะห์ข้อมูลออกตามประเภทหม้อน้ำ ชนิดเชื้อเพลิง กลุ่มประเทศและขนาดพิกัดหม้อน้ำ มีรายละเอียดดังนี้

1. แบ่งตามประเภทหม้อน้ำ

รูปที่ 2.6 แสดงการวิเคราะห์ประสิทธิภาพหม้อน้ำเชิงสถิติแบ่งแยกข้อมูลตามประเภทหม้อน้ำ จากรูปจะเห็นได้ว่า จากฐานข้อมูลบทความ 33 เล่ม หม้อน้ำกรณที่่อน้ำโดยส่วนใหญ่มีค่าประสิทธิภาพหม้อน้ำในช่วง 71-80% (สัดส่วน 46%) รองลงมาประสิทธิภาพหม้อน้ำมีค่าอยู่ในช่วง 81-90 % มีสัดส่วนเท่ากับ 36% ส่วนประสิทธิภาพหม้อน้ำกรณที่่อน้ำโดยส่วนใหญ่มีค่าประสิทธิภาพหม้อน้ำในช่วง 61-70% (สัดส่วน 40%) รองลงมาประสิทธิภาพหม้อน้ำมีค่าอยู่ในช่วง 71-80 % มีสัดส่วนเท่ากับ

30% เมื่อพิจารณาข้อมูลในเชิงสถิติพบว่าจากฐานข้อมูลบทความ 33 เล่ม หม่อน้ำที่อ่อนนุ่มมีค่าประสิทธิภาพหม่อน้ำอยู่ในช่วง 62.9 – 89.8% มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 79.15% ส่วนกรณีหม่อน้ำที่ไฟมีค่าประสิทธิภาพหม่อน้ำอยู่ในช่วง 54.7 – 82.2% มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 71.33%

2. แบ่งตามชนิดเชื้อเพลิง

รูปที่ 2.7 แสดงการวิเคราะห์ประสิทธิภาพหม่อน้ำเชิงสถิติแบ่งแยกข้อมูลตามชนิดเชื้อเพลิง จากรูปจะเห็นได้ว่า จากฐานข้อมูลบทความ 33 เล่ม หม่อน้ำกรณีเชื้อเพลิงแข็ง โดยส่วนใหญ่มีค่าประสิทธิภาพหม่อน้ำในช่วง 71-80% (สัดส่วน 46%) รองลงมาประสิทธิภาพหม่อน้ำมีค่าอยู่ในช่วง 61-70 % มีสัดส่วนเท่ากับ 31% ส่วนประสิทธิภาพหม่อน้ำกรณีเชื้อเพลิงเหลวโดยส่วนใหญ่มีค่าประสิทธิภาพหม่อน้ำในช่วง 81-90% (สัดส่วน 80%) รองลงมาประสิทธิภาพหม่อน้ำมีค่าอยู่ในช่วง 71-80 % มีสัดส่วนเท่ากับ 20% เมื่อพิจารณาข้อมูลในเชิงสถิติพบว่าจากฐานข้อมูลบทความ 33 เล่ม หม่อน้ำกรณีเชื้อเพลิงแข็งมีค่าประสิทธิภาพหม่อน้ำอยู่ในช่วง 54.7 – 87.0 % มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 74.5% ส่วนกรณีหม่อน้ำเชื้อเพลิงเหลวมีค่าประสิทธิภาพหม่อน้ำอยู่ในช่วง 74.0 – 89.8% มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 84.3 % ในขณะที่หม่อน้ำที่ใช้เชื้อเพลิงก๊าซมีค่าประสิทธิภาพหม่อน้ำอยู่ในช่วง 83.9 – 89.4% มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 86.7 %

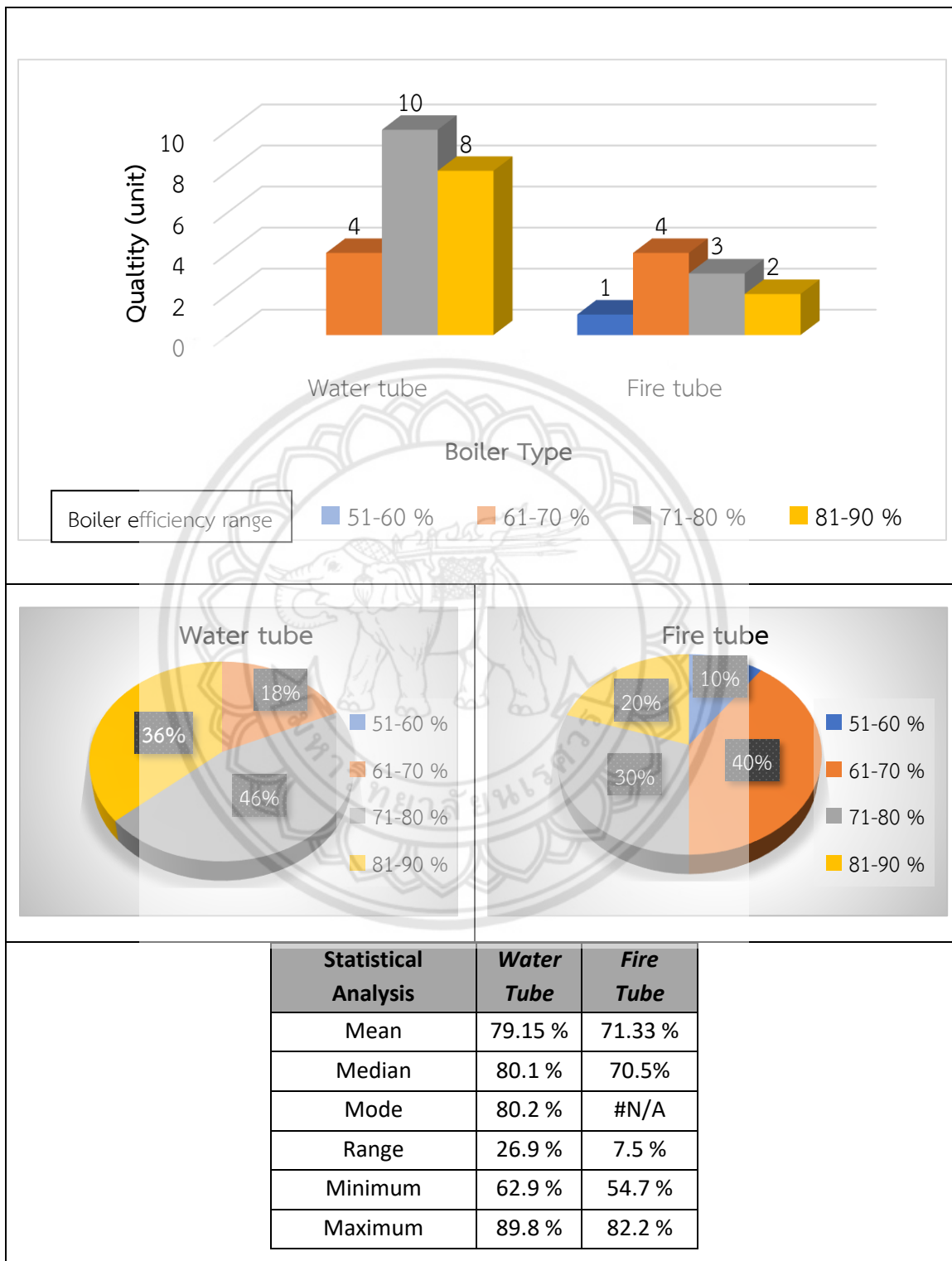
3. แบ่งตามกลุ่มประเทศ

รูปที่ 2.8 แสดงการวิเคราะห์ประสิทธิภาพหม่อน้ำเชิงสถิติแบ่งแยกข้อมูลตามชนิดเชื้อเพลิง จากรูปจะเห็นได้ว่า จากฐานข้อมูลบทความ 33 เล่ม หม่อน้ำกรณีกลุ่มประเทศแถบเอเชีย โดยส่วนใหญ่มีค่าประสิทธิภาพหม่อน้ำในช่วง 71-80% (สัดส่วน 36%) รองลงมาประสิทธิภาพหม่อน้ำมีค่าอยู่ในช่วงในช่วง 81-90 % มีสัดส่วนเท่ากับ 32% ส่วนประสิทธิภาพหม่อน้ำกรณีกลุ่มประเทศแถบอเมริกา โดยส่วนใหญ่มีค่าประสิทธิภาพหม่อน้ำในช่วง 81-90% (สัดส่วน 75%) รองลงมาประสิทธิภาพหม่อน้ำมีค่าอยู่ในช่วง 71-80 % มีสัดส่วนเท่ากับ 25% เมื่อพิจารณาข้อมูลในเชิงสถิติพบว่าจากฐานข้อมูลบทความ 33 เล่ม หม่อน้ำกรณีกลุ่มประเทศแถบเอเชีย มีค่าประสิทธิภาพหม่อน้ำอยู่ในช่วง 54.7 – 87.0 % มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 74.8% ส่วนกรณีหม่อน้ำกลุ่มประเทศแถบอเมริกา มีค่าประสิทธิภาพหม่อน้ำอยู่ในช่วง 78.0 – 89.4% มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 84.5 % ในขณะที่หม่อน้ำกลุ่มประเทศแถบแอฟริกา มีค่าประสิทธิภาพหม่อน้ำอยู่ในช่วง 62.9 – 89.8% มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 80.6 %

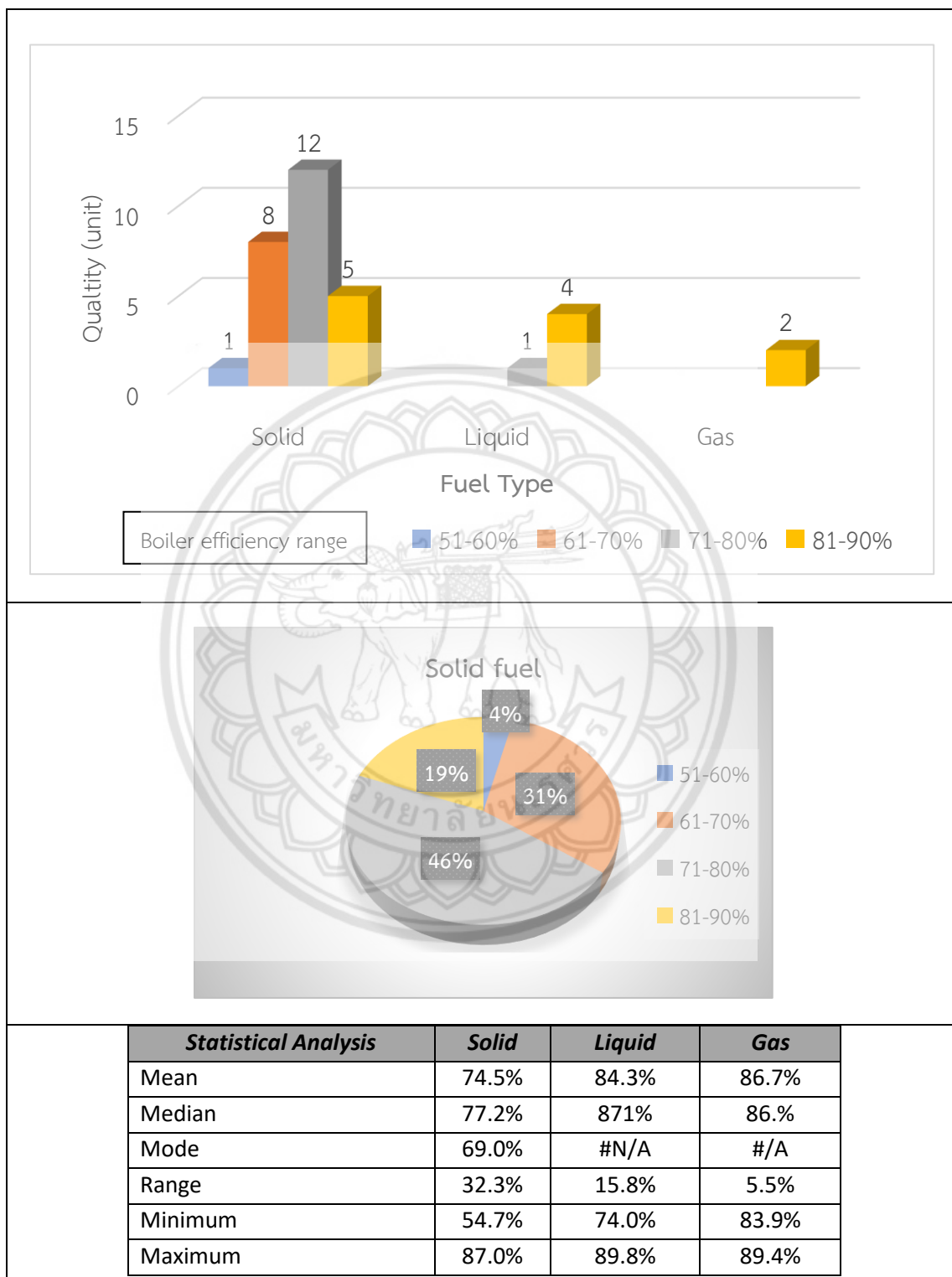
4. แบ่งตามขนาดพิกัดหม้อน้ำ

รูปที่ 2.9 แสดงการวิเคราะห์ประสิทธิภาพหม้อน้ำเชิงสถิติแบ่งแยกข้อมูลตามขนาดพิกัดหม้อน้ำ จากรูปจะเห็นได้ว่า จากฐานข้อมูลบทความ 33 เล่ม หม้อน้ำกรณีขนาดพิกัดหม้อน้ำมากกว่า 25 T/h โดยส่วนใหญ่มีค่าประสิทธิภาพหม้อน้ำในช่วง 81-90% (สัดส่วน 53 %) รองลงมาประสิทธิภาพหม้อน้ำมีค่าอยู่ในช่วง 71-80 % มีสัดส่วนเท่ากับ 31% ส่วนประสิทธิภาพหม้อน้ำกรณีขนาดพิกัดหม้อน้ำมากกว่า 10 -25 T/h โดยส่วนใหญ่มีค่าประสิทธิภาพหม้อน้ำในช่วง 71-80% (สัดส่วน 75%) รองลงมาประสิทธิภาพหม้อน้ำมีค่าอยู่ในช่วง 81-90 % มีสัดส่วนเท่ากับ 25% อีกทั้งประสิทธิภาพหม้อน้ำกรณีขนาดพิกัดหม้อน้ำมากกว่า 5-10 T/h โดยส่วนใหญ่มีค่าประสิทธิภาพหม้อน้ำในช่วง 61-70% (สัดส่วน 60%) ส่วนประสิทธิภาพหม้อน้ำกรณีขนาดพิกัดหม้อน้ำมากกว่า 1.5-5 T/h โดยส่วนใหญ่มีค่าประสิทธิภาพหม้อน้ำในช่วง 71-80% (สัดส่วน 60%) ที่เหลือจะเป็นหม้อน้ำขนาดน้อยกว่า 1.5 T/h มีค่าประสิทธิภาพในช่วง 61-70%

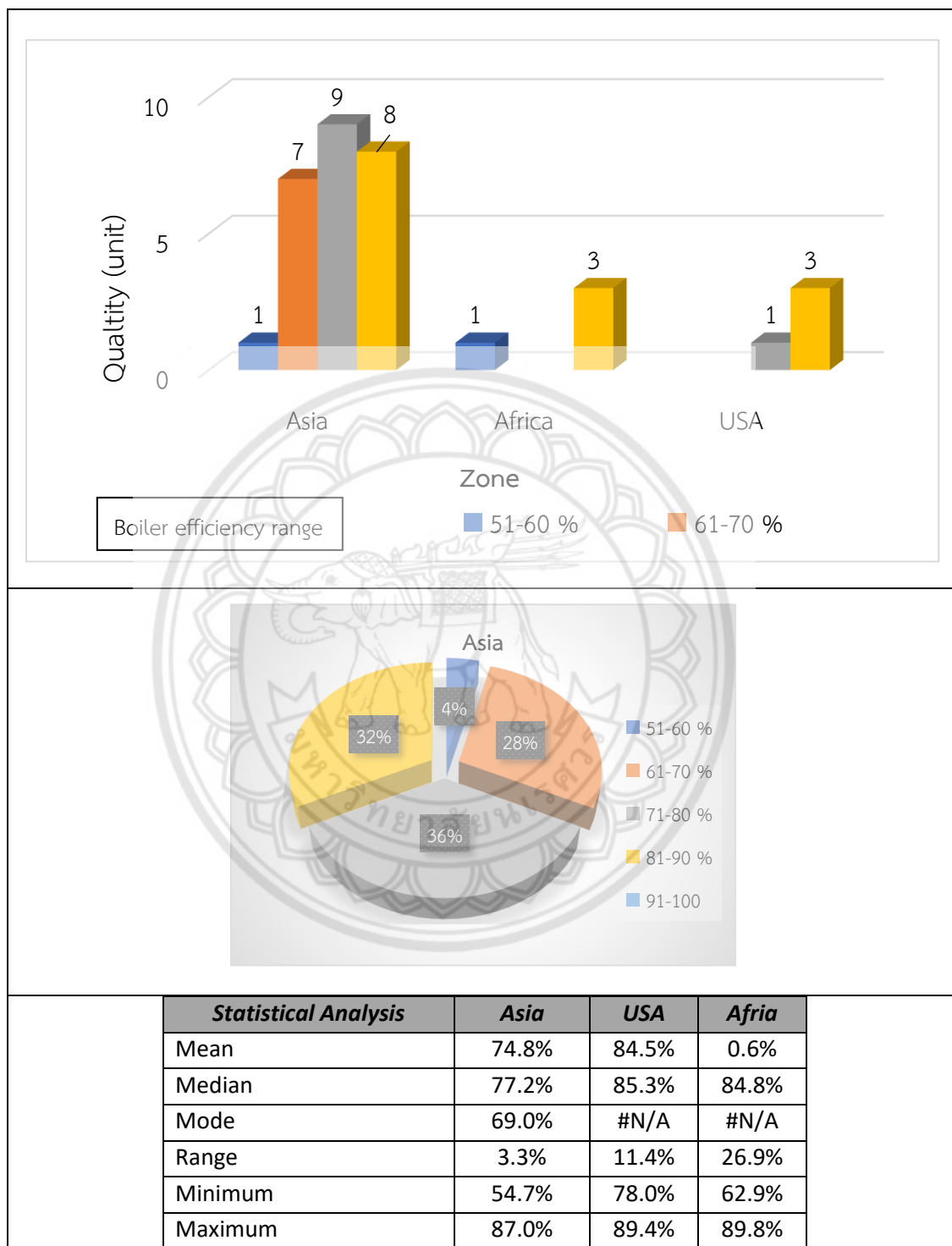
เมื่อพิจารณาข้อมูลในเชิงสถิติพบว่าจากฐานข้อมูลบทความ 33 เล่ม หม้อน้ำกรณีขนาดพิกัดหม้อน้ำมากกว่า 25 T/h มีค่าประสิทธิภาพหม้อน้ำอยู่ในช่วง 63.0 – 90.0 % มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 80.1 % ส่วนกรณีหม้อน้ำขนาดพิกัดหม้อน้ำมากกว่า 10 -25 T/h มีค่าประสิทธิภาพหม้อน้ำอยู่ในช่วง 75.0 – 82.0% มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 77.8 % ในขณะที่หม้อน้ำขนาดพิกัดหม้อน้ำมากกว่า 5-10 T/h มีค่าประสิทธิภาพหม้อน้ำอยู่ในช่วง 55.0 – 81.0% มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 67.8 % อีกทั้งหม้อน้ำขนาดมากกว่า 1.5-5 T/h มีค่าประสิทธิภาพหม้อน้ำอยู่ในช่วง 63.0 – 77.0% มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 71.6 %



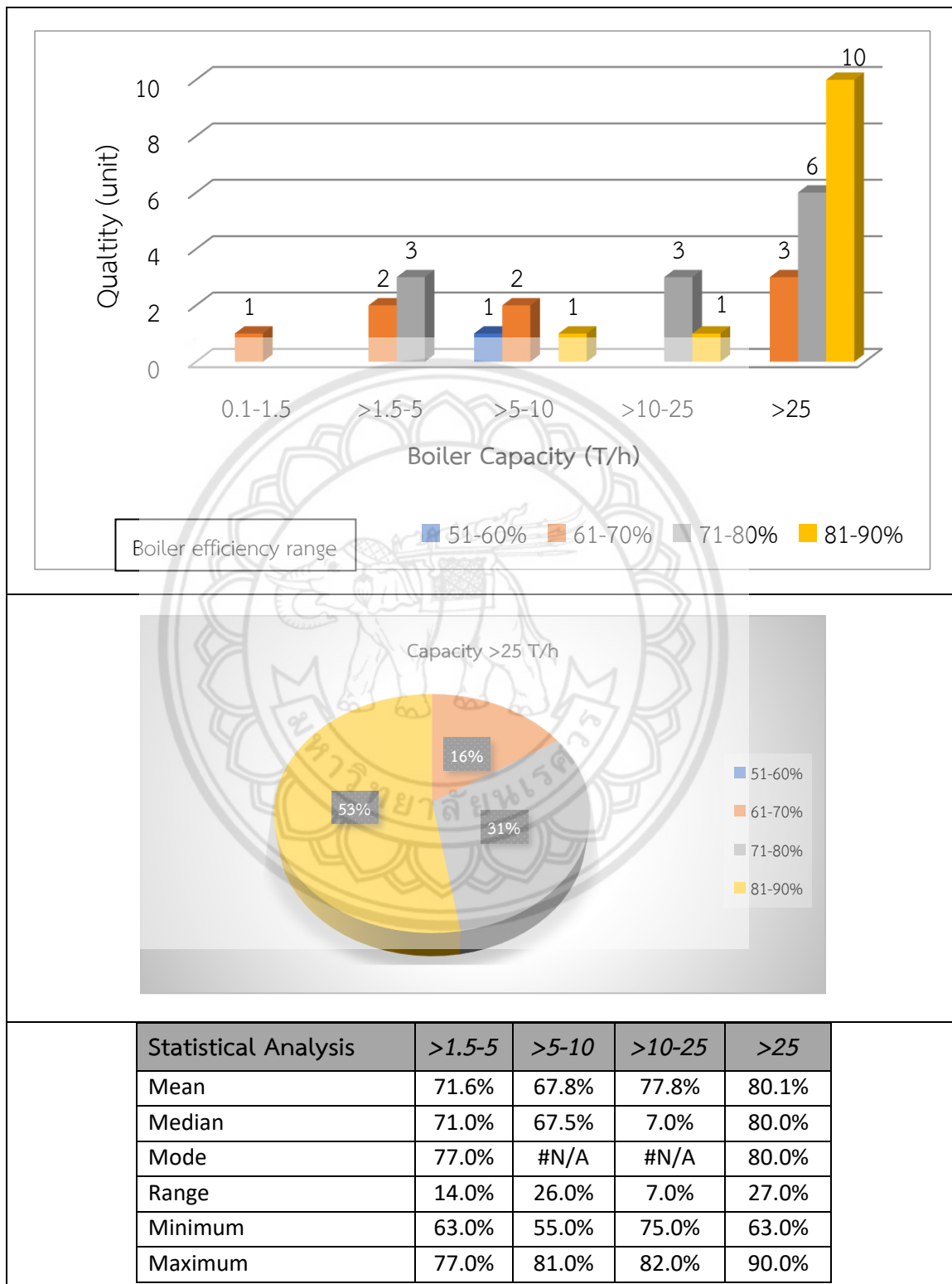
รูปที่ 2.6 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพหม้อน้ำเชิงสถิติแบ่งแยกข้อมูลตามประเภทหม้อน้ำ



รูปที่ 2.7 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพหม้อน้ำเชิงสถิติแบ่งแยกข้อมูลตามชนิดเชื้อเพลิง



รูปที่ 2.8 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพหม้อน้ำเชิงสถิติแบ่งแยกข้อมูลตามกลุ่มประเทศ



รูปที่ 2.9 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพหม้อน้ำเชิงสถิติแบ่งแยกข้อมูลตามขนาดพิกัดหม้อน้ำ

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 มาตรฐาน Japanese : JIS B8222: 1993 Land Boilers and Heat Balance [1]

มาตรฐาน JIS B 8222 : 1993 เป็นมาตรฐานที่ใช้ในการสมมูลพลังงานความร้อนในหม้อน้ำ รวมถึงหม้อต้มน้ำร้อน ที่มีการใช้เชื้อเพลิงแข็ง เชื้อเพลิงเหลว และเชื้อเพลิงก๊าซ

2.2.1.1 เงื่อนไขและการเตรียมความพร้อมระบบก่อนการเก็บตัวอย่างข้อมูล

มีดังต่อไปนี้

1. การตรวจสอบหม้อน้ำ

1.1 ตรวจสอบการรั่วไหลของเชื้อเพลิง

1.2 ตรวจสอบการรั่วไหลของไอน้ำที่อุปกรณ์เป่าเขม่า (Soot blow) วาล์วนิรภัย (Safety valve) จุดต่อท่อไอน้ำ และอื่นๆ

1.3 ตรวจสอบการรั่วไหลระบบน้ำของหม้อน้ำโดยเฉพาะการรั่วที่วาล์วโบลด์าวน์ (Blow down)

1.4 ตรวจสอบสภาพผนังหม้อน้ำ ฉนวนผนังหม้อน้ำ

1.5 หากหม้อน้ำมีความสกปรกให้ทำการทำความสะอาด พร้อมทั้งให้การบันทึกวันและวิธีการทำความสะอาดก่อนการทดสอบ

1.6 กรณีที่หม้อน้ำมีการซ่อมบำรุง ให้ทำการเก็บประวัติก่อนและซ่อมบำรุงหม้อน้ำ

2. การเตรียมความพร้อมของอุปกรณ์หม้อน้ำ เช่น ระบบส่งลำเลียงเชื้อเพลิง ระบบควบคุมการเผาไหม้ ระบบการลำเลียงซีเมนต์ ระบบป้อนน้ำที่รวมไปถึงอุปกรณ์ควบคุมระดับน้ำ ระบบควบคุมอัตโนมัติ เครื่องสูบน้ำ พัดลม อุปกรณ์การวัด และอื่นๆ ควรมีการตรวจสอบและทำการปรับตั้งค่าให้ถูกต้องและเหมาะสม เพื่อป้องกันการเกิดปัญหาอุปกรณ์ชำรุดระหว่างการทดสอบประสิทธิภาพหม้อน้ำ

3. การเตรียมความพร้อมของเครื่องมือวัด ควรทำการตรวจสอบ ทำการสอบเทียบ และติดตั้งเครื่องมือวัดให้ถูกต้องกับตำแหน่งการวัด

4. ทำการปรับการทำงานของหม้อน้ำให้เข้าสู่สภาวะการทดสอบ และให้คงไว้อย่างน้อย 1 ชั่วโมง

5. ผู้ตรวจวัด จะต้องทำการระบุตำแหน่งหน้าที่ และมีการอบรมในช่วงเวลาทดลองเดินเครื่อง (Test run) ก่อนที่จะทำการทดสอบอย่างเป็นทางการ

6. กิจกรรมที่ควรดำเนินการก่อนการเริ่มทำการทดสอบอย่างเป็นทางการ เช่น การเป่าเขม่า (Soot blown) การเก็บตัวอย่างน้ำป้อน น้ำโบล์ดาวน์ (Blow down) การทดสอบวาล์วนิรภัย (Safety valve) และอื่น ๆ และในระหว่างการทดสอบจะไม่มีดำเนินการในกิจกรรมข้างต้นแต่อย่างใด โดยเฉพาะวาล์วนิรภัย (Safety valve) และวาล์วระบายความดัน (Pressure relief valve) หากมีการเปิดระบายในระหว่างการทดสอบให้เริ่มทำการทดสอบใหม่

ความร้อนสูญเสียของหม้อน้ำในมาตรฐาน Japan : JIS B8222 [1] ประกอบด้วย ความร้อนสูญเสียจากก๊าซไอเสียแห้ง ความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ความร้อนสูญเสียไปกับเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ไม่หมดในซีลล์ ความร้อนสูญเสียจากการแผ่รังสีความร้อน ความร้อนสูญเสียจากการโบล์ดาวน์ และความร้อนสูญเสียอื่น ๆ ดังแสดงต่อไปนี้

1. ความร้อนสูญเสียจากก๊าซไอเสีย

1.1 ค่าความร้อนสูญเสียจากก๊าซไอเสียอ้างอิงตามค่าความร้อนต่ำ

$$L_{1L} = Gc_g (T_g - T_0) \text{ kJ / kg (or } m^3) \quad (2.1)$$

โดยที่ L_{1L} คือ ความร้อนสูญเสียจากก๊าซไอเสียอ้างอิงตามค่าความร้อนต่ำ (kJ/kg)

G คือ ปริมาณก๊าซไอเสียทั้งหมดต่อเชื้อเพลิง 1 kg หรือ 1 m^3 (m^3 / kg)

c_g คือ ค่าความร้อนจำเพาะของก๊าซไอเสีย (1.38 kJ / m^3K)

T_g คือ อุณหภูมิก๊าซไอเสียเฉลี่ย ($^{\circ}C$)

T_0 คือ อุณหภูมิอ้างอิง ($^{\circ}C$)

1.2 ค่าความร้อนสูญเสียจากก๊าซไอเสียอ้างอิงตามค่าความร้อนสูง

$$L_{1H} = L_{1L} + 25(9H + \omega) \text{ kJ / kg (or } m^3) \quad (2.2)$$

- โดยที่ L_{1H} คือ ความร้อนสูญเสียจากก๊าซไอเสียอ้างอิงตามค่าความร้อนสูง (kJ/kg)
 L_{1L} คือ ความร้อนสูญเสียจากก๊าซไอเสียอ้างอิงตามค่าความร้อนต่ำ (kJ/kg)
 H คือ ปริมาณของไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง mass wet basis (%)
 ω คือ ความชื้นหรือน้ำทั้งหมดที่สะสมในเชื้อเพลิง mass wet basis (%)

ปริมาณก๊าซไอเสียทั้งหมด (G) สามารถหาได้จาก

$$G = G_0 + G_w + [A_0(m-1)] + G_{w1} \quad m^3 / kg \text{ (or } m^3) \quad (2.3)$$

- โดยที่ G คือ ปริมาณก๊าซไอเสียทั้งหมดต่อเชื้อเพลิง 1 kg (m^3/kg)
 G_0 คือ ปริมาณก๊าซไอเสียแห้งทางทฤษฎีต่อเชื้อเพลิง 1 kg (m^3/kg)
 G_w คือ ปริมาณไอน้ำจากการเผาไหม้ และไอน้ำจากความชื้นในเชื้อเพลิงต่อเชื้อเพลิง 1 kg (m^3/kg)
 G_{w1} คือ ปริมาณไอน้ำจากอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ต่อเชื้อเพลิง 1 kg (m^3/kg)
 A_0 คือ ปริมาณอากาศต่อเชื้อเพลิง 1 kg ทางทฤษฎี (แห้ง) (m^3/kg)
 m คือ อัตราส่วนของอากาศส่วนเกิน

ปริมาณก๊าซไอเสียแห้งทางทฤษฎีต่อเชื้อเพลิง 1 kg (G_0) หาได้จาก

$$G_0 = \frac{1}{100} \left[8.89c_1 + 21.1 \left(h - \frac{o}{8} \right) + 3.3s + 0.80n \right] \quad m^3 / kg \quad (2.4)$$

- โดยที่ G_0 คือ ปริมาณก๊าซไอเสียแห้งทางทฤษฎีต่อเชื้อเพลิง 1 kg (m^3/kg)
 C_1 คือ ปริมาณของคาร์บอนในเชื้อเพลิงแบบ mass wet basis (%)
 ที่ใช้ในการเผาไหม้จริง

- C_2 คือ $au / (100-u)$ ปริมาณของคาร์บอนที่เผาไหม้ไม่หมด
mass wet basis (%)
- a คือ ปริมาณซีไธในเชื้อเพลิง mass wet basis (%)
- u คือ ค่าเฉลี่ยของปริมาณคาร์บอนที่เผาไหม้ไม่หมดในกากที่เหลือจากการ
เผาไหม้ mass wet basis (%)
- H คือ ปริมาณของไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง mass wet basis (%)
- O คือ ปริมาณของออกซิเจนในเชื้อเพลิง mass wet basis (%)
- S คือ ปริมาณของซัลเฟอร์ในเชื้อเพลิง mass wet basis (%)
- N คือ ปริมาณของไนโตรเจนในเชื้อเพลิง mass wet basis (%)

ปริมาณไอน้ำจากการเผาไหม้และไอน้ำจากความชื้นในเชื้อเพลิงต่อเชื้อเพลิง 1 kg (G_w)

หาได้จาก

$$G_w = \frac{1}{100} [1.24(9h + \omega)] \quad m^3 / kg \quad (2.5)$$

โดยที่ G_w คือ ปริมาณไอน้ำจากการเผาไหม้ และไอน้ำจากความชื้นในเชื้อเพลิงต่อ
เชื้อเพลิง 1 kg (m^3/kg)

H คือ ปริมาณของไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง mass wet basis (%)

ω คือ ความชื้นหรือน้ำทั้งหมดที่สะสมในเชื้อเพลิง mass wet basis (%)

ปริมาณไอน้ำจากอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ต่อเชื้อเพลิง 1 kg (G_{w1})

หาได้จาก

$$G_{w1} = 1.61zmA_0 \quad m^3 / kg \quad (2.6)$$

โดยที่ G_{w1} คือ ปริมาณไอน้ำจากอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ต่อเชื้อเพลิง 1 kg (m^3/kg)

m คือ อัตราส่วนของอากาศส่วนเกิน (-)

A_0 คือ ปริมาณอากาศต่อเชื้อเพลิง 1 kg ทางทฤษฎี (แห้ง) (m^3/kg)

Z คือ ความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ (kg/kg dry air)

อัตราอากาศส่วนเกิน (m) หาได้จาก

$$m = \frac{21}{21 - O_2(\text{flue gas})} \quad (2.7)$$

โดยที่ m คือ อัตราส่วนของอากาศส่วนเกิน

O_2 คือ ปริมาณของออกซิเจนในก๊าซไอเสีย (%)

ปริมาณอากาศทางทฤษฎี (A_0) หาได้จาก

$$A_0 = \frac{1}{100} \left[8.89C_1 + 26.7 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 3.35 + 0.8N \right] \quad (2.8)$$

โดยที่ A_0 คือ ปริมาณอากาศต่อเชื้อเพลิง 1 kg ทางทฤษฎี (แห้ง) (m^3/kg)

C_1 คือ ปริมาณคาร์บอนที่เผาไหม้ (%)

H คือ ปริมาณของไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง mass wet basis (%)

O คือ ปริมาณของออกซิเจนในเชื้อเพลิง mass wet basis (%)

N คือ ปริมาณของไนโตรเจนในเชื้อเพลิง mass wet basis (%)

2. ความร้อนสูญเสียจากไอน้ำหรือน้ำที่เป่าเข้าไปในหม้อน้ำ

$$L_2 = W_b(h_g - h_s) \quad kJ / kg \text{ (or } m^3) \quad (2.9)$$

โดยที่ L_2 คือ ความร้อนสูญเสียจากไอน้ำหรือน้ำที่เป่าเข้าไปในหม้อน้ำ (kJ/kg)

W_b คือ ไอน้ำหรือน้ำร้อนที่เป่าเข้าไปในหม้อน้ำต่อเชื้อเพลิง 1 kg หรือ 1 m³
(kg/kg (or m³))

h_g คือ เอนทาลปีของไอน้ำ ณ อุณหภูมิก๊าซไอเสีย (kJ/kg)

h_s คือ เอนทาลปีของไอน้ำหรือน้ำ (น้ำร้อน หรือน้ำป้อนหม้อน้ำ) ที่อุณหภูมิ
อ้างอิง (kJ/kg)

3. ความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์

$$L_3 = 126.1[G_0 + (m-1)A_0](CO) \quad \text{kJ / kg(or m}^3\text{)} \quad (2.10)$$

โดยที่ L_3 คือ ความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (kJ/kg)

G_0 คือ ปริมาณก๊าซไอเสียแห้งทางทฤษฎีต่อเชื้อเพลิง 1 kg หรือ 1 m³
(m³/kg)

m คือ อัตราส่วนของอากาศส่วนเกิน

A_0 คือ ปริมาณอากาศต่อเชื้อเพลิง 1 kg หรือ 1 m³ ทางทฤษฎี (แห้ง)
(m³/kg)

(CO) คือ ปริมาณของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในก๊าซไอเสียแห้ง (%Volume)

4. ความร้อนสูญเสียจากเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ไม่หมดในซีเมนต์

$$L_4 = 339C_2 \quad \text{kJ / kg(or m}^3\text{)} \quad (2.11)$$

โดยที่ L_4 คือ ความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (kJ/kg)

C_2 คือ $au/(100-u)$ ปริมาณของคาร์บอนที่เผาไหม้ไม่หมด (%)

a คือ ปริมาณซีเมนต์ในเชื้อเพลิง mass wet basis (%)

u คือ ค่าเฉลี่ยของปริมาณคาร์บอนที่เผาไหม้ไม่หมดในกากที่เหลือจากการเผาไหม้ mass wet basis (%)

5. ความร้อนสูญเสียจากการพาและแผ่รังสีความร้อน

5.1 ความร้อนสูญเสียจากการพาและแผ่รังสีความร้อนอ้างอิงตามความร้อนสูง (L_{5H})

$$L_{5H} = \frac{1}{100} l_{rh} HHV \text{ kJ / kg (or } m^3) \quad (2.12)$$

$$l_{rh} = \frac{l_r LHV}{HHV} (\%) \quad (2.13)$$

โดยที่ L_{5H} คือ ความร้อนสูญเสียจากการพาและแผ่รังสีจากตัวหม้อน้ำอ้างอิงค่าความร้อนเชื้อเพลิงทางสูง (kJ/kg)

l_{rh} คือ ความร้อนสูญเสียจากการพาและแผ่รังสีจากตัวหม้อน้ำคิดเป็นร้อยละ(%) อ้างอิงค่าความร้อนสูง

HHV คือ ค่าความร้อนเชื้อเพลิงทางสูง (High calorific value) ฐานเปียก

LHV คือ ค่าความร้อนเชื้อเพลิงทางต่ำ (High calorific value) ฐานเปียก

5.2 ความร้อนสูญเสียจากการพาและแผ่รังสีความร้อนอ้างอิงตามความร้อนต่ำ (L_{5L})

$$L_{5L} = \frac{1}{100} l_r LHV \text{ kJ / kg (or } m^3) \quad (2.14)$$

โดยที่ L_{5L} คือ ความร้อนสูญเสียจากการพาและแผ่รังสีจากตัวหม้อน้ำอ้างอิงค่าความร้อนเชื้อเพลิงทางต่ำ (kJ/kg)

l_r คือ ความร้อนสูญเสียจากการพาและแผ่รังสีจากตัวหม้อน้ำคิดเป็นร้อยละ(%) อ้างอิงค่าความร้อนต่ำ

