



การประเมินสมรรถนะทางความร้อนของระบบไอน้ำของหม้อน้ำเชื้อเพลิงแข็ง

บริษัท ซีพีเอฟ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) จังหวัดพิษณุโลก

Thermal Performance Assessment of The Steam System of a Solid Fuel

Boiler CPF (Thailand) Public Company Limited, Phitsanulok Province



นางสาวภัสสร

ภาแก้ว

นางสาวโยชิตา

สุขติเวชพงศ์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีการศึกษา 2562



ใบรับรองโครงการงาน

หัวข้อโครงการ : การประเมินสมรรถนะทางความร้อนของระบบไอน้ำของหม้อน้ำเชื้อเพลิง
 แข็ง บริษัท ซีพีเอฟ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) จังหวัดพิษณุโลก
 (Thermal Performance Assessment of The Steam System of a
 Solid Fuel Boiler CPF (Thailand) Public Company Limited,
 Phitsanulok Province)

ผู้ดำเนินโครงการ : นางสาวภััสสร เกาแก้ว รหัสนิต 59364066
 นางสาวโยษิตา สุขติเวชพงศ์ รหัสนิต 59364400

อาจารย์ที่ปรึกษา : ผศ.ดร. อาวุธ ลภีรัตนากุล
 ภาควิชา : วิศวกรรมเครื่องกล
 ปีการศึกษา : 2562

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้โครงการวิจัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ
 การศึกษาตามหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะกรรมการสอบโครงการงาน

.....
 (ผศ.ดร. อาวุธ ลภีรัตนากุล)

.....
 (ผศ.ดร. สิทธิโชค ผูกพันธุ์)

.....
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชูพงศ์ ช่วยเพ็ญ)

หัวข้อโครงการ : การประเมินสมรรถนะทางความร้อนของระบบไอน้ำของหม้อน้ำเชื้อเพลิง
แข็ง บริษัท ซีพีเอฟ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) จังหวัดพิษณุโลก
(Thermal Performance Assessment of The Steam System of a
Solid Fuel Boiler CPF (Thailand) Public Company Limited,
Phitsanulok Province)

ผู้ดำเนินโครงการ : นางสาวภัสสร เกาแก้ว รหัสนิสิต 59364066
นางสาวโยชิตา สุขติเวชพงศ์ รหัสนิสิต 59364400

อาจารย์ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.อาวุธ ลภีรัตนากุล
ภาควิชา : วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา : 2562

บทคัดย่อ

ปฏิญานินพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจวัดและประเมินสมรรถนะทางความร้อนของระบบไอน้ำของทางโรงงาน โดยแยกพิจารณากระบวนการไอน้ำได้ออกเป็น 4 ส่วน คือ ส่วนการผลิตไอน้ำ ส่วนระบบท่อส่งจ่ายไอน้ำ ส่วนอุปกรณ์ใช้ไอน้ำ และส่วนการนำความร้อนกลับ รวมถึงได้ทำการนำเสนอมาตรการประหยัดพลังงานในระบบไอน้ำเพื่อลดต้นทุนในการใช้งานระบบไอน้ำของทางโรงงาน โครงการนี้ทำการเลือกบริษัท ซีพีเอฟ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) จังหวัดพิษณุโลก เป็นกรณีศึกษา โดยส่วนแรก คือ ส่วนการผลิตไอน้ำ เป็นการหาประสิทธิภาพหม้อน้ำทางอ้อมอ้างอิงตามมาตรฐาน Japanese : JIS B8222: 1993 ส่วนที่สอง คือ ส่วนระบบท่อส่งจ่ายไอน้ำ ทำการตรวจสอบสภาพฉนวนท่อส่งจ่ายไอน้ำและการรั่วไหลของท่อส่งจ่ายไอน้ำ ส่วนที่สาม คือ ส่วนอุปกรณ์ใช้ไอน้ำ ในโครงการไม่สามารถตรวจวัดสมรรถนะของอุปกรณ์ใช้ไอน้ำได้ เนื่องจากทางโรงงานไม่มีการติดตั้งเครื่องวัดอัตราการไหลของไอน้ำในแต่ละอุปกรณ์ ไม่มีการวัดอุณหภูมิและความดันของไอน้ำที่ไหลเข้าออกอุปกรณ์ใช้ไอน้ำ ทำให้ไม่ทราบสถานะของไอน้ำ และในส่วนสุดท้าย ส่วนของการนำความร้อนกลับ ทำการตรวจวัดการรั่วของก๊อบดักไอน้ำด้วยกล้องถ่ายภาพอินฟราเรด จากผลการตรวจวัดพบว่า ในส่วนการผลิตไอน้ำ หม้อน้ำมีประสิทธิภาพ 81.86% และ 69.75% อ้างอิงตาม LHV และ HHV ตามลำดับ มีความร้อนสูญเสียผ่านผนังหม้อน้ำรวม 9.35 กิโลวัตต์ ส่วนระบบส่งจ่ายไอน้ำ สภาพฉนวนท่อส่งจ่ายไอน้ำอยู่ในสภาพดีและมีการรั่วไหลของท่อส่งจ่ายไอน้ำบางส่วน และส่วนการนำความร้อนกลับพบว่า ในกระบวนการตรวจพบกับดักไอน้ำรั่วจำนวน 8 ตัว จากการตรวจวัดระบบไอน้ำของทางโรงงานพบว่า มีศักยภาพการประหยัดพลังงานประกอบด้วย มาตรการการปรับแต่งการเผาไหม้