LHV คือ ค่าความร้อนเชื้อเพลิงทางต่ำ (Low calorific value) ฐานเปียก

5.3 การถ่ายเทความร้อน

ความร้อน คือ พลังงานที่เกิดจากการถ่ายเทเคลื่อนเมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิ

2 จุด [39] กระบวนการถ่ายเทความร้อนสามารถแบ่งได้เป็น 3 แบบ ดังต่อไปนี้

5.3.1 การถ่ายเทความร้อนโดยการนำ คือ การถ่ายเทความร้อนผ่านตัวกลาง (ของแข็งหรือของไหลที่หยุดนิ่งกับที่) เมื่อในตัวกลางนี้มีอุณหภูมิแตกต่างกันเกิดขึ้น สมการคำนวณการถ่ายเทความร้อนโดยการนำ Fourier's law

$$q'' = -k \left(\frac{dT}{dx} \right) \quad (2.15)$$

โดยที่ q'' คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน (Heat flux) หน่วย w/m^2

k คือ Thermal conductivity หน่วย $W/m-K$ เป็นสมบัติของวัสดุที่ใช้ ทำผนัง หน่วย $W/m-K$

5.3.2 การถ่ายเทความร้อนโดยการพา คือ การถ่ายเทความร้อนระหว่างพื้นผิวและของไหลที่กำลังเคลื่อนที่ซึ่งมีอุณหภูมิแตกต่างกัน โดยการถ่ายเทความร้อนโดยการพาแบ่งเป็น 2 ประเภท

1. การพาแบบบังคับ คือ การเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของของแข็งและของไหล โดยของไหลถูกบังคับให้เคลื่อนที่ไปสัมผัสกับผิวของของแข็งโดยกลไกภายนอก เช่น พัดลม เครื่องสูบล

2. การพาแบบอิสระ การเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของของแข็งและของไหล โดยไม่มีกลไกใดๆทำให้ของไหลเคลื่อนที่แต่เกิดจากแรงลอยตัวของของไหลเอง

สมการคำนวณการถ่ายเทความร้อนโดยการพา Newton's law of Cooling

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \quad (2.16)$$

โดยที่ q'' คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพา หน่วย W/m^2

T_s คือ อุณหภูมิพื้นผิว K

T_∞ คือ อุณหภูมิของไหล K

h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Convection heat transfer coefficient) หน่วย W/m^2-K

หมายเหตุ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (h) มีค่าแตกต่างกันแล้วแต่รูปร่างหรือลักษณะของพื้นผิวที่มีการถ่ายเทความร้อน ซึ่งหาได้จากสมการแสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สมการหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

Geometry	Laminar	Turbulent
1. Vertical plate or cylinder	$\bar{h} = 1.42(\Delta T / L)^{1/3}$ $10^4 < Ra < 10^9$	$\bar{h} = 1.32(\Delta T / L)^{1/3}$ $10^9 < Ra < 10^{12}$
2. Horizontal cylinder	$\bar{h} = 1.32(\Delta T / D)^{1/4}$	$\bar{h} = 1.25(\Delta T / D)^{1/3}$
3. Horizontal plate	$\bar{h} = 1.32(\Delta T / L)^{1/4}$	$\bar{h} = 1.67(\Delta T)^{1/3}$
(a) Heating surface facing up	$10^5 < Ra < 2 \times 10^7$	$2 \times 10^7 < Ra < 3 \times 10^{10}$
(b) Heating surface facing down	$\bar{h} = 0.59(\Delta T / L)^{1/4}$ $3 \times 10^5 < Ra < 3 \times 10^{10}$	$\bar{h} = 0.59(\Delta T / L)^{1/4}$
4. Sphere	$\bar{h} = [2 + 0.392Gr_d^{1/4}]$	$\frac{k}{D}$ for $1 < Gr_d < 10^5$

5.3.3 การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสี คือ การถ่ายเทความร้อนสุทธิโดยการแผ่รังสีระหว่างพื้นที่ผิว 2 อันที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันโดยไม่ต้องอาศัยตัวกลางในการถ่ายเท สมการคำนวณการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสี

$$q'' = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{sur}^4) \quad (2.17)$$

โดยที่ q'' คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสี หน่วย W/m^2

ε คือ Emissivity ซึ่งเป็นสมบัติของพื้นผิว แสดงดังตาราง ง.1

σ คือ Stefan-Boltzmann constant = $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{-K}^4$

T_{sur} คือ อุณหภูมิของสภาพแวดล้อมโดยรอบ K

6. ความร้อนสูญเสียรวมของหม้อน้ำ

$$Heat\ loss = L_t = L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5 + L_6 \quad (2.18)$$

โดยที่ L_6 คือ ความร้อนสูญเสียอื่นๆของหม้อน้ำ

7. ประสิทธิภาพของหม้อน้ำ

$$\eta_2 = (1 - Heat\ loss) \times 100 \% = \left(1 - \frac{L_t}{H_t + Q} \right) \times 100 \% \quad (2.19)$$

โดยที่ H_t คือ ค่าความร้อนจากเชื้อเพลิงทั้งหมดที่ป้อนให้หม้อน้ำ (kJ)

Q คือ ความร้อนอื่นๆที่ป้อนให้หม้อน้ำ (kJ)

L_t คือ ความร้อนสูญเสียทั้งหมดของหม้อน้ำ (kJ)

2.2.2 การระบายน้ำหม้อไอน้ำทิ้ง (Blowdown)

การระบายน้ำหม้อไอน้ำทิ้งเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการทำงานของหม้อไอน้ำ [34] เพื่อที่จะรักษาระดับค่าต่างๆของน้ำภายในหม้อไอน้ำเนื่องจากน้ำป้อนที่เข้าหม้อไอน้ำมีสารละลายอยู่จำนวนหนึ่งเมื่อน้ำระเหยกลายเป็นไอน้ำ จะทิ้งสารละลายเหล่านี้ไว้ในหม้อไอน้ำทำให้ความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น อาจอยู่ในสถานะสารละลายหรือสารแขวนลอยก็ได้เช่นกัน

ปริมาณน้ำในหม้อไอน้ำที่ระบายทิ้ง (Blowdown) ต้องไม่มากเกินไปจนความจำเป็น ถ้ามากเกินไปจะส่งผลให้สิ้นเปลืองพลังงาน การควบคุมระดับในการระบายน้ำในหม้อไอน้ำทิ้ง อย่างเหมาะสมจึงเป็นสิ่งสำคัญ สามารถหาปริมาณการระบายน้ำหม้อไอน้ำทิ้ง (Blowdown) ซึ่งคำนวณได้ดังสมการที่ 2.20 และ 2.21

$$\text{ร้อยละของการระบายน้ำหม้อไอน้ำทิ้ง } \beta = \frac{\text{Feedwater conductivity}}{\text{Blowdown conductivity}} \times 100 \quad (2.20)$$

$$\text{ปริมาณการระบายน้ำหม้อไอน้ำทิ้ง } \text{Blowdown rate (kg / h)} = \frac{\beta}{100 - \beta} \times \dot{m}_{\text{steam}} \quad (2.21)$$

2.2.3 หลักการประเมินการรั่วไหลของไอน้ำด้วยสมการ Napier's choke flow

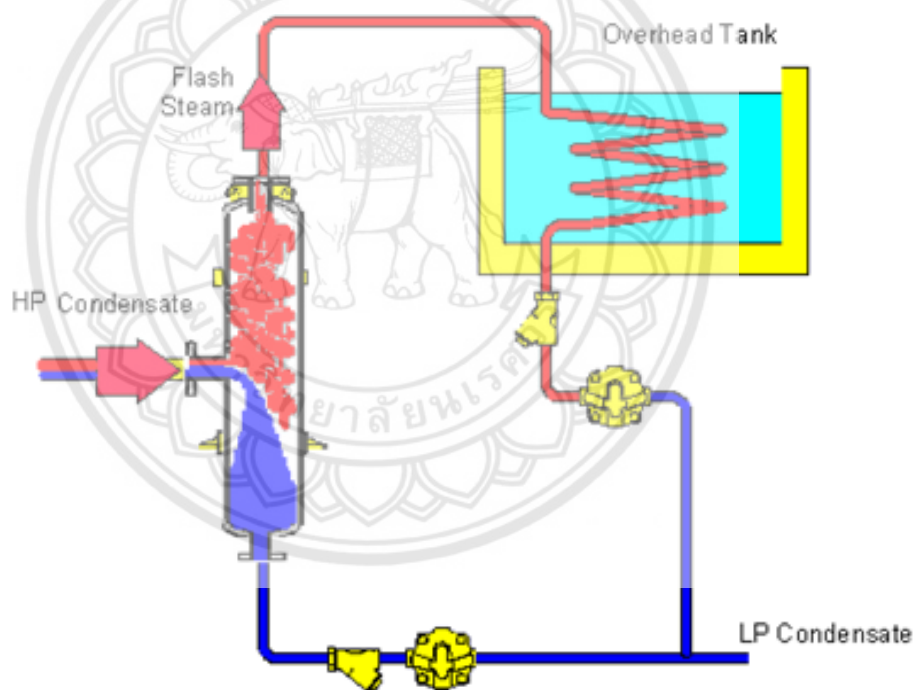
สมการ Napier's choke flow เป็นสมการที่ได้มาจากการทดลอง [1] ที่แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการรั่วของไอน้ำผ่านรูรั่ว ที่เรียกว่าออริฟิศ (orifice) ที่ความดันใช้งานแตกต่างกันออกไป ซึ่งจะแสดงได้ดังสมการที่ 2.22

$$m_{\text{steam}} = 0.695 \times A_{\text{orifice}} \times P_{\text{steam}} \quad (2.22)$$

โดยที่	m_{steam}	คือ อัตราการรั่วของไอน้ำ (kg/h)
	A_{orifice}	คือ พื้นที่หน้าตัดของรูรั่วที่คิดเป็นพื้นที่รูปวงกลมเทียบเท่า (mm ²)
	P_{steam}	คือ ความดันสัมบูรณ์ของไอน้ำ (Bar)

2.2.4 ไอน้ำแฟลช

ไอน้ำแฟลช [1] คือ ไอน้ำที่เกิดจากการลดความดันของน้ำหรือคอนเดนเสทที่มีความดันสูง ไปสู่สถานะที่มีความดันต่ำ ทำให้คอนเดนเสทหรือน้ำเกิดการเปลี่ยนสถานะกลับมาเป็นไอน้ำอีกครั้ง ซึ่งสามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้กับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ไอน้ำความดันต่ำ การนำคอนเดนเสทที่เกิดขึ้นในระบบส่งจ่ายหรืออุปกรณ์ที่ใช้ไอน้ำออกจากกับดักไอน้ำ (Steam trap) มารวมกันและส่งเข้าสู่อุปกรณ์ที่ใช้ในการแยกเอาไอน้ำแฟลชออกจากคอนเดนเสท ที่เรียกว่า ถังแฟลช ดังแสดงในรูปที่ 2.10 สถานะความดันในถังแฟลชจะมีความดันต่ำกว่าความดันคอนเดนเสท ทำให้คอนเดนเสทเกิดการระเหยกกลายเป็นไอน้ำ ไอน้ำแฟลชที่เกิดขึ้นจัดเป็นไอน้ำที่มีความดันต่ำสามารถไปใช้งานต่อไป



รูปที่ 2.10 การเกิดไอน้ำแฟลชในถังแฟลช [35]

2.2.5 คุณสมบัติของน้ำและการทดสอบคุณภาพน้ำ

ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม [36] เรื่อง คุณสมบัติของน้ำสำหรับหม้อน้ำ พ.ศ. 2549 ได้กำหนด คุณภาพของน้ำป้อนหม้อน้ำ (Boiler feed water) และคุณภาพน้ำในหม้อน้ำ (Boiler water) ไว้ดังตารางที่ 2.4 และ 2.5 ตามลำดับ

1. คุณภาพน้ำป้อนหม้อน้ำ (Boiler feed water) ให้เป็นไปตามเกณฑ์ ดังนี้

ตารางที่ 2.4 แสดงค่ามาตรฐานของคุณภาพน้ำป้อนหม้อน้ำ [36]

รายการ	ค่าเกณฑ์ควบคุม	หน่วย
pH value	5.8 – 9.5	-
Total Hardness	ไม่เกิน 10	ppm as CaCO ₂

2. คุณภาพน้ำในหม้อน้ำ (Boiler water) ให้เป็นไปตามเกณฑ์ ดังนี้

ตารางที่ 2.5 แสดงค่ามาตรฐานของคุณภาพน้ำในหม้อน้ำ [36]

รายการ	ค่าเกณฑ์ควบคุม	หน่วย
pH value	8.5 – 11.8	-
Total Dissolved Solid (TDS)	ไม่เกิน 3,500	ppm

2.2.6 ประเภทของหม้อน้ำ

หม้อน้ำในปัจจุบันนั้นจะมีอยู่ 3 ประเภทใหญ่ๆตามลักษณะโครงสร้าง [36] คือ หม้อน้ำแบบท่อไฟ หม้อน้ำแบบท่อน้ำ และ หม้อน้ำแบบผสม ซึ่งลักษณะแต่ละประเภทมีรายละเอียดดังนี้

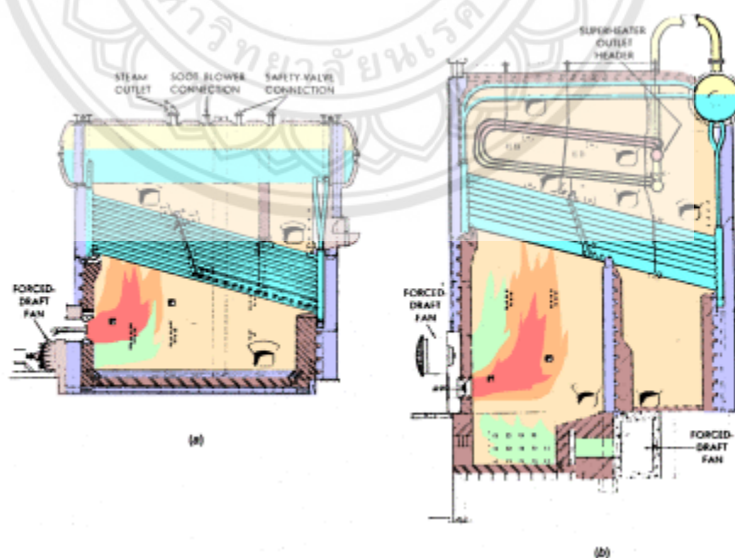
2.2.6.1 หม้อน้ำแบบท่อน้ำ (Water tube boiler) คือ หม้อน้ำที่มีน้ำไหลผ่านอยู่ภายในท่อ [36] ให้น้ำที่อยู่ภายในท่อ และมีการถ่ายเทความร้อนจากก๊าซร้อนที่ไหลผ่านอยู่นอกท่อเพื่อระเหยกลายเป็น ไอน้ำ หม้อน้ำแบบท่อน้ำมีลักษณะโครงสร้างหลักดังต่อไปนี้

2.2.6.1.1 Boiler Walls เป็นท่อน้ำหล่อเย็นผนังและรับความร้อน โดยจัดเรียงให้ชิดกันเพื่อดูดกลืนความร้อน

2.2.6.1.2 ถังไอ (Steam drum or Upper drum) เป็นที่เกิดหรือแยกตัวของไอน้ำ ที่ระเหยขึ้นมาจากผิวน้ำ โดยปกติระดับน้ำ จะอยู่ ประมาณระดับครึ่งหนึ่งของถังไอน้ำ ส่วนด้านล่างของถังไอจะเป็นส่วนที่ท่อน้ำจำนวนมากเข้ามาต่อชนเพื่อให้ น้ำ ในท่อ น้ำ ที่ได้รับการถ่ายเทความร้อน เวียนขึ้นมาแยกตัวเป็นไอน้ำ

2.2.6.1.3 ถังโคลน (Mud drum or Lower drum) จะเป็นส่วนที่ท่อน้ำจำนวนมากต่อมาชนกัน เปรียบเสมือนท่อร่วม (Header) ของท่อน้ำ

2.2.6.1.4 ท่อน้ำ (Water tube) ท่อที่ให้น้ำไหลผ่านภายในท่อโดยรับความร้อนจากก๊าซร้อนภายนอกท่อถ่ายเทให้กับน้ำที่อยู่ภายในท่อ



รูปที่ 2.11 โครงสร้างหม้อไอน้ำแบบท่อน้ำ [36]

2.2.6.2 หม้อน้ำแบบท่อไฟ (Fire tube boiler) คือ หม้อน้ำที่มีท่อไฟที่มีก๊าซร้อนไหลผ่านอยู่ภายในท่อ [36] และมีการถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำที่อยู่รอบๆท่อ หม้อน้ำแบบท่อไฟมีลักษณะโครงสร้างหลักดังต่อไปนี้

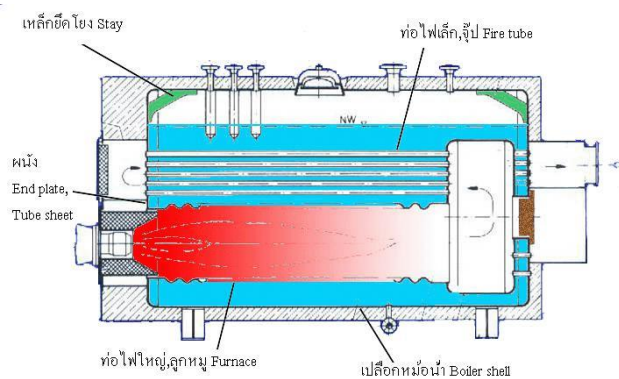
2.2.6.2.1 เปลือกหม้อน้ำ (Boiler shell) หมายถึง เปลือกเหล็กของหม้อน้ำภายในบรรจุน้ำและไอน้ำที่มีความดัน

2.2.6.2.2 ผนังหน้าและผนังหลังหม้อน้ำ (End plate or tube sheet) คือ ส่วนที่ปิดหัวปิดท้ายของเปลือกหม้อน้ำผนังหม้อน้ำ

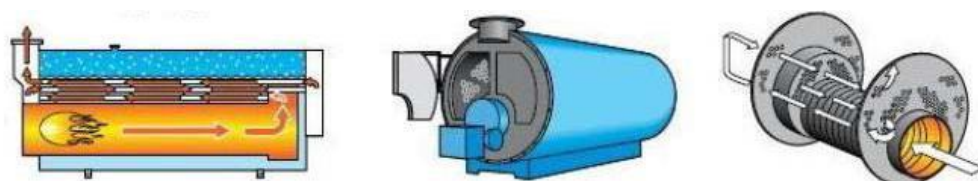
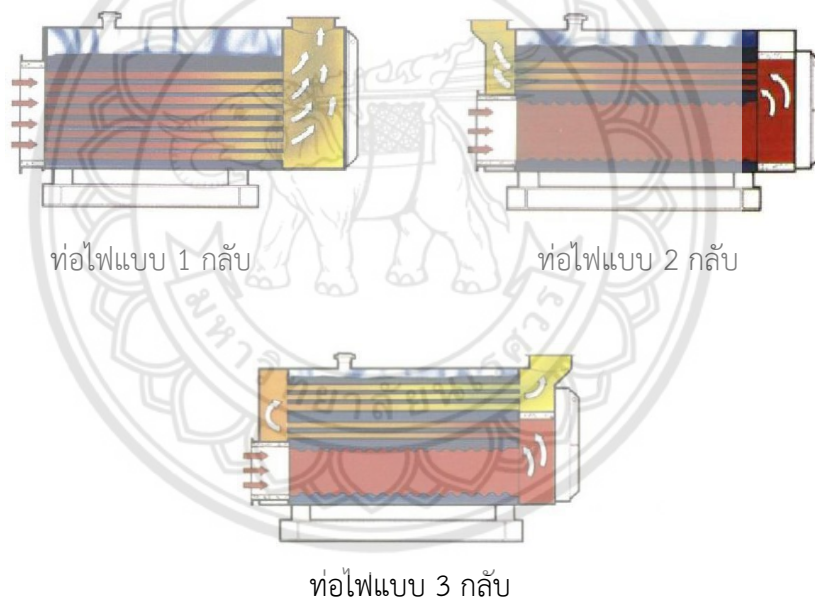
2.2.6.2.3 เหล็กยึดโยง (Stay) ทำหน้าที่เสริมความแข็งแรงของผนังหม้อน้ำและถ่ายเทความร้อน โดยการดึงผนังหม้อน้ำเอาไว้ อาจจะดึงผนังไว้กับเปลือกหม้อน้ำหรือดึงระหว่างผนังหน้ากับผนังหลังหม้อน้ำเอาไว้ด้วยกัน

2.2.6.2.4 ท่อไฟใหญ่หรือท่อลูกหมู (Furnace) คือ ท่อนำก๊าซร้อนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่มักจะเป็นห้องเผาไหม้ของหม้อน้ำเชื้อเพลิงเหลวหรือก๊าซ

2.2.6.2.5 ท่อไฟเล็กหรือจูป (Fire tube) คือ ท่อขนาดเล็กที่ให้ก๊าซร้อนไหลผ่านภายในท่อที่มีการติดตั้ง 2 ลักษณะคือ แบบเชื่อม และแบบแบ่ง สำหรับถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำที่อยู่ภายนอกท่อและทำหน้าที่เสริมความแข็งแรงของผนังหม้อน้ำ (กรณีติดตั้งแบบเชื่อม) โดยการดึงผนังหม้อน้ำท่อไฟเล็กมีทั้งแบบเกลียว และแบบเรียบ ซึ่งส่วนมากมักจะเป็นท่อเรียบ แต่หม้อน้ำบางยี่ห้ออาจจะเป็นท่อไฟเล็กแบบเกลียวเพื่อให้ก๊าซร้อนเกิดการการไหลแบบกลับไปกลับมาอยู่ในหม้อน้ำ เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน เรียกจำนวนครั้งในการไหลกลับไปกลับมา ของก๊าซร้อนในท่อไฟทั้งหมดภายในหม้อน้ำว่า จำนวนกลับ (Pass) ดังแสดงในรูปที่ 2.13 นอกจากนี้ตรงบริเวณหัวและท้ายหม้อน้ำ ซึ่งเป็นส่วนที่ไฟมีการกลับทิศทางการไหล จะเรียกบริเวณนี้ว่า ห้องไฟกลับ หากห้องไฟกลับนั้นมีน้ำล้อมรอบภายนอก จะเรียกว่า แบบหลังเปียก (Wet back) ในทางกลับกัน หากห้องไฟกลับไม่มีน้ำล้อมรอบหรือเป็นแบบห้องที่ก่อด้วยอิฐทนไฟยื่นออกไปนอกตัวหม้อน้ำจะเรียกว่า แบบหลังแห้ง (Dry back) ดังแสดงในรูปที่ 2.14 และโครงสร้างของหม้อน้ำแบบท่อไฟแสดงได้ดังรูปที่ 2.12

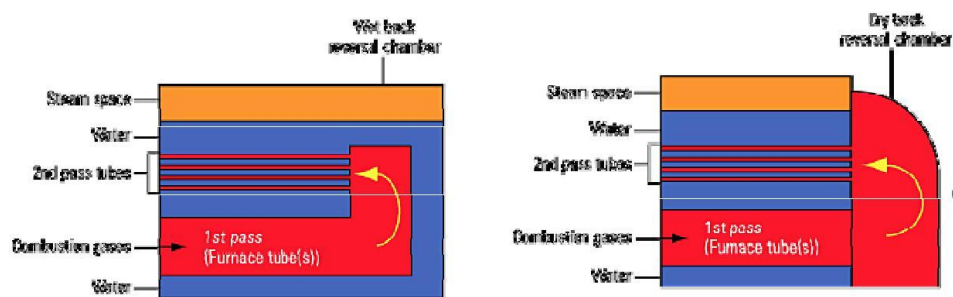


รูปที่ 2.12 โครงสร้างของหม้อน้ำแบบท่อไฟ [36]



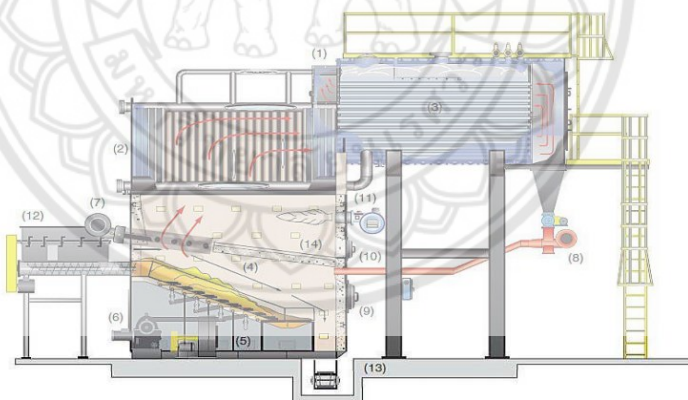
ท่อไฟแบบ 4 กลีบ

รูปที่ 2.13 จำนวนกลีบของท่อไฟ [36]



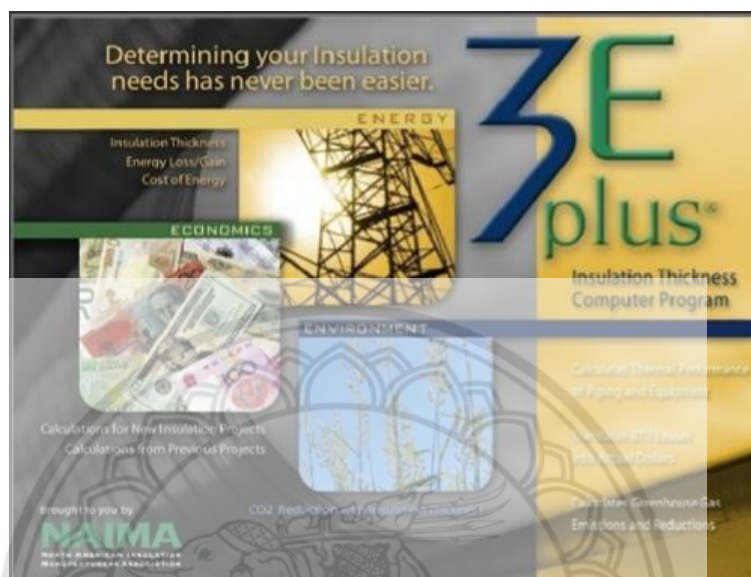
รูปที่ 2.14 ห้องกลับไฟ [36]

2.2.6.3 หม้อน้ำแบบผสม (Hybrid boiler) คือ เป็นหม้อน้ำที่มีทั้งหม้อน้ำแบบท่อน้ำ และหม้อน้ำแบบท่อไฟอยู่ในเครื่องเดียวกัน [36] โดยโครงสร้างหม้อน้ำแบบท่อน้ำที่อยู่ด้านล่าง เป็นส่วนห้องเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง ส่วนโครงสร้างที่เป็นหม้อน้ำแบบท่อไฟที่อยู่ด้านบนจะเป็นส่วนที่รับการถ่ายเทความร้อนที่เหลือมาจาก ส่วนโครงสร้างหม้อน้ำแบบท่อน้ำผ่านท่อที่เชื่อมต่อกัน



รูปที่ 2.15 หม้อน้ำแบบผสม (Hybrid boiler) [36]

2.2.7 โปรแกรม 3E PLUS



รูปที่ 2.16 ไอคอนของโปรแกรม 3E PLUS [37]

โปรแกรม 3E Plus ไอคอนโปรแกรมแสดงได้ดังรูปที่ 2.16 เป็นซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการประเมินการหุ้มฉนวนท่อส่งจ่ายของระบบไอน้ำ และสามารถประยุกต์ใช้ในการประเมินต้นทุนในการผลิตไอน้ำที่สูญเสีย เนื่องจากมีการสูญเสียพลังงานความร้อนในระหว่างการส่งจ่ายไอน้ำไปยังอุปกรณ์ที่ใช้ไอน้ำ ซึ่งโปรแกรม 3E PLUS ถูกพัฒนาโดย NAIMA

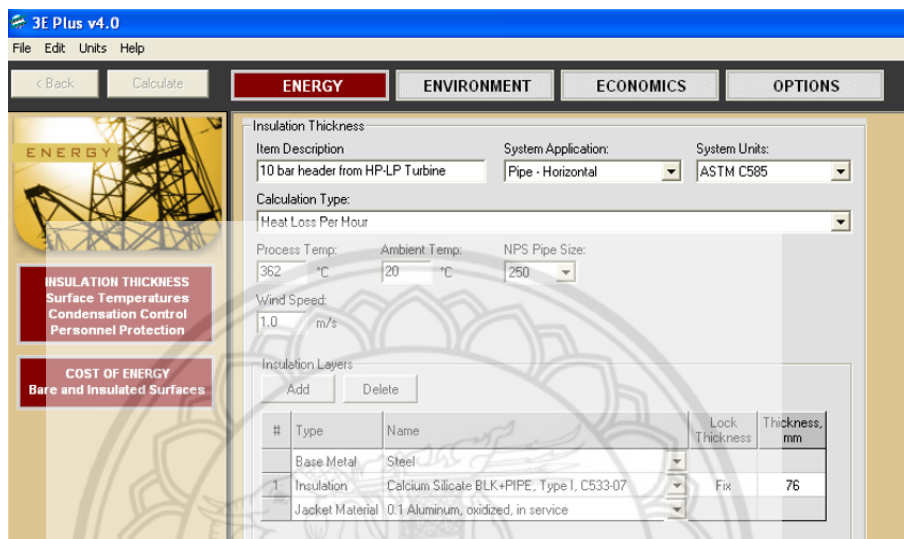
ตัวอย่างการใช้งานโปรแกรม

ข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดท่อส่งจ่ายไอน้ำ

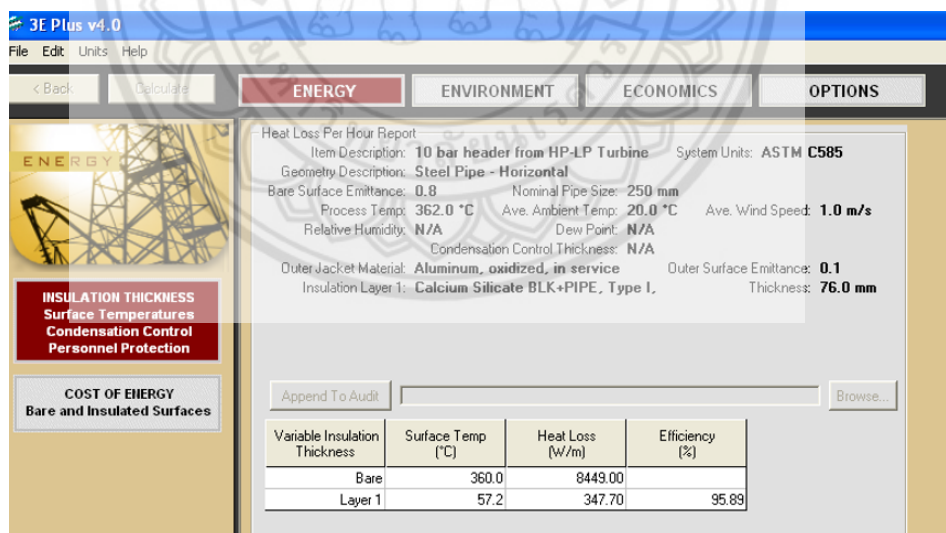
1. ท่อ steam header ความดัน 10 bar ยาว 10 เมตรไม่ได้หุ้มฉนวน
2. Nominal diameter 25.4 ซม.
3. อุณหภูมิผิวท่อประมาณ 362°C

การใช้โปรแกรม 3E PLUS ในการประเมิน เมื่อเรานำข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดท่อส่งจ่ายไอน้ำที่ไม่มีการหุ้มฉนวน [37] หรือฉนวนเกิดการเสื่อมสภาพตามอายุการใช้งานแล้วรอกเข้าไปในโปรแกรมดังแสดงในรูปที่ 2.17 โปรแกรม 3E PLUS จะทำการคำนวณหาปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปในหน่วย

ของ W/m รวมถึงบอกค่าประสิทธิภาพของท่อส่งจ่ายไอน้ำในหน่วยของ % ดังแสดงในรูปที่ 2.18 ซึ่งเราสามารถนำค่าที่ได้ไปคำนวณเพื่อคิดออกมาเป็นจำนวนเงินที่สูญเสียต่อไปได้



รูปที่ 2.17 กรอกข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดลงในโปรแกรม [37]



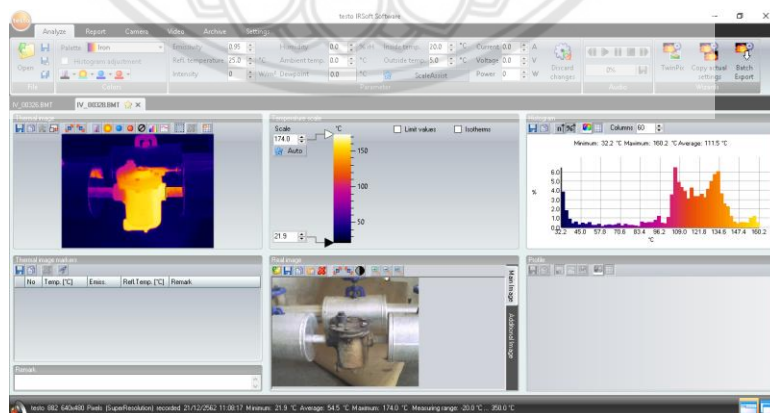
รูปที่ 2.18 โปรแกรมจะทำการคำนวณค่าพลังงานความร้อนที่สูญเสียออกมา [37]

2.2.8 โปรแกรม testo IRSoft software



รูปที่ 2.19 ไอคอนของโปรแกรม testo IRSoft software [38]

โปรแกรม IRSoft thermography ไอคอนโปรแกรมแสดงได้ดังรูปที่ 2.19 เป็นโปรแกรมช่วยวิเคราะห์ประมวลผลภาพถ่ายความร้อนแบบอินฟราเรดจากกล้องเทอร์โมสแกน ดังแสดงในรูปที่ 2.20 โดยโปรแกรมจะอ่านค่าอุณหภูมิต่ำสุด สูงสุดและอุณหภูมิเฉลี่ยในจุดที่ผู้ใช้ต้องการทราบ โดยการคลิกที่ Histogram แล้วเลือกพื้นที่ที่ต้องการทราบค่าอุณหภูมิในหน่วยของ $^{\circ}\text{C}$ หรือ $^{\circ}\text{F}$ ซึ่งโปรแกรม testo IRSoft software ถูกพัฒนาโดย testo



รูปที่ 2.20 โปรแกรมจะทำการวิเคราะห์ประมวลผลภาพถ่ายความร้อน

บทที่ 3

วิธีการดำเนินโครงการ

ในบทนี้จะทำการกล่าวถึงข้อมูลระบบไอน้ำเบื้องต้นของโรงงานลานนาโปรดักส์ ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่ 1.ส่วนระบบผลิตไอน้ำ 2. ส่วนระบบท่อส่งจ่ายไอน้ำและน้ำป้อน 3. ส่วนระบบอุปกรณ์ที่ใช้ไอน้ำ 4. ส่วนการนำความร้อนกลับ รวมถึงวิธีการตรวจวัดและอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดเพื่อเก็บข้อมูลมาใช้ในการวิเคราะห์หามาตรการที่มีความเป็นไปได้ในการเพิ่มศักยภาพให้กับระบบไอน้ำในแต่ละส่วน

3.1 ข้อมูลเบื้องต้นของโรงงาน

1. ชื่อโรงงาน บริษัท ลานนาโปรดักส์ จำกัด
2. เลขทะเบียนโรงงาน น.9(3)-1/2532 นนน
3. ประเภทอุตสาหกรรม อาหาร
4. สถานที่ตั้ง 68,68/5 หมู่ 4 ถนน ทางหลวงหมายเลข 11 ต.บ้านกลาง อ.เมืองลำพูน จ.ลำพูน 51000
5. โทรศัพท์ 053-581169
6. โทรสาร 053-581179



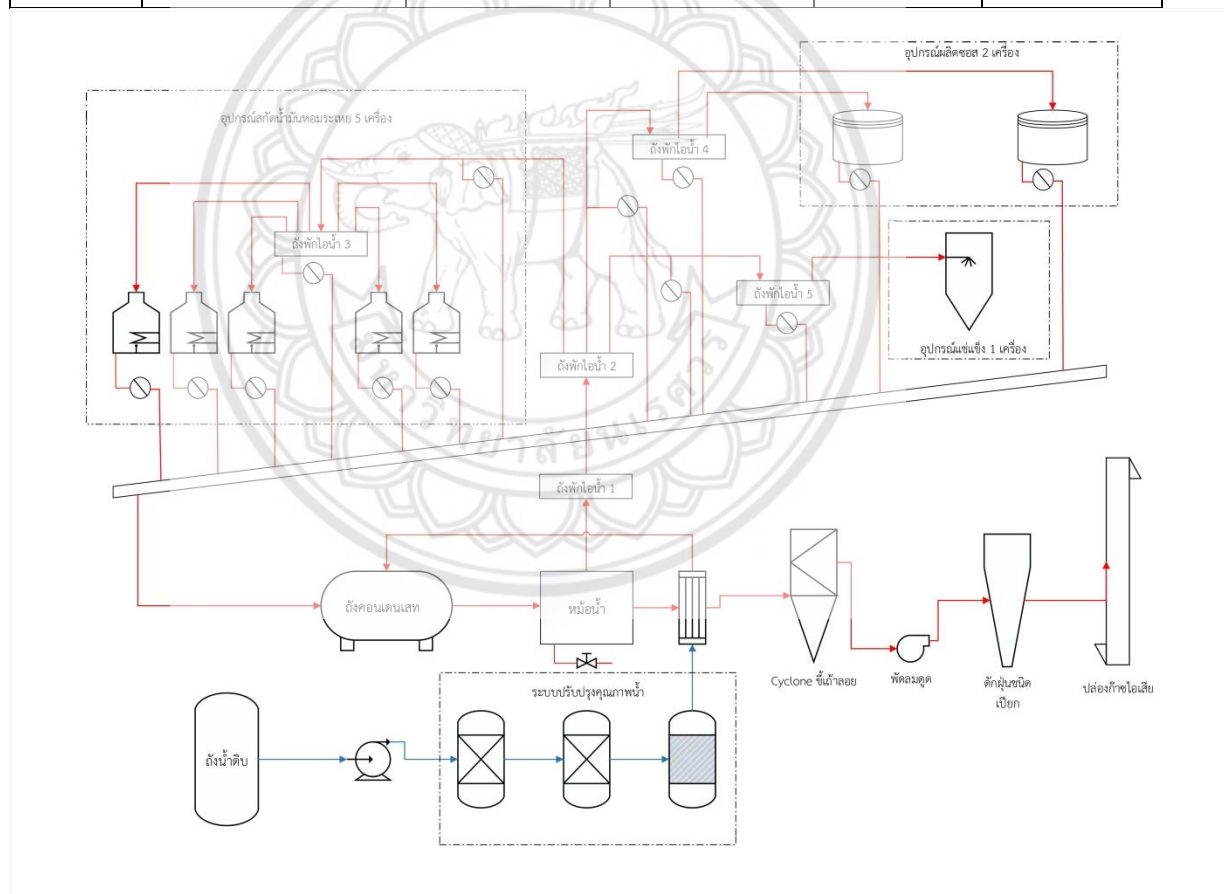
รูปที่ 3.1 ภาพถ่ายด้านหน้าโรงงาน

3.2 ข้อมูลเบื้องต้นระบบผลิตไอน้ำ

บริษัท ลานนาโปรดักส์ จำกัด (กลั่นน้ำมันหอมระเหย) ใช้หม้อน้ำแบบผสม (Hybrid boiler) ในการผลิตไอน้ำเพื่อนำไอน้ำที่ได้ไปใช้ในส่วนต่างๆของโรงงาน ชั่วโมงการทำงานอยู่ที่ 2,176 ชั่วโมง/ปี โดยข้อมูลเบื้องต้นของหม้อน้ำได้แสดงดังตารางที่ 3.1 แผนผังระบบไอน้ำของโรงงานแสดงดังรูปที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลเบื้องต้นของหม้อน้ำ