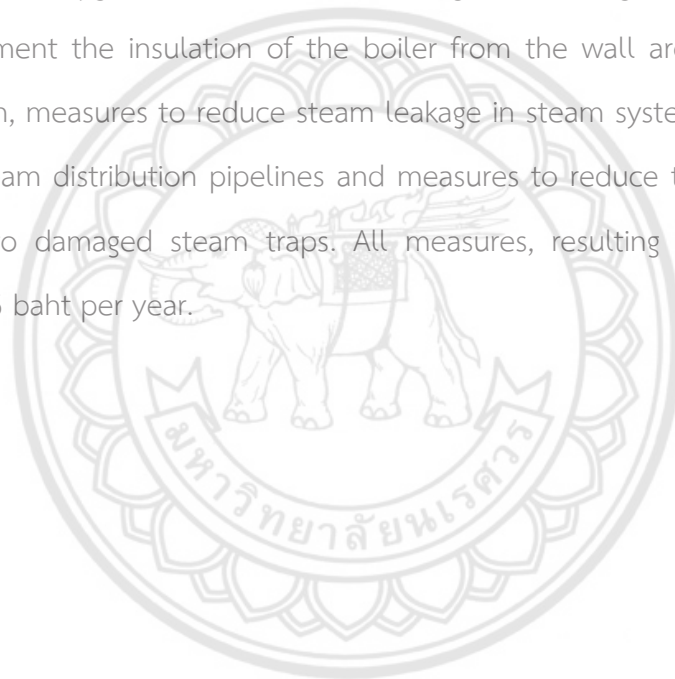
จากปริมาณก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เกินมาตรฐาน มาตรการปรับปรุงฉนวนหม้อ
 น้ำจากฉนวนบริเวณผนังรอบหม้อน้ำบางส่วนเสื่อมสภาพ มาตรการลดการรั่วไหลของไอน้ำในระบบไอน้ำ
 น้ำจากการรั่วไหลของท่อส่งจ่ายไอน้ำบางส่วน และมาตรการลดการรั่วไหลของก๊าดักไอน้ำจากการที่มี
 ก๊าดักไอน้ำมีการชำรุด มาตรการทั้งหมด ทำให้เกิดผลประหยัดจริงรวม 1,393,798.76 บาท/ปี

Project Title : Thermal Performance Assessment of The Steam System of
 a Solid Fuel Boiler CPF (Thailand) Public Company Limited,
 Phitsanulok Province
 Name : Miss Phassorn Phackaew
 Miss Yosita Suktiwetchapong
 Project Advisor : Asst.Prof.Dr. Arwut Lapirattanakun
 Academic Year : 2019

Abstract

The objective of this thesis is to measure and evaluate the thermal performance of the steam system of the factory. By considering the steam system can be divided into 4 parts, which is generation, distribution, end use and recovery. As well as presenting energy saving measures in the steam system in order to reduce the cost of using the steam system of the factory. This project selected CPF (Thailand) Public Company Limited, Phitsanulok Province is a case study. The first part is the generation. It is an indirect boiler for finding reference to the Japanese standard: JIS B8222 : 1993. The second part is the distribution. Check the condition of the steam pipe insulation and the leak of the steam pipe. The third part is the end use. In the project, unable to measure the performance of steam equipment since the factory doesn't have a steam flow meter installed in each device. There is no measurement of the temperature and pressure of the steam coming in and out, causing to not know the condition of steam. And in the last part is the recovery. Measure the leak of steam

traps using infrared cameras. From the measurement results, it was found that. In the generation. The boiler is 81.86% and 69.75% efficient, according to LHV and HHV respectively. The heat loss through the boiler wall is 9.35 kilowatts. In the distribution. The insulation of the steam distribution pipe is good condition and there is some leakage of the steam distribution pipe. In the recovery. It was found that, in the process of detecting 8 steam traps is leakage. After inspecting the steam system of the factory, it found that it has the potential to save energy. Such as combustion adjustment measures from oxygen and carbon monoxide gas exceeding the standard, measures to improvement the insulation of the boiler from the wall around the boiler part deterioration, measures to reduce steam leakage in steam systems from the leakage of some steam distribution pipelines and measures to reduce the leakage of steam traps due to damaged steam traps. All measures, resulting in total real savings 1,393,798.76 baht per year.



กิตติกรรมประกาศ

โครงการการประเมินสมรรถนะระบบไอน้ำของหมอน้ำเชื้อเพลิงแข็ง ฉบับนี้เสร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ทางคณะผู้ดำเนินงาน ต้องขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. อาวุธ ลภีรัตนากุล ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการที่ให้ความรู้ คำปรึกษา และชี้แนะแนวทางการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในระหว่างการดำเนินโครงการ ตลอดจนติดตามประเมินผลการดำเนินโครงการมาโดยตลอด ด้วยความเอาใจใส่ทุกขั้นตอนเพื่อให้เขียนโครงการฉบับนี้ออกมาสมบูรณ์มากที่สุด ทางคณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณท่านอาจารย์เป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณกรรมการ ได้แก่ ผศ.ดร. สิทธิโชค ผูกพันธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชูพงศ์ ช่วยเพ็ญ ที่ให้ความรู้ คำแนะนำ และแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ของโครงการแก่ผู้ดำเนินงาน



นางสาวภัสสร เภาแก้ว

นางสาวโยชิตา สุขติเวชพงศ์

สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองโครงการ	ก
บทคัดย่อ	ข
Abstract	ค
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ฎ
สารบัญรูปภาพ	ฐ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	4
1.3 ขอบเขตของโครงการ	4
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	5
1.5 แผนการดำเนินงาน	7
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	8
1.7 รายละเอียดงบประมาณตลอดโครงการ	8
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี	9
2.1 พื้นฐานของหม้อน้ำ	9
2.2.1 ประเภทของหม้อน้ำ	9
2.2 พื้นฐานของระบบไอน้ำ	12

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.3 การประเมินสมรรถนะด้านพลังงานของระบบไอน้ำทั้ง 4 ส่วน	12
2.3.1 การประเมินสมรรถนะด้านพลังงานส่วนของการผลิตหม้อน้ำ	12
2.3.2 การประเมินสมรรถนะด้านพลังงานส่วนจากระบบส่งจ่ายไอน้ำ	17
2.3.3 การประเมินสมรรถนะด้านพลังงานส่วนของอุปกรณ์ใช้ไอน้ำ	21
2.3.4 การประเมินสมรรถนะด้านพลังงานส่วนจากระบบการนำความร้อนกลับ	22
2.4 หลักการถ่ายเทความร้อน (Principle of heat transfer)	27
2.4.1 การนำความร้อน (Conduction)	27
2.4.2 การพาความร้อน (Convection)	28
2.4.3 การแผ่รังสีความร้อน (Radiation)	29
บทที่ 3 วิธีดำเนินงาน	32
3.1 ข้อมูลเบื้องต้นของโรงงาน	32
3.2 ข้อมูลเบื้องต้นของกระบวนการผลิต	33
3.3 ข้อมูลเบื้องต้นของระบบผลิตไอน้ำ	34
3.3.1 หม้อน้ำ	35
3.3.2 อุปกรณ์ดักจับขี้เถ้าลอย (Cyclone)	39
3.3.3 ปล่องระบายแก๊สไอเสีย	39
3.4 ข้อมูลเบื้องต้นของอุปกรณ์การใช้ไอน้ำ	40
3.4.1 อุปกรณ์ใช้ไอน้ำส่วนที่ 1	40
3.4.2 อุปกรณ์ใช้ไอน้ำส่วนที่ 2	40

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.5 ข้อมูลเบื้องต้นของกักตักไอน้ำที่มีปัญหา	41
3.6 อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัด	41
3.7 ขั้นตอนในการตรวจประเมินประสิทธิภาพและมาตรการประหยัดพลังงาน ในระบบไอน้ำ	43
3.7.1 ขั้นตอนการตรวจวัดส่วนการผลิตไอน้ำ	44
3.7.2 ขั้นตอนการตรวจวัดส่วนระบบท่อส่งจ่ายไอน้ำ	49
3.7.3 ขั้นตอนการตรวจวัดส่วนของอุปกรณ์ใช้ไอน้ำ	50
3.7.4 ขั้นตอนการตรวจวัดส่วนของการนำความร้อนกลับ	50
บทที่ 4 วิเคราะห์ผลการดำเนินงาน	52
4.1 การสำรวจเชิงลึกส่วนการผลิตไอน้ำ	53
4.1.1 การตรวจวัดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงในหม้อน้ำ	53
4.1.2 การตรวจวัดความดันไอน้ำที่ใช้งาน	54
4.1.3 การตรวจวัดปริมาณการผลิตไอน้ำที่หม้อน้ำผลิตได้ต่อชั่วโมง	55
4.1.4 การตรวจวัดก๊าซไอเสียของหม้อน้ำเพื่อดูพฤติกรรมกรมการเผาไหม้	55
4.1.5 การตรวจวัดคุณภาพน้ำป้อนและน้ำโบลว์ดาวน์	58
4.1.6 การตรวจวัดอุณหภูมิหม้อน้ำป้อน	60
4.1.7 การตรวจวัดอัตราการโบลว์ดาวน์	61
4.1.8 การตรวจวัดสภาพฉนวนหม้อน้ำ	61
4.1.9 การตรวจวัดประสิทธิภาพหม้อน้ำ	69

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.2 การสำรวจเชิงลึกส่วนของระบบท่อส่งจ่ายไอน้ำ	70
4.2.1 การตรวจวัดสภาพฉนวนท่อส่งจ่ายไอน้ำ	70
4.2.2 การตรวจวัดการรั่วไหลของท่อส่งจ่ายไอน้ำ	61
4.3 การสำรวจเชิงลึกส่วนของอุปกรณ์ใช้ไอน้ำ	72
4.4 การสำรวจเชิงลึกส่วนของการนำความร้อนกลับ	72
4.4.1 การตรวจวัดการรั่วไหลของกักเก็บไอน้ำ	72
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงาน	75
5.1 การสำรวจเชิงลึกส่วนการผลิตไอน้ำ	76
5.1.1 มาตรการปรับแต่งการเผาไหม้ของหม้อน้ำ	76
5.1.2 มาตรการปรับปรุงฉนวนหม้อน้ำ	77
5.2 การดำเนินมาตรการส่วนของระบบส่งจ่ายไอน้ำ	78
5.2.1 มาตรการลดการรั่วไหลของไอน้ำในระบบส่งจ่ายไอน้ำ	78
5.3 การดำเนินมาตรการส่วนของอุปกรณ์ใช้ไอน้ำ	79
5.4 การดำเนินมาตรการส่วนของการนำความร้อนกลับ	79
5.4.1 มาตรการลดการรั่วของไอน้ำผ่านกักเก็บไอน้ำ	79
5.5 ผลการตรวจติดตามการดำเนินมาตรการประหยัดพลังงานในระบบไอน้ำ	80
5.6 สรุปผลของโครงการ	81
เอกสารอ้างอิง	82
ภาคผนวก	84

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ก Emissivity of Various Surfaces	85
ภาคผนวก ข การใช้โปรแกรมที่เกี่ยวข้อง	87
ภาคผนวก ค การคำนวณ	97



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สมการสำหรับการพาความร้อนอิสระ	29
ตารางที่ 3.1 ข้อมูลพื้นฐานของอุปกรณ์ผลิตความร้อน	34
ตารางที่ 3.2 ตารางแสดงข้อมูลกับดักไอน้ำที่ชำรุดในโรงงาน	41
ตารางที่ 3.3 รายการอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัด	41
ตารางที่ 3.3 รายการอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัด (ต่อ)	42
ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบเชื้อเพลิง (กรณีมาตรฐานแห่ง)	53
ตารางที่ 4.2 ตำแหน่งของความดันไอน้ำที่ใช้งาน	54
ตารางที่ 4.3 ผลการตรวจวัดก๊าซไอเสีย	57
ตารางที่ 4.4 ผลการตรวจวัดค่าน้ำ	60
ตารางที่ 4.5 อัตราการโบล์ควานของหม้อน้ำ	61
ตารางที่ 4.6 ผลประเมินการสูญเสียความร้อนที่ผนังของหม้อน้ำ	68
ตารางที่ 4.7 การเปรียบเทียบการคำนวณอัตราการสูญเสียความร้อนผ่านพื้นผิวหม้อน้ำ จากการคำนวณและโปรแกรม 3E Plus	69
ตารางที่ 4.8 ข้อมูลแสดงการคำนวณประสิทธิภาพหม้อน้ำ	70
ตารางที่ 4.9 ผลประเมินการรั่วไหลไอน้ำที่ท่อส่งจ่าย	72
ตารางที่ 4.10 ผลประเมินการรั่วไหลของกับดักไอน้ำ	73
ตารางที่ 4.11 กับดักไอน้ำที่มีการชำรุด	73
ตารางที่ 5.1 ตารางสรุปศักยภาพและการดำเนินมาตรการสำหรับระบบไอน้ำของโรงงาน	75
ตารางที่ 5.2 ประสิทธิภาพหม้อน้ำ (มาตรการปรับแต่งการเผาไหม้)	76

สารบัญตาราง(ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ 5.3 ผลประหยัดจากการดำเนินมาตรการปรับแต่งการเผาไหม้ของหม้อน้ำ	77
ตารางที่ 5.4 ผลประหยัดจากการดำเนินมาตรการปรับปรุงฉนวนหม้อน้ำ	78
ตารางที่ 5.5 ผลประหยัดจากการดำเนินมาตรการลดการรั่วไหลของไอน้ำในระบบไอน้ำ	79
ตารางที่ 5.6 ผลประหยัดจากการดำเนินมาตรการลดการรั่วของไอน้ำผ่านก๊อบดักไอน้ำ	80
ตารางที่ 5.7 ตารางสรุปผลประหยัดจากการดำเนินมาตรการระบบไอน้ำของโรงงาน	80



สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 ระบบไอน้ำ	3
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของหม้อน้ำแบบท่อไฟ	10
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของหม้อน้ำแบบท่อน้ำ	11
รูปที่ 2.3 หม้อน้ำแบบผสม กรณีใช้เชื้อเพลิงแข็ง	11
รูปที่ 2.4 องค์ประกอบของระบบไอน้ำและการทำงานของหม้อน้ำ	12
รูปที่ 2.5 แผนผังการประเมินประสิทธิภาพหม้อน้ำด้วยวิธีทางอ้อม	13
รูปที่ 2.6 ระบบส่งจ่ายไอน้ำ (Steam distribution) เส้นปะวงรีสีเขียว	18
รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการรั่วไหลและความดันสมบูรณ์ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางออริฟิตต่างกันตามสมการNapier's choke flow	19
รูปที่ 2.8 Hydraulic diameter	19
รูปที่ 2.9 ตัวอย่างโปรแกรม 3E Plus	21
รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันคอนเดนเสทและความร้อนที่สะสมคอนเดนเสทเมื่อเทียบกับความร้อนที่สะสมในไอน้ำอิมตัวที่ความดันต่าง ๆ	23
รูปที่ 2.11 ไอน้ำแฟลชจากคอนเดนเสทหรือโบลว์ดาวน์	24
รูปที่ 2.12 ลักษณะการทำงานของกักไอน้ำแบบปกติ	26
รูปที่ 2.13 ลักษณะการทำงานของกักไอน้ำที่มีการรั่วไหลของไอน้ำความเร็วสูง	26
รูปที่ 2.14 การใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนในการประเมินการรั่วไหล	26
รูปที่ 2.15 การแผ่รังสีที่ผิว (ก) และ การแผ่รังสีระหว่างที่ผิวและสิ่งแวดล้อม (ข)	30
รูปที่ 3.1 ภาพถ่ายด้านหน้าโรงงาน	32
รูปที่ 3.2 วัตถุดิบหลักที่ใช้ในการผลิตอาหารสัตว์	33

สารบัญรูปรูปภาพ(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.3 แผนผังกระบวนการผลิตอาหารสัตว์	34
รูปที่ 3.4 หม้อน้ำที่ 1 ผลิตโดย GETABEC ขนาด 8 ton/hr	35
รูปที่ 3.5 แสดงเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้ คือ ไม้สับ	35
รูปที่ 3.6 แสดงตำแหน่งการจ่ายอากาศ บริเวณเหนือตะกรับและบริเวณใต้ตะกรับ	36
รูปที่ 3.7 แสดงตำแหน่งสายพานลำเลียงขี้เถ้าหนัก	36
รูปที่ 3.8 ถังพักไอน้ำรวม	37
รูปที่ 3.9 ถังพักไอน้ำหมายเลข 1	37
รูปที่ 3.10 ถังพักไอน้ำหมายเลข 2	38
รูปที่ 3.11 ระบบไอน้ำที่ผลิตจากหม้อน้ำ	38
รูปที่ 3.12 อุปกรณ์ดักจับขี้เถ้าลอย	39
รูปที่ 3.13 ที่ทิ้งขี้เถ้าลอยของอุปกรณ์ดักจับขี้เถ้าลอย	39
รูปที่ 3.14 ปล่องระบายแก๊สไอเสีย	39
รูปที่ 3.15 เครื่องอัดเม็ดอาหารสัตว์	40
รูปที่ 3.16 Extruder (เครื่องรีดอาหารสัตว์ให้เป็นแท่ง)	40
รูปที่ 3.17 แผนผังขั้นตอนในการตรวจประเมินประสิทธิภาพในระบบผลิตไอน้ำ	43
รูปที่ 3.18 กระบวนการตรวจวัดส่วนการผลิตไอน้ำ	44
รูปที่ 3.19 ตารางบันทึกข้อมูลระบบไอน้ำ	44
รูปที่ 3.20 หน้าจอแสดงผลการทำงานของ Boiler	45
รูปที่ 3.21 ตารางบันทึกข้อมูลการควบคุมหม้อน้ำรายชั่วโมง	45

สารบัญรูปรูปภาพ(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.22 การเก็บข้อมูลการตรวจวัดก๊าซไอเสียของหม้อน้ำ	46
รูปที่ 3.23 การตรวจวัดค่าPH Conductivity และTDS	46
รูปที่ 3.24 หน้าจอแสดงอุณหภูมิที่เกี่ยวข้องกับ Boiler	47
รูปที่ 3.25 ตัวอย่างการวัดอุณหภูมิผิววัสดุหม้อน้ำ	48
รูปที่ 3.26 ตัวอย่างโปรแกรม 3E Plus	48
รูปที่ 3.27 กระบวนการตรวจวัดระบบท่อส่งจ่ายไอน้ำ	49
รูปที่ 3.28 สภาพฉนวนท่อส่งจ่ายไอน้ำ	49
รูปที่ 3.29 บริเวณท่อส่งจ่ายไอน้ำที่การรั่วไหล	50
รูปที่ 3.30 กระบวนการตรวจวัดส่วนการนำความร้อนกลับ	51
รูปที่ 3.31 ภาพจากกล้องถ่ายภาพความร้อนแบบอินฟราเรด	51
รูปที่ 4.1 ส่วนประกอบระบบไอน้ำ (U.S. Department of Energy)	52
รูปที่ 4.2 ตารางบันทึกข้อมูลการควบคุมหม้อน้ำรายชั่วโมง	54
รูปที่ 4.3 แสดงมิเตอร์วัดอัตราการไหลน้ำป้อน	55
รูปที่ 4.4 การติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดก๊าซไอเสีย	56
รูปที่ 4.5 ผลการตรวจวัดก๊าซไอเสียของหม้อน้ำ	56
รูปที่ 4.6 การตรวจวัดน้ำ Blowdown	59
รูปที่ 4.7 การตรวจวัดน้ำ Feed water	59
รูปที่ 4.8 Economizer (ซ้าย) และ ถังพักอุณหภูมิต่ำ (ขวา)	60
รูปที่ 4.9 เกจวัดอุณหภูมิน้ำป้อนก่อนเข้าสู่หม้อน้ำ	60