อุปกรณ์	ผู้ผลิต	อายุการใช้งาน	กำลังผลิตไอน้ำ สูงสุด	ความดันไอน้ำ	เชื้อเพลิง
หม้อน้ำ	แอล เค บอยเลอร์	9 ปี	5 ton/hr	7 barg	กะลาปาล์ม



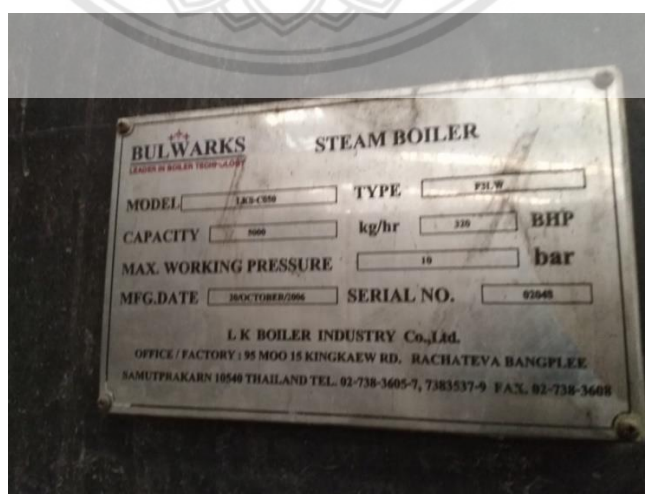
รูปที่ 3.2 แผนผังระบบไอน้ำของโรงงาน

3.2.1 หม้อไอน้ำ

หม้อไอน้ำที่ใช้ในการผลิตไอน้ำ ผลิตโดยบริษัท แอล เค บอยเลอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.3 เป็นหม้อไอน้ำแบบผสม (Hybrid boiler) มีกำลังผลิตไอน้ำสูงสุด 5 ton/h ความดันสูงสุด 10 barg ใช้กะลาปาล์มเป็นเชื้อเพลิง Name Plate หม้อไอน้ำแสดงดังรูปที่ 3.4 ทำหน้าที่ผลิตไอน้ำเข้าสู่กระบวนการผลิต ที่ความดันใช้งาน 6.5 barg



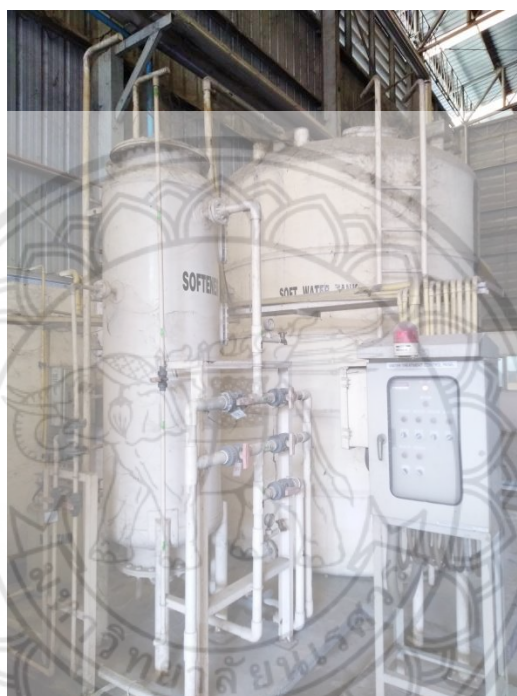
รูปที่ 3.3 หม้อไอน้ำ ผลิตโดยบริษัท แอล เค บอยเลอร์ ขนาด 5 ton/h



รูปที่ 3.4 Name Plate หม้อไอน้ำ

3.2.2 อุปกรณ์ปรับปรุงคุณภาพน้ำ

บริษัท ลานนาโปรดักส์ จำกัด จะมีการนำถังกรองน้ำอ่อน (Water softener) ดังแสดงในรูปที่ 3.5 มาช่วยในการปรับปรุงคุณภาพน้ำก่อนเข้าหม้อไอน้ำ ซึ่งเป็นการกรองสารแขวนลอยหรือของแข็งที่ละลายสะสมอยู่ในน้ำโดยใช้เรซิน ก่อนที่จะส่งน้ำที่ได้รับการปรับปรุงไปใช้ต่อไป



รูปที่ 3.5 ถังกรองน้ำอ่อน

3.3.3 อุปกรณ์ดักจับซีเถ้าลอย (Cyclone)

หลังจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงเพื่อให้ได้พลังงานความร้อนไปใช้ในการผลิตไอน้ำ ก็จะมีการปล่อยก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้นทิ้งผ่านปล่องระบายก๊าซไอเสีย แต่ภายในก๊าซไอเสียหลังจากการเผาไหม้นั้น จะมีส่วนผสมของซีเถ้าอยู่เป็นจำนวนมาก จึงต้องมีการนำ Cyclone ดังแสดงในรูปที่ 3.6 มาใช้ในการดักจับซีเถ้าลอย เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดมลพิษกับสิ่งแวดล้อมหลังจากการปล่อยแก๊สไอเสียทิ้ง



รูปที่ 3.6 อุปกรณ์ดักจับขี้เถ้าลอย

3.3.4 อุปกรณ์ดักจับฝุ่นชนิดเปียก

ก๊าซไอเสียที่ได้รับการกำจัดขี้เถ้าลอยแล้ว จะถูกส่งไปยังอุปกรณ์ที่ชื่อว่า เครื่องดักจับฝุ่นชนิดเปียก (Wet Scrubber) ดังแสดงในรูปที่ 3.7 ซึ่ง Wet Scrubber จะทำหน้าที่บำบัดอากาศแบบเปียก สามารถใช้ได้กับสารปนเปื้อนที่เป็นฝุ่นและก๊าซต่างๆ โดยเฉพาะก๊าซที่สามารถละลายน้ำได้



รูปที่ 3.7 อุปกรณ์ดักจับฝุ่นชนิดเปียก

3.3.5 ปล่องระบายก๊าซไอเสีย

เมื่อแก๊สไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงได้รับการดักจับซีเถ้าลอยและการดักจับฝุ่นชนิดเปียกแล้ว จะถูกส่งไปยังปล่องระบายแก๊สไอเสีย ดังแสดงในรูปที่ 3.8 ซึ่งจะทำหน้าที่ปล่อยแก๊สไอเสียออกสู่บรรยากาศต่อไป



รูปที่ 3.8 ปล่องระบายแก๊สไอเสีย

3.3.6 ระบบป้อนเชื้อเพลิง

เชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้ของระบบไอน้ำคือ กะลาปาล์ม ดังแสดงในรูปที่ 3.9 โดยจะมีปริมาณการใช้อยู่ที่ 187.5 kg/hr และใน 1 วัน มีการเปิดใช้งานหม้อน้ำ 8 ชั่วโมง ซึ่งการป้อนเชื้อเพลิงเข้าไปในห้องเผาไหม้นั้น จะเป็นระบบควบคุมการจ่ายเชื้อเพลิงแบบอัตโนมัติ ผ่านท่อลำเลียงเชื้อเพลิง ดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.9 กะลาปาล์ม



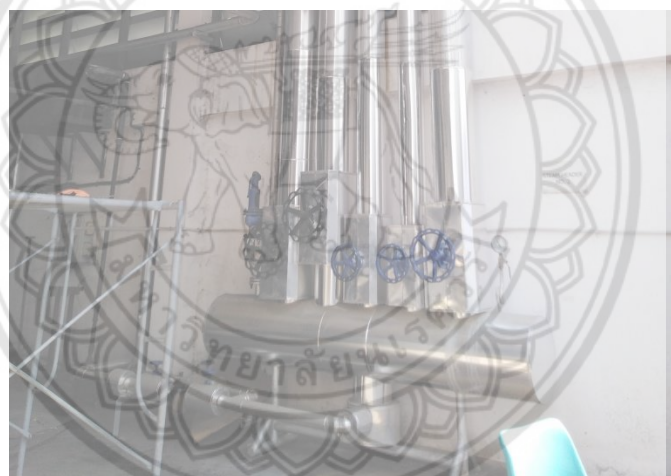
รูปที่ 3.10 ท่อลำเลียงเชื้อเพลิง

3.3 ข้อมูลเบื้องต้นระบบส่งจ่ายไอน้ำและน้ำป้อน

หม้อน้ำขนาด 5 ton/h ผลิตไอน้ำที่ความดัน 6.5 barg (สถานะไอน้ำเป็นไออิ่มตัว) ไอน้ำจะถูกส่งจ่ายไปยังถึงพักไอน้ำ 1 (Steam header 1) แสดงดังรูป 3.11 จากนั้นจ่ายไอน้ำผ่านท่อไปยังถึงพักไอน้ำ 2 (Steam header 2) ดังแสดงในรูปที่ 3.12 ซึ่งถึงพักไอน้ำ 2 จะเป็นตัวควบคุมการจ่ายไอน้ำไปใช้ในส่วนต่างๆของโรงงาน ซึ่งจะประกอบไปด้วย ส่วนของการสกัดน้ำมันหอมระเหย ส่วนของการผลิตอาหารแช่แข็ง และ ส่วนของการผลิต



รูปที่ 3.11 ถังพักไอน้ำ 1



รูปที่ 3.12 ถังพักไอน้ำ 2

3.4 ข้อมูลเบื้องต้นระบบการใช้ไอน้ำ

อุปกรณ์ใช้ไอน้ำมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.4.1 เครื่องสกัดน้ำมันหอมระเหย

เครื่องสกัดน้ำมันหอมระเหย ดังแสดงในรูปที่ 3.13 เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับสกัดน้ำมันหอมระเหยจากพืช วิธีการกลั่นจะเป็นการผ่านไอน้ำจากเครื่องกำเนิดไอน้ำเข้าไปในหม้อควบคุมความดัน

ที่บรรจุวัตถุดิบของพืชที่นำมากลั่นน้ำมันหอมระเหย เมื่อความร้อนจากไอน้ำกระทบกับวัตถุดิบ ไอน้ำก็จะนำพาน้ำมันหอมระเหยที่อยู่ในพืชชนิดนั้น ๆ ออกมาผ่านท่อเกลียวที่หล่อเลี้ยงด้วยน้ำเย็นเพื่อให้เกิดการลดอุณหภูมิและควบแน่นกลายเป็นของเหลว หลังจากนั้นของเหลวจากการควบแน่นที่ได้ก็จะไหลผ่านท่อควบแน่นเข้าสู่หลอดแก้ว เป็นการใช้อินน้ำแบบสัมผัสโดยอ้อม (Indirect steam) จำนวน 5 เครื่อง



รูปที่ 3.13 เครื่องสกัดน้ำมันหอมระเหย

3.5 ข้อมูลเบื้องต้นระบบการนำความร้อนกลับ

3.5.1 ถังน้ำป้อนเข้าหม้อน้ำ

ในระบบไอน้ำของ บริษัท ลานนาโปรดักส์ จำกัด มีการนำน้ำคอนเดนเสท (น้ำอุณหภูมิสูง) ของอุปกรณ์ที่ใช้ไอน้ำภายในโรงงานกลับมาใช้ในระบบไอน้ำอีกครั้ง โดยจะส่งน้ำคอนเดนเสทไปเก็บไว้ที่ถังน้ำป้อนเข้าหม้อน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 3.14 และมีการป้อนน้ำที่ได้รับการแลกเปลี่ยนความร้อนจาก Economizer มาผสม ก่อนที่จะส่งน้ำที่ถูกผสมภายในถังน้ำป้อนเข้าหม้อน้ำไปใช้ในการผลิตไอน้ำต่อไป



รูปที่ 3.14 ถังน้ำป้อนเข้าหม้อน้ำ

3.5.2 แผงที่รับความร้อน (Economizer)

น้ำป้อนที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพแล้ว จะถูกส่งไปที่ Economizer ดังแสดงในรูปที่ 3.15 ซึ่งจะทำหน้าที่แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำป้อนกับแก๊สไอเสีย เพื่อเป็นการเพิ่มอุณหภูมิของน้ำป้อนให้สูงขึ้นก่อนที่จะถูกส่งไปผสมกับน้ำคอนเดนเสทที่ถังเก็บน้ำป้อน โดยที่ตำแหน่งที่ติดตั้งของ Economizer จะอยู่ที่ท่อทางออกของแก๊สไอเสีย



รูปที่ 3.15 Economizer

3.5.3 กักน้ำไอน้ำ (Steam trap)

กักน้ำไอน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 3.16 จะทำหน้าที่ ระบายไอน้ำที่เกิดการควบแน่นเป็นน้ำคอนเดนเสททิ้ง เพื่อเป็นการป้องกันหรือรักษาระดับอุณหภูมิของไอน้ำให้เป็นไปตามที่ต้องการ แต่ในระบบไอน้ำของโรงกลั่นนาโปรดักส์ ได้มีการนำน้ำคอนเดนเสทนี้ ไปใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำป้อนที่จะเข้าหม้อน้ำ ซึ่งจะช่วยให้สามารถลดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงในการเผาไหม้ได้











รูปที่ 3.16 กักน้ำไอน้ำ

3.6 อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัด

รายการอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดแสดงได้ดังตารางที่ 3.2

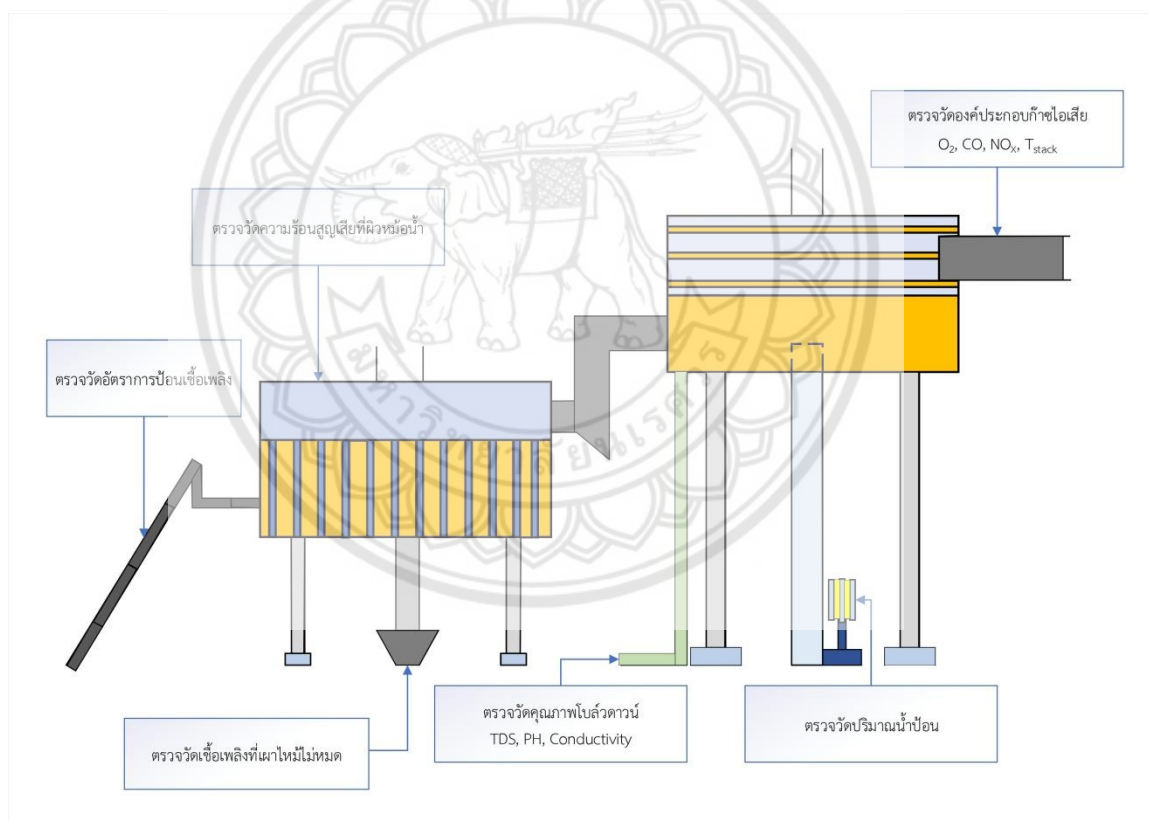
ตารางที่ 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัด

ลำดับ	รายการ	รูปภาพ	การใช้งาน
1	เครื่องวัดองค์ประกอบ ก๊าซไอเสีย		ใช้วัดองค์ประกอบ ก๊าซ ไอเสียจากการเผาไหม้ ของเชื้อเพลิง ดังนี้ CO CO ₂ NO _x และ O ₂ รวมทั้ง อุณหภูมิก๊าซไอ เสีย
2	กล้องถ่ายภาพความ ร้อนแบบอินฟราเรด		ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิผิว วัสดุต่างๆที่ต้องการ
3	เครื่องวัดอุณหภูมิ และ ความชื้นสัมพัทธ์ (% RH)		ใช้ในการตรวจวัดค่า ความชื้นสัมพัทธ์และ อุณหภูมิของอากาศ บริเวณรอบหม้อน้ำ
4	เครื่องวัดค่า TDS อุณหภูมิ และ ค่า Conductivity		ใช้ในการตรวจวัดค่า TDS และค่า Conductivity และ อุณหภูมิ ของน้ำป้อน และน้ำโบลว์ดาวน์

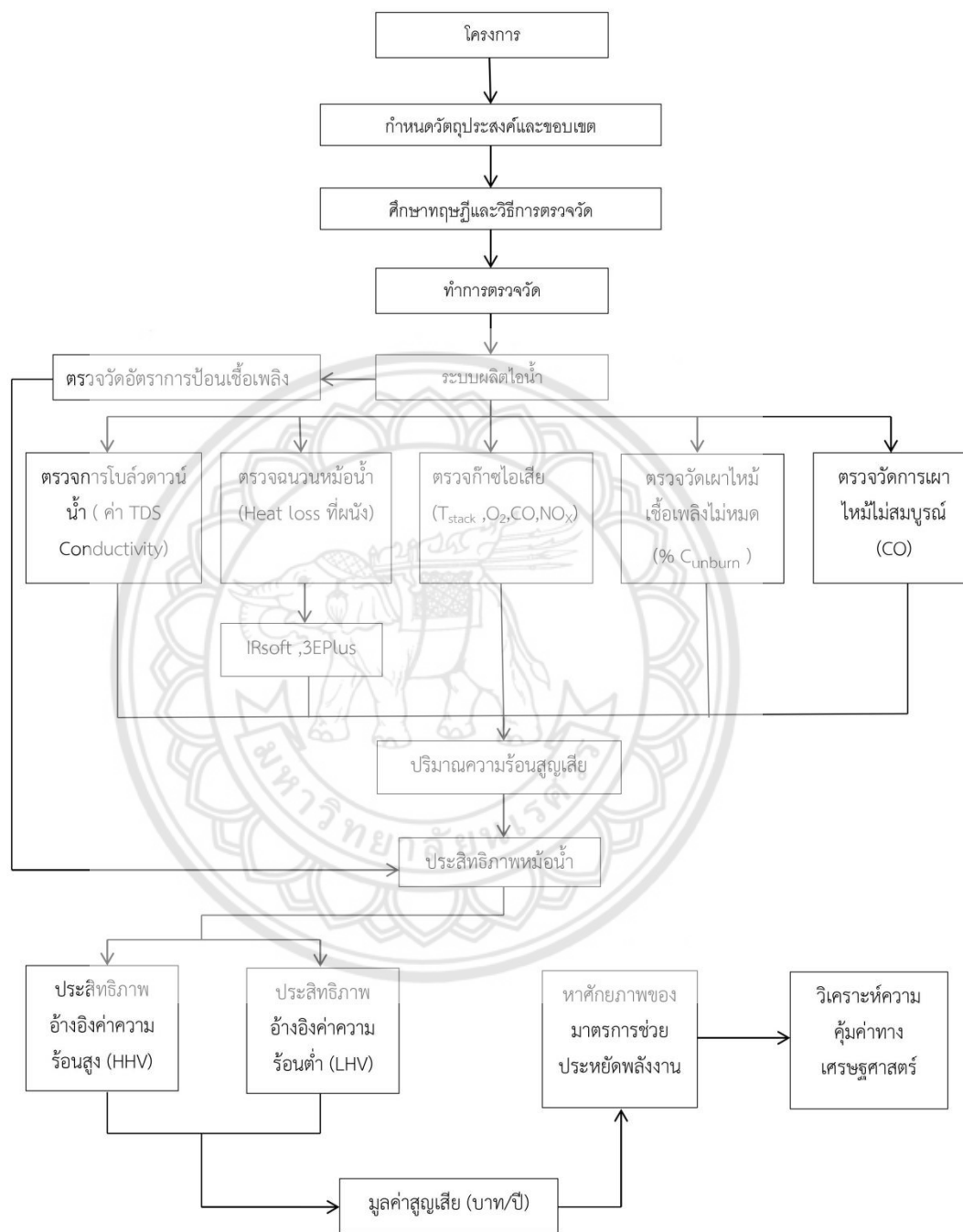
5	เครื่องวัดการรั่วไหลของ น้ำแบบอัลตราโซนิก		ใช้ในการวัดการรั่วไหล ของไอน้ำในระบบท่อส่ง จ่ายไอน้ำ
6	เครื่องวัดอัตราการ ไหลน้ำป้อน		ใช้ในการวัดอัตราการ ป้อนน้ำเข้าสู่หม้อไอน้ำ
7	เกจวัดความดันไอน้ำ		ใช้ในการวัดค่าความดัน ของไอน้ำในจุดที่ ต้องการทราบ
8	เครื่องวัดค่า pH		ใช้ในการวัดค่า pH ของ น้ำป้อนและน้ำโบลว์ ดาวน

3.7 ขั้นตอนในการตรวจวัด

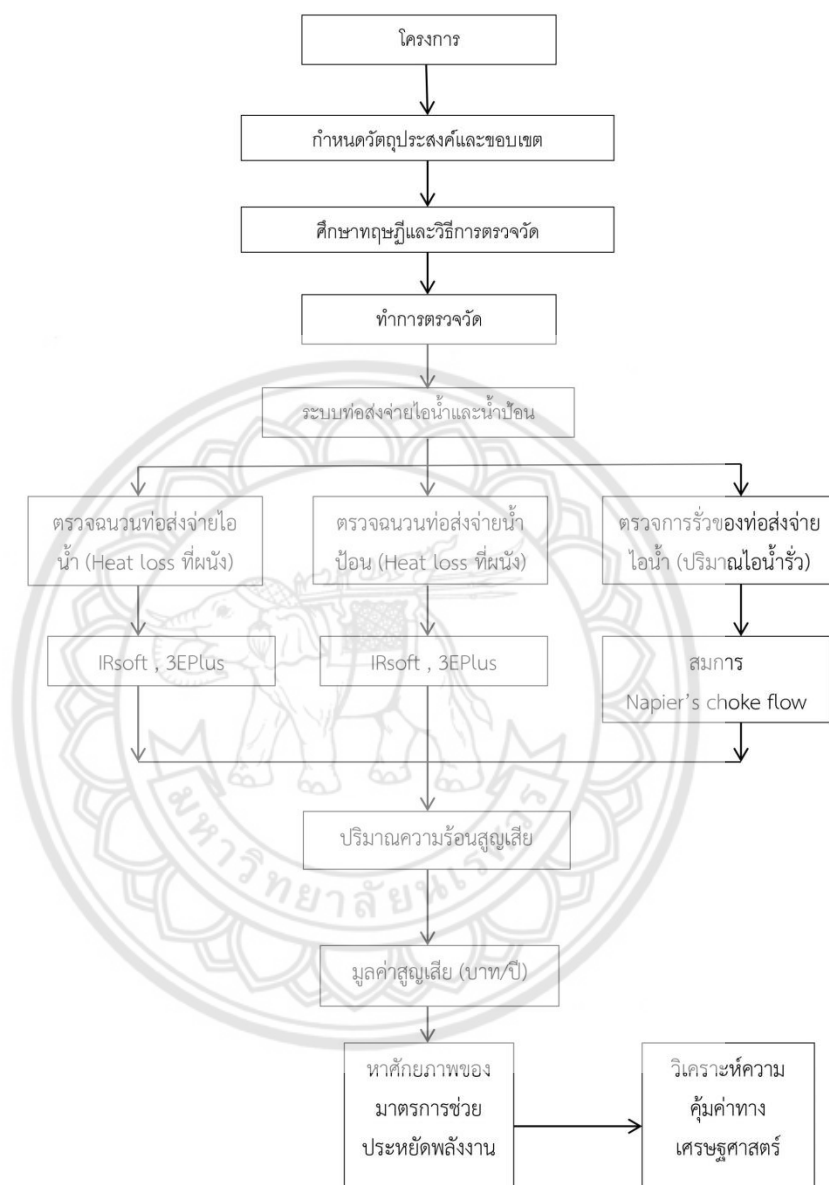
ในส่วนของการตรวจวัดนั้น จะทำการตรวจวัดเพื่อนำข้อมูลไปใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณความร้อนสูญเสียในส่วนต่างๆของระบบไอน้ำ และนำผลการวิเคราะห์ที่ได้ไปใช้เป็นแนวทางในการแก้ไขปัญหาต่อไป โดยที่รายละเอียดและขั้นตอนของการตรวจวัดแสดงได้ดังรูปที่ 3.17-3.20 ซึ่งในระบบไอน้ำของโรงงานลานนาโปรดักส์นั้นไม่ได้มีการติดตั้งเครื่องมือวัดอัตราการไหลและอุณหภูมิของไอน้ำในอุปกรณ์ที่ใช้ไอน้ำแต่ละตัว จึงทำให้ไม่มีการตรวจวัดในส่วนของระบบอุปกรณ์ที่ใช้ไอน้ำเนื่องจากไม่รู้สภาวะของไอน้ำ ณ จุดต่างๆ เช่น ไม่ทราบค่าอุณหภูมิของไอน้ำที่ทางเข้าและทางออกของแต่ละอุปกรณ์ จึงทำให้ไม่สามารถประเมินพลังงานความร้อนที่อุปกรณ์ใช้ไปในกระบวนการผลิตได้ เป็นต้น



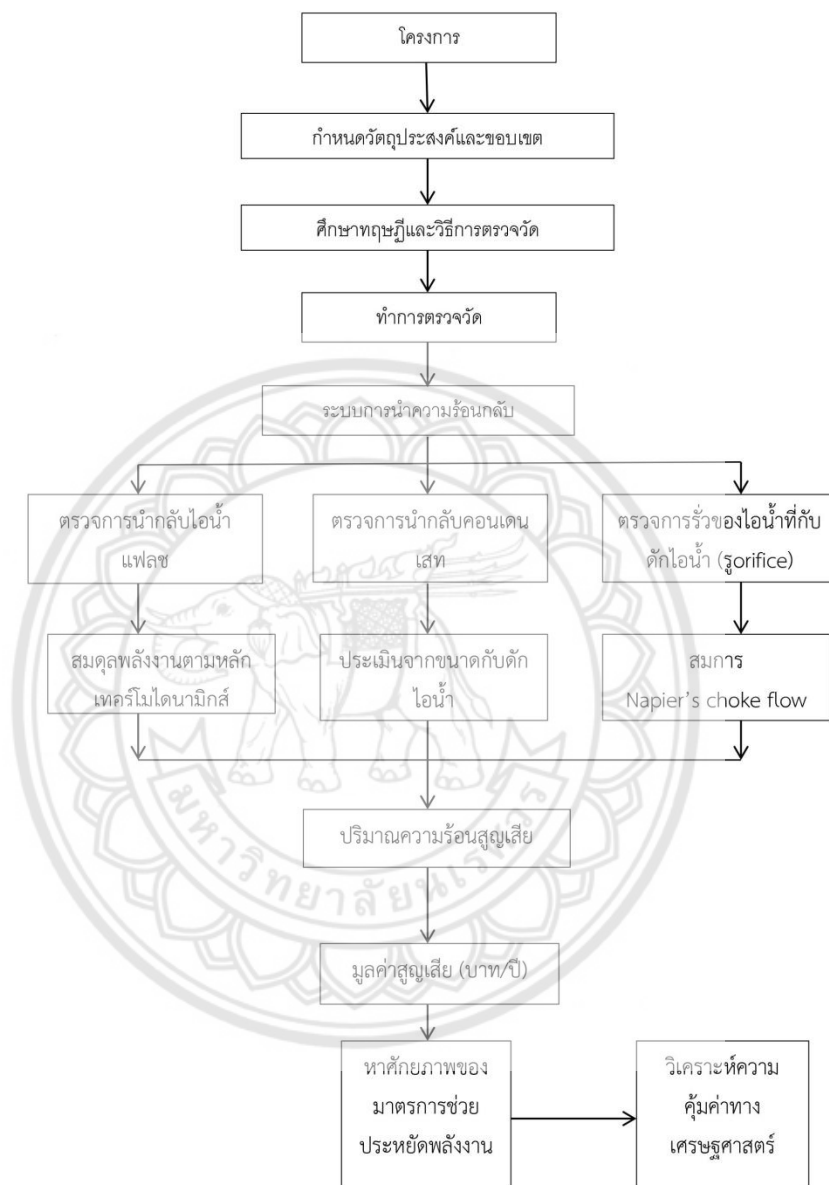
รูปที่ 3.17 ตำแหน่งการตรวจวัดของหม้อไอน้ำ



รูปที่ 3.18 ขั้นตอนการตรวจวัดและวิเคราะห์ในส่วน of ระบบผลิตไอน้ำ



รูปที่ 3.19 ขั้นตอนการตรวจวัดและวิเคราะห์ในส่วน of ระบบท่อส่งจ่ายไอน้ำและน้ำป้อน



รูปที่ 3.20 ขั้นตอนการตรวจวัดและวิเคราะห์ในส่วน of ระบบการนำความร้อนกลับ

3.7.1 การตรวจวัดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงในหม้อน้ำ

ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงสามารถตรวจวัดได้จากตารางบันทึกข้อมูลระบบไอน้ำของโรงงานลานนาโปรดักส์ ดังแสดงในรูปที่ 3.21 และทำการคำนวณหาค่าเฉลี่ยการใช้เชื้อเพลิงต่อหนึ่งชั่วโมง เพื่อนำค่าที่ได้คำนวณหาค่าประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำต่อไป

The image shows a handwritten data table on a grid background. The table has multiple columns and rows, with some text in Thai. A large, faint watermark of a university seal is overlaid on the table.

รูปที่ 3.21 ตารางบันทึกข้อมูลระบบไอน้ำ

3.7.2 การตรวจวัดความดันไอน้ำที่ใช้งาน

ความดันไอน้ำที่ใช้งานสามารถตรวจวัดได้จากเกจวัดความดันที่ถังพักไอน้ำ (Header 1) ดังแสดงในรูปที่ 3.22 ซึ่งถังพักไอน้ำจะทำหน้าที่เก็บไอน้ำที่ถูกส่งมาจากหม้อไอน้ำก่อนที่จะส่งไปใช้ใน ส่วนต่อไป อีกทั้งยังสามารถตรวจวัดได้จากตารางบันทึกข้อมูลระบบไอน้ำได้เช่นเดียวกัน



รูปที่ 3.22 เกจวัดความดันที่ถังพักไอน้ำ

3.7.3 การตรวจวัดปริมาณการผลิตไอน้ำที่หม้อน้ำผลิตได้ต่อหนึ่งชั่วโมง

เนื่องจากทางโรงงานลานนาโปรดักส์ ไม่ได้มีการติดตั้งมิเตอร์วัดอัตราการไหลของไอน้ำ ทำให้ไม่สามารถตรวจวัดอัตราการผลิตไอน้ำได้โดยตรง จึงมีการใช้สมการสมดุลมวลมาช่วยในการคำนวณ ซึ่งจะสามารถหาอัตราการผลิตไอน้ำได้จากผลต่างของอัตราการป้อนน้ำเข้าหม้อน้ำโดยสามารถตรวจวัดได้จากมิเตอร์น้ำป้อน ดังแสดงในรูปที่ 3.23 กับ อัตราการโบล์วดาวน



รูปที่ 3.23 มิเตอร์น้ำป้อน

3.7.4 การตรวจวัดก๊าซไอเสียของหม้อน้ำ

ก๊าซไอเสียของหม้อไอน้ำสามารถตรวจวัดได้ที่ตำแหน่งท่อทางออกของก๊าซไอเสีย โดยใช้เครื่องวัดองค์ประกอบของก๊าซไอเสีย ซึ่งจะทำให้ทราบค่า ดังนี้ CO CO_2 NO_x และ O_2 รวมทั้ง อุณหภูมิก๊าซไอเสีย ดังแสดงในรูปที่ 3.24 เพื่อนำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 3.24 ตำแหน่งการวัดองค์ประกอบของก๊าซไอเสีย

3.7.5 การตรวจวัดคุณภาพน้ำป้อนและน้ำโถ้วดาวน์

การตรวจวัดคุณภาพน้ำสามารถทำได้โดยการใช้ เครื่องวัดค่า TDS และ Conductivity ในการตรวจสอบค่า ppm ของสารแขวนลอยและค่าการนำไฟฟ้าของน้ำป้อนและน้ำโถ้วดาวน์ ดังแสดงในรูปที่ 3.25 และใช้เครื่องวัดค่า pH ในการตรวจสอบค่าความเป็นกรดต่างของน้ำป้อนและน้ำโถ้วดาวน์ ดังแสดงในรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.25 การตรวจสอบค่า TDS และค่า Conductivity



รูปที่ 3.26 การตรวจสอบค่า pH

3.7.6 การตรวจวัดอัตราการโบล์ดาวน์

การตรวจวัดอัตราการโบล์ดาวน์ทำได้โดยการใช้สมการในการคำนวณหา % Blowdown (% β) โดยที่สมการคือ

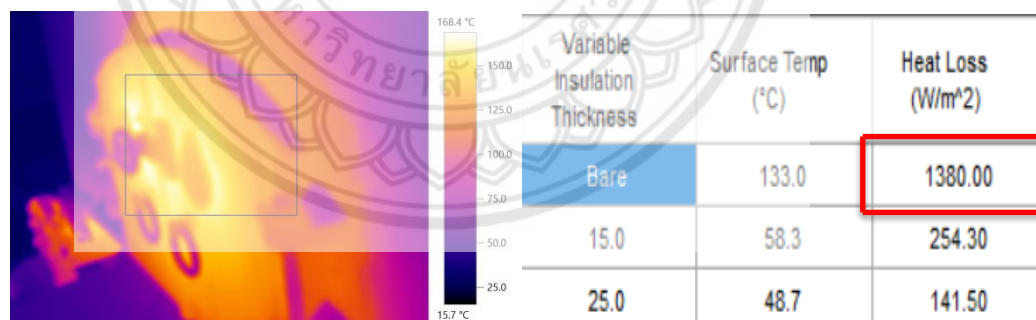
$$\% \text{ Blowdown} = \frac{\text{FeedWater Conductivity}}{\text{Blowdown Conductivity}} \times 100$$

เมื่อได้ค่า % β จะสามารถหาค่าอัตราการโบล์ดาวน์ได้ โดยการใช้สมการดังต่อไปนี้

$$\text{Blowdown rate} = \frac{\% \beta}{100} \times \text{Feed Water rate}$$

3.7.7 การตรวจวัดสภาพฉนวน

การตรวจวัดสภาพฉนวนทำได้โดยการใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนแบบอินฟราเรดวัดอุณหภูมิผิววัสดุ เช่น ฉนวนท่อส่งจ่ายไอน้ำ ฉนวนหม้อไอน้ำ เป็นต้น จากนั้นใช้โปรแกรม 3E Plus และ IR Soft มาช่วยในการคำนวณหาปริมาณความร้อนที่สูญเสีย ดังแสดงในรูปที่ 3.27



รูปที่ 3.27 ตัวอย่างการตรวจวัดสภาพฉนวน

3.7.8 การตรวจการรั่วไหลของท่อส่งจ่ายไอน้ำ

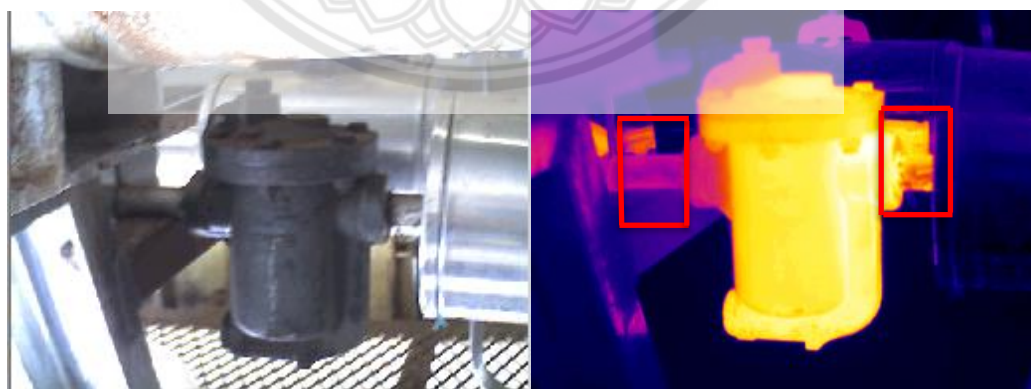
การตรวจการรั่วไหลของไอน้ำที่ท่อส่งจ่ายไอน้ำนั้น ทำได้โดยการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูรั่วโดยใช้อุปกรณ์ เช่น ไม้บรรทัด ตลับเมตร เป็นต้น เพื่อนำข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดไปคำนวณหาปริมาณไอน้ำที่รั่วไหลต่อไป ตัวอย่างการรั่วของท่อส่งจ่ายไอน้ำแสดงได้ดังรูปที่ 3.28



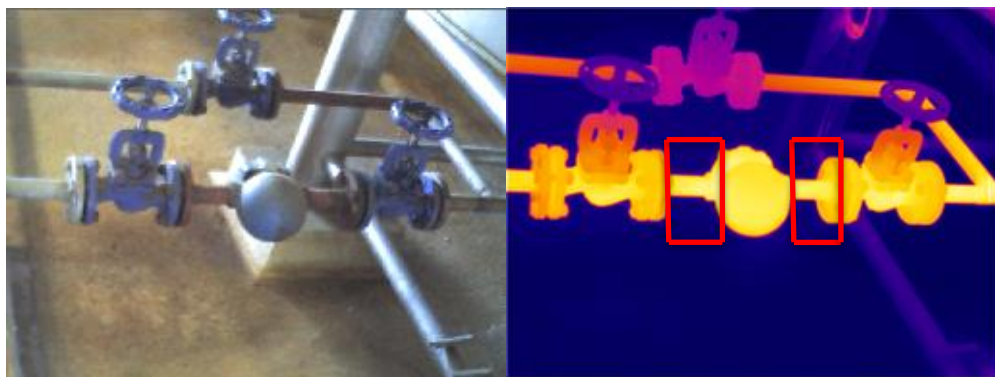
รูปที่ 3.28 ตัวอย่างการรั่วไหลของท่อส่งจ่ายไอน้ำ