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.10 อุณหภูมิผนังด้านหน้าห้องเผาไหม้	62
รูปที่ 4.11 อุณหภูมิผนังด้านข้างห้องเผาไหม้	62
รูปที่ 4.12 อุณหภูมิผนังด้านหลังห้องเผาไหม้	62
รูปที่ 4.13 อุณหภูมิผนังด้านหน้าหม้อน้ำ	62
รูปที่ 4.14 อุณหภูมิผนังด้านข้างหม้อน้ำ	63
รูปที่ 4.15 อุณหภูมิผนังด้านหลังหม้อน้ำ	63
รูปที่ 4.16 ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิ ด้วยโปรแกรม Testo IR Software	63
รูปที่ 4.17 ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิ ด้วยโปรแกรม Testo IR Software	65
รูปที่ 4.18 ตัวอย่างโปรแกรม 3E-PLUS	66
รูปที่ 4.19 การประเมินการสูญเสียความร้อนที่ผนังด้านหน้าห้องเผาไหม้ จากโปรแกรม 3E-PLUS	66
รูปที่ 4.20 การประเมินการสูญเสียความร้อนที่ผนังด้านข้างห้องเผาไหม้ จากโปรแกรม 3E-PLUS	66
รูปที่ 4.21 การประเมินการสูญเสียความร้อนที่ผนังด้านหลังห้องเผาไหม้ จากโปรแกรม 3E-PLUS	66
รูปที่ 4.22 การประเมินการสูญเสียความร้อนที่ผนังด้านหน้าหม้อน้ำ จากโปรแกรม 3E-PLUS	67
รูปที่ 4.23 การประเมินการสูญเสียความร้อนที่ผนังด้านข้างหม้อน้ำ จากโปรแกรม 3E-PLUS	67
รูปที่ 4.24 การประเมินการสูญเสียความร้อนที่ผนังด้านหลังหม้อน้ำ จากโปรแกรม 3E-PLUS	67
รูปที่ 4.25 ฉนวนท่อส่งจ่ายไอน้ำ	71
รูปที่ 4.26 การรั่วของท่อส่งจ่ายไอน้ำบริเวณหม้อน้ำเก่า	71
รูปที่ 4.27 ชุดอุ่นไขมัน ชุดที่ 1	74
รูปที่ 4.28 ชุดอุ่นไขมัน ชุดที่ 2	74
รูปที่ 4.29 ท่อเมนก่อนเข้าเครื่องอัดเม็ดอาหารสัตว์ ชุดที่ 1	74

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.30 ท่อเมนก่อนเข้าเครื่องอัดเม็ดอาหารสัตว์ ชุดที่ 2	74
รูปที่ 5.1 ความร้อนสูญเสียของผนังด้านหลังหม้อน้ำ	77



บทที่ 1

บทนำ

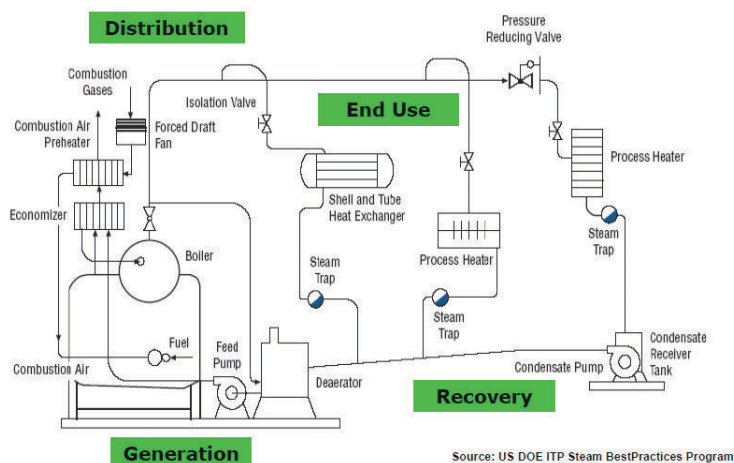
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

ด้วยสถานการณ์การใช้พลังงานในภาคอุตสาหกรรมของประเทศไทยมีการใช้พลังงานค่อนข้างมาก ไม่ว่าจะเป็นพลังงานไฟฟ้า หรือพลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิง จากการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายจำแนกตามสาขาเศรษฐกิจในปี 2561 พบว่ามีการใช้พลังงานในสาขาอุตสาหกรรม 30,064 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ หรือคิดเป็นร้อยละ 35.9 ของการใช้พลังงานในประเทศ นอกจากนี้ยังพบว่าดัชนีความเข้มการใช้พลังงาน (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) [1] จึงจำเป็นต้องดำเนินการประหยัดพลังงานอย่างเป็นระบบในส่วน of โรงงานควบคุมซึ่งเป็นผู้ใช้พลังงานที่มีนัยสำคัญ

โรงงานอุตสาหกรรมมีการใช้พลังงานเป็นจำนวนมากในการผลิตไอน้ำ และมีจำนวนหม้อน้ำที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบันกว่า 15,000 เครื่อง โดยแบ่งเป็นหม้อน้ำแบบท่อไฟ 56% และแบบท่อน้ำ 30% จากจำนวนหม้อน้ำที่มีอยู่มากนี้ทำให้มีการใช้พลังงานและมีการปล่อย CO₂ สูงด้วย ทั้งนี้พบว่าการใช้พลังงานในหม้อน้ำสูงถึง 8,100 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ หรือคิดเป็น 29.1% ของพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรม [2] ดังนั้นจึงจำเป็นต้องสนับสนุนส่งเสริมให้โรงงานเหล่านี้มีการประหยัดพลังงานและช่วยลดการปล่อย CO₂ อย่างเป็นรูปธรรมและยั่งยืน

หากกล่าวถึงการใช้พลังงานความร้อนในสาขาอุตสาหกรรมแล้วนั้น การใช้พลังงานส่วนใหญ่จะถูกใช้เพื่อการทำความร้อน ให้ความร้อนแก่เครื่องจักรและกระบวนการผลิต ซึ่งตัวกลางที่นิยมมากที่สุดคือไอน้ำ ดังนั้นหม้อน้ำซึ่งเป็นอุปกรณ์หลักในการผลิตไอน้ำและระบบไอน้ำจึงเป็นส่วนที่สำคัญเป็นอย่างยิ่ง บุคลากรของโรงงานควรเริ่มต้นจากการตรวจประเมินหม้อน้ำและระบบไอน้ำ โดยเริ่มจากการสำรวจตรวจวัดประสิทธิภาพการเผาไหม้ซึ่งหมายถึงประสิทธิภาพการปล่อยความร้อนของ