3.7.9 การตรวจวัดกับดักไอน้ำรั่วไหล

การตรวจวัดการรั่วไหลของกับดักไอน้ำ ทำได้โดยการใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนวัดอุณหภูมิทางเข้าและทางออกของกับดักไอน้ำ ซึ่งหากพบว่าอุณหภูมิของกับดักไอน้ำที่ทางเข้าและทางออกมีค่าที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน แสดงว่ากับดักไอน้ำอยู่ในสภาพการใช้งานปกติ ดังแสดงในรูปที่ 3.29 แต่หากทำการตรวจวัดแล้วพบว่าอุณหภูมิที่ทางเข้าและทางออกของกับดักไอน้ำเท่ากันหรือใกล้เคียงกันแสดงว่ากับดักไอน้ำมีการรั่วไหล ดังแสดงในรูปที่ 3.30



รูปที่ 3.29 กับดักไอน้ำสภาพใช้งานปกติ



รูปที่ 3.30 กักน้ำที่มีการรั่วไหล



บทที่ 4

ผลการดำเนินงานและวิเคราะห์ผล

ในบทนี้เป็นการกล่าวถึงผลการตรวจวัดของระบบไอน้ำและการวิเคราะห์ผลการตรวจวัดของระบบไอน้ำ เพื่อหาปริมาณความสูญเสียในระบบไอน้ำในแต่ละส่วน ซึ่งทั้งในส่วนของการตรวจวัดและการวิเคราะห์ผลนั้นได้มีการแบ่งระบบไอน้ำออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่ 1. ส่วนระบบผลิตไอน้ำ 2. ส่วนท่อส่งจ่ายไอน้ำและน้ำป้อน 3. ส่วนอุปกรณ์ที่ใช้ไอน้ำ 4. ส่วนของการนำความร้อนกลับ เพื่อนำข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ผลไปใช้ในการปรับปรุงระบบไอน้ำให้ดียิ่งขึ้น ซึ่งจะกล่าวในส่วนถัดไป

4.1 ผลการตรวจวัดระบบไอน้ำ

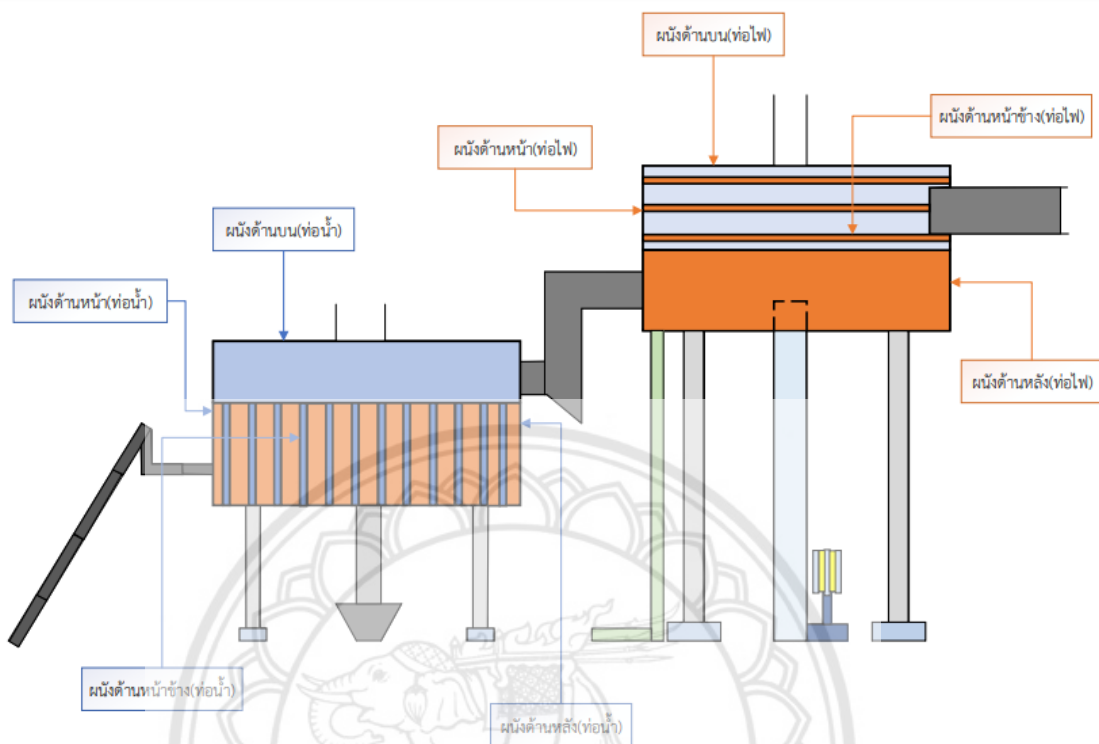
ในส่วนนี้จะเป็นการกล่าวถึงผลการตรวจวัดระบบไอน้ำซึ่งได้ทำการแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ดังที่ได้กล่าวมาก่อนหน้านี้ โดยที่ผลการตรวจวัดนั้นได้จากการตรวจวัดระบบไอน้ำของโรงงานลานนาโปรดักส์ ซึ่งรายละเอียดของผลการตรวจวัดมีดังต่อไปนี้

4.1.1 ส่วนระบบผลิตไอน้ำ

ในส่วนของระบบผลิตไอน้ำจะทำการตรวจวัดความร้อนสูญเสียที่จุดต่างๆของหม้อไอน้ำเป็นหลัก เช่น ความร้อนสูญเสียที่ผิวหรือผนังของหม้อไอน้ำ ความร้อนสูญเสียที่เกิดจากก๊าซไอเสีย ความร้อนสูญเสียที่เกิดจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ เป็นต้น ซึ่งผลการตรวจวัดความร้อนสูญเสียในส่วน of ระบบผลิตไอน้ำมีดังต่อไปนี้

4.1.1.1 ความร้อนสูญเสียที่ผิวหรือผนังของหม้อไอน้ำ




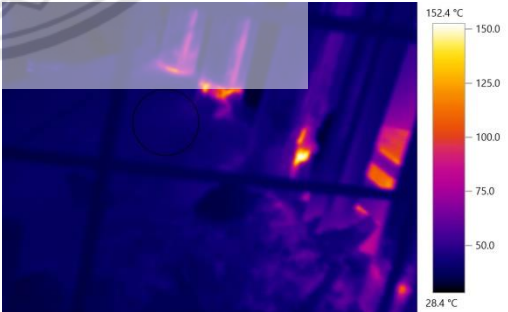
การตรวจวัดความร้อนสูญเสียที่ผิวหรือผนังหม้อไอน้ำแบบ Hybrid (หม้อไอน้ำแบบผสมที่เป็นการทำงานร่วมกันของหม้อไอน้ำแบบท่อไอน้ำและหม้อไอน้ำแบบท่อไฟ)ทำได้โดยใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนแบบอินฟราเรดถ่ายภาพพื้นที่ผิวของหม้อไอน้ำในแต่ละด้าน โดยที่ตำแหน่งการตรวจวัดนั้นแสดงได้ดังรูปที่ 4.1 และผลการตรวจวัดแสดงได้ดังตารางที่ 4.1

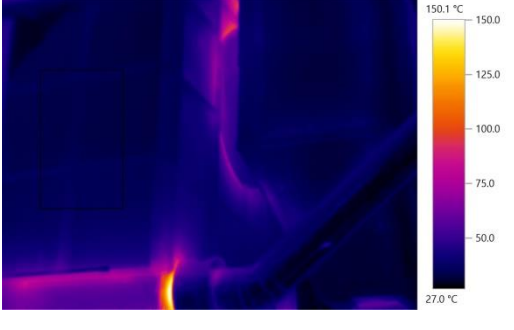

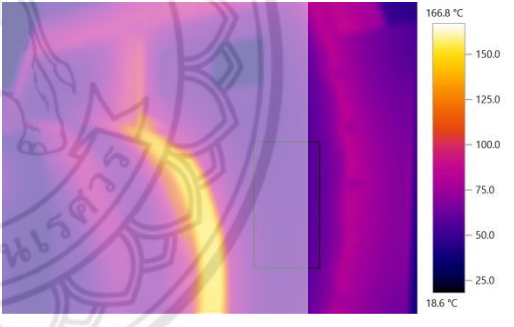



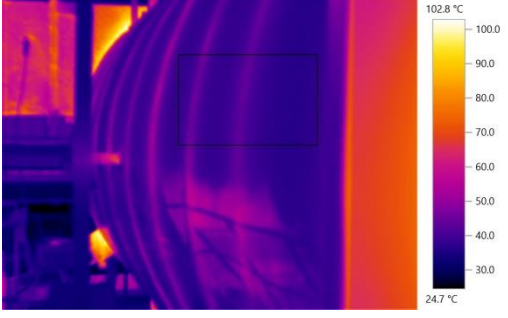

รูปที่ 4.1 ตำแหน่งการตรวจวัดความร้อนสูญเสียที่ผนังหม้อไอน้ำ

ตารางที่ 4.1 ภาพถ่ายความร้อนแบบอินฟราเรดที่ผิวของหม้อไอน้ำ

ลำดับที่	พื้นที่ผิว	ภาพถ่ายความร้อนแบบอินฟราเรด
1	ผนังด้านหน้าของหม้อไอน้ำแบบท่อน้ำ (อุณหภูมิเฉลี่ย 38.8 °C)	

2	<p>ผนังประตูห้องเผาไหม้ของหม้อน้ำ แบบท่อน้ำ (อุณหภูมิเฉลี่ย 133.0 °C)</p>	
3	<p>ผนังด้านซ้ายของหม้อน้ำแบบท่อน้ำ (อุณหภูมิเฉลี่ย 34.3 °C)</p>	
4	<p>ผนังด้านขวาของหม้อน้ำแบบท่อน้ำ (อุณหภูมิเฉลี่ย 33.9 °C)</p>	
5	<p>ผนังด้านบนของหม้อน้ำแบบท่อน้ำ (อุณหภูมิเฉลี่ย 41.0 °C)</p>	

6	ผนังด้านหลังของหม้อน้ำแบบท่อน้ำ (อุณหภูมิเฉลี่ย 35.2 °C)	
7	ผนังด้านหน้าของหม้อน้ำแบบท่อไฟ ด้านซ้าย (อุณหภูมิเฉลี่ย 55.4 °C)	
8	ผนังด้านหน้าของหม้อน้ำแบบท่อไฟ ด้านขวา (อุณหภูมิเฉลี่ย 55.9 °C)	
9	ผนังด้านซ้ายของหม้อน้ำแบบท่อไฟ (อุณหภูมิเฉลี่ย 39.3 °C)	

10	ผนังด้านขวาของหม้อน้ำแบบท่อไฟ (อุณหภูมิเฉลี่ย 38.7 °C)	
11	ผนังด้านหลังของหม้อน้ำแบบท่อไฟ (อุณหภูมิเฉลี่ย 47.1 °C)	

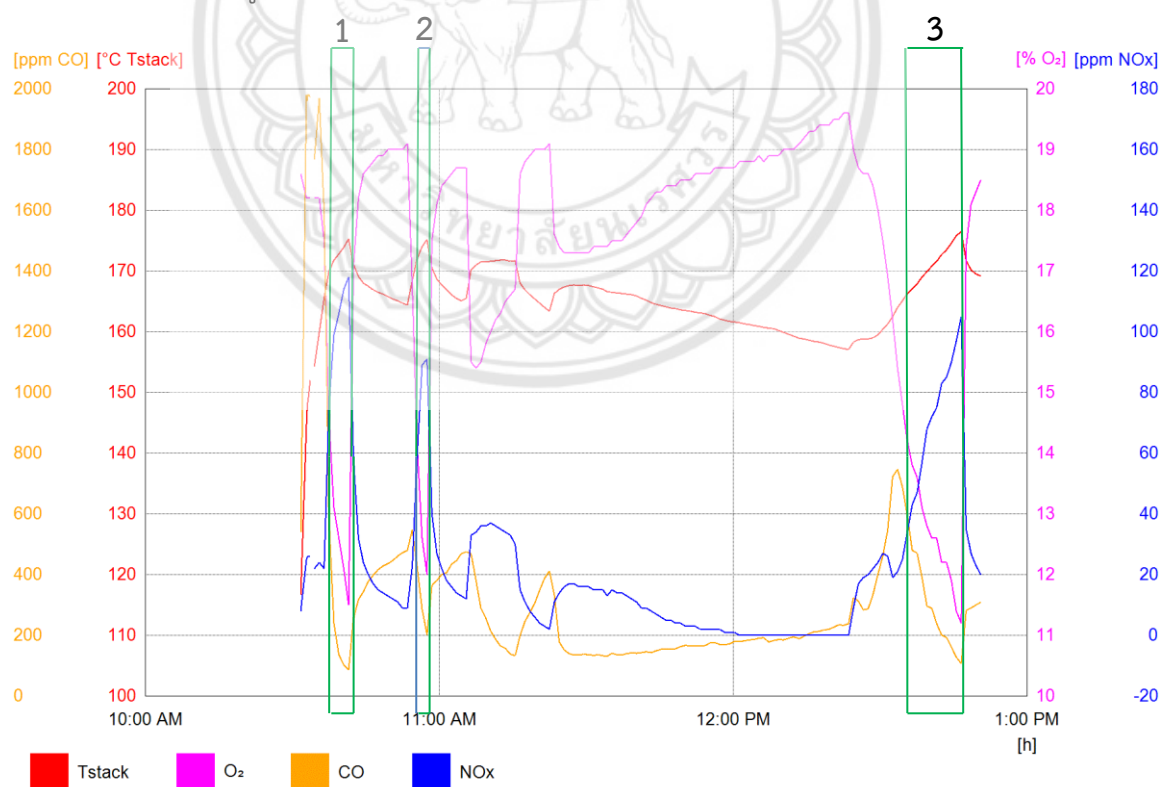
4.1.1.2 ความร้อนสูญเสียที่เกิดจากก๊าซไอเสียและการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์

การตรวจวัดความร้อนสูญเสียที่เกิดจากก๊าซไอเสียทำได้โดยการวัดองค์ประกอบของก๊าซไอเสียที่ตำแหน่งท่อทางออกของก๊าซ โดยใช้เครื่องวัดองค์ประกอบของก๊าซไอเสียแบบที่กค่าทุกๆ 1 นาที ในช่วงเวลา 10:30 – 12:50 น. ซึ่งจะทำให้การบันทึกค่า อุณหภูมิของก๊าซไอเสีย (T_{stack}) ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และปริมาณก๊าซออกซิเจน (O₂) ซึ่งผลการตรวจวัดแสดงได้ดังตารางที่ 4.2 จากนั้นจะทำการส่งข้อมูลไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อทำการแสดงผลในรูปของกราฟ ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.2 อีกทั้งยังสามารถนำข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดนี้ มาวิเคราะห์หาค่าปริมาณความร้อนสูญเสียที่เกิดจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ได้อีกด้วย โดยค่าที่บ่งบอกถึงการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์นั้นคือค่าปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งหากตรวจพบก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในก๊าซไอเสียเป็นจำนวนมาก จะทำให้สามารถทราบได้ว่าปริมาณอากาศกับเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้นั้นอยู่ในสัดส่วนที่ไม่เหมาะสมกัน

ตารางที่ 4.2 ผลการตรวจวัดองค์ประกอบของก๊าซไอเสีย

ก๊าซไอเสีย	หน่วย	ค่าเฉลี่ยจากการตรวจวัด
ปริมาณก๊าซออกซิเจน	%	12.8
ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์	ppm	299.2
ปริมาณก๊าซไนโตรเจนออกไซด์	ppm	77.9
อุณหภูมิก๊าซไอเสีย	°C	171.7
อุณหภูมิอากาศรอบหม้อน้ำ	°C	34.0
ความชื้นสัมพัทธ์	%	62.3

จากการตารางที่ 4.2 พบว่าจากการตรวจวัดองค์ประกอบของแก๊สไอเสียนั้นมีค่าปริมาณก๊าซออกซิเจนอยู่ที่ 12.8 % ค่าปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์อยู่ที่ 299.2 ppm ค่าปริมาณก๊าซไนโตรเจนออกไซด์อยู่ที่ 77.9 ppm ค่าอุณหภูมิของก๊าซไอเสียอยู่ที่ 171.7 °C ค่าอุณหภูมิบริเวณและความชื้นสัมพัทธ์รอบหม้อน้ำอยู่ที่ 34.0 °C และ 62.3 % ตามลำดับ



รูปที่ 4.2 ผลการตรวจวัดองค์ประกอบของก๊าซไอเสีย

จากกราฟจะพบว่าปริมาณออกซิเจนจะมีค่าสูงและต่ำเป็นบางช่วง สาเหตุเนื่องจากหม้อไอน้ำมีการตั้งค่าความดันที่ต้องการไว้เมื่อความดันภายในหม้อไอน้ำถึงค่าที่กำหนดจะทำให้หม้อไอน้ำหยุดการเผาไหม้เชื้อเพลิง ซึ่งช่วงที่หม้อไอน้ำหยุดการเผาไหม้นี้จะทำให้ค่าปริมาณออกซิเจนที่วัดได้จากก๊าซไอเสียมีค่าสูง ในทำนองเดียวกันเมื่อความดันของหม้อไอน้ำต่ำกว่าที่ตั้งไว้หม้อไอน้ำจะทำการเผาไหม้เชื้อเพลิง ซึ่งจะทำให้สามารถวัดปริมาณก๊าซออกซิเจนในก๊าซไอเสียได้ต่ำ โดยที่ในการวิเคราะห์หาความร้อนสูญเสียที่เกิดจากก๊าซไอเสียและการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์นั้น จะพิจารณาเฉพาะช่วงที่เกิดการเผาไหม้ โดยที่ในกราฟจะพบว่าช่วงที่เกิดการเผาไหม้เชื้อเพลิงนั้นปริมาณก๊าซออกซิเจนจะอยู่ที่ 11-14% เนื่องจากในข้อมูลการตรวจวัดองค์ประกอบของก๊าซไอเสียพบว่ามี การแบ่งกลุ่มของปริมาณก๊าซออกซิเจนอย่างชัดเจน ประกอบด้วย กลุ่มที่ 1 จะมีช่วงปริมาณก๊าซออกซิเจนอยู่ที่ 11-14 % กลุ่มที่ 2 จะมีช่วงปริมาณก๊าซออกซิเจนอยู่ที่ 17-19 % ดังนั้นช่วงที่เกิดการเผาไหม้จะเป็นช่วงก๊าซออกซิเจน 11-14 % (ช่วงออกซิเจนต่ำ) ซึ่งจะพบว่ามีทั้งหมด 3 ช่วง คือ 1. ช่วงเวลา 10:37 – 10:41 AM 2. ช่วงเวลา 10:55 – 10:57 AM 3. ช่วงเวลา 12:34 – 12:46 PM

4.1.1.3 ความร้อนสูญเสียที่เกิดจากการโบลว์ดาวน์

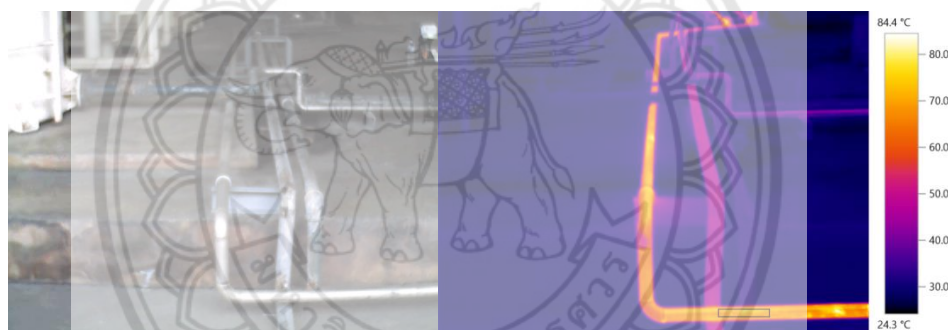
การวัดความร้อนสูญเสียที่เกิดจากการโบลว์ดาวน์ ทำได้โดยการตรวจสอบคุณภาพของน้ำโบลว์ดาวน์และน้ำป้อนเข้าหม้อน้ำ ซึ่งจะประกอบไปด้วย การตรวจสอบค่า pH การตรวจสอบค่าการนำไฟฟ้า และการตรวจสอบค่า TDS เพื่อนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานที่มีการควบคุมตามกฎหมาย ส่งผลให้สามารถควบคุมปริมาณการโบลว์ดาวน์ให้เหมาะสม โดยที่โรงงานลานนาโปรดักส์ มีการโบลว์ดาวน์โดยใช้คนเป็นตัวควบคุมการเปิดปิดของวาล์วระบายน้ำ และทำการโบลว์ดาวน์ 1 ครั้งต่อวัน ครั้งละ 7 วินาที ซึ่งผลการตรวจวัดคุณภาพของน้ำโบลว์ดาวน์และน้ำป้อนเข้าหม้อน้ำแสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการตรวจวัดคุณภาพน้ำ

ประเภทของน้ำ	ค่าการนำไฟฟ้า ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	ค่า TDS (ppm)	ค่า pH
น้ำป้อนเข้าหม้อน้ำ	182	91.2	8.39
น้ำโบลว์ดาวน์	2,430	1,210	9.71

4.1.2 ส่วนระบบท่อส่งจ่ายไอน้ำและน้ำป้อน

ในส่วนของระบบท่อส่งจ่ายไอน้ำนั้น ความร้อนสูญเสียจะเกิดขึ้นได้ 3 ลักษณะ คือ ความร้อนสูญเสียที่เกิดจากผิวของท่อส่งจ่ายไอน้ำ ความร้อนสูญเสียที่เกิดจากการรั่วไหลของท่อส่งจ่ายไอน้ำ และความร้อนสูญเสียที่เกิดจากผิวของท่อนำกลับคอนเดนเสท โดยที่จากการตรวจวัดระบบไอน้ำของโรงงานลานนาโปรดักส์ พบว่าไม่มีตำแหน่งของไอน้ำที่รั่วไหลออกมาจากท่อส่งจ่ายไอน้ำ รวมถึงไม่มีความร้อนสูญเสียที่เกิดจากผิวของท่อส่งจ่ายไอน้ำ แต่มีความร้อนสูญเสียที่เกิดจากผิวของท่อนำกลับคอนเดนเสท 2 จุดด้วยกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.3 - 4.4 ซึ่งทั้ง 2 จุดที่มีการสูญเสียนั้นประกอบไปด้วย 1. ท่อน้ำจาก economizer ไปยังถังเก็บน้ำป้อน โดยที่ท่อมีความยาว 20 เมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 2 นิ้ว อุณหภูมิที่ผิวท่ออยู่ที่ 70.9°C 2. ท่อน้ำจากถังเก็บน้ำป้อนไปยังหม้อไอน้ำ โดยที่ท่อมีความยาว 15 เมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 2 นิ้ว อุณหภูมิที่ผิวท่ออยู่ที่ 72.2°C



รูปที่ 4.3 ท่อน้ำจาก economizer ไปยังถังเก็บน้ำป้อน (อุณหภูมิเฉลี่ยที่ผิวท่ออยู่ที่ 70.9°C)



รูปที่ 4.4 ท่อน้ำจากถังเก็บน้ำป้อนไปยังหม้อไอน้ำ (อุณหภูมิเฉลี่ยที่ผิวท่ออยู่ที่ 72.2°C)

4.1.3 ส่วนของอุปกรณ์ที่ใช้ไอน้ำ

ในส่วนของอุปกรณ์ที่ใช้ไอน้ำจะทำการแบ่งออกเป็น 3 ประเภทคือ อุปกรณ์ที่ใช้ไอน้ำโดยตรง อุปกรณ์ที่ใช้ไอน้ำโดยอ้อม และอุปกรณ์ที่ใช้ไอน้ำในการขับเคลื่อนเครื่องจักรกล ซึ่งผลการตรวจวัดของโรงงานลานนาโปรดักส์ แสดงได้ดังตารางที่ 4.4 โดยที่อุปกรณ์ที่ใช้ไอน้ำภายในโรงงานลานนาโปรดักส์นั้นคือ เครื่องสกัดน้ำมันหอมระเหย ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ไอน้ำโดยอ้อมจำนวน 5 เครื่อง แต่ไม่สามารถตรวจวัดประสิทธิภาพของอุปกรณ์ที่ใช้ไอน้ำต่างๆในโรงงานลานนาโปรดักส์ได้ เนื่องจากทางโรงงานไม่มีการติดตั้งเครื่องมือวัดอัตราการไหลของไอน้ำในแต่ละอุปกรณ์และไม่มีการวัดอุณหภูมิและความดันของไอน้ำที่ไหลเข้าออกอุปกรณ์ที่ใช้ไอน้ำ จึงไม่ทราบสถานะของไอน้ำ ณ จุดต่างๆ

ตารางที่ 4.4 ผลการตรวจวัดอุปกรณ์ที่ใช้ไอน้ำ

รายการอุปกรณ์ใช้ไอน้ำ	จำนวน	รายละเอียด
อุปกรณ์ใช้ไอน้ำทางตรง	0	-
อุปกรณ์ใช้ไอน้ำทางอ้อม	5	เครื่องสกัดน้ำมันหอมระเหย
อุปกรณ์ใช้ไอน้ำในการขับเคลื่อนเครื่องจักรกล	0	-

4.1.4 ส่วนของการนำความร้อนกลับ

ในส่วนของการนำความร้อนกลับจะพิจารณาองค์ประกอบทั้งหมด 3 อย่าง คือ การรั่วไหลของก๊อบติกไอน้ำ การนำกลับคอนเดนเตส และการนำกลับไอน้ำแฟลช ซึ่งจากการตรวจวัดระบบไอน้ำของโรงงานลานนาโปรดักส์ พบว่าไม่มีการนำกลับของไอน้ำแฟลช แต่มีการนำกลับของคอนเดนเตส และพบว่าการรั่วไหลของก๊อบติกไอน้ำด้วยเช่นกัน ซึ่งการประเมินว่าก๊อบติกไอน้ำมีการรั่วไหลหรือไม่นั้นทำได้โดยการใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนแบบอินฟราเรดวัดอุณหภูมิที่ทางเข้าและทางออกของก๊อบติกไอน้ำ หากอุณหภูมิมีค่าที่แตกต่างกันแสดงว่าก๊อบติกไอน้ำอยู่ในสภาพที่ใช้งานได้ตามปกติ แต่หากอุณหภูมิมีค่าเท่ากันหรือใกล้เคียงกันแสดงว่าก๊อบติกไอน้ำมีการรั่วไหล ซึ่งลักษณะของก๊อบติกไอน้ำที่มีการรั่วไหลและก๊อบติกไอน้ำที่มีสภาพการใช้งานที่ปกติแสดงได้ดังรูปที่ 4.5 - 4.6 ตามลำดับ สำหรับการตรวจวัดขนาดรูรั่วของก๊อบติกไอน้ำนั้น (ขนาดรู orifice) เนื่องจากไม่สามารถถอดก๊อบติกไอน้ำออกมาวัดได้โดยตรงจึงทำการประมาณจากเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อทางเข้าและทางออกของก๊อบติกไอน้ำ โดยที่ท่อขนาด 1-2 นิ้ว จะสามารถประมาณขนาดรูรั่วของก๊อบติกไอน้ำอยู่ที่ 3-5 มิลลิเมตร ซึ่งผลการตรวจวัดก๊อบติกไอน้ำแสดงได้ดังตารางที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ตัวอย่างกับดักไอน้ำที่มีการรั่วไหล
(สีของอุณหภูมิจากภาพถ่ายความร้อนที่ตำแหน่งทางเข้าและทางออกมีความใกล้เคียงกัน)



รูปที่ 4.6 ตัวอย่างกับดักไอน้ำที่ปกติ
(สีของอุณหภูมิจากภาพถ่ายความร้อนที่ตำแหน่งทางเข้าและทางออกมีความแตกต่างกันชัดเจน)

ตารางที่ 4.5 ผลการตรวจวัดก๊าดักไอน้ำ

รายการ	ผลการตรวจวัด		ข้อมูลเพิ่มเติม
	รั่ว	ไม่รั่ว	
ก๊าดักไอน้ำที่ Header 1		x	
ก๊าดักไอน้ำที่ Header 2		x	
ก๊าดักไอน้ำที่ Header 3		x	
ก๊าดักไอน้ำที่ท่อส่งจ่ายไอน้ำหลัก		x	
ก๊าดักไอน้ำที่เครื่องสกัดน้ำมันหอมระเหย 1	x		รูรั่วขนาด 3 mm
ก๊าดักไอน้ำที่เครื่องสกัดน้ำมันหอมระเหย 2	x		รูรั่วขนาด 3 mm
ก๊าดักไอน้ำที่เครื่องสกัดน้ำมันหอมระเหย 3	x		รูรั่วขนาด 3 mm
ก๊าดักไอน้ำที่เครื่องสกัดน้ำมันหอมระเหย 4		x	
ก๊าดักไอน้ำที่เครื่องสกัดน้ำมันหอมระเหย 5		x	

4.2 วิเคราะห์ผลการตรวจวัดระบบไอน้ำ

ในส่วนนี้จะเป็นการวิเคราะห์ผลการตรวจวัดระบบไอน้ำในแต่ละส่วน ซึ่งจะทำการแบ่งระบบไอน้ำออกเป็น 4 ส่วน ดังที่ได้กล่าวมาก่อนหน้านี้ โดยที่การวิเคราะห์ผลนั้น มีจุดประสงค์เพื่อต้องการทราบปริมาณความร้อนสูญเสียในส่วนต่างๆของระบบไอน้ำ เพื่อนำไปหาแนวทางหรือมาตรการที่ช่วยให้สามารถลดปริมาณความร้อนที่สูญเสียให้ได้มากที่สุด ซึ่งผลการวิเคราะห์มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.2.1 ส่วนระบบผลิตไอน้ำ

ในส่วนของระบบผลิตไอน้ำนี้ จะทำการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการตรวจวัดหาความร้อนสูญเสียในส่วนต่างๆของหม้อไอน้ำ เช่น ความร้อนสูญเสียที่เกิดจากก๊าซไอเสีย ความร้อนสูญเสียที่เกิดจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ เป็นต้น รวมถึงมีการคำนวณหาประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำที่อ้างอิงจากค่าความร้อนสูง (HHV) และ ค่าความร้อนต่ำ (LHV) ซึ่งรายละเอียดของการวิเคราะห์ผลในส่วนระบบผลิตไอน้ำมีดังต่อไปนี้

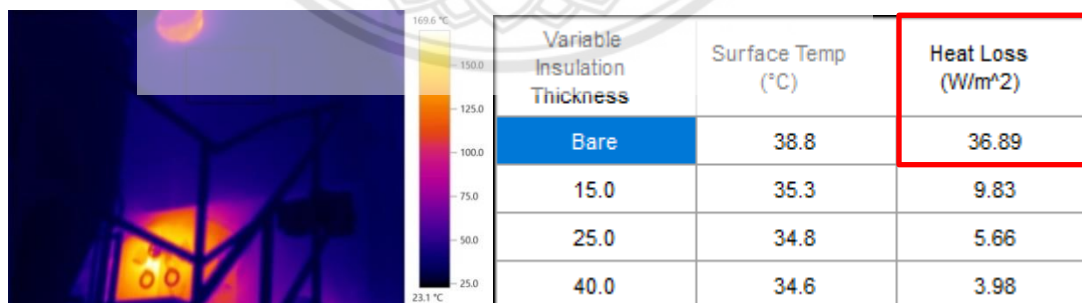
4.2.1.1 ความร้อนสูญเสียที่ผิวหรือผนังหม้อน้ำ

การวิเคราะห์หาปริมาณความร้อนสูญเสียที่ผิวหรือผนังหม้อน้ำ ทำได้โดยใช้โปรแกรม IR Soft และ 3E Plus ในการวิเคราะห์หาค่า อุณหภูมิผิวและปริมาณความร้อนที่สูญเสียต่อหน่วยพื้นที่ (W/m^2) ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์แสดงได้ดังรูปที่ 4.7 – 4.17 และมีการนำตัวอย่างผลการวิเคราะห์จากการใช้โปรแกรม 3E Plus มาเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์จากการคำนวณ แสดงได้ดังตารางที่ 4.6 หลังจากนั้นจะทำการคำนวณหาปริมาณความร้อนที่สูญเสียทั้งหมดที่ผิวหรือผนังของหม้อน้ำ ผลคำนวณแสดงได้ดังตารางที่ 4.7

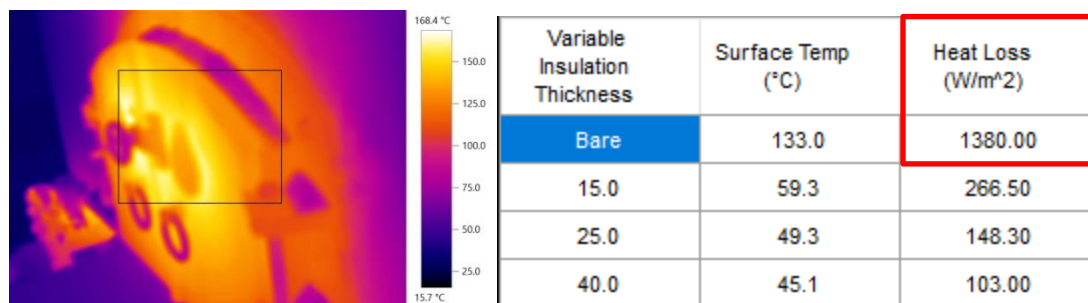
ตารางที่ 4.6 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ความร้อนสูญเสียที่ผิวหรือผนังหม้อน้ำ

การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ความร้อนสูญเสียที่ผิวหรือผนังหม้อน้ำ			
ตัวอย่างพื้นผิวผนังหม้อน้ำที่มีการสูญเสียความร้อน	อุณหภูมิ ($^{\circ}C$)	ผลจากโปรแกรม 3E Plus (W/m^2)	ผลจากการคำนวณ (W/m^2)
ผนังด้านซ้ายของหม้อน้ำแบบท่อไฟ	39.3	41.18	42.24

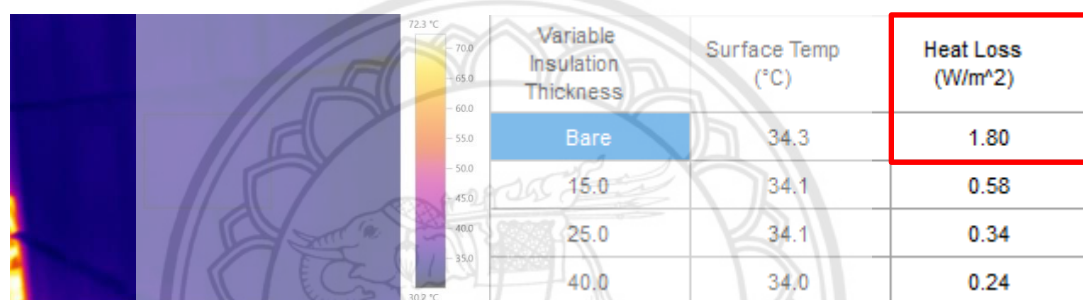
จากตารางที่ 4.6 พบว่าผลการวิเคราะห์ความร้อนสูญเสียต่อหน่วยพื้นที่จากโปรแกรม 3E Plus นั้นมีค่าใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์จากการคำนวณตามหลักทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน โดยที่ในการคำนวณตามหลักทฤษฎีนั้นจะทำการแบ่งความร้อนสูญเสียที่ผิวหม้อน้ำออกเป็น 2 ประเภท คือ 1. ความร้อนสูญเสียที่เกิดจากการพาความร้อน 2. ความร้อนสูญเสียที่เกิดจากการแผ่รังสีความร้อน



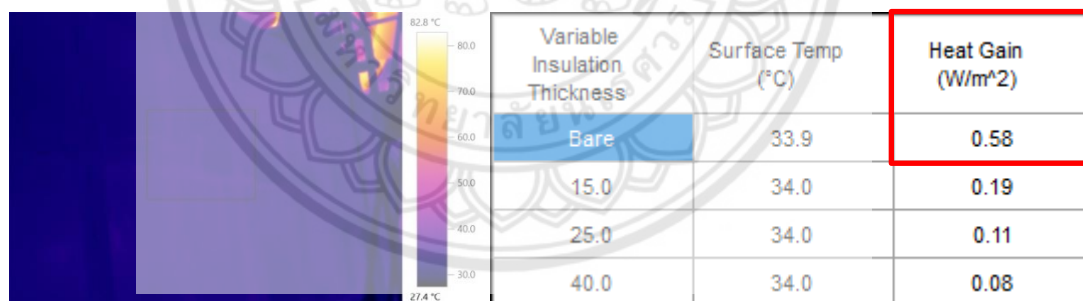
รูปที่ 4.7 ผนังด้านหน้าของหม้อน้ำแบบท่อไฟ (อุณหภูมิเฉลี่ย $38.8^{\circ}C$ และ Heat loss $36.89 W/m^2$)



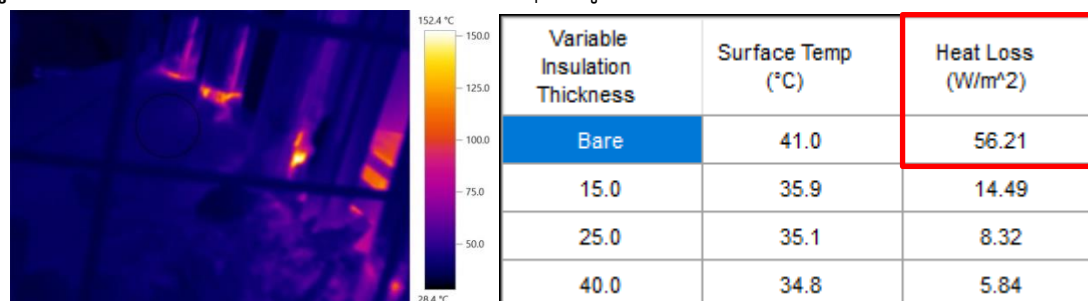
รูปที่ 4.8 ผนังประตูห้องเผาไหม้ของหม้อน้ำแบบท่อน้ำ (อุณหภูมิเฉลี่ย 133.0 °C และ Heat loss 1380 W/m²)



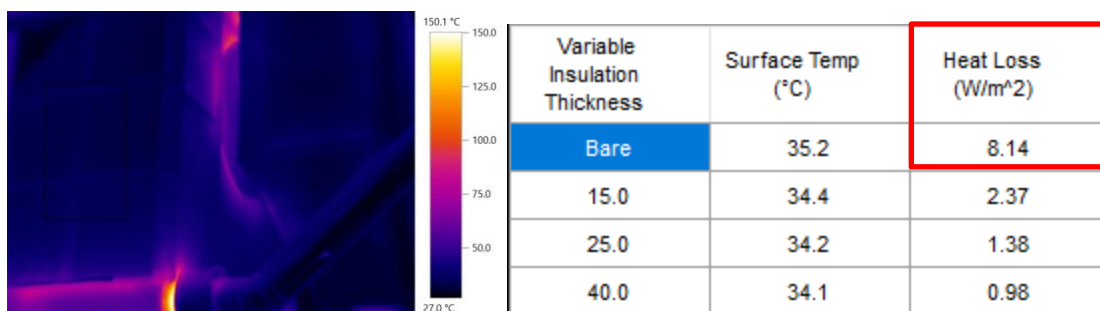
รูปที่ 4.9 ผนังด้านซ้ายของหม้อน้ำแบบท่อน้ำ (อุณหภูมิเฉลี่ย 34.3 °C และ Heat loss 1.8 W/m²)



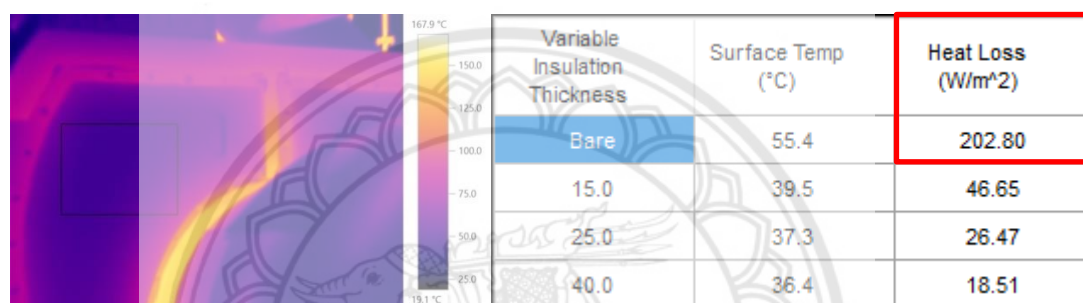
รูปที่ 4.10 ผนังด้านขวาของหม้อน้ำแบบท่อน้ำ (อุณหภูมิเฉลี่ย 33.9 °C และ Heat loss 0.58 W/m²)



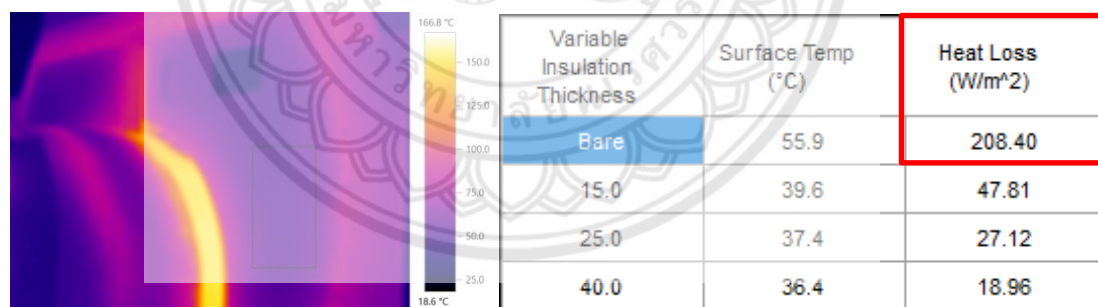
รูปที่ 4.11 ผนังด้านบนของหม้อน้ำแบบท่อน้ำ (อุณหภูมิเฉลี่ย 41.0 °C และ Heat loss 56.21 W/m²)



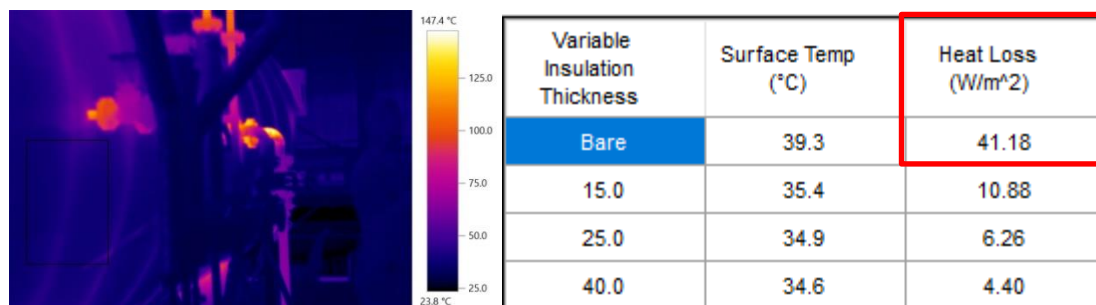
รูปที่ 4.12 ผนังด้านหลังของหม้อน้ำแบบท่อน้ำ (อุณหภูมิเฉลี่ย 35.2 °C และ Heat loss 8.14 W/m²)



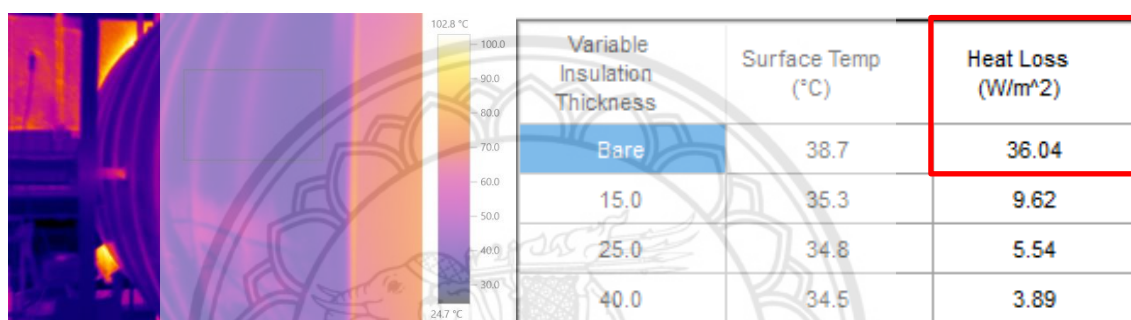
รูปที่ 4.13 ผนังด้านหน้าของหม้อน้ำแบบท่อไฟ (ด้านซ้าย) (อุณหภูมิเฉลี่ย 55.4 °C และ Heat loss 202.80 W/m²)



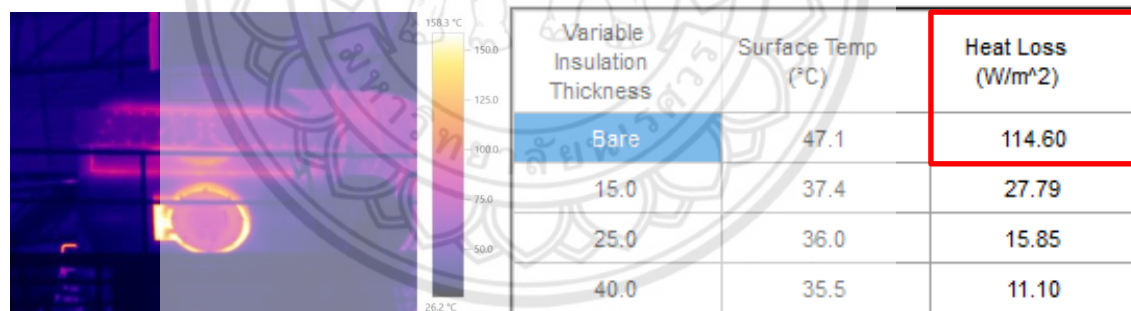
รูปที่ 4.14 ผนังด้านหน้าของหม้อน้ำแบบท่อไฟ (ด้านขวา) (อุณหภูมิเฉลี่ย 55.9 °C และ Heat loss 208.40 W/m²)



รูปที่ 4.15 ผนังด้านซ้ายของหม้อน้ำแบบท่อไฟ (อุณหภูมิเฉลี่ย 39.3 °C และ Heat loss 41.18 W/m²)



รูปที่ 4.16 ผนังด้านขวาของหม้อน้ำแบบท่อไฟ (อุณหภูมิเฉลี่ย 38.7 °C และ Heat loss 36.04 W/m²)



รูปที่ 4.17 ผนังด้านหลังของหม้อน้ำแบบท่อไฟ (อุณหภูมิเฉลี่ย 47.1 °C และ Heat loss 114.60 W/m²)

ตารางที่ 4.7 คำนวณหาปริมาณความร้อนสูญเสียที่ผิวหรือผนังหม้อน้ำ

ความร้อนสูญเสียผ่านผนังหม้อน้ำ		
อุณหภูมิผนังด้านหน้าของหม้อน้ำแบบท่อน้ำ	°C	38.80
อุณหภูมิผนังด้านซ้ายของหม้อน้ำแบบท่อน้ำ	°C	34.30
อุณหภูมิผนังด้านขวาของหม้อน้ำแบบท่อน้ำ	°C	33.90
อุณหภูมิผนังด้านบนของหม้อน้ำแบบท่อน้ำ	°C	41.00
อุณหภูมิผนังประตูห้องเผาไหม้ของหม้อน้ำแบบท่อน้ำ	°C	133.10
อุณหภูมิผนังด้านหลังของหม้อน้ำแบบท่อน้ำ	°C	35.20
อุณหภูมิผนังด้านหน้าของหม้อน้ำแบบท่อไฟ (ด้านซ้าย)	°C	55.40
อุณหภูมิผนังด้านหน้าของหม้อน้ำแบบท่อไฟ (ด้านขวา)	°C	55.90
อุณหภูมิผนังด้านซ้ายของหม้อน้ำแบบท่อไฟ	°C	39.30
อุณหภูมิผนังด้านขวาของหม้อน้ำแบบท่อไฟ	°C	38.70
อุณหภูมิผนังด้านหลังของหม้อน้ำแบบท่อไฟ	°C	47.10
ปริมาณความร้อนสูญเสียที่ผนังด้านหน้าของหม้อน้ำแบบท่อน้ำ	W/m ²	36.89
ปริมาณความร้อนสูญเสียที่ผนังด้านซ้ายของหม้อน้ำแบบท่อน้ำ	W/m ²	1.80
ปริมาณความร้อนสูญเสียที่ผนังด้านขวาของหม้อน้ำแบบท่อน้ำ	W/m ²	0.58
ปริมาณความร้อนสูญเสียที่ผนังด้านบนของหม้อน้ำแบบท่อน้ำ	W/m ²	56.21
ปริมาณความร้อนสูญเสียที่ผนังประตูห้องเผาไหม้ของหม้อน้ำแบบท่อน้ำ	W/m ²	1380.00
ปริมาณความร้อนสูญเสียที่ผนังด้านหลังของหม้อน้ำแบบท่อน้ำ	W/m ²	8.14
ปริมาณความร้อนสูญเสียที่ผนังด้านหน้าของหม้อน้ำแบบท่อไฟ (ด้านซ้าย)	W/m ²	202.80
ปริมาณความร้อนสูญเสียที่ผนังด้านหน้าของหม้อน้ำแบบท่อไฟ (ด้านขวา)	W/m ²	208.40
ปริมาณความร้อนสูญเสียที่ผนังด้านซ้ายของหม้อน้ำแบบท่อไฟ	W/m ²	41.18
ปริมาณความร้อนสูญเสียที่ผนังด้านขวาของหม้อน้ำแบบท่อไฟ	W/m ²	36.04
ปริมาณความร้อนสูญเสียที่ผนังด้านหลังของหม้อน้ำแบบท่อไฟ	W/m ²	114.60
พื้นที่ผนังด้านหน้าของหม้อน้ำแบบท่อน้ำ	m ²	5.48
พื้นที่ผนังด้านซ้ายของหม้อน้ำแบบท่อน้ำ	m ²	10.49
พื้นที่ผนังด้านขวาของหม้อน้ำแบบท่อน้ำ	m ²	10.49
พื้นที่ผนังด้านบนของหม้อน้ำแบบท่อน้ำ	m ²	10.49
พื้นที่ผนังประตูห้องเผาไหม้ของหม้อน้ำแบบท่อน้ำ	m ²	5.48

ตารางที่ 4.7 ต่อ คำนวณหาปริมาณความร้อนสูญเสียที่ผิวหรือผนังหม้อน้ำ

ความร้อนสูญเสียผ่านผนังหม้อน้ำ		
พื้นที่ผนังด้านหลังของหม้อน้ำแบบท่อน้ำ	m ²	5.48
พื้นที่ผนังด้านหน้าของหม้อน้ำแบบท่อไฟ (ด้านซ้าย)	m ²	2.15
พื้นที่ผนังด้านหน้าของหม้อน้ำแบบท่อไฟ (ด้านขวา)	m ²	2.15
พื้นที่ผนังด้านซ้ายของหม้อน้ำแบบท่อไฟ	m ²	16.47
พื้นที่ผนังด้านขวาของหม้อน้ำแบบท่อไฟ	m ²	16.47
พื้นที่ผนังด้านหลังของหม้อน้ำแบบท่อไฟ	m ²	4.30
ปริมาณความร้อนสูญเสียทั้งหมดที่ผิวหรือผนังหม้อน้ำ	kW	11.07

จากการวิเคราะห์ผลการตรวจวัดและการคำนวณทำให้ทราบค่าปริมาณความร้อนที่สูญเสียต่อหน่วยพื้นที่ของผนังหม้อน้ำแต่ละด้าน เมื่อนำค่าที่ได้มาใช้ในการคำนวณหาปริมาณความร้อนสูญเสียทั้งหมดที่ผิวหรือผนังของหม้อน้ำ จะพบว่ามีความร้อนสูญเสียที่ผิวหรือผนังหม้อน้ำอยู่ที่ 11.07 kW

4.2.1.2 ความร้อนสูญเสียที่เกิดจากก๊าซไอเสียและการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์

ผลตรวจวัดองค์ประกอบของก๊าซไอเสีย ดังแสดงตารางที่ 4.2 ซึ่งได้จากการหาค่าเฉลี่ยองค์ประกอบของก๊าซไอเสียในช่วงที่เกิดการเผาไหม้ (ช่วงอุณหภูมิก๊าซไอเสียสูงและปริมาณออกซิเจนต่ำ) แต่ละตัว โดยที่เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานที่ยอมรับได้ขององค์ประกอบก๊าซไอเสียได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบองค์ประกอบของก๊าซไอเสีย

ก๊าซไอเสีย	หน่วย	ค่ามาตรฐาน	ค่าเฉลี่ยจากการตรวจวัด
ปริมาณก๊าซออกซิเจน	%	7 - 10	12.8
ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์	ppm	<690	299.2
ปริมาณก๊าซไนโตรเจนออกไซด์	ppm	<200	77.9
อุณหภูมิก๊าซไอเสีย	°C	ไม่กำหนด	171.7

หมายเหตุ ค่ามาตรฐานอ้างอิงจากประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่องกำหนดค่าปริมาณของสารเจือปนในอากาศที่ระบายออกจากโรงงาน พ.ศ.2549

จากตารางที่ 4.8 พบว่า ค่าเฉลี่ยจากการตรวจวัดของ ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ปริมาณก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน โดยมีค่าต่ำกว่า 690 และ 200 ตามลำดับ โดยสาเหตุที่มีการเกิดก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ เนื่องจากการเผาไหม้ระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศนั้นเป็นการเผาไหม้แบบอากาศเกินจึงทำให้มีปริมาณก๊าซออกซิเจนในอากาศที่เหลือจากการเผาไหม้ไปทำปฏิกิริยากับไนโตรเจนส่งผลให้เกิด NO_x แต่ค่าปริมาณก๊าซออกซิเจน เกินค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ โดยที่ค่ามาตรฐานอยู่ที่ 7-10 % แต่ค่าจากการตรวจวัดอยู่ที่ 12.8 % การที่มีปริมาณก๊าซออกซิเจนมากเกินไป บ่งชี้ให้เห็นว่าสัดส่วนการเผาไหม้ระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงไม่เหมาะสมกัน โดยที่ในกรณีนี้มีอากาศมากเกินไปทำให้มีปริมาณก๊าซออกซิเจนเหลือจากการเผาไหม้ถูกปล่อยออกมาในรูปของก๊าซไอเสีย อีกทั้งยังพบว่าปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์จะแปรผันตรงกับปริมาณก๊าซออกซิเจนเนื่องจากการที่มีปริมาณก๊าซออกซิเจนเหลือมาก ก็จะทำให้มีออกซิเจนไปทำปฏิกิริยากับก๊าซคาร์บอนเกิดเป็น CO มากด้วยเช่นกัน

4.2.1.3 ความร้อนสูญเสียที่เกิดจากการโบล์ดาวน์

ผลการตรวจวัดคุณภาพน้ำโบล์ดาวน์จากตารางที่ 4.3 ทำให้ทราบค่า TDS pH และ Conductivity เมื่อนำค่าที่ได้จากการตรวจวัดมาเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานที่กฎหมายควบคุม ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบคุณภาพน้ำจากการตรวจวัด

รายการ	หน่วย	ค่าเกณฑ์ควบคุม	ค่าที่ได้จากการตรวจวัด
pH value	-	8.5 - 11.8	9.71
Total Dissolved Solid (TDS)	ppm	ไม่เกิน 3,500	1,210

หมายเหตุ ค่าเกณฑ์ควบคุมอ้างอิงจากประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่องคุณสมบัติของน้ำสำหรับหม้อน้ำ พ.ศ. 2549

จากตารางที่ 4.9 พบว่าค่า pH และ TDS ของน้ำโบล์ดาวน์อยู่ในเกณฑ์ที่กฎหมายควบคุมทำให้สามารถลดความเสี่ยงที่อาจเกิดตะกรันภายในหม้อไอน้ำ ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดอันตรายในการใช้งานหม้อไอน้ำได้

หาอัตราการโบล์ดาวน์ของหม้อน้ำ (Blowdown) โดยใช้ข้อมูลจากการตรวจวัด ตารางที่ 4.3 และอัตราน้ำป้อน คือ 997 kg/hr (ได้จากตารางจุดบันทึกของโรงงาน)

$$\begin{aligned} \text{จาก } \% \text{ Blowdown} &= \frac{\text{FeedWater Conductivity}}{\text{Blowdown Conductivity}} \times 100 \\ &= \frac{182}{2430} \times 100 \end{aligned}$$

$$\% \text{ Blowdown} = 7.49\%$$

$$\begin{aligned} \text{จาก Blowdown rate} &= \frac{\% \beta}{100} \times \text{Feed Water rate} \\ &= \frac{7.49}{100} \times 997 \end{aligned}$$

$$\text{Blowdown rate} = 74.68 \text{ kg/hr}$$

จากการวิเคราะห์ % Blowdown พบว่ามีค่าอยู่ที่ 7.49 % ของอัตราการป้อนน้ำเข้าหม้อน้ำ ซึ่งถือว่าการโบล์ดาวน์มากเกินไป โดยปกติอัตราการโบล์ดาวน์จะอยู่ที่ไม่เกิน 5 % ของอัตราการป้อนน้ำเข้าหม้อน้ำ การที่มีการโบล์ดาวน์มากเกินไปนั้นจะส่งผลให้เกิดการสูญเสียพลังงานความร้อนเกินความจำเป็น เนื่องจากน้ำที่โบล์ดาวน์นั้นเป็นน้ำที่ได้รับพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงแล้ว (น้ำอุณหภูมิสูง)

4.2.1.4 คำนวณหาอัตราการผลิตไอน้ำของหม้อน้ำ

อัตราการผลิตไอน้ำสามารถหาได้จากการสมดุลมวลของน้ำที่เข้าและออกจากหม้อน้ำ ซึ่งน้ำที่เข้าหม้อน้ำคือน้ำป้อนและน้ำที่ออกจากหม้อน้ำมี 2 ชนิด คือ 1. น้ำที่เปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอน้ำและถูกส่งไปใช้ในอุปกรณ์ต่างๆ 2. น้ำที่เกิดจากการระบายทิ้งหรือการโบล์ดาวน์

หาอัตราการผลิตไอน้ำของหม้อน้ำ

$$\begin{aligned} \text{จากสมการ } \text{อัตราการผลิตไอน้ำ} &= \text{อัตราน้ำป้อน} - \text{อัตราการโบล์ดาวน์} \\ &= 997 - 74.68 \text{ kg/hr} \end{aligned}$$

$$\text{อัตราการผลิตไอน้ำ} = 922.32 \text{ kg/hr}$$

4.2.1.5 คำนวณหาประสิทธิภาพของหม้อน้ำ

จากการตรวจวัดและวิเคราะห์ข้อมูลของความร้อนสูญเสีย ทำให้สามารถคำนวณหาประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำได้ (วิธีทางอ้อม) โดยที่จะทำการหาปริมาณความร้อนสูญเสียในแต่ละส่วนของหม้อไอน้ำเทียบกับปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ ($\text{kJ/kg}_{\text{fuel}}$) และใช้สมการคำนวณตามมาตรฐานของ JIS B8222:1993 land boiler-heat balance ในการคำนวณหาประสิทธิภาพ โดยที่ผลการคำนวณแสดงได้ดังตารางที่ 4.10 ซึ่งจะพบว่าความร้อนสูญเสียที่มีค่ามากที่สุดคือ ความร้อนสูญเสียที่เกิดจากก๊าซไอเสียโดยที่มีการสูญเสียอยู่ที่ $3363 \text{ kJ/kg}_{\text{fuel}}$ คิดเป็น 24.7 % เทียบกับค่าความร้อนสูง (HHV) รองลงมาคือความร้อนสูญเสียที่เกิดจากผนังหม้อมีการสูญเสียอยู่ที่ $212 \text{ kJ/kg}_{\text{fuel}}$ คิดเป็น 1.6 % เทียบกับค่าความร้อนสูง (HHV) และเมื่อทำการคำนวณหาประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำด้วยวิธีทางอ้อมจะได้ประสิทธิภาพอยู่ที่ 82.81 % เทียบกับค่าความร้อนต่ำ (LHV) และ 73.05 % เทียบกับค่าความร้อนสูง (HHV)

ตารางที่ 4.10 คำนวณหาประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ

คำนวณประสิทธิภาพหม้อน้ำ	หน่วย	LHV	HHV
ความร้อนสูญเสียจากก๊าซไอเสีย	$\text{kJ/kg}_{\text{fuel}}$	1,756	3363
ความร้อนสูญเสียจากการ Blow in furnace	$\text{kJ/kg}_{\text{fuel}}$	0	0
ความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์	$\text{kJ/kg}_{\text{fuel}}$	31	31
ความร้อนสูญเสียจากการกักคาร์บอน	$\text{kJ/kg}_{\text{fuel}}$	68	68
ความร้อนสูญเสียจากผนังหม้อน้ำ	$\text{kJ/kg}_{\text{fuel}}$	212	212
การสูญเสียความร้อนจากก๊าซไอเสีย (L1)	%	14.6	24.7
การสูญเสียความร้อนจากการ Blow in furnace (L2)	%	0	0
การสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (L3)	%	0.3	0.2
การสูญเสียจากการกักคาร์บอน (L4)	%	0.6	0.5
การสูญเสียความร้อนทางพื้นผิวผนังหม้อน้ำ (L5)	%	1.8	1.6
ประสิทธิภาพหม้อน้ำ $(100 - ((L1+L2+L3+L4+L5) / H + Q_{\text{add in}}))$	%	82.81	73.05

4.2.2 ส่วนของระบบท่อส่งจ่ายไอน้ำและน้ำป้อน

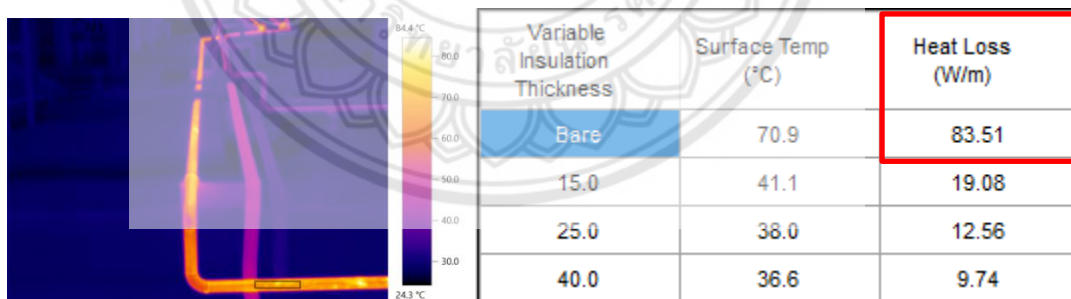
การวิเคราะห์หาปริมาณความร้อนสูญเสียที่ผิวท่อส่งจ่ายไอน้ำและน้ำป้อน ทำได้โดยการใช้โปรแกรม IR Soft และ 3E Plus ในการวิเคราะห์หาค่าอุณหภูมิผิวและปริมาณความร้อนที่สูญเสียต่อ

หน่วยความยาวท่อ (W/m) ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์แสดงได้ดังรูปที่ 4.18 – 4.19 และมีการนำตัวอย่างผลการวิเคราะห์จากการใช้โปรแกรม 3E Plus มาเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์จากการคำนวณแสดงได้ดังตารางที่ 4.11 หลังจากนั้นจะทำการคำนวณหาปริมาณความร้อนที่สูญเสียทั้งหมด ผลคำนวณแสดงได้ดังตารางที่ 4.12

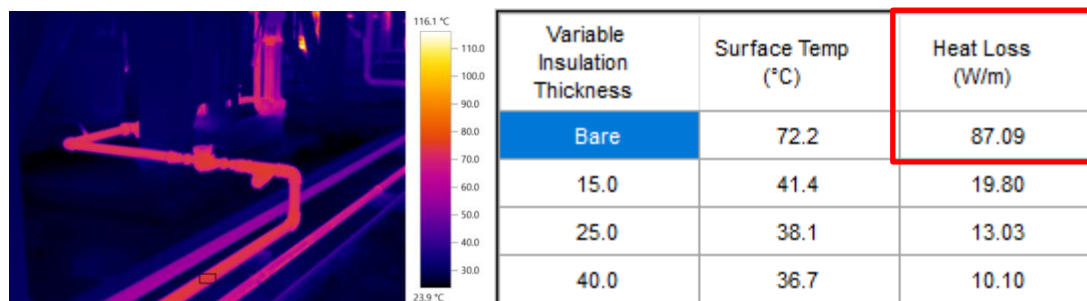
ตารางที่ 4.11 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ความร้อนสูญเสียที่ผิวท่อส่งจ่ายไอน้ำและน้ำป้อน

การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ความร้อนสูญเสียที่ผิวท่อส่งจ่ายไอน้ำและน้ำป้อน			
ตัวอย่างพื้นผิวท่อส่งจ่ายน้ำป้อนที่มีการสูญเสียความร้อน	อุณหภูมิ (°C)	ผลจากโปรแกรม 3E Plus (W/m)	ผลจากการคำนวณ (W/m)
ผิวนวนท่อส่งจ่ายน้ำป้อนจาก Economizer ไปยังถังเก็บน้ำป้อน	70.9	83.51	83.75

จากตารางที่ 4.11 พบว่าผลการวิเคราะห์ความร้อนสูญเสียต่อหน่วยความยาวจากโปรแกรม 3E Plus นั้นมีค่าใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์จากการคำนวณตามหลักทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน โดยที่ในการคำนวณตามหลักทฤษฎีนั้นจะทำการแบ่งความร้อนสูญเสียที่ผิวนวน ออกเป็น 2 ประเภท คือ 1. ความร้อนสูญเสียที่เกิดจากการพาความร้อน 2. ความร้อนสูญเสียที่เกิดจากการแผ่รังสีความร้อน



รูปที่ 4.18 ท่อน้ำจาก economizer ไปยังถังเก็บน้ำป้อน (อุณหภูมิเฉลี่ยที่ผิวท่ออยู่ที่ 70.9 °C และ Heat loss 83.51 W/m)



รูปที่ 4.19 ท่อน้ำจากถังเก็บน้ำป้อนไปยังหม้อไอน้ำ
(อุณหภูมิเฉลี่ยที่ผิวท่ออยู่ที่ 72.2 °C และ Heat loss 87.09 W/m)

ตารางที่ 4.12 คำนวณหาความร้อนสูญเสีย

รายการ	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่า
ชั่วโมงทำงานต่อวัน	h	h/d	8.00
วันทำงานต่อปี	d	d/y	272.00
ชั่วโมงทำงานต่อปี	h/y	h/y	2176.00
ลักษณะของ heat loss	-	-	ท่อ
เส้นผ่านศูนย์กลางท่อน้ำออกจาก Economizer เข้าถึงน้ำป้อน	dia. 1	mm	50.8 (2 นิ้ว)
เส้นผ่านศูนย์กลางท่อน้ำออกจากถังน้ำป้อนเข้าหม้อน้ำ	dia. 2	mm	50.8 (2 นิ้ว)
ความยาวท่อน้ำออกจาก Economizer เข้าถึงน้ำป้อน	L ₁	m	20.00
ความยาวท่อออกจากถังน้ำป้อนเข้าหม้อน้ำ	L ₂	m	15.00
การสูญเสียความร้อนจาก 3E-Plus (1)	HL ₁	W/m	83.51
การสูญเสียความร้อนจาก 3E-Plus (2)	HL ₂	W/m	87.09
ความร้อนสูญเสียทั้งหมด	HL	kW	2.98
		kJ/h	10,715.58

จากการวิเคราะห์ผลการตรวจวัดทำให้ทราบค่าปริมาณความร้อนที่สูญเสียต่อหน่วยความยาว เมื่อนำค่าที่ได้ไปใช้ในการคำนวณหาปริมาณความร้อนสูญเสียทั้งหมดที่ท่อส่งจ่าย จะพบว่ามีความร้อนสูญเสียที่ท่อส่งจ่ายอยู่ที่ 2.98 kW

4.2.3 ส่วนของอุปกรณ์ที่ใช้ไอน้ำ

ไม่มีการตรวจวัดเนื่องจากระบบไอน้ำของโรงงานลานนาโปรดักส์ไม่มีการติดตั้งเครื่องวัดอัตราการไหลและอุณหภูมิของไอน้ำ ทำให้ไม่สามารถทราบสภาวะของไอน้ำที่ทางเข้าและออกของอุปกรณ์ที่ใช้ไอน้ำได้

4.2.4 ส่วนของการนำความร้อนกลับ

ในส่วนนี้จะทำการวิเคราะห์ปริมาณไอน้ำที่เกิดรั่วไหล โดยที่จากการตรวจวัดพบว่ามีกับดักไอน้ำที่มีการรั่วไหลจำนวน 3 ตัว ขนาดรูรั่ว 3 mm ซึ่งผลการวิเคราะห์หาอัตราการสูญเสียไอน้ำที่เกิดจากการรั่วไหลของกับดักไอน้ำแสดงได้ดังตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 คำนวณหาอัตราการสูญเสียไอน้ำ

รายการ	หน่วย	ค่า
ความดันไอน้ำ	bar(g)	2.00
ขนาดรู orifice กับดักไอน้ำของเครื่องสกัดน้ำมันหอมระเหย 1	mm	3.00
ขนาดรู orifice กับดักไอน้ำของเครื่องสกัดน้ำมันหอมระเหย 2	mm	3.00
ขนาดรู orifice กับดักไอน้ำของเครื่องสกัดน้ำมันหอมระเหย 3	mm	3.00
อัตราการสูญเสียไอน้ำของกับดักไอน้ำรวม $M_{\text{steam}} = 0.25 \times 0.695 \times A_{\text{orifice}} \times P_{\text{steam}}$	kg/h	11.10

จากการวิเคราะห์ข้อมูล โดยการใช้สมการของ Napier's Choke Flow โดยที่สมการคือ
 $m_{\text{steam}} = 0.25 \times 0.695 \times A_{\text{orifice}} \times P_{\text{steam}}$ คำนวณหาอัตราการสูญเสียไอน้ำของก๊าดักไอน้ำที่มีการ
รั่วไหลทั้ง 3 ตัว พบว่ามีประมาณการสูญเสียไอน้ำอยู่ที่ 11.10 kg/hr



บทที่ 5

สรุปผลการตรวจวัดและมาตรการประหยัดพลังงาน

ในบทนี้จะกล่าวถึงการสรุปผลที่ได้จากการตรวจวัดระบบไอน้ำในแต่ละส่วน และทำการหาแนวทางในการปรับปรุงระบบไอน้ำให้ดียิ่งขึ้น เพื่อเป็นการลดการใช้พลังงานและลดจำนวนเงินที่สูญเสียเนื่องจากการสูญเสียพลังงานความร้อนในส่วนต่างๆของระบบไอน้ำ มีการคำนวณหาต้นทุนในการผลิตไอน้ำของโรงงานลานนาโปรดักส์ อีกทั้งยังมีการวิเคราะห์ถึงความคุ้มค่าในการลงทุนปรับปรุงระบบไอน้ำเพื่อเป็นแนวทางในการตัดสินใจได้ดียิ่งขึ้น รวมถึงมีการเปรียบเทียบประสิทธิภาพหม้อไอน้ำที่ได้จากการตรวจวัดกับงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษาอีกด้วย

5.1 สรุปผลการตรวจวัดระบบไอน้ำ

จากการตรวจวัดและการวิเคราะห์ข้อมูลทำให้ทราบความสูญเสียต่างๆในระบบไอน้ำในแต่ละส่วน รวมถึงการทราบสาเหตุที่ทำให้เกิดความสูญเสียนั้น ส่งผลให้สามารถหาแนวทางในการปรับปรุงแก้ไขได้อย่างถูกต้อง ซึ่งสรุปผลการตรวจวัดระบบไอน้ำแบ่งออกได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 ส่วนของระบบผลิตไอน้ำ

5.1.1.1 ความร้อนสูญเสียที่ผิวหรือผนังหม้อไอน้ำ เกิดจากฉนวนของหม้อไอน้ำเกิดการเสื่อมสภาพ เนื่องจากอายุการใช้งานที่มากขึ้น โดยที่หม้อไอน้ำของโรงงานลานนาโปรดักส์เป็นชนิดผสม (Hybrid) ซึ่งจากการตรวจวัดและการวิเคราะห์พบว่าการสูญเสียความร้อนอยู่ที่ 11.07 kW

5.1.1.2 ความร้อนสูญเสียจากการโบลว์ดาวน์ จากการตรวจวัดและวิเคราะห์การโบลว์ดาวน์น้ำของหม้อไอน้ำ พบว่าการโบลว์ดาวน์น้ำในอัตราที่สูงเกินความจำเป็นซึ่งมีการโบลว์ดาวน์อยู่ที่ 7.49 % ของอัตราการป้อนน้ำ ในขณะที่ตามมาตรฐานแล้วอัตราการโบลว์ดาวน์น้ำไม่ควรเกิน 5% จากการที่มีการโบลว์ดาวน์ในอัตราที่สูงเกินนี้ ส่งผลให้มีการสูญเสียพลังงานความร้อนและสูญเสียปริมาณน้ำป้อนในอัตราที่สูงด้วยเช่นกัน

5.1.1.3 ความร้อนสูญเสียจากก๊าซไอเสียและการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซไอเสียที่ตรวจวัดได้นั้นจะพบว่าค่ามีปริมาณออกซิเจนอยู่ที่ 12.8 % เกินค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ที่ไม่เกิน 10 % ซึ่งการที่ตรวจพบออกซิเจนในก๊าซไอเสียเป็นจำนวนมากนี้ เป็นตัวบ่งชี้ให้เห็นว่าอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้นั้น ไม่เหมาะสมกันซึ่งในกรณีที่มีปริมาณออกซิเจนในก๊าซไอเสียมากเกินไปจะเกิดจากการที่มีอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้มากเกินไปส่งผลให้มีความร้อนสูญเสียไปกับก๊าซไอเสียมากด้วยเช่นกัน

5.1.2 ส่วนของระบบท่อส่งจ่ายไอน้ำและน้ำป้อน

ความร้อนสูญเสียที่ผิวหรือผนังท่อส่งจ่ายน้ำป้อน ในระบบไอน้ำของโรงงานลานนาโปรดัคชั่น มีการเพิ่มอุณหภูมิน้ำป้อนเข้าหม้อน้ำโดยการใช้ Economizer ซึ่งน้ำป้อนที่ไหลออกจาก Economizer จะถูกส่งผ่านท่อไปยังถังเก็บน้ำป้อนโดยที่ท่อไม่มีการหุ้มฉนวน อีกส่วนหนึ่งที่พบว่าไม่มีการหุ้มฉนวนเช่นกัน คือ ท่อส่งน้ำจากถังเก็บน้ำป้อนไปยังหม้อน้ำ ซึ่งเมื่อคิดความร้อนสูญเสียทั้ง 2 ส่วนนี้จะอยู่ที่ 2.98 kW

5.1.3 ส่วนของอุปกรณ์ที่ใช้ไอน้ำ

ในส่วนนี้ไม่สามารถตรวจวัดประสิทธิภาพของอุปกรณ์ที่ใช้ไอน้ำต่างๆในโรงงานลานนาโปรดัคชั่นได้เนื่องจากทางโรงงานไม่มีการติดตั้งเครื่องมือวัดอัตราการไหลของไอน้ำในแต่ละอุปกรณ์และไม่มีการวัดอุณหภูมิและความดันของไอน้ำที่ไหลเข้าออกอุปกรณ์ใช้ไอน้ำ ทำให้ไม่ทราบสถานะของไอน้ำ

5.1.4 ส่วนของการนำความร้อนกลับ

ในส่วนของการนำความร้อนกลับ ได้มีการตรวจวัดการรั่วไหลของกับดักไอน้ำเป็นหลัก ซึ่งจากการตรวจวัดนั้นทำให้ทราบว่ามีการรั่วไหลของไอน้ำ 3 จุด ที่อยู่ในสถานะผิดปกติ (มีการรั่วไหล) โดยที่ทั้ง 3 จุดนี้ จะเป็นการติดตั้งกับดักไอน้ำไว้กับเครื่องสกัดน้ำมันหอมระเหย ซึ่งเมื่อทำการวิเคราะห์หาปริมาณการรั่วไหลของไอน้ำพบว่าอยู่ที่ 11.10 kg/hr

5.2 ต้นทุนในการผลิตไอน้ำ

ต้นทุนในการผลิตไอน้ำนั้น จะเป็นตัวที่บ่งบอกถึงค่าใช้จ่ายในการทำให้ไอน้ำเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอน้ำ ซึ่งค่าใช้จ่ายหลักในส่วนนี้คือค่าเชื้อเพลิงและค่าน้ำป้อน เนื่องจากพลังงานความร้อนที่ทำ

ให้นำเกิดการเปลี่ยนสถานะนั้น มาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงภายในหม้อไอน้ำ โดยที่ต้นทุนในการผลิตไอน้ำของโรงงานลานนาโปรดักส์แสดงได้ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 แสดงผลการคำนวณต้นทุนไอน้ำ

ต้นทุนในการผลิตไอน้ำ		
รายการ	หน่วย	ค่า
อัตราการใช้เชื้อเพลิง	kg/hr	187.5
อัตราการใช้น้ำป้อน	kg/hr	997
ราคาเชื้อเพลิง	Baht/kg	2
ราคาน้ำป้อน	Baht/kg	0.0159
ค่าใช้จ่ายเชื้อเพลิงต่อชั่วโมง	Baht/hr	375
ค่าใช้จ่ายน้ำป้อนต่อชั่วโมง	Baht/hr	15.85
ค่าใช้จ่ายในการผลิตไอน้ำ(เชื้อเพลิง+น้ำป้อน)	Baht/hr	402.85
อัตราการผลิตไอน้ำ	kg/hr	922.32
ต้นทุนในการผลิตไอน้ำ	Baht/Ton _{steam}	436.78