เชื้อเพลิงหลากหลายชนิด ทั้งเชื้อเพลิงแข็ง เชื้อเพลิงเหลว และเชื้อเพลิงก๊าซ เมื่อทำการวัดประสิทธิภาพการเผาไหม้และปรับแต่งการเผาไหม้ที่เหมาะสมของเชื้อเพลิงแล้ว โรงงานต้องทำการประเมินต่อไปอีกว่าความร้อนดังกล่าวสามารถถ่ายเทไปให้น้ำเพื่อเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นไอน้ำได้ตามอุณหภูมิและความดันที่ต้องการใช้งานหรือไม่ กล่าวคือจะต้องทำการประเมินประสิทธิภาพทางความร้อนของหม้อน้ำ โดยใช้เกณฑ์มาตรฐานอ้างอิง [3] ซึ่งเกณฑ์มาตรฐานจะมีการระบุการได้มาของข้อมูลจากการตรวจวัด และสมการคำนวณไว้อย่างชัดเจน จากการทำหม้อน้ำทำหน้าที่ต้มน้ำเพื่อผลิตเป็นไอน้ำสำหรับนำไปใช้งาน ดังนั้นคุณภาพของน้ำป้อนและน้ำในหม้อน้ำเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของระบบไอน้ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งส่วนผลิตไอน้ำ หากน้ำป้อนและน้ำในหม้อน้ำมีของแข็งที่ละลายในน้ำทั้งหมด (Total Dissolved Solid) และแร่ธาตุเจือปนอยู่มาก เมื่อน้ำเปลี่ยนเป็นไอน้ำแล้ว ความเข้มข้นของสารเจือปนเหล่านี้สูงขึ้นและเกิดตะกอนไปเกาะที่พื้นผิวของอุปกรณ์ ทำให้เป็นอุปสรรคต่อการถ่ายเทความร้อนของหม้อน้ำ ส่งผลให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของหม้อน้ำลดลง จึงต้องมีการควบคุมดูแลที่เหมาะสมในการใช้งานหม้อน้ำ คือ การควบคุมคุณภาพของน้ำป้อน อุณหภูมิน้ำป้อน คุณภาพของน้ำภายในตัวหม้อน้ำ และการควบคุมอัตราส่วนของการโบล์วดาวนเพื่อรักษาคุณภาพน้ำทางเคมี รวมถึงการนำคอนเดนเสทกลับมาใช้ประโยชน์ ทั้งนี้หากผู้ควบคุมไม่ควบคุมดูแลการใช้งานอย่างเหมาะสมก็จะก่อให้เกิดความสูญเสียพลังงานที่เกิดจากการโบล์วดาวนมากเกินไป ทำให้สูญเสียความร้อนมากขึ้น หรือหากมีการโบล์วดาวนน้อยเกินไปก็จะเกิดปัญหาตะกอนสะสมในท่อของหม้อ ซึ่งหากพิจารณาตามแนวทางการปฏิบัติที่ดีของการใช้งานระบบไอน้ำ อาจแยกพิจารณาระบบไอน้ำได้ออกเป็น 4 ส่วน คือ ส่วนการผลิตไอน้ำ (Generation) ส่วนของระบบท่อส่งจ่ายไอน้ำ (Distribution) ส่วนของอุปกรณ์ใช้น้ำ (End Use) และ ส่วนของการนำความร้อนกลับ (Recovery) ดังแสดงในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 ระบบไอน้ำ [4]

ทั้งนี้การใช้หม้อน้ำหรือระบบไอน้ำมีความร้อนสูญเสียเกิดขึ้นโดยไม่จำเป็น ดังนั้นในแต่ละ ส่วนของระบบไอน้ำจำเป็นจะต้องทำการตรวจประเมินอย่างเหมาะสม จึงเป็นที่มาในการตรวจวัด ประสิทธิภาพของระบบไอน้ำทั้ง 4 ส่วน เพื่อลดการสูญเสียความร้อนที่ทิ้งไปโดยเปล่าประโยชน์ และสามารถลดต้นทุนในการผลิตไอน้ำ โดยอาศัยเครื่องมือวัดที่เหมาะสมกับกระบวนการนั้น ๆ ความ เข้าใจทางเทคนิควิศวกรรม และอาศัยผู้เชี่ยวชาญ วิศวกร ทำงานร่วมกันเป็นทีมในการวิเคราะห์ ออกแบบ ปรับปรุงแก้ไขบำรุงรักษาระบบและกำหนดมาตรการประหยัดพลังงานในระบบไอน้ำ รวมถึงติดตามผลประหยัดที่เกิดขึ้น โดยเฉพาะโรงงานควบคุมที่มีการใช้พลังงานความร้อนสูง เพื่อเป็น ต้นแบบในการยกระดับประสิทธิภาพพลังงานในระบบไอน้ำของโรงงานอุตสาหกรรม

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. ตรวจสอบประสิทธิภาพทางความร้อนของระบบไอน้ำของทางโรงงาน โดยแยกพิจารณาระบบไอน้ำได้ออกเป็น 4 ส่วน คือ ส่วนการผลิตไอน้ำ (Generation) ส่วนของระบบท่อส่งจ่ายไอน้ำ (Distribution) ส่วนของอุปกรณ์ใช้ไอน้ำ (End Use) และ ส่วนของการนำความร้อนกลับ (Recovery)

2. วิเคราะห์ และกำหนดมาตรการประหยัดพลังงานในระบบไอน้ำ โดยแยกพิจารณาระบบไอน้ำได้ออกเป็น 4 ส่วน คือ ส่วนการผลิตไอน้ำ (Generation) ส่วนของระบบท่อส่งจ่ายไอน้ำ (Distribution) ส่วนของอุปกรณ์ใช้ไอน้ำ (End Use) และ ส่วนของการนำความร้อนกลับ (Recovery)

1.3 ขอบเขตของโครงการ

ตรวจสอบประสิทธิภาพทางความร้อนของระบบไอน้ำทั้ง 4 ส่วนของหม้อน้ำแบบผสม (Hybrid boiler) ขนาด 8 ton/h โดยสมรรถนะทางความร้อนของระบบไอน้ำ หมายถึง ประสิทธิภาพของหม้อน้ำรวมถึงปริมาณความร้อนสูญเสียของฉนวนหม้อน้ำ ท่อส่งจ่ายไอน้ำ และกับดักไอน้ำ

1. ส่วนของระบบผลิตไอน้ำ

ตรวจสอบประสิทธิภาพหม้อน้ำด้วยมาตรฐาน Japanese; JIS B8222: 1993 Land Boilers and Heat Balance และใช้การประเมินประสิทธิภาพหม้อน้ำด้วยวิธีทางอ้อม (Indirect method) โดยเป็นการประเมินผลรวมความร้อนสูญเสียที่ออกจากหม้อน้ำ

- การสูญเสียความร้อนผ่านพื้นผิวหม้อน้ำ
- อัตราการโบล์ดาวน
- การสูญเสียที่เกิดจากซีล

2. ส่วนของระบบท่อส่งจ่ายไอน้ำ

ตรวจสอบสมรรถนะของท่อส่งจ่ายไอน้ำ โดยคำนวณปริมาณการรั่วตามสมการ Napier's Choke Flow และคำนวณปริมาณความร้อนสูญเสียด้วยโปรแกรม 3E plus

- ความร้อนสูญเสียจากการรั่วของไอน้ำ (Steam leak)
- ความร้อนสูญเสียผ่านผิวท่อไอน้ำ (Surface loss)

3. ส่วนของอุปกรณ์การใช้น้ำ

ตรวจวัดประสิทธิภาพอุปกรณ์ใช้น้ำ โดยแบ่งเป็น 3 รูปแบบจากการใช้งาน

4. ส่วนของระบบการนำความร้อนกลับ

หาค่าศักยภาพการนำน้ำกลับมาใช้ในระบบเพื่อลดความสูญเสียผ่านผิวท่อ โดยพิจารณาการเกิดไอน้ำและการนำกลับคอนเดนเสท

- ตรวจสอบการรั่วของก๊าดักไอน้ำ

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2. เข้าตรวจสอบ ตรวจวัด ประเมิน และวิเคราะห์ระบบไอน้ำทั้ง 4 ส่วนของทางโรงงาน

- ขั้นตอนการตรวจวัดส่วนการผลิตไอน้ำ
 - การตรวจวัดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงในหม้อน้ำ
 - การตรวจวัดความดันไอน้ำที่ใช้งาน
 - การตรวจวัดปริมาณการผลิตไอน้ำที่หม้อน้ำผลิตได้ต่อชั่วโมง
 - การตรวจวัดค่าข้อเสียนของหม้อน้ำเพื่อพฤติกรรมการเผาไหม้
 - การตรวจวัดคุณภาพน้ำป้อน และน้ำโบล์ดวาร์น
 - การตรวจวัดอุณหภูมิน้ำป้อน
 - การตรวจวัดอัตราการโบล์ดวาร์น
 - การตรวจวัดสภาพฉนวนหม้อน้ำ

- ขั้นตอนการตรวจวัดส่วนระบบท่อส่งจ่ายไอน้ำ

- การตรวจวัดสภาพฉนวนท่อส่งไอน้ำ
- การตรวจวัดการรั่วไหลของไอน้ำ

- ขั้นตอนการตรวจวัดส่วนของอุปกรณ์ไอน้ำ

มีการตรวจสอบข้อมูลในระบบไอน้ำ พฤติกรรมการใช้งานไอน้ำในกระบวนการผลิต และสอบถามถึงปัญหาการใช้งานของเครื่องจักรไอน้ำ เพื่อวิเคราะห์ข้อมูล ให้คำแนะนำในการแก้ไขจุดบกพร่อง และช่วยลดการสูญเสียในระบบไอน้ำของอุปกรณ์ใช้น้ำ

- ขั้นตอนการตรวจวัดส่วนของการนำความร้อนกลับ

- การตรวจวัดการรั่วไหลของก๊าดักไอน้ำ

3. วิเคราะห์ปัญหาและหามาตรการในการลดการใช้พลังงานของระบบไอน้ำของทางโรงงาน
4. เสนอมาตรการประหยัดพลังงานในระบบไอน้ำของทางโรงงาน

จากข้อมูลการสำรวจเชิงลึก และทำการประเมินประสิทธิภาพระบบไอน้ำ จะสามารถทราบถึงข้อบกพร่องที่จะต้องทำการปรับปรุง โดยจะดำเนินการเสนอมาตรการประหยัดพลังงานในระบบไอน้ำทั้ง 4 ส่วน คือ ส่วนการผลิตไอน้ำ ส่วนของระบบท่อส่งจ่ายไอน้ำ ส่วนของอุปกรณ์ใช้ไอน้ำ และ ส่วนของการนำความร้อนกลับ ได้ดังนี้

- ส่วนการผลิตไอน้ำ
 - มาตรการปรับแต่งการเผาไหม้ของหม้อน้ำ
 - มาตรการควบคุมความชื้นของเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าหม้อน้ำ
 - มาตรการส่งเสริมให้มีการใช้อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนหม้อน้ำ
 - มาตรการเพิ่มอุณหภูมิอากาศก่อนเข้าห้องเผาไหม้
 - มาตรการปรับปรุงฉนวนหม้อน้ำ
 - มาตรการลดการสูญเสียจากการโบลด์วาร์น
 - มาตรการนำความร้อนจากการโบลด์วาร์นกลับมาใช้ใหม่
- ส่วนของระบบท่อส่งจ่ายไอน้ำ
 - มาตรการปรับปรุงฉนวนในระบบท่อส่งไอน้ำ
 - มาตรการลดการรั่วไหลของไอน้ำในระบบไอน้ำ
- ส่วนของอุปกรณ์ใช้ไอน้ำ
 - มาตรการนำไอน้ำที่เหลือจากการใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่
- ส่วนของการนำความร้อนกลับ
 - มาตรการนำคอนเดนเสทในระบบไอน้ำกลับมาใช้ประโยชน์
 - มาตรการนำความร้อนจากไอน้ำแฟลชกลับมาใช้งาน

5. สรุปผลการทำโครงการ

6. จัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เกิดการประหยัดพลังงาน ยกกระดับประสิทธิภาพพลังงานในระบบไอน้ำสำหรับโรงงาน
2. โรงงานมีการเพิ่มประสิทธิภาพระบบไอน้ำให้สูงขึ้น ทำให้เกิดการประหยัดพลังงาน ประหยัดเชื้อเพลิง ลดต้นทุนการผลิต และเพิ่มความสามารถในการแข่งขันในภาคอุตสาหกรรม
3. นิสิตมีความรู้ความเข้าใจในเกณฑ์มาตรฐานและขั้นตอนในการตรวจประเมินสมรรถนะทางความร้อนของระบบไอน้ำ