หมายเหตุ : ค่าน้ำประปาอ้างอิงจากการประปานครหลวงอุตสาหกรรมประเภทที่ 2 พ.ศ.2542

จากตารางที่ 5.1 ข้อมูลการตรวจวัดระบบไอน้ำของโรงงานลานนาโปรดักส์นั้น พบว่ามีอัตราการใช้เชื้อเพลิงอยู่ที่ 187.5 กิโลกรัมต่อชั่วโมง โดยที่เชื้อเพลิงที่ใช้คือกะลาปาล์ม ราคาเชื้อเพลิงอยู่ที่ 2 บาท/กิโลกรัม มีอัตราการใช้น้ำป้อนอยู่ที่ 1 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง หรือเท่ากับ 997 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ราคาน้ำป้อนอยู่ที่ 0.0159 บาท/กิโลกรัม (15.81 บาท/ลูกบาศก์เมตร) เมื่อคิดค่าใช้จ่ายในการผลิตไอน้ำทั้ง 2 ส่วนรวมกันโดยที่ชั่วโมงการทำงานคือ 2176 ชั่วโมงต่อปี จะได้ต้นทุนในการผลิตไอน้ำอยู่ที่ 850,494.60 บาท/ปี และเมื่อนำไปเทียบกับอัตราการผลิตไอน้ำที่สามารถผลิตได้ จะได้ต้นทุนในการผลิตไอน้ำอยู่ที่ 436.78 บาท/ตันไอน้ำ

5.3 ศักยภาพของมาตรการในการประหยัดพลังงาน

จากการทราบถึงปัญหาภายในระบบไอน้ำในส่วนต่างๆ ทำให้สามารถออกมาตราการเพื่อเป็นแนวทางในการแก้ไขปัญหาในระบบไอน้ำ และทำการประเมินศักยภาพของมาตรการในการประหยัด

พลังงานและลดจำนวนเงินสูญเสียต่างๆ ซึ่งมาตรการที่ได้กำหนดขึ้นมาเพื่อแก้ไขปัญหาของระบบไอน้ำ แสดงได้ดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 แสดงมาตรการที่ได้มีการกำหนดขึ้นเพื่อปรับปรุงแก้ไขปัญหาของระบบไอน้ำ

ระบบไอน้ำ	มาตรการ	มีการดำเนินการ
ส่วนการผลิตไอน้ำ	ปรับแต่งการเผาไหม้	✓
	ควบคุมความชื้นของเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าหม้อน้ำ	-
	ส่งเสริมให้มีการใช้อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนหม้อน้ำ	-
	เพิ่มอุณหภูมิอากาศก่อนเข้าห้องเผาไหม้	-
	ปรับปรุงฉนวนหม้อน้ำ	-
	ลดการสูญเสียจากการโบลด์วาร์น	✓
	นำความร้อนจากการโบลด์วาร์นกลับมาใช้ใหม่	-
ส่วนการส่งจ่ายไอน้ำ	ปรับปรุงฉนวนในระบบท่อส่งจ่ายไอน้ำและน้ำป้อน	✓
	ลดการรั่วไหลของไอน้ำในระบบส่งจ่ายไอน้ำ	-
ส่วนอุปกรณ์ใช้ไอน้ำ	หุ้มฉนวนอุปกรณ์ใช้ไอน้ำ	-
ส่วนการนำความร้อนกลับ	นำน้ำคอนเดนเสทกลับมาใช้ใหม่	-
	ลดการรั่วไหลของไอน้ำผ่านกับดักไอน้ำ	✓
	นำความร้อนจากไอน้ำแฟลชกลับมาใช้งาน	-

จากตารางที่ 5.2 จะพบว่ามีการดำเนินการปรับปรุงระบบไอน้ำในแต่ละส่วนทั้งหมด 4 มาตรการดังต่อไปนี้ 1. มาตรการลดการสูญเสียจากการโบลด์วาร์น 2. มาตรการปรับปรุงฉนวนในระบบท่อส่งจ่ายไอน้ำและน้ำป้อน 3. มาตรการปรับแต่งการเผาไหม้ และ 4. มาตรการลดการรั่วไหลของไอน้ำผ่านกับดักไอน้ำ

5.3.1 ศักยภาพในการลดการโบลด์วาร์น

มาตรการลดการโบลด์วาร์นน้ำที่ออกมา นี้ ต้องการให้มีอัตราการโบลด์วาร์น ลดลงจากเดิมอยู่ที่ 7.49 % ให้เหลือ 2 % ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการประหยัดเชื้อเพลิงเนื่องจากความร้อนสูญเสียไปกับน้ำโบลด์วาร์นและประหยัดปริมาณน้ำป้อนที่ใช้ในการป้อนให้กับหม้อไอน้ำ โดยผลการประหยัดแสดงได้ดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ศักยภาพในการลดการปล่อยไอระเหย

ศักยภาพในการลดการปล่อยไอระเหย			
ค่า	หน่วย	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง
% β	%	7.49	2
อัตราการปล่อยไอระเหย	kg/hr	74.68	19.94
ชั่วโมงทำงานต่อปี	hr/y	2,176	
ค่าความร้อนเชื้อเพลิง	kJ/kg	13,631	
อุณหภูมิน้ำป้อน	°C	34	
อุณหภูมิน้ำไอระเหย	°C	167.83	
อัตราสูญเสียความร้อนน้ำไอระเหย $Q = mc\Delta T$	kJ/hr	41,846.65	11,173.30
ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ	%	73.05	
อัตราการสูญเสียความร้อนน้ำไอระเหยเทียบเท่าเชื้อเพลิง	kg/hr	4.20	1.12
ราคาเชื้อเพลิง	Baht/kg	2	
ค่าน้ำประปา	Baht/kg	0.0159	
จำนวนเงินที่สูญเสียจากเชื้อเพลิง	Baht/y	18,289.49	4,883.40
จำนวนเงินที่สูญเสียจากน้ำป้อน	Baht/y	2,583.81	689.89
จำนวนเงินสูญเสียรวม	Baht/y	20,873.30	5,573.29
จำนวนเงินที่ประหยัดได้	Baht/y	15,300.01	

จากตารางที่ 5.3 พบว่าในส่วนของการปล่อยไอระเหยนั้น จะทำให้มีการสูญเสียเงินในส่วนของคุณค่าเชื้อเพลิง 18,289.06 บาท/ปี และ ค่าน้ำป้อน 2,583.81 บาท/ปี รวมมีการสูญเสียเงินจากการปล่อยไอระเหยทั้งหมด 20,873.30 บาท/ปี ซึ่งสาเหตุเกิดจากการที่ทางโรงงานลานนาโปรดักส์นั้นทำการปล่อยไอระเหยในอัตราที่สูงเกินไป โดยที่จากการตรวจวัดและการวิเคราะห์พบว่ามีอัตราการปล่อยไอระเหยสูงถึง 7.49 % ของอัตราการป้อนน้ำเข้าหม้อไอน้ำ ซึ่งมาตรการลดการปล่อยไอระเหยนั้น มีเป้าหมายคือ การลดอัตราการปล่อยไอระเหยลงให้เหลือ 2 % เมื่อทำการประเมินศักยภาพของมาตรการพบว่าที่อัตราการปล่อยไอระเหย 2 %

ของอัตราการป้อนน้ำเข้าหม้อน้ำ จะมีการสูญเสียเงินในส่วนของค่าเชื้อเพลิง 4,883.40 บาท/ปี และ ค่า น้ำป้อน 689.89 บาท/ปี รวมมีการสูญเสียเงินจากการโบล์ดวาร์นทั้งหมด 5,573.29 บาท/ปี ซึ่งเมื่อนำไป เปรียบเทียบกับจำนวนเงินที่สูญเสียจากอัตราการโบล์ดวาร์นที่ 7.49 % จะพบว่าสามารถประหยัดเงินได้ 15,300.01 บาท/ปี

5.3.2 ศักยภาพในการหุ้มฉนวนท่อส่งจ่ายน้ำป้อน

ทำการหุ้มฉนวนท่อส่งจ่ายน้ำป้อน 2 ส่วน 1. ท่อส่งน้ำที่ออกมาจาก Economizer ไปยัง ถังเก็บน้ำป้อน 2. ท่อส่งน้ำป้อนจากถังเก็บน้ำป้อนไปยังหม้อไอน้ำ ซึ่งการหุ้มฉนวนนั้นจะทำให้สามารถ ลดความร้อนสูญเสียที่ผิวท่อได้เป็นจำนวนมากเนื่องจากปัจจุบันท่อทั้ง 2 ส่วนนี้ไม่มีการหุ้มฉนวน จึงทำให้ น้ำป้อนที่มีอุณหภูมิสูงเกิดการสูญเสียความร้อนขณะส่งจ่ายผ่านท่อไปยังถังเก็บน้ำป้อนหรือหม้อน้ำ โดย ในการหุ้มฉนวนนี้จะใช้ฉนวนใยแก้ว ที่มีความหนา 1 นิ้ว ผลการประหยัดแสดงได้ในตารางที่ 5.4 ซึ่งจาก ตารางที่ 5.4 ในส่วนของท่อส่งจ่ายน้ำป้อน ได้ทำการแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ 1.ท่อส่งจ่ายน้ำป้อนจาก Economizer ไปยังถังเก็บน้ำป้อน 2. ท่อส่งจ่ายน้ำป้อนจากถังเก็บน้ำป้อนไปยังหม้อไอน้ำ เมื่อทำการ วิเคราะห์ปริมาณความร้อนสูญเสียพบว่าจะมีปริมาณความร้อนสูญเสียทั้งหมดตลอดความยาวท่ออยู่ที่ 2.98 kW หรือคิดเป็นเงินจำนวน 4,683.35 บาท/ปี โดยที่เมื่อทำการประเมินศักยภาพของมาตรการจะ พบว่า หลังจากการหุ้มฉนวนท่อส่งจ่ายน้ำป้อนทั้ง 2 ส่วน จะมีจำนวนเงินสูญเสียจากการสูญเสียความร้อน ที่ผิวท่ออยู่ที่ 702.77 บาท/ปี ซึ่งผลประหยัดของมาตรการนี้คือ 3980.58 บาท/ปี

ตารางที่ 5.4 ศักยภาพในการหุ้มฉนวนท่อส่งจ่ายน้ำป้อน

ศักยภาพในการหุ้มฉนวนท่อส่งจ่ายน้ำป้อน 1 นิ้ว (25 mm)			
ค่า	หน่วย	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง
ชั่วโมงทำงานต่อปี	hr/y	2,176	
ค่าความร้อนเชื้อเพลิง	kJ/kg	13,631	
ความร้อนสูญเสียที่น้ำออกจากถังน้ำป้อนเข้าหม้อน้ำ	W/m	87.09	13.03
ความร้อนสูญเสียที่น้ำออกจาก Economizer เข้าถังน้ำป้อน	W/m	83.51	12.56
ความยาวท่อน้ำออกจากถังน้ำป้อนเข้าหม้อน้ำ	m	15.00	
ความยาวท่อน้ำออกจาก Economizer เข้าถังน้ำป้อน	m	20.00	
ปริมาณความร้อนสูญเสียทั้งหมด	kW	2.98	0.45
	kJ/hr	10,715.58	1,607.94
ประสิทธิภาพหม้อน้ำ	%	73.05	
อัตราการสูญเสียความร้อนเทียบเท่าเชื้อเพลิง	kg/hr	1.08	0.16
ราคาเชื้อเพลิง	Baht/kg	2	
จำนวนเงินที่สูญเสีย	Baht/y	4,683.35	702.77
จำนวนเงินที่ประหยัดได้	Baht/y	3,980.58	

5.3.3 ศักยภาพในการปรับแต่งการเผาไหม้

มาตรการปรับแต่งการเผาไหม้ จะทำการปรับแต่งอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงให้เหมาะสมกัน ซึ่งจากการที่มีปริมาณออกซิเจนมากนั้น ต้องทำการลดอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ภายใน

หม้อไอน้ำ เพื่อเป็นการลดปริมาณออกซิเจนในก๊าซไอเสีย โดยต้องการให้มีปริมาณออกซิเจนอยู่ที่ 9 % (จากเดิม 12.8 %) ผลการประหยัดแสดงได้ดังตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 ศักยภาพในการปรับแต่งการเผาไหม้

มาตรการปรับแต่งการเผาไหม้ (ลดปริมาณก๊าซออกซิเจน)			
ค่า	หน่วย	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง
ปริมาณก๊าซออกซิเจน	%	12.8	9
ชั่วโมงการทำงานต่อปี	hr/y	2,176	
ค่าความร้อนเชื้อเพลิง	kJ/kg	13,631	
อัตราการผลิตไอน้ำ	kg/hr	922.32	
ความร้อนสูญเสีย	kJ/kg _{fuel}	3,394	2,874
ประสิทธิภาพหม้อน้ำ	%	73.05	76.86
อัตราการใช้เชื้อเพลิง $\dot{m}_f = \frac{\dot{m}_s \times (h_g - h_f)}{\eta_B \times \text{HHV}}$	kg/hr	242.98	230.94
ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้ต่อปี	kg/y	528,724.48	501,872.64
ราคาเชื้อเพลิง	Baht/kg	2.00	
ค่าใช้จ่ายเชื้อเพลิง	Baht/y	1,057,448.96	1,003,745.28
จำนวนเงินที่ประหยัดได้	Baht/y	53,703.68	

จากตารางที่ 5.5 พบว่าในการตรวจวัดองค์ประกอบของก๊าซไอเสียนั้นมีปริมาณก๊าซออกซิเจนอยู่ที่ 12.8 % โดยที่ปกติก๊าซออกซิเจนควรมีค่าน้อยที่สุดและไม่เกิน 10% ซึ่งเมื่อทำการวิเคราะห์หาปริมาณความร้อนสูญเสียพบว่าจะอยู่ที่ 3,394 kJ/kg_{fuel} ประสิทธิภาพหม้อน้ำ คือ 73.05 % โดยมีปริมาณการใช้เชื้อเพลิงอยู่ที่ 528,724.48 kg/y คิดเป็นเงิน 1,057,448.96 บาท/ปี ซึ่งมาตรการปรับแต่งการเผาไหม้นี้ มีเป้าหมายคือ การลดปริมาณก๊าซออกซิเจนในก๊าซไอเสียให้เหลือ 9 % และเมื่อทำการประเมินศักยภาพของมาตรการจะพบว่า ที่ปริมาณก๊าซออกซิเจน 9 % จะมีการสูญเสียความร้อนลดลง ทำให้ประสิทธิภาพของหม้อน้ำสูงขึ้น ส่งผลให้มีการใช้เชื้อเพลิงในการเผาไหม้ลดลง โดยมีการใช้เชื้อเพลิงอยู่ที่ 501,872.64 kg/y คิดเป็นเงิน 1,003,745.28 บาท/ปี ซึ่งจะสามารถประหยัดเงินได้ 53,703.68 บาท/ปี

5.3.4 ศักยภาพในการเปลี่ยนกับดักไอน้ำ

จากการตรวจวัดระบบไอน้ำของโรงงานลานนาโปรดักส์นั้น พบว่ามีกับดักไอน้ำที่รั่วไหล จึงมีการออกมาตรการให้เปลี่ยนกับดักไอน้ำของเครื่องสกัดน้ำมันหอมระเหย ที่มีการรั่วไหลทั้งหมด 3 ตัว เพื่อเป็นการลดปริมาณการสูญเสียไอน้ำ ผลการประหยัดแสดงได้ดังตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.6 ศักยภาพในการเปลี่ยนกับดักไอน้ำ

ศักยภาพในการเปลี่ยนกับดักไอน้ำ		
ความดันไอน้ำ	bar(g)	2.00
ขนาดรู orifice กับดักไอน้ำของเครื่องสกัดน้ำมันหอมระเหย 1	mm	3.00
ขนาดรู orifice กับดักไอน้ำของเครื่องสกัดน้ำมันหอมระเหย 2	mm	3.00
ขนาดรู orifice กับดักไอน้ำของเครื่องสกัดน้ำมันหอมระเหย 3	mm	3.00
อัตราการสูญเสียไอน้ำของกับดักไอน้ำรวม ($M_{\text{steam}} = 0.25 \times 0.695 \times A_{\text{orifice}} \times P_{\text{steam}}$)	kg/h	11.10
ชั่วโมงทำงานต่อวัน	h/day	8.00
จำนวนวันทำงานต่อปี	day/year	272.00
จำนวนชั่วโมงการทำงานต่อปี	h/year	2,176.00
อัตราไอน้ำที่สูญเสียจากการรั่วต่อปี	Ton _{steam} /year	24.16
ราคาต้นทุนไอน้ำ	Baht/Ton _{steam}	436.78
จำนวนเงินที่สูญเสียต่อปี	Baht/year	10,552.01
จำนวนเงินที่ประหยัดได้	Baht/year	10,552.01

จากตารางที่ 5.6 พบว่าการรั่วไหลของกับดักไอน้ำทั้ง 3 ตัว ทำให้มีการสูญเสียไอน้ำในอัตรา 11.10 กิโลกรัม/ชั่วโมง หรือคิดเป็นเงิน 10,552.01 บาท/ปี ซึ่งเมื่อทำการประเมินศักยภาพของมาตรการเปลี่ยนกับดักไอน้ำจะสามารถลดจำนวนเงินที่สูญเสียได้ 10,552.01 บาท/ปี

5.4 สรุปศักยภาพของมาตรการและความคุ้มค่าในการลงทุน

ตารางที่ 5.7 สรุปศักยภาพของมาตรการและความคุ้มค่าในการลงทุน

ระบบไอน้ำ	มาตรการ	ศักยภาพของ มาตรการ(บาท/ ปี)	เงินลงทุน (บาท)	ระยะเวลา คืนทุน
ส่วนการผลิต ไอน้ำ	ปรับแต่งการเผาไหม้	53,703.68	0	0
	ควบคุมความชื้นของเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าหม้อน้ำ	-	-	-
	ส่งเสริมให้มีการใช้อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนหม้อน้ำ	-	-	-
	เพิ่มอุณหภูมิอากาศก่อนเข้าห้องเผาไหม้	-	-	-
	ปรับปรุงฉนวนหม้อน้ำ	-	-	-
	ลดการสูญเสียจากการโบล์ดวาร์น	15,300.01	0	0
	นำความร้อนจากการโบล์ดวาร์นกลับมาใช้ใหม่	-	-	-
ส่วนการส่ง จ่ายไอน้ำ	ปรับปรุงฉนวนในระบบท่อส่งจ่ายไอน้ำ	3,980.58	3,071.25	10 เดือน
	ลดการรั่วไหลของไอน้ำในระบบส่งจ่ายไอน้ำ	-	-	-
ส่วนอุปกรณ์ ใช้ไอน้ำ	หุ้มฉนวนอุปกรณ์ใช้ไอน้ำ	-	-	-
ส่วนการนำ ความร้อน กลับ	นำน้ำคอนเดนเสทกลับมาใช้ใหม่	-	-	-
	ลดการรั่วไหลของไอน้ำผ่านกับดักไอน้ำ	10,552.01	21,000	2 ปี
	นำความร้อนจากไอน้ำแฟลชกลับมาใช้งาน	-	-	-
รวม		83,536.28	24,071.25	-

จากตารางที่ 5.7 จะมี 2 มาตรการที่ใช้เงินในการลงทุน คือ 1. มาตรการหุ้มฉนวนท่อส่งจ่าย ซึ่งในมาตรการนี้เลือกฉนวนใยแก้วสำหรับหุ้มท่อน้ำร้อนและน้ำเย็นที่มีความ 1 นิ้ว ราคา 87.75 บาทต่อเมตร ความยาวท่อทั้งหมดที่ต้องใช้คือ 35 เมตร คิดเป็นเงินลงทุนคือ 3,071.25 บาท

2. มาตรการเปลี่ยนกับดักไอน้ำ โดยที่กับดักไอน้ำ มีเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทางเข้าและทางออก 1 นิ้ว ราคา 6,754.68 บาท ประมาณ 7,000 บาท ต้องใช้ทั้งหมด 3 ตัว คิดเป็นเงินลงทุน 21,000 บาท

5.5 เปรียบเทียบศักยภาพของมาตรการกับต้นทุนในการผลิตไอน้ำ

ต้นทุนในการผลิตไอน้ำแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ต้นทุนในส่วนของการซื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้ และ ต้นทุนในส่วนของการนำป้อนที่ป้อนเข้าไปในหม้อน้ำ ตารางเปรียบเทียบศักยภาพของมาตรการกับต้นทุนในการผลิตไอน้ำแสดงได้ดังตารางที่ 5.8

ตารางที่ 5.8 การเปรียบเทียบศักยภาพของมาตรการกับต้นทุนในการผลิตไอน้ำ

ผลการประหยัดต้นทุนในการผลิตไอน้ำ		
รายการ	หน่วย	ค่า
จำนวนชั่วโมงทำงานต่อปี	hr/y	2,176
อัตราการใช้เชื้อเพลิงเฉลี่ย	kg/hr	187.5
อัตราการใช้น้ำป้อน	kg/hr	997
ราคาเชื้อเพลิง	Baht/kg	2
ราคาน้ำป้อน	Baht/kg	0.0159
ค่าใช้จ่ายเชื้อเพลิงต่อปี	Baht/y	816,000
ค่าใช้จ่ายน้ำป้อนต่อปี	Baht/y	34,494.60
ต้นทุนในการผลิตไอน้ำ (เชื้อเพลิง+น้ำป้อน)	Baht/y	850,494.60
จำนวนเงินที่ประหยัดได้	Baht/y	83,536.28
คิดเป็น	%	9.82

จากตารางที่ 5.8 พบว่าจำนวนเงินที่ประหยัดได้จากการประเมินศักยภาพของมาตรการจะคิดเป็น 9.82 % ของค่าใช้จ่ายหรือต้นทุนในการผลิตไอน้ำ ซึ่งหมายความว่าหากมีการดำเนินงานปรับปรุงระบบไอน้ำตามมาตรการที่ได้มีการกำหนดขึ้น จะสามารถลดต้นทุนในการผลิตไอน้ำได้ถึง 9.82 %

5.6 เปรียบเทียบประสิทธิภาพหม้อน้ำ

จากงานวิจัยที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพของหม้อน้ำ โดยทำการแบ่งตาม ชนิดเชื้อเพลิง ชนิดหม้อน้ำ เป็นต้น ซึ่งในงานวิจัยที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพของหม้อน้ำนั้น

1. หากแบ่งตามชนิดเชื้อเพลิง พบว่าหม้อน้ำที่ใช้เชื้อเพลิงแข็งจะมีประสิทธิภาพเฉลี่ยอยู่ที่ 74.5 % จากการตรวจวัดหม้อน้ำของโรงงานลานนาโปรดักส์จะมีประสิทธิภาพอยู่ที่ 73.05 % ซึ่งใกล้เคียงกับงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษา

2. หากแบ่งตามชนิดของหม้อน้ำ ในงานวิจัยที่ได้ศึกษานั้น พบว่าหม้อน้ำชนิดท่อไฟจะมีประสิทธิภาพเฉลี่ยอยู่ที่ 71.33% ซึ่งก็ใกล้เคียงกับประสิทธิภาพหม้อน้ำของโรงงานลานนาโปรดักส์เช่นกัน ตารางเปรียบเทียบประสิทธิภาพของหม้อน้ำที่ได้จากการตรวจวัดกับงานวิจัยที่ทำการศึกษา แสดงได้ดังตารางที่ 5.9

ตารางที่ 5.9 ตารางเปรียบเทียบประสิทธิภาพของหม้อน้ำ

เปรียบเทียบประสิทธิภาพหม้อน้ำ				
จากการตรวจวัด	จากงานวิจัยที่ทำการศึกษา			
	แบ่งตามชนิดเชื้อเพลิง (เชื้อเพลิงแข็ง)	แบ่งตามชนิดหม้อน้ำ (ท่อไฟ)	แบ่งตามขนาดหม้อน้ำ (5 ton/hr)	แบ่งตามทวีป (เอเชีย)
73.05%	74.50%	71.33%	67.80%	74.80%

5.7 วิธีการดำเนินงานตามมาตรการประหยัดพลังงาน

5.7.1 มาตรการปรับแต่งการเผาไหม้

จากมาตรการปรับแต่งการเผาไหม้ที่ได้มีการกำหนดขึ้นมานั้นเป้าหมายของมาตรการคือการลดปริมาณก๊าซออกซิเจนในก๊าซไอเสียจาก 12.8 % ให้เหลือ 9 % สาเหตุที่ต้องการให้ก๊าซออกซิเจนเหลือ 9 % เนื่องจากหากออกซิเจนมีค่าต่ำกว่านั้นอาจส่งผลให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซไอเสียซึ่งจะทำให้เกิดมลพิษทางอากาศ โดยวิธีการลดปริมาณก๊าซออกซิเจนในก๊าซไอเสียนั้นทำได้โดยการลดปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ลง ซึ่งทำได้โดยการปรับแอมเปอร์ที่ช่องทางเข้าของอากาศไปยังห้องเผาไหม้ และทำการวัดปริมาณก๊าซออกซิเจนในก๊าซไอเสียหากค่าปริมาณก๊าซออกซิเจนยังสูงกว่า 9 % ให้ทำซ้ำจนกว่าจะได้ปริมาณก๊าซออกซิเจนในก๊าซไอเสีย 9 % หรือใกล้เคียง

5.7.2 มาตรการลดอัตราการโบลว์ดาวน์

จากมาตรการลดอัตราการโบลว์ดาวน์ที่ได้มีการกำหนดขึ้นมานั้นเป้าหมายของมาตรการ คือ การลดอัตราการโบลว์ดาวน์ลงจาก 7.49 % ให้เหลือ 2 % ของอัตราการป้อนน้ำเข้าหม้อน้ำ จากการตรวจวัดพบว่าวิธีการโบลว์ดาวน์ของโรงงานลานนาโปรดักส์นั้น คือ การโบลว์ดาวน์ด้วยมือโดยจะทำการโบลว์ดาวน์ 1 ครั้งต่อวัน ครั้งละ 7 วินาที ซึ่งการลดอัตราการโบลว์ดาวน์ให้เหลือ 2 % นั้นทำได้โดยการลดระยะเวลาการโบลว์ดาวน์ลง เช่น จากเดิมโบลว์ดาวน์ 7 วินาที เปลี่ยนเป็น 5 วินาที และทำการวัดองค์ประกอบของน้ำในหม้อน้ำหรือน้ำโบลว์ดาวน์เพื่อนำไปวิเคราะห์หาอัตราการโบลว์ดาวน์ หากพบว่าอัตราการโบลว์ดาวน์ยังมีค่าสูง ให้ทำการลดระยะเวลาโบลว์ดาวน์ลงและทำการวิเคราะห์ซ้ำอีกครั้ง จนกว่าจะได้อัตราการโบลว์ดาวน์ 2 % หรือใกล้เคียง

5.7.3 มาตรการหุ้มฉนวนท่อส่งจ่ายไอน้ำและน้ำป้อน

วิธีการดำเนินงานในส่วนของมาตรการนี้ทำได้โดยการหุ้มฉนวนท่อส่งจ่ายน้ำป้อน 2 ส่วน คือ 1. ท่อส่งจ่ายน้ำป้อนจาก Economizer ไปยังถังเก็บน้ำป้อนความยาว 20 เมตร 2. ท่อส่งจ่ายน้ำป้อนจากถังเก็บน้ำป้อนไปยังหม้อน้ำความยาว 15 เมตร โดยฉนวนที่ใช้ในการหุ้มคือฉนวนใยแก้วสำหรับหุ้มท่อส่งจ่ายน้ำร้อนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว และมีความหนา 1 นิ้ว

5.7.4 มาตรการเปลี่ยนกับดักไอน้ำ

วิธีการดำเนินงานในส่วนของมาตรการนี้ทำได้โดยการเปลี่ยนกับดักไอน้ำทั้ง 3 ตัวที่มีการรั่วไหล โดยกับดักไอน้ำที่เลือกนั้นจะต้องสามารถรับความดันของไอน้ำที่อุปกรณ์ที่ใช้ไอน้ำได้(2 barg) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทางเข้า (Up Steam) และ ทางออก (Down Steam) ของกับดักไอน้ำต้องมีขนาด 1 นิ้ว

บทที่ 6

สรุปผลการศึกษา

6.1 สรุปผลการศึกษาระบบไอน้ำของโรงงานลานนาโปรดักส์

จากการศึกษาระบบไอน้ำของโรงงานลานนาโปรดักส์ พบว่ามีการสูญเสียในส่วนต่างๆของระบบไอน้ำเกิดขึ้น โดยส่วนที่มีการสูญเสียมากที่สุดคือ ส่วนของระบบผลิตไอน้ำ ซึ่งในส่วนนี้จะทำการตรวจวัดความสูญเสียของหม้อไอน้ำเป็นหลัก เช่น การตรวจวัดองค์ประกอบของก๊าซไอเสียพบว่ามีความเข้มข้นออกซิเจนสูง ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงสัดส่วนของอากาศกับเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้ไม่เหมาะสมกัน ส่งผลให้เกิดความร้อนสูญเสียจากก๊าซไอเสียเป็นจำนวนมาก เป็นต้น สำหรับความสูญเสียของระบบไอน้ำในส่วนอื่นจะประกอบไปด้วย ส่วนของระบบท่อส่งจ่ายไอน้ำและน้ำป้อน สาเหตุของการสูญเสียเกิดจากไม่มีการหุ้มฉนวนของท่อส่งจ่ายน้ำป้อนเมื่อทำการประเมินความสูญเสียจะมีมูลค่าอยู่ที่ 4,683.35 บาท/ปี ส่วนของการนำความร้อนกลับ สาเหตุเกิดจากการรั่วไหลของก๊าดไอน้ำเมื่อทำการประเมินความสูญเสียจะมีมูลค่าอยู่ที่ 10,552.01 บาท/ปี จากความสูญเสียของระบบไอน้ำดังกล่าว ทำให้มีการเสนอมาตรการเพื่อช่วยในการปรับปรุงระบบไอน้ำในแต่ละส่วน ซึ่งจะประกอบด้วย 1. มาตรการลดการโบล์ดาวน์น้ำ 2. มาตรการปรับแต่งการเผาไหม้ 3. มาตรการหุ้มฉนวนท่อส่งจ่ายน้ำป้อน 4. มาตรการเปลี่ยนกับดักไอน้ำ โดยที่เมื่อทำการประเมินศักยภาพของมาตรการในการลดมูลค่าความสูญเสียของระบบไอน้ำจะพบว่าสามารถลดมูลค่าความสูญเสียลงได้ทั้งหมด 83,536.28 บาท/ปี

6.2 ข้อเสนอแนะ

จากการตรวจวัดระบบไอน้ำของโรงงานลานนาโปรดักส์ ทำให้ทราบถึงปัญหาหลายๆอย่างภายในระบบไอน้ำซึ่งอาจเกิดจากการขาดการดูแลและการตรวจวัดอย่างถูกต้อง คณะผู้จัดทำจึงเสนอให้ทางโรงงานลานนาโปรดักส์ ทำการตรวจวัดระบบไอน้ำภายในโรงงานอยู่เป็นประจำ โดยขอคำปรึกษาจากวิศวกรที่มีประสบการณ์ในการตรวจวัดระบบไอน้ำอย่างถูกต้อง เพื่อเป็นการป้องกันการสูญเสียพลังงานภายในระบบไอน้ำ รวมถึงควรทำการตรวจเช็คอุปกรณ์ต่างๆภายในระบบไอน้ำ เพื่อให้แน่ใจว่าอุปกรณ์นั้นอยู่ในสภาพที่ใช้งานได้ปกติ

บรรณานุกรม

- [1] กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม . (2562) . คู่มือสำหรับการตรวจสอบความปลอดภัยของหม้อน้ำและพลังงานของระบบไอน้ำ. พิมพ์ครั้งที่ 1. บริษัท ธนภัทร (2006) พิมพ์ซ้ำ
- [2] Ren Liu et al. Comparative Analysis of Boiler Energy Efficiency Regulation System, 2018 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 186 012033.
- [3] Robert Loftiness. Energy Hand book, Second edition, Von Nostrand Reinhold Company.
- [4] T. Patel, Bhavesh K and K. Patel. EFFICIENCY WITH DIFFERENT GCV OF COAL AND EFFICIENCY IMPROVEMENT OPPORTUNITY IN BOILER, International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, Vol. 2, Issue 5, May 2013.
- [5] Cleaver-Brooks, Boiler efficiency guide, USA, 2010, Inc CB-7767, 03/10.
- [6] Ahmad Mahmoudi Lahijani, Eris.E. Supeni and Fatemeh Kalantari . A REVIEW OF INDIRECT METHOD FOR MEASURING THERMAL EFFICIENCY IN FIRE TUBE STEAM BOILERS, Jr. of Industrial Pollution Control 34(1)(2018) pp 1825-1832.
- [7] Jaywant College Of Engineering, Karad, India. Professor, JSPM NTC, Savitribai Phule Pune University, Pune, Maharashtra, India. Review on Increasing Boiler Efficiency Using Solar Bagasse Dryer. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE) E-ISSN: 2278-1684, P-ISSN: 2320-334X PP.42-44.
- [8] JP Yadav and Bharat Raj Singh. Study on Comparison of Boiler Efficiency Using Husk and Coal as Fuel in Rice Mill. S-JPSET : ISSN : 2229-7111, Vol. 2, Issue 2.
- [9] Amit Kumar Jain. An Approach towards Efficient Operation of Boilers. International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 3, Issue 6, June-2012 ISSN 2229-5518.
- [10] JP Yadav and Bharat Raj Singh. Study on Comparison of Boiler Efficiency Using Husk and Coal as Fuel in Rice Mill. S-JPSET : ISSN : 2229-7111, Vol. 2, Issue 2.
- [11] Sugar Milling Research Institute, Durban 4041, South Africa. BOILERS, BOILER FUEL AND BOILER EFFICIENCY. Proc S Afr Sug Technol Ass (2001) 75.

- [12] Sugar Milling Research Institute, Durban 4041, South Africa. BOILERS, BOILER FUEL AND BOILER EFFICIENCY. Proc S Afr Sug Technol Ass (2001) 75.
- [13] Ahmad Mahmoudi Lahijani and Eris E Supeni. Evaluating the Effect of Economizer on Efficiency of the Fire Tube Steam Boiler. Innov Ener Res, an open access journal ISSN: 2576-1463.
- [14] Sandip V. Borate, Dr. J. S. Gawande. Review on Increasing Boiler Efficiency Using Solar Bagasse Dryer. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE) E-ISSN: 2278-1684, P-ISSN: 2320-334X pp.42-44.
- [15] Chetan T. Patel, Dr. Bhavesh K. Patel, Vijay K. Patel. EFFICIENCY WITH DIFFERENT GCV OF COAL AND EFFICIENCY IMPROVEMENT OPPORTUNITY IN BOILER. International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology Vol. 2, Issue 5, May 2013.
- [16] Johnston Boiler Company. FIRETUBE/WATERUBE BOILERS A COMPARISON.
- [17] David A.T. Rodgers, P.E., Timothy Golightly, Fred D. Lang, P.E. COMPARING BOILER EFFICIENCY CALCULATIONAL METHODS. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power [rejected], or Journal of Thermal Science and Engineering Applications.
- [18] Gudimella Tirumala Srinivas, Doddapineni Rajeev Kumar, Peruri Venkata Vithal Murali Mohan, Boggarapu Nageswara Rao. Efficiency of a Coal Fired Boiler in a Typical Thermal Power Plant. American Journal of Mechanical and Industrial Engineering Volume 2, Issue 1, January 2017, Pages: 32-36.
- [19] Bureau of Energy Efficiency. DETAILED PROJECT REPORT ON ENERGY EFFICIENT BOILER (3 TPH) (SURAT TEXTILE CLUSTER).
- [20] Bureau of Energy Efficiency. DETAILED PROJECT REPORT ON WASTE HEAT RECOVERY SYSTEM IN 4 TPH BOILER (WARANGAL RICE MILLING CLUSTER).
- [21] B.StC.MOOR Technical Management Department Tongaat-Hulett Sugar Limited. A RELIABLE HIGH EFFICIENCY SUGAR MILL BOILER.
- [22] Vikas Kumar Patidar, R.P. Kumawat and Shuchi Shah. Energy Saving in a 10 TPH Boiler using Flash Steam. Journal of Basic and Applied Engineering Research P-ISSN: 2350-0077; E-ISSN: 2350-0255; Volume 3, Issue 9; April-June, 2016, pp. 752-754.

- [23] Mr. Sanjay Rao Chennamaneni , Dr. Vinoth Kumar Kandasamy. Gasifier Integrated Boiler Based Power Plant–A boon for all scale industrial Sector to meet thermal and power demand.
- [24] Nishant Singh Verma , Jitendra Jayant , Anubhav Yadav , Abhay Gehlot , Sandeep Garg. PERFORMANCE ASSESSMENT OF 2 X 100 TPH AFBC BOILER OF 40 MW COAL BASED THERMAL POWER PLANT (M.P.). Vol-2 Issue-52016IJARIE-ISSN(O)-2395-4396.
- [25] SalunkeV.V. , Deshmukh K.B. , GarudR.P. ,Patil A.S. Prof. KulkarniS.C. Improvement of Boiler Efficiency Using Bagasse Dryer. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)e-ISSN: 2395-0056 , P-ISSN: 2395-0072.
- [26] Nishant Singh , Bhanu Pratap , Sandeep Kumar Kamboj. Performance evaluation Of Boiler In 46mw Bagasse Based Cogeneration Power Plant. International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973-4562 Volume 13, Number 6(2018) pp. 149-158.
- [27] Anjum Munir, A.R.Tahir, M.Shafi Sabir, Khuram Ejaz. Efficiency Calculations of Bagasse Fired Boiler on the Basis of Flue Gases Temperature and Total Heat Values of Steam. Pakistan Journal of Life and Social Sciences. Pak. j. life soc. sci. (2004), 2(1): 36-39.
- [28] Sumeet M. Sanghvi, Vijay M. Parmar. Efficiency Improvement in Boiler by Trimming Oxygen. International Journal for Innovative Research in Science & Technology| Volume 3 | Issue 11| April(2017) ISSN (online): 2349-6010.
- [29] Ren LIU, Yuejin ZHAO, Ting Guo, Jianhong Chen. Analysis on Effects of Energy Efficiency Standards of Industry Boiler in China. MATEC Web of Conferences 175, 04004 (2018).
- [30] Md. Amanulla Farhan, Dr.P. Rathnakumar. Investigation of Boiler Performance in a Power Plant. International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering (IJIRAE) ISSN: 2349-2163.
- [31] Brundaban Patro. Efficiency studies of combination tube boilers. AEJ - Alexandria Engineering Journal · December 2015.

- [32] Gbasouzor Austine Ikechukwu. Fabrication of Pilot Multi-Tube Fire-Tube Boiler Designed For Teaching and Learning Purposes in Mechanical Laboratory. Proceedings of the World Congress on Engineering 2014 Vol II, WCE 2014, July 2 - 4, 2014, London, U.K.
- [33] Abhay Sharma, Prof. A.C. Tiwari. DESIGN OF THE HORIZONTAL FIRE TUBE BOILER FOR THE COMMERCIAL COOKING OF INDIAN FOOD. Journal of Mechanical Engineering and Technology (JMET) Volume 5, Issue 1, Jan-June 2017, pp. 01–13, Article ID: JMET 05-01-001
- [34] ศูนย์ทรัพยากรฝึกอบรมเพื่ออนุรักษ์พลังงาน. คู่มือการใช้เชื้อเพลิงอย่างมีประสิทธิภาพ. [ออนไลน์]. 2544. แหล่งที่มา: <http://www.enconlab.com/ve/Download/energy/Strem.PDF> [8 กันยายน 2562]
- [35] EPMC Company Limited. condensate recovery [ออนไลน์]. 2557. แหล่งที่มา: <http://epmc-epmc.blogspot.com/2009/09/condensate-management.html> [12 กันยายน 2562]
- [36] กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. คู่มือการใช้งานและการดูแลรักษาหม้อน้ำ [ออนไลน์]. 2553. แหล่งที่มา: <http://php.diw.go.th/safety/wp-content/uploads/2015/01/boiler2.pdf> [12 กันยายน 2562]
- [37] North American Insulation Manufacturers Association. 3E Plus Program [ออนไลน์]. 2015. แหล่งที่มา: <https://insulationinstitute.org/tools-resources/free-3e-plus/> [12 ธันวาคม 2562]
- [38] testo IRSoft software. Practical knowledge [ออนไลน์]. - . แหล่งที่มา: <https://www.testo.com/en-TH/applications/infrared-camera-maintenance> [12 ธันวาคม 2562]
- [39] ศูนย์การเรียนรู้วิทยาศาสตร์โลกและดาราศาสตร์. กลไกการถ่ายเทความร้อน [ออนไลน์]. 2012. แหล่งที่มา: <http://www.lesa.biz/earth/atmosphere/heat-transfer> [12 ธันวาคม 2562]
- [40] MIKRON Company . Inc . table of emissivity of various surfaces [ออนไลน์]. - . แหล่งที่มา: http://www-eng.lbl.gov/~dw/projects/DW4229_LHC_detector_analysis/calculations/emissivity2.pdf [18 เมษายน 2563]



1. การคำนวณความร้อนสูญเสียในส่วนต่างๆของหม้อไอน้ำรวมถึงการหาประสิทธิภาพที่ทำการอ้างอิงจากค่าความร้อนสูง (HHV) และ ค่าความร้อนต่ำ (LHV) ตามมาตรฐาน JIS B8222 : 1993
Land Boilers and Heat Balance

ตาราง ก.1 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงกะลาปาล์ม

เชื้อเพลิง	หน่วย	ค่า Dry basis	ค่า wet basis
C	%	46.99	35.06
H	%	5.79	4.32
N	%	0.00	0.00
O	%	42.48	31.70
Ash(a)	%	4.64	3.46
S	%	0.10	0.07
Water	%	0.00	25.38
รวม	%	100	100
HHV	kJ/kg	18267.00	-
LHV	kJ/kg	17405.00	-

ตาราง ก.2 องค์ประกอบของขี้เถ้าเชื้อเพลิงกะลาปาล์ม

เถ้าเชื้อเพลิง	หน่วย	ค่า Dry basis	ค่า wet basis
Water	%	0.00	15.19
Ash	%	97.30	82.52
C(u)	%	2.58	2.19
H	%	0.02	0.02
N ₂	%	0.00	0.00
S	%	0.05	0.04
O ₂	%	0.00	0.00
รวม	%	100	100

จาก
$$HHV_w = \frac{HHV_D \times (100 - \omega)}{100}$$

$$= \frac{18,267 \times (100 - 25.38)}{100}$$

$$HHV_w = 13,630.84 \text{ kJ/kg}$$

จาก
$$LHV_w = HHV_w - 25(9H + \omega)$$

$$= 13,630.84 - 25(9 \times 4.32 + 25.38)$$

$$LHV_w = 12,024.34 \text{ kJ/kg}$$

4. หาค่าความร้อนสูญเสียจากก๊าซไอเสีย

4.1 ค่าความร้อนสูญเสียจากก๊าซไอเสียอ้างอิงตามค่าความร้อนต่ำ (L_{1L})

จาก $L_{1L} = Gc_g(T_g - T_0)$ สมการที่ (2.1) เมื่อ $G = G_0 + G_w + [A_0(m-1)] + G_{w1}$
 สมการที่ (2.3) พบว่าต้องทำการหาค่าตัวแปรไม่ทราบค่าก่อนแล้วจึงนำไปแทนในสมการ เพื่อหาค่าความร้อนสูญเสียจากก๊าซไอเสียจากก๊าซไอเสียต่อไป

4.1.1 หาค่าอัตราส่วนอากาศส่วนเกิน (m)

จาก

$$m = \frac{21}{21 - O_2(\text{flue gas})} = \frac{21}{21 - 12.8} = 2.56$$

4.1.2 หาค่าปริมาณอากาศทางทฤษฎี (A_0)

จาก

$$A_0 = \frac{1}{100} \left[8.89C_1 + 26.7 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 3.35 + 0.8N \right] \quad (2.8)$$

$$= \frac{1}{100} \left[8.89(35.06 - 0.2) + 26.7 \left(4.32 - \frac{31.699}{8} \right) + 3.35(0.0746) + 0.8(0) \right]$$

$$A_0 = 3.198 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

4.1.3 หาค่าปริมาณก๊าซไอเสียแห้งทางทฤษฎีต่อเชื้อเพลิง (G_0)

จาก

$$G_0 = \frac{1}{100} \left[8.89c_1 + 21.1 \left(h - \frac{o}{8} \right) + 3.3s + 0.80n \right] \quad (2.4)$$

$$= \frac{1}{100} \left[8.89(35.064 - 0.2) + 21.1 \left(4.32 - \frac{31.699}{8} \right) + 3.3(0.0746) + 0.80(0) \right]$$

$$G_0 = 3.177 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

4.1.4 หาค่าปริมาณน้ำจากการเผาไหม้รวมกับน้ำจากเชื้อเพลิง (G_w)

จาก

$$G_w = \frac{1}{100} [1.24(9h + w)] \quad (2.5)$$

$$= \frac{1}{100} [1.24(9(4.32) + 25.38)]$$

$$G_w = 0.797 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

4.1.5 หาค่าปริมาณความชื้นจากอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ (G_{w1})

จาก

$$G_{w1} = 1.61zmA_0 \quad (2.6)$$

$$= 1.61(0.02105)(2.56)(3.198)$$

$$G_{w1} = 0.277 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

4.1.6 หาค่าอัตราการไหลของก๊าซไอเสีย (G)

จาก

$$G = G_0 + G_w + [A_0(m-1)] + G_{w1} \quad (2.3)$$

$$= 3.177 + 0.797 + [3.198(2.56-1)] + 0.277$$

$$G = 9.2399 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

แทนค่าตัวแปร G , T_g , T_0 ลงในสมการที่ (2.1) $L_{1L} = Gc_g(T_g - T_0)$ เพื่อหาค่าความร้อนสูญเสีย เมื่อ $T_g = 171.7 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_0 = 34 \text{ }^\circ\text{C}$ (ค่าจากการตรวจวัด)

$$\text{จะได้ } L_{1L} = 9.2399 \times 1.38 \times (171.7 - 34)$$

$$L_{1L} = 1,755.82 \text{ kJ} / \text{kg}_{\text{fuel}}$$

ดังนั้น ค่าความร้อนสูญเสียจากก๊าซไอเสียอ้างอิงตามค่าความร้อนต่ำ (L_{1L}) = 1,755.82 kJ/kg_{fuel}

4.2 ค่าความร้อนสูญเสียจากก๊าซไอเสียอ้างอิงตามค่าความร้อนสูง (L_{1H})

จาก

$$L_{1H} = L_{1L} + 25(9H + \omega) \quad (2.2)$$

$$= 1,755.82 + 25(9 \times 4.32 + 25.38)$$

$$L_{1H} = 3,312.32 \text{ kJ} / \text{kg}_{\text{fuel}}$$

ดังนั้น ค่าความร้อนสูญเสียจากก๊าซไอเสียอ้างอิงตามค่าความร้อนสูง (L_{1H}) = 3,312.32 kJ/kg_{fuel}

5. หาค่าความร้อนสูญเสียจากการเป่าน้ำหรือไอน้ำเข้าไปในหม้อน้ำ (L_2)

จาก

$$L_2 = W_b(h_g - h_s) = 0 \quad (2.9)$$

(เนื่องจากไม่มีการเป่าน้ำหรือไอน้ำเข้าไปในหม้อน้ำ)

6. หาค่าความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (L_3)

จาก

$$L_3 = 126.1[G_0 + (m-1)A_0](CO) \quad (2.10)$$

$$L_3 = 126.1[3.177 + (2.56-1)(3.198)]\left(\frac{299.20}{10,000}\right)$$

$$L_3 = 30.81 \text{ kJ/kg}_{fuel}$$

ดังนั้น ค่าความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (L_3) = 30.81 kJ/kg_{fuel}7. หาค่าความร้อนสูญเสียจากเชื้อเพลิงเผาไหม้ไม่หมด (L_4)

จาก

$$L_4 = 339C_2 \quad (2.11)$$

$$= 339 \times \frac{aU}{100-U}$$

$$= 339 \times \frac{3.46 \times 5.49}{100 - 5.49}$$

$$L_4 = 68.14 \text{ kJ/kg}_{fuel}$$

ดังนั้น ค่าความร้อนสูญเสียจากเชื้อเพลิงเผาไหม้ไม่หมด (L_4) = 68.14 kJ/kg_{fuel}

8. หาค่าความร้อนสูญเสียจากการแผ่รังสีความร้อน (L_5)

8.1 ความร้อนสูญเสียจากการแผ่รังสีความร้อนอ้างอิงตามความร้อนสูง (L_{5H})

จาก

$$L_{5H} = \frac{1}{100} l_{rh} HHV \text{ kJ / kg (or } m^3) \quad (2.12)$$

$$l_{rh} = \frac{l_r LHV}{HHV} (\%) \quad (2.13)$$

จะได้

$$\begin{aligned} L_{5H} &= \frac{1}{100} l_{rh} HHV = \frac{1}{100} \times \frac{l_r LHV}{HHV} \times HHV \\ &= \frac{1}{100} \times 1.768 \times \frac{12,024}{13,631} \times 13,631 \\ L_{5H} &= 212.58 \text{ kJ/kg}_{fuel} \end{aligned}$$

ดังนั้น ค่าความร้อนสูญเสียจากการแผ่รังสีความร้อนอ้างอิงตามค่าความร้อนสูง (L_{5H}) = 212.58 kJ/kg_{fuel}

8.2 ค่าความร้อนสูญเสียจากการแผ่รังสีความร้อนอ้างอิงตามค่าความร้อนต่ำ (L_{5L})

จาก

$$L_{5L} = \frac{1}{100} l_r LHV \quad (2.14)$$

$$= \frac{1}{100} \times 1.768 \times 12,024$$

$$L_{5L} = 212.58 \text{ kJ/kg}_{fuel}$$

ดังนั้น ค่าความร้อนสูญเสียจากการแผ่รังสีความร้อนอ้างอิงตามค่าความร้อนต่ำ (L_{5L}) = 212.58 kJ/kg_{fuel}

9. ทำการแปลง Heat Loss ต่างๆให้เป็น % โดยเทียบกับค่าความร้อนสูง (HHV) และ ค่าความร้อนต่ำ (LHV)

9.1 เปอร์เซ็น Heat Loss เทียบค่าความร้อนสูง (HHV)

$$L_1 = \frac{3,362.32}{13,631} \times 100 = 24.67 \%$$

$$L_2 = 0 \text{ (ไม่มีความร้อนสูญเสียจากการเป่าน้ำเข้าไปในหม้อน้ำ)}$$

$$L_3 = \frac{30.81}{13,631} \times 100 = 0.23 \%$$

$$L_4 = \frac{68.14}{13,631} \times 100 = 0.50 \%$$

$$L_5 = \frac{212.58}{13,631} \times 100 = 1.56 \%$$

$$L_6 = 0 \text{ (ไม่มีความร้อนสูญเสียจากแหล่งอื่น)}$$

9.2 เปอร์เซ็น Heat Loss เทียบค่าความร้อนต่ำ (LHV)

$$L_1 = \frac{1,755}{12,024} \times 100 = 14.60 \%$$

$$L_2 = 0 \text{ (ไม่มีความร้อนสูญเสียจากการเป่าน้ำเข้าไปในหม้อน้ำ)}$$

$$L_3 = \frac{30.81}{12,024} \times 100 = 0.26 \%$$

$$L_4 = \frac{68.14}{12,024} \times 100 = 0.57 \%$$

$$L_5 = \frac{212.58}{12,024} \times 100 = 1.78 \%$$

$$L_6 = 0 \text{ (ไม่มีความร้อนสูญเสียจากแหล่งอื่น)}$$

10. คำนวณหาประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ

10.1 ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำอ้างอิงตามค่าความร้อนสูง (η_{HHV})

จาก

$$\eta_2 = (1 - \text{Heat loss}) \times 100 \% = \left(1 - \frac{L_1}{H_1 + Q}\right) \times 100 \% \quad (2.19)$$

หรือ

$$\eta_{HHV} = 100 - (L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5 + L_6)$$

$$\eta_{HHV} = 100 - (24.67 + 0 + 0.23 + 0.50 + 1.56 + 0)$$

$$\eta_{HHV} = 73.04 \%$$

10.2 ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำอ้างอิงตามค่าความร้อนต่ำ (η_{LHV})

จาก

$$\eta_2 = (1 - \text{Heat loss}) \times 100 \% = \left(1 - \frac{L_1}{H_1 + Q}\right) \times 100 \% \quad (2.19)$$

หรือ

$$\eta_{LHV} = 100 - (L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5 + L_6)$$

$$\eta_{LHV} = 100 - (14.60 + 0 + 0.26 + 0.57 + 1.78 + 0)$$

$$\eta_{LHV} = 82.79 \%$$

2. ตัวอย่างการคำนวณความร้อนสูญเสียที่ผนังของหม้อไอน้ำ

อุณหภูมิผนังด้านซ้ายของหม้อน้ำแบบท่อไฟ จากการตรวจวัดคือ $39.30^{\circ}\text{C} = 312.3\text{ K}$

อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมรอบหม้อน้ำ จากการตรวจวัดคือ $34^{\circ}\text{C} = 307\text{ K}$

ความร้อนสูญเสียทั้งหมดประกอบด้วย 1. ความร้อนสูญเสียจากการพาความร้อนแบบอิสระ

2. ความร้อนสูญเสียจากการแผ่รังสีความร้อน

จากสมการที่ 2.16 และ 2.17 จะได้ สมการหาปริมาณความร้อนสูญเสียทั้งหมดต่อหน่วยพื้นที่คือ

$$q'' = q''_{conv} + q''_{rad}$$

$$q'' = h(T_s - T_\infty) + \varepsilon\sigma(T_s^4 - T_\infty^4)$$

หาค่า h จากตารางที่ 2.3 (Horizontal cylinder)

จะได้
$$h = 1.25(\Delta T / D)^{\frac{1}{3}} = 1.25\left(\frac{312.3 - 307}{2.34}\right)^{\frac{1}{3}} = 1.64\text{ W/m}^2 \cdot \text{k}$$

หาค่า ε จากภาคผนวก ง

จะได้ $\varepsilon = 0.94$ (Steel Plate)

แทนค่า h และ ε ลงในสมการ

จะได้
$$q'' = 1.64(312.3 - 307) + (0.94)(5.67 \times 10^{-8})(312.3^4 - 307^4)$$

$$= 8.692 + 33.549$$

$$q'' = 42.241\text{ W/m}^2$$

สรุป ปริมาณความร้อนสูญเสียต่อหน่วยพื้นที่ที่ผนังด้านซ้ายของหม้อน้ำแบบท่อไฟ คือ 42.241 W/m^2

3. ตัวอย่างการคำนวณความร้อนสูญเสียที่ผิวของท่อส่งจ่ายน้ำป้อน

อุณหภูมิผิวท่อส่งจ่ายน้ำป้อนจาก economizer ไปยังถังเก็บน้ำป้อน จากการตรวจวัด คือ $70.9^{\circ}\text{C} = 343.9\text{ K}$ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว = 0.0508 m

อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมรอบท่อส่งจ่ายน้ำป้อนจากการตรวจวัด คือ $34^{\circ}\text{C} = 307\text{ K}$

ความร้อนสูญเสียทั้งหมดประกอบด้วย 1. ความร้อนสูญเสียจากการพาความร้อนแบบอิสระ

2. ความร้อนสูญเสียจากการแผ่รังสีความร้อน

จากสมการที่ 2.16 และ 2.17 จะได้ สมการหาปริมาณความร้อนสูญเสียทั้งหมดต่อหน่วยพื้นที่คือ

$$q'' = q''_{conv} + q''_{rad}$$

หรือ

$$q' = q'_{conv} + q'_{rad}$$

$$q' = 2\pi rh(T_s - T_\alpha) + 2\pi r\epsilon\sigma(T_s^4 - T_\alpha^4)$$

หาค่า h จากตารางที่ 2.3 (Horizontal Cylinder)

$$\text{จะได้ } h = 1.32(\Delta T / D)^{\frac{1}{4}} = 1.32\left(\frac{343.9 - 307}{0.0508}\right)^{\frac{1}{4}} = 6.85\text{ W/m}^2 \cdot k$$

หาค่า ϵ จากภาคผนวก ง

$$\text{จะได้ } \epsilon = 0.94 \text{ (Steel)}$$

แทนค่า h และ ϵ ลงในสมการ จะได้

$$\begin{aligned} q' &= 2\pi\left(\frac{0.0508}{2}\right)(6.85)(343.9 - 307) + 2\pi\left(\frac{0.0508}{2}\right)(0.94)(5.67 \times 10^{-8})(343.9^4 - 307^4) \\ &= 40.33 - 43.42 \end{aligned}$$

$$q' = 83.75\text{ W/m}$$

สรุป ปริมาณความร้อนสูญเสียต่อหน่วยความยาวที่ผิวท่อส่งจ่ายน้ำป้อนจาก economizer ไปยังถังเก็บน้ำป้อน คือ 83.75 W/m



ภาคผนวก ข

รูปภาพการตรวจวัด

มหาวิทยาลัยพระนคร

ผลการตรวจวัดต่างๆ

ตาราง ข.1 ผลการตรวจวัดองค์ประกอบก๊าซไอเสีย

Date / time	°C Tamb	°C Tstack	% O2	ppm CO	% CO2	ppm NO	ppm NOx	% ExAir	l/min Pump
Saturday, December 21, 2019	32.3	116.7	18.6	540	0.00	8	8	787.9	0.26
21-Dec-19 10:32:52 AM	32.9	144.8	18.2	1981	0.00	24	25	649.1	0.04
21-Dec-19 10:32:57 AM	32.9	146.3	18.2	1960	0.00	24	25	648.6	0.44
21-Dec-19 10:33:02 AM	32.9	147.8	18.2	1964	0.00	25	26	651.0	0.43
21-Dec-19 10:33:07 AM	32.9	148.3	18.2	1976	0.00	25	26	652.6	0.44
21-Dec-19 10:33:12 AM	33.0	148.8	18.2	1981	0.00	25	26	653.2	0.44
21-Dec-19 10:33:17 AM	33.0	149.4	18.2	1981	0.00	25	26	653.4	0.43
21-Dec-19 10:33:22 AM	33.0	150.0	18.2	1980	0.00	25	26	654.1	0.43
21-Dec-19 10:33:27 AM	33.1	150.7	18.2	1976	0.00	25	26	655.0	0.43
21-Dec-19 10:33:32 AM	33.2	151.3	18.2	1974	0.00	25	26	655.3	0.44
21-Dec-19 10:33:37 AM	33.1	152.0	18.2	1975	0.00	25	26	655.3	0.44
21-Dec-19 10:34:28 AM	33.6	154.3	18.2	1768	0.00	21	22	644.4	0.42
21-Dec-19 10:35:28 AM	34.9	159.9	18.2	1970	0.00	23	24	662.3	0.42
21-Dec-19 10:36:28 AM	34.2	165.6	17.5	1593	0.00	21	22	501.6	0.42
21-Dec-19 10:37:28 AM	34.5	170.0	14.5	572	0.00	73	77	224.8	0.43
21-Dec-19 10:38:28 AM	34.9	171.8	13.1	240	0.00	94	99	167.5	0.43
21-Dec-19 10:39:28 AM	34.8	172.8	12.6	136	0.00	101	106	149.9	0.44
21-Dec-19 10:40:28 AM	35.4	173.9	12.1	103	0.00	109	114	134.9	0.44
21-Dec-19 10:41:28 AM	35.6	175.3	11.5	86	0.00	112	118	121.1	0.44
21-Dec-19 10:42:28 AM	36.0	171.1	17.1	256	0.00	54	57	443.7	0.44
21-Dec-19 10:43:28 AM	36.1	169.1	18.2	318	0.00	30	32	648.9	0.45
21-Dec-19 10:44:28 AM	36.2	168.0	18.6	343	0.00	23	24	761.3	0.46
21-Dec-19 10:45:28 AM	36.6	167.5	18.7	378	0.00	19	20	815.8	0.46
21-Dec-19 10:46:28 AM	36.1	166.9	18.8	398	0.00	16	17	869.8	0.46
21-Dec-19 10:47:28 AM	36.4	166.5	18.9	416	0.00	14	15	895.6	0.48
21-Dec-19 10:48:28 AM	36.0	166.2	18.9	428	0.00	13	14	921.8	0.48
21-Dec-19 10:49:28 AM	36.0	165.8	19.0	436	0.00	12	13	936.7	0.50
21-Dec-19 10:50:28 AM	36.7	165.4	19.0	446	0.00	11	12	951.6	0.50
21-Dec-19 10:51:28 AM	37.1	165.1	19.0	461	0.00	10	11	966.6	0.52
21-Dec-19 10:52:28 AM	37.9	164.7	19.0	472	0.00	9	9	969.9	0.53
21-Dec-19 10:53:28 AM	37.5	164.4	19.1	480	0.00	9	9	983.9	0.54
21-Dec-19 10:54:28 AM	37.0	168.5	16.7	549	0.00	22	23	388.1	0.54
21-Dec-19 10:55:28 AM	36.9	172.1	14.1	421	0.00	57	60	202.6	0.55
21-Dec-19 10:56:28 AM	37.0	174.0	12.6	286	0.00	85	89	151.0	0.56
21-Dec-19 10:57:28 AM	36.5	175.2	12.0	202	0.00	87	91	132.6	0.58
21-Dec-19 10:58:28 AM	36.2	170.5	17.5	366	0.00	38	40	491.8	0.59
21-Dec-19 10:59:28 AM	37.2	168.7	18.1	380	0.00	26	27	630.0	0.61
21-Dec-19 11:00:28 AM	36.8	167.7	18.4	401	0.00	21	22	698.5	0.61
21-Dec-19 11:01:28 AM	37.1	166.9	18.5	406	0.00	17	18	746.5	0.61

Date / time	°C Tamb	°C Tstack	% O2	ppm CO	% CO2	ppm NO	ppm NOx	% ExAir	l/min Pump
21-Dec-19 11:02:28 AM	37.1	166.1	18.6	434	0.00	15	16	782.4	0.61
21-Dec-19 11:03:28 AM	37.7	165.5	18.7	446	0.00	13	14	810.6	0.61
21-Dec-19 11:04:28 AM	37.5	165.1	18.7	469	0.00	12	13	825.2	0.61
21-Dec-19 11:05:28 AM	37.3	165.5	18.7	475	0.00	11	12	819.9	0.59
21-Dec-19 11:06:28 AM	38.2	170.2	15.5	469	0.00	31	33	283.2	0.59
21-Dec-19 11:07:28 AM	38.3	171.0	15.4	381	0.00	32	34	275.8	0.59
21-Dec-19 11:08:28 AM	36.7	171.5	15.5	289	0.00	34	36	281.6	0.57
21-Dec-19 11:09:28 AM	37.5	171.5	15.8	257	0.00	34	36	305.3	0.57
21-Dec-19 11:10:28 AM	38.1	171.6	16.0	214	0.00	35	37	320.1	0.58
21-Dec-19 11:11:28 AM	36.8	171.7	16.2	187	0.00	34	36	338.7	0.57
21-Dec-19 11:12:28 AM	38.2	171.8	16.3	165	0.00	33	35	348.0	0.56
21-Dec-19 11:13:28 AM	37.5	171.8	16.5	157	0.00	32	34	364.5	0.56
21-Dec-19 11:14:28 AM	38.3	171.6	16.6	138	0.00	31	33	376.8	0.56
21-Dec-19 11:15:28 AM	37.7	171.7	16.7	133	0.00	29	30	386.3	0.67
21-Dec-19 11:16:28 AM	38.2	168.0	18.6	199	0.00	14	15	777.2	0.68
21-Dec-19 11:17:28 AM	38.0	166.9	18.8	246	0.00	10	11	856.6	0.69
21-Dec-19 11:18:28 AM	36.6	166.1	18.9	275	0.00	8	8	897.8	0.68
21-Dec-19 11:19:28 AM	38.5	165.4	19.0	306	0.00	6	6	932.9	0.69
21-Dec-19 11:20:28 AM	36.9	164.7	19.0	349	0.00	4	4	952.1	0.68
21-Dec-19 11:21:28 AM	38.4	164.0	19.0	388	0.00	3	3	966.3	0.68
21-Dec-19 11:22:28 AM	38.5	163.4	19.1	412	0.00	2	2	983.3	0.68
21-Dec-19 11:23:28 AM	37.7	166.3	17.6	332	0.00	10	11	509.3	0.68
21-Dec-19 11:24:28 AM	37.2	167.0	17.4	178	0.00	13	14	475.6	0.67
21-Dec-19 11:25:28 AM	39.1	167.4	17.3	152	0.00	15	16	461.5	0.67
21-Dec-19 11:26:28 AM	40.2	167.6	17.3	140	0.00	16	17	464.3	0.66
21-Dec-19 11:27:28 AM	38.9	167.7	17.3	135	0.00	16	17	460.7	0.67
21-Dec-19 11:28:28 AM	39.9	167.6	17.3	135	0.00	15	16	462.4	0.67
21-Dec-19 11:29:28 AM	39.8	167.7	17.3	138	0.00	15	16	468.0	0.65
21-Dec-19 11:30:28 AM	40.6	167.6	17.3	136	0.00	15	16	469.3	0.64
21-Dec-19 11:31:28 AM	39.6	167.4	17.4	134	0.00	14	15	478.2	0.64
21-Dec-19 11:32:28 AM	39.6	167.2	17.4	136	0.00	14	15	479.6	0.63
21-Dec-19 11:33:23 AM	39.0	167.0	17.4	133	0.00	14	15	481.7	0.63
21-Dec-19 11:34:14 AM	39.3	166.6	17.4	131	0.00	12	13	481.6	0.51
21-Dec-19 11:35:14 AM	38.8	166.5	17.5	141	0.00	14	15	497.3	0.62
21-Dec-19 11:36:14 AM	40.6	166.4	17.5	136	0.00	13	14	504.9	0.61
21-Dec-19 11:37:14 AM	38.9	166.3	17.5	135	0.00	13	14	507.7	0.61
21-Dec-19 11:38:14 AM	38.7	166.2	17.6	140	0.00	12	13	526.6	0.60
21-Dec-19 11:39:14 AM	38.3	166.1	17.7	142	0.00	11	12	539.0	0.61
21-Dec-19 11:40:14 AM	38.2	165.9	17.8	141	0.00	10	11	562.4	0.61
21-Dec-19 11:41:14 AM	38.9	165.5	17.9	143	0.00	9	9	586.7	0.60
21-Dec-19 11:42:14 AM	39.0	165.2	18.1	146	0.00	9	9	621.5	0.60
21-Dec-19 11:43:14 AM	39.8	164.8	18.2	143	0.00	8	8	639.5	0.60
21-Dec-19 11:44:14 AM	39.5	164.5	18.3	149	0.00	7	7	664.9	0.61
21-Dec-19 11:45:14 AM	39.2	164.3	18.3	154	0.00	6	6	682.8	0.61
21-Dec-19 11:46:14 AM	39.6	164.1	18.4	155	0.00	5	5	710.8	0.60
21-Dec-19 11:47:14 AM	39.8	163.9	18.4	154	0.00	5	5	717.7	0.61
21-Dec-19 11:48:14 AM	39.4	163.8	18.4	156	0.00	4	4	720.9	0.60

Date / time	°C Tamb	°C Tstack	% O2	ppm CO	% CO2	ppm NO	ppm NOx	% ExAir	l/min Pump
21-Dec-19 11:49:14 AM	41.3	163.6	18.5	163	0.00	4	4	739.6	0.60
21-Dec-19 11:50:14 AM	40.7	163.5	18.5	167	0.00	3	3	741.1	0.61
21-Dec-19 11:51:14 AM	40.3	163.4	18.5	165	0.00	3	3	745.1	0.60
21-Dec-19 11:52:14 AM	39.9	163.2	18.6	166	0.00	3	3	764.8	0.60
21-Dec-19 11:53:14 AM	40.1	163.1	18.6	166	0.00	2	2	768.3	0.60
21-Dec-19 11:54:14 AM	39.4	163.0	18.6	166	0.00	2	2	782.9	0.60
21-Dec-19 11:55:14 AM	40.6	162.7	18.6	175	0.00	2	2	793.4	0.60
21-Dec-19 11:56:14 AM	40.2	162.5	18.7	176	0.00	2	2	795.7	0.61
21-Dec-19 11:57:14 AM	41.4	162.1	18.7	170	0.00	2	2	798.7	0.60
21-Dec-19 11:58:14 AM	41.0	161.9	18.7	169	0.00	1	1	817.3	0.61
21-Dec-19 11:59:14 AM	40.7	161.7	18.7	172	0.00	1	1	825.6	0.60
21-Dec-19 12:00:14 PM	40.1	161.6	18.7	180	0.00	1	1	827.7	0.60
21-Dec-19 12:01:14 PM	40.1	161.5	18.8	179	0.00	0	0	833.6	0.60
21-Dec-19 12:02:14 PM	40.6	161.3	18.8	182	0.00	0	0	851.7	0.60
21-Dec-19 12:03:14 PM	41.9	161.2	18.8	185	0.00	0	0	862.7	0.60
21-Dec-19 12:04:14 PM	42.0	161.0	18.8	186	0.00	0	0	869.2	0.60
21-Dec-19 12:05:14 PM	40.7	160.9	18.9	191	0.00	0	0	890.1	0.60
21-Dec-19 12:06:14 PM	42.2	160.7	18.8	192	0.00	0	0	872.7	0.61
21-Dec-19 12:07:14 PM	43.6	160.6	18.9	178	0.00	0	0	900.9	0.61
21-Dec-19 12:08:14 PM	42.3	160.5	18.9	183	0.00	0	0	901.3	0.60
21-Dec-19 12:09:14 PM	42.6	160.2	18.9	186	0.00	0	0	896.7	0.60
21-Dec-19 12:10:14 PM	42.2	159.9	19.0	185	0.00	0	0	935.9	0.60
21-Dec-19 12:11:14 PM	41.7	159.6	19.0	190	0.00	0	0	941.1	0.60
21-Dec-19 12:12:14 PM	42.1	159.3	19.0	195	0.00	0	0	965.7	0.60
21-Dec-19 12:13:32 PM	42.1	158.9	19.1	189	0.00	0	0	989.0	0.20
21-Dec-19 12:14:32 PM	41.6	158.8	19.2	198	0.00	0	0	1056.4	0.60
21-Dec-19 12:15:32 PM	43.5	158.6	19.3	206	0.00	0	0	1102.2	0.60
21-Dec-19 12:16:32 PM	42.4	158.4	19.3	212	0.00	0	0	1141.0	0.60
21-Dec-19 12:17:32 PM	41.9	158.3	19.4	213	0.00	0	0	1176.3	0.60
21-Dec-19 12:18:32 PM	42.4	158.1	19.4	218	0.00	0	0	1193.1	0.60
21-Dec-19 12:19:32 PM	43.0	157.8	19.4	220	0.00	0	0	1238.5	0.60
21-Dec-19 12:20:32 PM	42.0	157.6	19.5	227	0.00	0	0	1289.6	0.60
21-Dec-19 12:21:32 PM	42.5	157.4	19.5	235	0.00	0	0	1326.4	0.60
21-Dec-19 12:22:32 PM	42.5	157.2	19.6	233	0.00	0	0	1404.5	0.60
21-Dec-19 12:23:32 PM	43.6	157.1	19.6	238	0.00	0	0	1427.5	0.60
21-Dec-19 12:24:32 PM	44.0	158.3	19.0	324	0.00	9	9	970.1	0.59
21-Dec-19 12:25:32 PM	43.0	158.7	18.7	313	0.00	16	17	805.3	0.60
21-Dec-19 12:26:32 PM	43.0	158.8	18.6	284	0.00	18	19	782.4	0.60
21-Dec-19 12:27:32 PM	43.5	158.8	18.6	287	0.00	19	20	759.6	0.60
21-Dec-19 12:28:32 PM	43.0	159.0	18.4	335	0.00	21	22	693.0	0.60
21-Dec-19 12:29:32 PM	43.3	159.5	18.0	401	0.00	23	24	596.0	0.60
21-Dec-19 12:30:32 PM	43.9	160.4	17.5	462	0.00	26	27	501.1	0.59
21-Dec-19 12:31:32 PM	44.1	161.3	16.9	548	0.00	25	26	412.1	0.60
21-Dec-19 12:32:32 PM	43.7	162.5	16.2	723	0.00	18	19	337.8	0.60
21-Dec-19 12:33:32 PM	42.5	164.0	15.4	747	0.00	20	21	278.2	0.61
21-Dec-19 12:34:32 PM	41.9	165.1	14.8	689	0.00	24	25	237.9	0.60
21-Dec-19 12:35:32 PM	42.0	166.3	14.2	594	0.00	32	34	207.1	0.61
21-Dec-19 12:36:32 PM	42.5	167.1	13.8	480	0.00	41	43	191.2	0.61

Date / time	°C Tamb	°C Tstack	% O2	ppm CO	% CO2	ppm NO	ppm NOx	% ExAir	l/min Pump
21-Dec-19 12:37:32 PM	42.4	167.9	13.6	471	0.00	45	47	182.8	0.61
21-Dec-19 12:38:32 PM	42.7	169.0	13.1	390	0.00	54	57	165.9	0.61
21-Dec-19 12:39:32 PM	43.0	169.9	12.8	296	0.00	65	68	157.6	0.61
21-Dec-19 12:40:32 PM	43.4	170.8	12.6	289	0.00	69	72	149.3	0.61
21-Dec-19 12:41:32 PM	43.5	171.6	12.6	238	0.00	71	75	149.5	0.61
21-Dec-19 12:42:32 PM	43.4	172.7	12.2	201	0.00	79	83	139.7	0.61
21-Dec-19 12:43:32 PM	42.9	173.5	12.2	193	0.00	81	85	138.0	0.62
21-Dec-19 12:44:32 PM	43.3	174.6	11.9	161	0.00	86	90	131.3	0.61
21-Dec-19 12:45:32 PM	43.6	175.8	11.4	128	0.00	92	97	119.7	0.61
21-Dec-19 12:46:32 PM	43.7	176.5	11.2	107	0.00	100	105	113.8	0.62
21-Dec-19 12:47:32 PM	43.1	171.7	17.4	282	0.00	33	35	491.2	0.61
21-Dec-19 12:48:32 PM	43.6	170.2	18.1	290	0.00	26	27	612.1	0.62
21-Dec-19 12:49:32 PM	43.1	169.5	18.3	300	0.00	22	23	682.3	0.62
21-Dec-19 12:50:32 PM	42.6	169.2	18.5	309	0.00	19	20	746.9	0.61

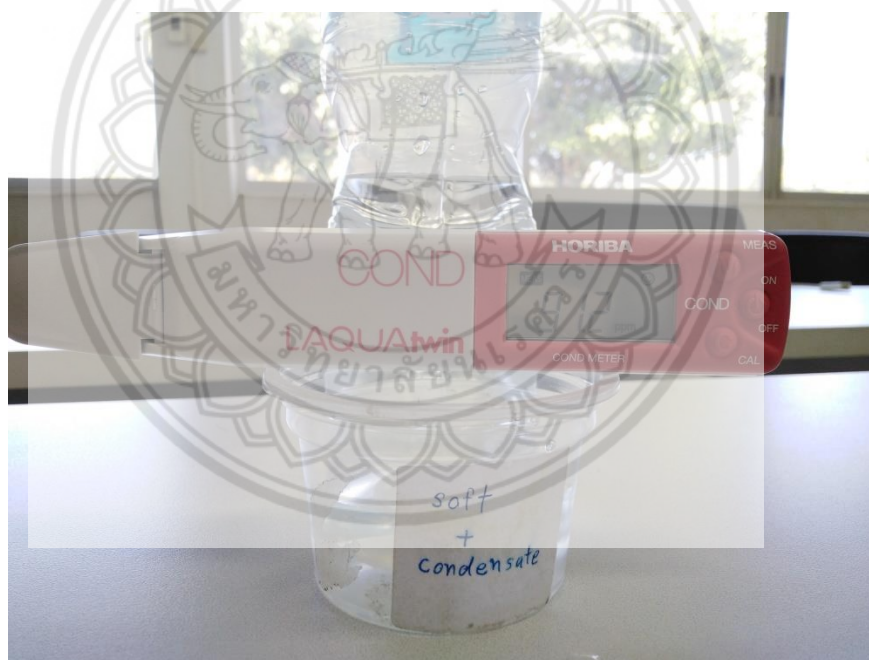


เลขที่	ชนิดพันธุ์	จำนวนตัว	น้ำหนัก (kg)	อายุ (ปี)	เพศ	หมายเหตุ	วันที่	ชื่อผู้เลี้ยง
1	...	5.5	34	16	♂	...	23/10/5	...
2	...	6.6	34	16	♂	...	23/10/6	...
3	...	6.5	34	16	♂	...	23/10/7	...
4	...	6.2	36	16	♂	...	23/10/8	...
5	...	6.1	36	16	♂	...	23/10/9	...
6	...	6.0	36	16	♂	...	23/10/10	...
7	...	6.2	36	16	♂	...	23/10/11	...
8	...	6.4	36	16	♂	...	23/10/12	...
9	...	6.2	36	16	♂	...	23/10/13	...
10	...	6.5	36	16	♂	...	23/10/14	...
11	...	5.8	36	16	♂	...	23/10/15	...
12	...	6.4	35	16	♂	...	23/10/17	...
13	...	6.6	35	16	♂	...	23/10/18	...
14	...	6.6	34	16	♂	...	23/10/20	...
15	...	6.6	34	16	♂	...	23/10/22	...
16	...	6.3	34	16	♂	...	23/10/24	...
17	...	6.0	34	16	♂	...	23/10/24	...
18	...	6.5	33	16	♂	...	23/10/25	...
19	...	6.5	34	16	♂	...	23/10/25	...
20	...	5.0	38	15	♂	...	23/10/27	...
21	...	5.4	38	15	♂	...	23/10/27	...
22	...	5.5	35	15	♂	...	23/10/27	...

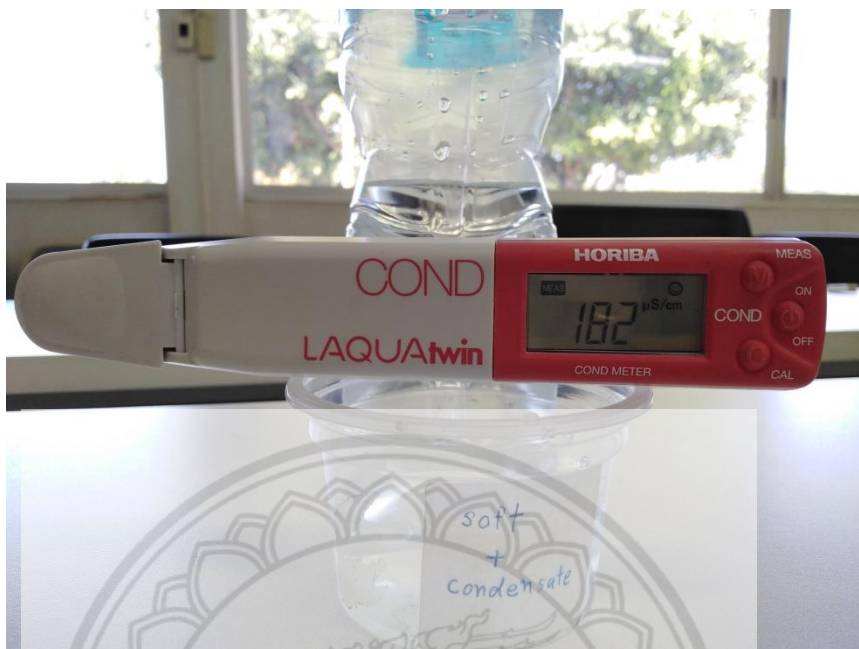
รูป ข.1 ตารางบันทึกข้อมูลการใช้เข้าป้อนและเชื้อเพลิง



รูป ข.2 การตรวจวัดค่า TDS น้ำโบล์ดาวน์



รูป ข.3 การตรวจวัดค่า TDS น้ำป้อน



รูป ข.4 การตรวจวัดค่า Conductivity น้ำป้อน



รูป ข.5 การตรวจวัดค่า pH น้ำโถ้ดาวน์



รูป ข.6 การตรวจวัดค่า pH น้ำป้อน





ภาคผนวก ค
รายงานการตรวจวัดหม้อน้ำประจำปี

บอรัส โบโล ลาเนดาโปรดักต์

-1-

สำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย
กรมโรงงานอุตสาหกรรม

รหัส.....
เลขที่รับ.....วันที่.....
(ช่องที่1) สำหรับเจ้าหน้าที่กรอก

เอกสารรับรองความปลอดภัยในการใช้หม้อไอน้ำ

ข้าพเจ้า.....นายมนัส.....เป็ยวนิช.....อายุ.....67.....ปี อาชีพ.....วิศวกร.....
ที่พักอยู่เลขที่.....266 / 215.....หมู่.....15.....ต.รอก/ชอย.....10.....ถนน.....พหลโยธิน.....
ตำบล/แขวง.....พิชัย.....อำเภอ/เขต.....เมือง.....จังหวัด.....ลำปาง.....โทรศัพท์.....0818834451.....
ได้รับใบอนุญาตประกอบวิชาชีพวิศวกรรมควบคุม สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ตามพระราชบัญญัติวิชาชีพวิศวกรรม พ.ศ. 2505
เลขทะเบียน ศก/วท/พท.....549.....ตั้งแต่วันที่.....9.....ค.ศ.....34.....ถึงวันที่.....ตลอดชีพ.....และไม่อยู่ในระหว่างถูกสั่งพักหรือเพิกถอนใบ
อนุญาตฯ ตามสำเนาบัตรประจำตัวที่แนบมาพร้อมนี้ ได้รับอนุญาตให้ขึ้นทะเบียนเป็นวิศวกรตรวจสอบหม้อไอน้ำหรือหม้อต้มฯ
เลขทะเบียน.....6-60-172.....หม้อไอน้ำวันที่ 31 ธันวาคม พ.ศ. 2565

ข้าพเจ้าได้ทำการร่อนน้ำทดสอบและตรวจสอบสภาพหม้อไอน้ำของโรงงาน.....บริษัท ลานนาโปรดักต์ จำกัด.....
ที่อยู่เลขที่.....68, 68/5.....หมู่ที่.....4.....ต.รอก/ชอย.....ถนน.....ทางหลวงหมายเลข 11.....
ตำบล / แขวง.....บ้านกลาง.....อำเภอ / เขต.....เมือง.....จังหวัด.....ลำพูน.....โทรศัพท์.....0-5358-1170-5.....
ประกอบกิจการ.....แปรรูปผลิตภัณฑ์การเกษตร , กลั่นน้ำมันหอมระเหย.....ทะเบียนโรงงานเลขที่.....น.9(3)-1/2532 นนพ.....หม้อไอน้ำ พ.ศ. 25
ผู้รับใบอนุญาตประกอบกิจการโรงงานชื่อ.....นายปรีชา โกวิทยา.....จำนวนคนงาน.....200.....คน
ตรวจสอบเรียบร้อยเมื่อวันที่.....15 ธันวาคม 2562.....เวลา.....12.00.....น. โรงงานนี้มีหม้อไอน้ำทั้งหมด.....3.....เครื่อง
หม้อไอน้ำเครื่องนี้หมายเลข.....3.....ขณะตรวจ หม้อไอน้ำเครื่องอื่นสภาพ กำลังใช้งาน หยุด

ข้าพเจ้าได้ทำการตรวจสอบสภาพหม้อไอน้ำเครื่องนี้โดยการอัดน้ำ (Hydrostatic Test) ที่ความดันไม่น้อยกว่าเกณฑ์การอัดน้ำ
ทดสอบตามที่ระบุในหน้าที่ 4 ของเอกสารนี้ และขอรับรองว่าหม้อไอน้ำและอุปกรณ์ทุกส่วนของหม้อไอน้ำเป็นไปตามรายละเอียดแสดงไว้
ในหน้า 2 และ 3 ของเอกสารนี้ ข้าพเจ้าได้ทำการตรวจสอบและหรือทดสอบอย่างถูกต้องตามหลักวิศวกรรม และหม้อไอน้ำเครื่องนี้
สามารถใช้งานได้โดยปลอดภัยเป็นเวลานานไม่น้อยกว่า 1 ปี นับตั้งแต่ตรวจสอบ ที่ความดัน ซึ่งได้ปรับตั้งลิ้นนิรภัยให้ปีกระบายไอที่ความ
ดันไม่เกิน.....ก.ก./ซม.².....ข้าพเจ้าจึงลงลายมือชื่อไว้เป็นหลักฐาน



ลงชื่อ.....
(.....)
ผู้รับใบอนุญาตประกอบกิจการโรงงาน

ก่อนการตรวจสอบฯ โปรดอ่านรายละเอียดในหน้า 4 ของเอกสารนี้

หม้อไอน้ำเครื่องนี้เป็นหม้อไอน้ำ เรือ รถไฟ ถูกหุ้ม ท่อน้ำจาง ท่อไฟนอน (Package)
 คัดแปลงเตาจากหม้อไอน้ำแบบ.....อื่น ๆ (ระบุ).....ใช้งานมาแล้ว.....9.....ปี
หมายเลขเครื่อง.....02048.....สร้างโดย.....บริษัท แอล เค บอยเลอร์ อินดัสตรี จำกัด.....โดยออกแบบความดันสูงสุดไว้ที่.....10 กก./ซม.².....
อุณหภูมิ.....184 °C.....อัตราการผลิตไอ.....5,000 กก./ชม.....พื้นที่ผิวรับความร้อน.....204 ตร.ม.....
แรงม้าหม้อไอน้ำ.....320 แรงม้า.....การเคลื่อนย้ายหม้อไอน้ำ ไม่เคย เคย เมื่อ.....
จาก (ที่ใด).....
ชื่อผู้ควบคุมหม้อไอน้ำ.....นายสมเกียรติ เทพมา.....ขึ้นทะเบียนฯ เลขที่.....103-085-32257.....หม้อไอน้ำ พ.ศ.25.....
ชื่อผู้ควบคุมหม้อไอน้ำ.....นายอำนาจ ภูศรีฤทธิ.....ขึ้นทะเบียนฯ เลขที่.....103-085-32258.....หม้อไอน้ำ พ.ศ.25.....
ชื่อผู้ควบคุมหม้อไอน้ำ.....ขึ้นทะเบียนฯ เลขที่.....หม้อไอน้ำ พ.ศ.25.....

-2-

1. ตัวหม้อไอน้ำ

การต่อแผ่นเหล็กหม้อไอน้ำ เป็นแบบ เชื่อม หมุดย้ำ เปลือกหม้อไอน้ำหนา.....18 มม.....
 ฉนวนหุ้มหม้อไอน้ำ ไม่มี มี เป็นแบบ โยแก้ว Asbestos อิฐทนไฟ อื่น ๆ.....โยหิน.....
 ขนาดหม้อไอน้ำ \varnothing ...2,340 มม. ยาว...4,484 มม. ท่อไฟใหญ่ ขนาด \varnothing ยาว หนา จำนวน.....ท่อ
 ท่อไฟเล็กขนาด \varnothing ...63.5 มม. ยาว...3,836 มม. จำนวน...89...ท่อ กลับ 1
 ท่อไฟเล็กขนาด \varnothing ...63.5 มม. ยาว...3,836 มม. จำนวน...70...ท่อ กลับ 2
 ท่อไฟเล็กขนาด \varnothing ...63.5 มม. ยาว...4,484 มม. จำนวน...64...ท่อ กลับ 3
 ท่อน้ำ (สำหรับหม้อไอน้ำแบบท่อน้ำ) ขนาด \varnothing ...76.2 มม. ยาว...1,312 มม. จำนวน...7...ท่อ
 ขนาด \varnothing ...76.2 มม. ยาว...2,950 มม. จำนวน...66...ท่อ
 ขนาด \varnothing ...114.3 มม. ยาว...2,970 มม. จำนวน...2...ท่อ
 ขนาด \varnothing ...267 มม. ยาว...5,100 มม. จำนวน...1...ท่อ
 ขนาด \varnothing ...216 มม. ยาว...5,044 มม. จำนวน...2...ท่อ

ผนังเตาขนาด.....หนา.....ผนังด้านหน้า-หลัง (End Plates) หนา.....18.65 มม.

ถังพักไอ (Header or Steam Dome) ขนาด \varnothing

ช่องคนลง (Man Hole) ไม่มี มี จำนวน...1...ช่อง, ช่องมือถอด (Hand Hole) ไม่มี มี จำนวน...2...ช่อง

ช่องทำความสะอาดท่อไอน้ำ (สำหรับท่อที่ตั้งแบบท่อน้ำขวาง) ไม่มี มี จำนวน.....ช่อง

เหล็กเชื่อมโยงเป็นแบบ Stay Rod ขนาด \varnothing ...63.5 มม.....จำนวน.....8.....ชุด
 Stay Tube ขนาด \varnothing ...63.5 มม.....จำนวน.....45.....ชุด
 Gusset Stay หนา.....18 มม.....ด้านหน้า.....8.....ชุด ด้านหลัง.....4.....ชุด
 อื่น ๆจำนวน.....ชุด

2. สภาพอุปกรณ์ของหม้อไอน้ำ

2.1 ลิ้นนิรภัย (Safety Valve) มีจำนวน.....2.....ชุด เป็นแบบ

แบบถ่วงน้ำหนัก ขนาด \varnothing ระบายไอน้ำที่ความดัน.....

แบบสปริงมีคานจัด ขนาด \varnothing ...50 มม..... ระบายไอน้ำที่ความดัน.....9.5 กก./ cm^2

แบบ.....ขนาด \varnothing ระบายไอน้ำที่ความดัน.....

2.2 ระบบความดัน

ความดันใช้งานปกติ (Working Pressure).....7 กก./ cm^2

เกจวัดความดัน (Pressure Gauge) จำนวน.....1.....ชุด สเกลสูงสุดที่อ่านได้.....0-20 กก./ cm^2

สวิตช์ควบคุมความดัน (Pressure Control Switch) ไม่มี มี จำนวน.....2.....ชุด

ตั้งไว้ที่ความดัน.....8 กก./ cm^2 Diff. Pressure.....0.5 กก./ cm^2

2.3 ระบบน้ำ

หลอดแก้วและวาล์วบังคับ มีจำนวน.....2.....ชุด พร้อมท่อระบายจากวาล์วตลอดแก้วถึงระดับพื้น

เครื่องควบคุมระดับน้ำ (Water Level Control) ไม่มี มี เป็นแบบ ลูกลอย (Float Type)

Electrode อื่น ๆ (ระบุ).....จำนวน.....3.....ชุด

เครื่องสูบน้ำเข้าหม้อไอน้ำ เป็นแบบ Reciprocating Turbine อื่น ๆ.....จำนวน.....2.....ชุด

โดยใช้พลังงานจาก ไฟฟ้า ไอน้ำ อื่น ๆ.....

วาล์วกันกลับ (Check Valve) ที่ท่อน้ำเข้าหม้อไอน้ำ ขนาด \varnothing50 มม.....จำนวน.....3.....ชุด

น้ำที่เข้าหม้อไอน้ำ น้ำปะปา น้ำบาดาล น้ำบ่อ น้ำคลอง อื่น ๆ (ระบุ).....

กรรมวิธีการปรับสภาพน้ำ ไม่มี มี เป็นแบบ Softener (Resin) เติมนิรภัย อื่น ๆ (ระบุ).....

คุณสมบัติของน้ำเข้าหม้อไอน้ำ pH=.....7..... Hardness =.....10 พีพีเอ็ม.....อื่น ๆ (ถ้ามี).....

วาล์วถ่างน้ำ (Blow Down Valve) ขนาด \varnothing50 มม.....จำนวน.....4.....ชุด

2.4 ระบบการจ่ายไอน้ำ

วาล์วจ่ายไอน้ำ (Main Steam Valve) ขนาด \varnothing150 มม.....จำนวน.....1.....ชุด

วาล์วกันกลับที่ท่อจ่ายไอ (Check Valve) ขนาด \varnothing150 มม.....จำนวน.....1.....ชุด

ท่อจ่ายไอน้ำ (Steam Pipe) ขนาด \varnothing150 มม. ฉนวนหุ้มท่อจ่ายไอน้ำ ไม่มี มี เป็นแบบ.....โยหิน.....

-3-

2.5 ระบบสัญญาณเตือนภัย ไม่มี มี เป็นแบบ กระดิ่งไฟฟ้า ไซเรน อื่น ๆ (ระบุ).....

2.6 ระบบการเผาไหม้

เชื้อเพลิงที่ใช้ ฟืน แกลบ ชีเสื่อ น้ำมันดีเซล น้ำมันเตากรด..... อื่น ๆ (ระบุ) ถ่านหิน, ถ่านไม้, ถ่านอัด
 ปริมาณการใช้500 กก./ชม..... (ต่อหน่วยเวลา) มีระบบควบคุมการจ่ายเชื้อเพลิง เป็นแบบ..... อัตโนมัติ.....
 ขนาดความสามารรถ...720 กก./ชม.....การจัดการทิศทางเปลวไฟ 1 Pass 2 Pass 3 Pass 4 Pass
 ปล่องไฟขนาด \varnothing ...780 มม. สูง...30 ม.....ลมช่วยในการเผาไหม้ ธรรมชาติ พัดลมขนาด...30, 5.5, 5.5 HP.....
 สายล่อฟ้า ไม่จำเป็นต้องมี จำเป็นต้องมี (มีเหมาะสม ยังไม่มี)

2.7 ปลั๊กหลอมละลาย (Fusible Plug) ไม่มี มี จำนวนชุด

2.8 ระบบปรับปรุงประสิทธิภาพ

เครื่องอุ่นน้ำมัน (Oil Heater)	<input checked="" type="checkbox"/> ไม่มี	<input type="checkbox"/> มี เป็นแบบ.....	อุ่นถึงอุณหภูมิ.....
เครื่องอุ่นอากาศ (Air Heater)	<input checked="" type="checkbox"/> ไม่มี	<input type="checkbox"/> มี เป็นแบบ.....	อุ่นถึงอุณหภูมิ.....
เครื่องอุ่นน้ำ (Economizer)	<input checked="" type="checkbox"/> ไม่มี	<input type="checkbox"/> มี เป็นแบบ.....	อุ่นถึงอุณหภูมิ.....
การนำคอนเดนเสดกลับมาใช้	<input checked="" type="checkbox"/> ไม่มี	<input type="checkbox"/> มี เป็นแบบ.....	อุ่นถึงอุณหภูมิ.....

2.9 ภาชนะรับแรงดันไอน้ำ (Pressure Vessel) ไม่มี มี (ระบุ)

เครื่องจักรไอน้ำ ขนาด \varnothing ใต้อี (High Pressure)	.....	ขนาด ใต้อี (Low Pressure)	.....	จำนวน	.....ชุด
เครื่อง.....	จำนวน.....ชุด	ใช้ความดัน.....	<input type="checkbox"/>	มีลิ้นนรภัยตั้งความดัน.....	
เครื่อง.....	จำนวน.....ชุด	ใช้ความดัน.....	<input type="checkbox"/>	มีลิ้นนรภัยตั้งความดัน.....	
เครื่อง.....	จำนวน.....ชุด	ใช้ความดัน.....	<input type="checkbox"/>	มีลิ้นนรภัยตั้งความดัน.....	
เครื่อง.....	จำนวน.....ชุด	ใช้ความดัน.....	<input type="checkbox"/>	มีลิ้นนรภัยตั้งความดัน.....	

รายงานผลการตรวจหม้อน้ำก่อนรับรอง

ท่อไฟใหญ่	<input type="checkbox"/> เรียบร้อย	<input type="checkbox"/> บกพร่อง	ท่อไฟเล็ก	<input checked="" type="checkbox"/> เรียบร้อย	<input type="checkbox"/> บกพร่อง
ผนังด้านหน้า - หลัง	<input checked="" type="checkbox"/> เรียบร้อย	<input type="checkbox"/> บกพร่อง	ผนังเตา	<input checked="" type="checkbox"/> เรียบร้อย	<input type="checkbox"/> บกพร่อง
เหล็กยึดโครง	<input type="checkbox"/> เรียบร้อย	<input type="checkbox"/> บกพร่อง	ช่องมือถอด	<input type="checkbox"/> เรียบร้อย	<input type="checkbox"/> บกพร่อง
ห้องคนลง	<input checked="" type="checkbox"/> เรียบร้อย	<input type="checkbox"/> บกพร่อง	ท่อน้ำ	<input checked="" type="checkbox"/> เรียบร้อย	<input type="checkbox"/> บกพร่อง
เกจวัดความดัน	<input checked="" type="checkbox"/> เรียบร้อย	<input type="checkbox"/> บกพร่อง	ลิ้นนรภัย	<input checked="" type="checkbox"/> เรียบร้อย	<input type="checkbox"/> บกพร่อง
เครื่องสูบน้ำเข้าหม้อน้ำ	<input checked="" type="checkbox"/> เรียบร้อย	<input type="checkbox"/> บกพร่อง	สวิทช์ควบคุมความดัน	<input checked="" type="checkbox"/> เรียบร้อย	<input type="checkbox"/> บกพร่อง
ระบบสัญญาณเตือนภัย	<input checked="" type="checkbox"/> เรียบร้อย	<input type="checkbox"/> บกพร่อง	เครื่องควบคุมระดับน้ำ	<input checked="" type="checkbox"/> เรียบร้อย	<input type="checkbox"/> บกพร่อง
สภาพตะกอนภายในหม้อไอน้ำ	<input checked="" type="checkbox"/> ไม่มี	<input type="checkbox"/> มี	<input type="checkbox"/> มาก	<input type="checkbox"/> ปานกลาง	<input type="checkbox"/> น้อย

รายละเอียดของส่วนที่บกพร่องและอื่น ๆ

.....

ข้าพเจ้าได้ให้ผู้รับอนุญาตประกอบกิจการดำเนินการซ่อมแก้ไขจนเป็นที่เรียบร้อยแล้วโดยมีชื่อผู้รับรอง



(วิศวกรผู้ตรวจทดสอบ)



ภาคผนวก ง

ค่า Emissivity ของวัสดุชนิดต่างๆ

ค่า Emissivity ของวัสดุชนิดต่างๆ [40]

TABLE OF EMISSIVITY OF VARIOUS SURFACES

Introduction:

Emissivity is a modifying factor used in single color thermometry to achieve a correct temperature reading. Emissivity, or radiating efficiency, of most materials is function of surface condition, temperature and wavelength of measurement.

In the following table, values for the total emissivity of various surfaces, as well as spectral emissivity at a given temperature, have been tabulated. Total emissivity is defined as the resultant value when the individual emissivity factors are averaged over the total radiation spectrum being utilized.

The user may find that for the application a different emissivity setting is required than the one tabulated. This table, however, will provide the best initial setting. A more refined value should be determined experimentally.

References:

- 1) *Handbook of Chemistry and Physics*, Chemical Rubber Publishing Co., Cleveland, Ohio
- 2) *DMIC Report 177*, Battelle Memorial Institute
- 3) *Thermal Radiation Properties Survey*, Honeywell Research Center



MIKRON Vertretung Schweiz: ☐

☐ TRANSMETRA haltec GmbH ☐

Postfach 174 ☐

CH-8203 Schaffhausen ☐

Tel. 052 - 624 8626 ☐

Fax 052 - 624 8611 ☐

www.transmetra.ch

TOTAL EMISSIVITY OF VARIOUS SURFACES

MATERIAL	TEMPERATURE °C	*EMISSIVITY
Alloys		
20Ni-25Cr-55Fe, oxidized.....	200.....	0.90
.....	500.....	0.97
60Ni-12Cr-28Fe, oxidized.....	270.....	0.89
.....	560.....	0.82
80Ni-20Cr, oxidized.....	100.....	0.87
.....	600.....	0.87
.....	1300.....	0.89
Aluminum		
Polished.....	100.....	0.095
Highly Polished.....	50-500.....	0.04-0.06
Unoxidized.....	25.....	0.022
.....	100.....	0.028
.....	500.....	0.060
Oxidized.....	200.....	0.11
.....	600.....	0.19
Commercial Sheet.....	100.....	0.090
Anodized Sheet, Chromic Acid Proc.....	100.....	0.55
Heavily Oxidized.....	93-504.....	0.2-0.31
Aluminum Oxide.....	500-827.....	0.42-0.26
Asbestos		
Board.....	20.....	0.96
Cement.....	0-200.....	0.96
Cloth.....	93.....	0.90
Paper.....	0-100.....	0.95
Asphalt Ambient..... 0.90-0.98		
Oil, on polished metal		
.001" Thick.....	Ambient.....	0.27
.002" Thick.....	Ambient.....	0.46
.005" Thick.....	Ambient.....	0.72
Bismuth, Unoxidized 25..... 0.048		
.....	100.....	0.061
Brass		
Polished.....	200.....	0.03
Unoxidized.....	25.....	0.035
.....	100.....	0.035
Oxidized.....	200.....	0.61
.....	600.....	0.59
Rolled Sheet.....	20.....	0.06
Brick		
Building.....	1000.....	0.450
Red, rough, no gross irregularities.....	20.....	0.930
Grog, Brick, glazed.....	1100.....	0.750
Silica Brick.....	1000.....	0.80
.....	1100.....	0.85
Fire Brick.....	1000.....	0.750

*When range of values for temperature and emissivity are given, end points correspond and linear interpolation of emissivity is acceptable.

TOTAL EMISSIVITY OF VARIOUS SURFACES

MATERIAL	TEMPERATURE °C	*EMISSIVITY
Bronze, Polished	50	0.10
Carbon		
Filament	1000-1400	0.53
Graphite	0-3600	0.70-0.80
Lamp, Black, water glass coating	20-400	0.96
Soot applied to solid	50-1000	0.96
Soot with water glass	20-200	0.96
Candle Soot	97-271	0.952
Graphite, pressed, filed surface	250-510	0.980
Unoxidized	25	0.81
.....	100	0.81
.....	500	0.81
Carborundum 87SiC; 2.3 density	1010-1400	0.920-0.820
Ceramic		
Earthenware	20	0.90
Porcelain, Glazed	20	0.92
Refractory Black	93	0.94
Refractory White	93	0.90
Chromium		
Polished	50	0.10
.....	500-1000	0.28-0.38
Unoxidized	100	0.08
Oxidized	316	0.08
.....	482	0.18
.....	650	0.27
.....	816	0.36
.....	982	0.66
Cobalt, Unoxidized	500	0.13
.....	1000	0.23
Columbium		
Polished	1500	0.19
.....	2000	0.24
Oxidized	816	0.73
.....	927	0.70
Concrete	0-100	0.94
Concrete Tiles	1000	0.630
Copper		
Commercial, Scoured to a shine	20	0.07
Calorized	100	0.26
Calorized, oxidized	200	0.18
.....	600	0.19

*When range of values for temperature and emissivity are given, end points correspond and linear interpolation of emissivity is acceptable.

TOTAL EMISSIVITY OF VARIOUS SURFACES

MATERIAL	TEMPERATURE °C	*EMISSIVITY
Plate, heated long time, covered with thick oxide layer .....	.25	0.78
Plate, heated at 600°C	200-600	0.570
Cuprous Oxide	800-1100	0.66-0.54
Polished	50-100	0.02-.05
Oxidized .....	.50	0.6-0.7
.....	200	0.60
.....	500	0.88
Unoxidized	100	0.02
.....	Liquid	0.15
Dow Metal	232-400	0.24-0.20
Enamel, White, fused on Iron	19	0.900
Glass		
Smooth	0-200	0.95
.....	250-1000	0.87-0.72
.....	1100-1500	0.70-0.67
Fused Quartz	320	0.75
Covex D Glass	320	0.76
Nonex Glass	320	0.82
Pyrex	0-300	0.90
Gold		
Pure, highly polished	100	0.02
Carefully Polished	200-600	0.02-0.03
Unoxidized	100	0.02
.....	500	0.03
Enamel	100	0.37
Graphite	0-3600	0.70-0.80
Gypsum 0.02" thick on smooth or blackened plate .....	.20	0.93
Human Skin	36-7-37.2	0.985
Inconel		
Type X .....	.....	0.550-0.780
Type B	450-1620	0.350-0.550
Iron		
Cast		
Oxidized	200-600	0.64-0.78
Strongly Oxidized .....	.40	0.95
.....	250	0.95
Unoxidized	100	0.21
Polished	200	0.210
Newly Turned .....	.22	0.440
Turned and Heated	882-990	0.600-0.700

*When range of values for temperature and emissivity are given, end points correspond and linear interpolation of emissivity is acceptable.

TOTAL EMISSIVITY OF VARIOUS SURFACES

MATERIAL	TEMPERATURE °C	*EMISSIVITY
Liquid Unoxidized.....	--	0.29
Rusted.....	.25	0.65
Wrought, Dull.....	100	0.50
Wrought Iron, dull oxidized.....	.21-360	0.940
Wrought, highly polished.....	.38-250	0.280
Oxidized.....	100	0.74
.....	500	0.84
Unoxidized.....	1200	0.89
Plate, pickled, then rusted red.....	.20	0.610
Plate, completely rusted.....	.19	0.690
Smooth oxidized electrolytic iron.....	127-527	0.780-0.820
Iron Oxide.....	500-1200	0.85-0.89
Rough-ingot iron.....	927-1116	0.870-0.950
Cast Plate, oxidized, smooth.....	.23	0.8
Cast Plate, oxidized, rough.....	.23	0.82
Molten Pure Iron.....	1516-1771	0.420-0.450
Molten Armco Iron.....	1521-1689	0.400-0.410
Lead		
Pure (99.96%) Unoxidized.....	127-227	0.057-0.075
Oxidized.....	200	0.63
Oxidized, Gray.....	.24	0.280
Magnesium		
Magnesium Oxide.....	227-826	0.550-0.200
Magnesium Oxide.....	900-1704	0.200
Magnesite		
Refractory Brick.....	1000	0.380
Marble, Light Grey Polished.....	0-100	0.903
Mercury, Unoxidized.....	0	0.09
.....	.25	0.10
.....	100	0.12
Molybdenum		
Polished.....	538	0.05
.....	1482	0.17
Oxidized.....	538	0.82
Unoxidized.....	1000	0.13
.....	1500	0.19
.....	2000	0.24
Filament.....	827-2593	0.096-0.202

*When range of values for temperature and emissivity are given, end points correspond and linear interpolation of emissivity is acceptable.

TOTAL EMISSIVITY OF VARIOUS SURFACES

MATERIAL	TEMPERATURE °C	*EMISSIVITY
Monel Metal, Oxidized	200.....	0.43
.....	600.....	0.43
Nichrome Wire		
Clean	50.....	0.65
.....	500-1000.....	0.71-0.79
Oxidized.....	50-500.....	0.95-0.98
Nickel		
Polished.....	low.....	0.12
.....	1204.....	0.32
Oxidized.....	200.....	0.37
.....	871.....	0.85
.....	1200.....	0.85
Unoxidized.....	25.....	0.045
.....	100.....	0.06
.....	500.....	0.12
.....	1000.....	0.19
Electroplated, Polished.....	23.....	0.045
Electroplated, not Polished.....	20.....	0.110
Wire.....	187-1007.....	0.096-0.186
Plate, oxidized by heating at 600°C.....	200-600.....	0.370-0.480
Nickel Oxide.....	650-1254.....	0.590-0.860
Chromnickel.....	52-1034.....	0.640-0.760
Nickel-Silver Polished.....	100.....	0.135
Oak, Planed	21.....	0.900
Oil Layers on Aluminum Foil (Linseed Oil)		
Aluminum Foil.....	100.....	0.087
+1, 2 coats oil.....	100.....	0.561-0.574
Paint, Lacquers, Varnishes		
Alum. Paint	0-100.....	0.55
Bronze Paint	0-100.....	0.80
Black Glass Paint.....	0-100.....	0.90
White Lacquer.....	0-100.....	0.95
Green Paint.....	0-100.....	0.95
Gray Paint.....	0-100.....	0.95
Lamp Black.....	0-100.....	0.95
Gold Enamel.....	0-100.....	0.37
Snow White Enamel varnish on rough iron plate.....	23.....	0.906
Black Shiny Lacquer, sprayed on iron.....	24.....	0.875
Black Shiny shellac on tinned iron sheet.....	21.....	0.821
Black Matte shellac	77-146.....	0.910
Black on White Lacquer.....	38-93.....	0.800-0.950
Flat Black Lacquer	38-93.....	0.960-0.980
Oil Paints, 16 diff. (all colors).....	100.....	0.920-0.960

*When range of values for temperature and emissivity are given, end points correspond and linear interpolation of emissivity is acceptable.

TOTAL EMISSIVITY OF VARIOUS SURFACES

MATERIAL	TEMPERATURE °C	*EMISSIVITY
Aluminum Paints & Lacquers		
10% A1 22% lacquer body, on rough or smooth surface.....	100.....	0.520
Other A1 paints, varying age and Al content.....	100.....	0.270-0.670
A1 Lacquer, Varnish binder on rough plate.....	.21.....	0.390
A1 Paint after heating to 326°C.....	150-316.....	0.350
Radiator Paint: White, Cream, Bleach	100.....	0.790, 0.770, 0.840
Radiator Paint, bronze.....	100.....	0.510
Lacquer coatings, 0.001-0.015" thick on Alum. alloys.....	38-150.....	0.870-0.970
3M Nextel101-C10.....	0-300.....	.98
Mikron High Temp Test Paint (Spirex SP102).....	Ambient-650.....	0.999
Clear Silicone Vehicle Coating 0.001-0.150" thick:		
On mild steels.....	260.....	0.660
On stainless steels 316, 301, 347.....	260.....	0.680, 0.750, 0.750
On Dow Metal.....	260.....	0.740
On Al Alloys, 24ST, 75ST.....	260.....	0.770, 0.820
Aluminum Paint with silicone vehicle paint on Inconel.....	260.....	0.290
Dull Black Varnish.....	40-100.....	0.80-0.95
Glossy Black Varnish sprayed on iron.....	20.....	0.87
.....	40.....	0.96-0.98
Paper, Any Color.....	0-100.....	0.94
Thinipasted on Tinned or Blackened Plate.....	19.....	0.920-0.940
Plaster.....	0-200.....	0.91
Plastics, Opaque any color.....	25.....	0.950
Platinum		
Cleaned Polished.....	200-600.....	0.05-0.10
Filament.....	27-1227.....	0.036-0.192
Unoxidized.....	25.....	0.037
.....	100.....	0.047
.....	500.....	0.096
.....	1000.....	0.152
.....	1500.....	0.191
Wire.....	50-200.....	0.06-0.07
.....	500-1000.....	0.10-0.16

*When range of values for temperature and emissivity are given, end points correspond and linear interpolation of emissivity is acceptable.

TOTAL EMISSIVITY OF VARIOUS SURFACES

MATERIAL	TEMPERATURE °C	*EMISSIVITY
.....	1400.....	0.18
Propellant:		
Liquid rocket engine.....	600-4500.....	0.900
Quartz		
Rough, fused.....	21.....	0.930
Glass, 1.98mm Thick.....	282-838.....	0.900-0.410
Glass, 6.88mm Thick.....	300-838.....	0.930-0.470
Opaque.....	300-838.....	0.920-0.680
Roofing Paper.....	21.....	0.910
Silica (98 Si O ₂ , Fe-free) effect of grain size, microns		
10 microns.....	1010-1566.....	0.420-0.330
70-600 microns.....	1010-1566.....	0.620-0.460
Silver		
Polished.....	100.....	0.052
Cleaned Polished.....	200-600.....	0.02-0.03
Unoxidized.....	100.....	0.02
.....	500.....	0.035
Stainless Steel 18-8		
Buffed.....	20.....	0.160
Polished.....	93.....	0.16
.....	371.....	0.19
Oxidized.....	93-371.....	0.83
Stainless Steel 303.....	316.....	0.74
Oxidized.....	1093.....	0.87
Stainless Steel 304 (8Cr 18Ni) light silvery, rough brown, after heating.....	216-490.....	0.440-0.360
After 42 hours of heating at 527°C.....	216-527.....	0.620-0.730
Stainless Steel 310 (25Cr, 20Ni) Brown, splotched, oxidized from furnace service.....	216-527.....	0.900-0.970
Stainless Steel		
Allegheny metal No. 4, polished.....	100.....	0.130
Allegheny metal No. 66, polished.....	100.....	0.110
Steel		
Alloyed (8%Ni, 18%Cr).....	500.....	0.35
Aluminized.....	50-500.....	0.79

*When range of values for temperature and emissivity are given, end points correspond and linear interpolation of emissivity is acceptable.

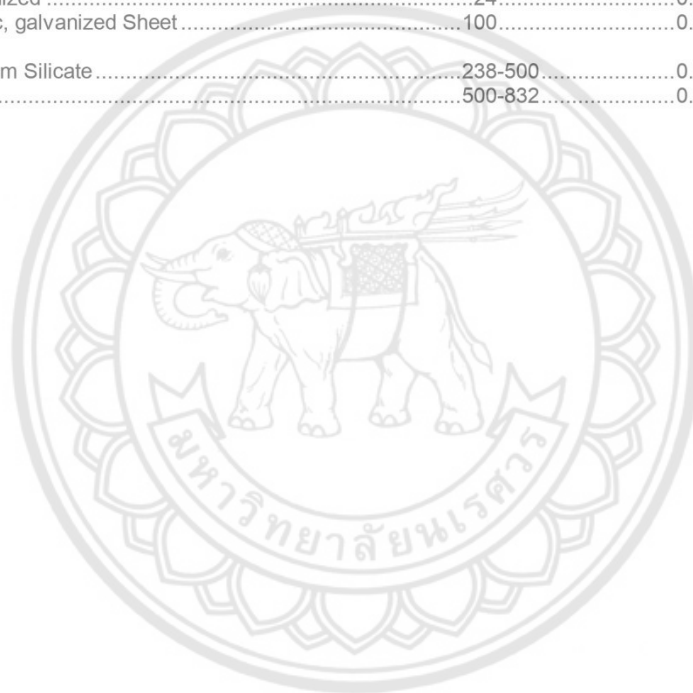
TOTAL EMISSIVITY OF VARIOUS SURFACES

MATERIAL	TEMPERATURE °C	*EMISSIVITY
Dull Nickel Plated	20.....	0.11
Flat, Rough Surface	50.....	0.95-0.98
Cast, Polished	750-1050.....	0.52-0.56
Calorized, Oxidized	200.....	0.52
.....	600.....	0.57
Sheet Steel, Ground.....	938-1100.....	0.550-0.610
Sheet Steel, Rolled	21.....	0.660
Sheet Steel, Strong, Rough Oxide Layer.....	24.....	0.800
Sheet with Shiny layer of oxide.....	20.....	0.82
Oxidized.....	25.....	0.80
.....	200.....	0.79
.....	600.....	0.79
Unoxidized.....	100.....	0.08
Molten Steel.....	1500-1650.....	0.420-0.530
.....	1520-1650.....	0.430-0.40
Molten Mild Steel	1600-1800.....	0.280
Molten Steel, various with 0.25-1.2% (slightly oxidized surfaces.).....	1560-1710.....	0.270-0.390
Molten Steel, unoxidized	Liquid.....	0.280
Steel Plate, Rough	40.....	0.94
.....	400.....	0.97
.....	600.....	0.57
Tantalum		
Unoxidized	1500.....	0.21
.....	2000.....	0.26
Filament.....	1327-3000.....	0.190-0.310
Thorium Oxide	277-500.....	0.580-0.360
Tin		
Unoxidized	25.....	0.05
Commercial tin-plated sheet iron	100.....	0.070-0.080
Tungsten		
Filament, aged	27-3316.....	0.320-0.350
Filament.....	3316.....	0.390
Unoxidized	25.....	0.024
.....	100.....	0.032
.....	500.....	0.071
.....	1000.....	0.15
.....	1500.....	0.23
.....	2000.....	0.28
Turbojet Engine Operating.....	350-600.....	0.900
Water	Ambient.....	0.96
Wood		
Spruce, sanded	93.....	0.82
Oak, planed	0-200.....	0.89

*When range of values for temperature and emissivity are given, end points correspond and linear interpolation of emissivity is acceptable.

TOTAL EMISSIVITY OF VARIOUS SURFACES

MATERIAL	TEMPERATURE °C	*EMISSIVITY
Zinc		
Highly Polished	200-300	0.04-0.05
Unoxidized	300	0.05
Oxidized by heating at 399°C	399	0.110
Galvanized Sheet Iron, fairly bright	28	0.230
Galvanized Sheet Iron, gray oxidized	24	0.280
Zinc, galvanized Sheet	100	0.210
Zirconium Silicate	238-500	0.920-0.800
.....	500-832	0.800-0.520



*When range of values for temperature and emissivity are given, end points correspond and linear interpolation of emissivity is acceptable.