1.7 รายละเอียดงบประมาณตลอดโครงการ

1. กระดาษ 500 บาท
2. จัดทำรูปเล่ม 1,000 บาท
3. ค่าอุปกรณ์อื่น ๆ 500 บาท



บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

2.1 พื้นฐานของหม้อน้ำ

หม้อน้ำ เป็นอุปกรณ์สำหรับผลิตไอน้ำ เพื่อนำไอน้ำไปใช้ประโยชน์ในโรงงานอุตสาหกรรมด้านต่าง ๆ โดยสามารถผลิตไอน้ำได้ทั้งปริมาณและความดันที่ต้องการ ดังนั้นหม้อน้ำ จึงมีหลายแบบตามความเหมาะสมกับการใช้งาน เช่น ไอน้ำอิ่มตัว (Saturated Steam) จะใช้ในการถ่ายเทความร้อนในกระบวนการผลิต และไอน้ำยิ่งยวด (Superheat Steam) ซึ่งมีอุณหภูมิและความดันสูงจะใช้เป็นต้นกำลัง เช่น ขับเครื่องกังหันไอน้ำเพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้า เป็นต้น คำจำกัดความของหม้อน้ำตามกฎหมายกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องกำหนดมาตรการความปลอดภัยเกี่ยวกับหม้อน้ำ หม้อต้มที่ใช้ของเหลวเป็นสื่อนำความร้อน และภาชนะรับแรงดันในโรงงาน พ.ศ. 2549 [5] ระบุว่า หม้อน้ำ หมายถึง ภาชนะปิดสำหรับบรรจุน้ำที่มีปริมาณความจุเกิน 2 ลิตรขึ้นไป เมื่อได้รับความร้อนจากการสันดาปของเชื้อเพลิงหรือแหล่งพลังงานความร้อนอื่น น้ำจะเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอน้ำภายใต้ความดันมากกว่า 1.5 เท่าของความดันบรรยากาศที่ระดับน้ำทะเล หรือ ภาชนะปิดสำหรับบรรจุน้ำซึ่งใช้ในการผลิตน้ำร้อนที่มีพื้นที่ผิวรับความร้อนตั้งแต่ 8 ตารางเมตรขึ้นไป

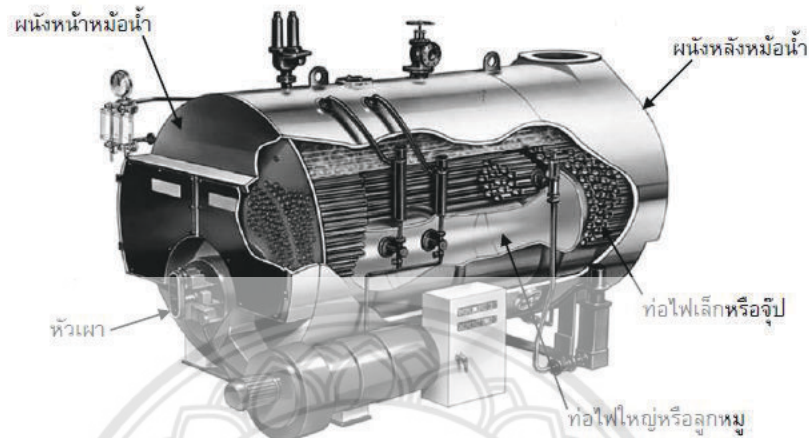
2.2.1 ประเภทของหม้อน้ำ

หม้อน้ำปัจจุบันสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ ตามลักษณะโครงสร้าง คือ หม้อน้ำแบบท่อไฟ หม้อน้ำแบบท่อน้ำ และหม้อน้ำแบบอื่น ๆ ซึ่งไม่สามารถจัดอยู่ในหม้อน้ำสองประเภทแรกได้ ซึ่งรายละเอียดของหม้อน้ำแต่ละประเภทมีดังต่อไปนี้

ก. หม้อน้ำแบบท่อไฟ (Fire tube boiler)

คือ หม้อน้ำที่มีท่อไฟที่ก๊าซร้อนไหลผ่านอยู่ในท่อ และมีน้ำที่รับความร้อนเพื่อกลายเป็นไอน้ำอยู่ภายนอกท่อ เป็นหม้อไอน้ำที่มีโครงสร้างง่ายๆ โดยความร้อนจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงในห้อง

เผาไหม้ จะถูกส่งไปในท่อเหล็กจำนวนมากที่ประกอบตามความยาวหม้อน้ำ ทำให้น้ำโดยรอบท่อเดือด และเปลี่ยนสภาพกลายเป็นไอน้ำ หม้อไอน้ำประเภทนี้จะมีขนาดเล็กและมีความดันต่ำ

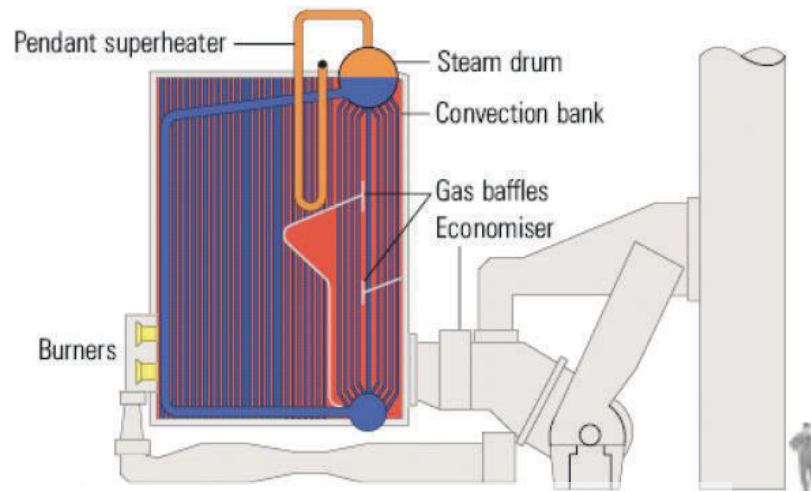


รูปที่ 2.1 โครงสร้างของหม้อน้ำแบบท่อไฟ [6]

ข. หม้อน้ำแบบท่อน้ำ (Water tube boiler)

เป็นหม้อน้ำที่มีน้ำอยู่ภายในท่อน้ำ รับความร้อนจากก๊าซร้อนที่ไหลผ่านอยู่ภายนอกท่อเพื่อระเหยกลายเป็นไอน้ำ หม้อน้ำแบบท่อน้ำมีหลากหลายประเภทมาก มีขนาดกำลังผลิตไอน้ำตั้งแต่ขนาดเล็ก ๆ 100 กิโลกรัมต่อชั่วโมง จนถึงขนาดใหญ่มากที่สามารถใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าได้มากกว่า 1,300 MW ความดันอนุญาตใช้งานสูงสุด (MAWP) อยู่ระหว่างประมาณ 1-31 MPa และอุณหภูมิสูงถึง 593 °C [6]

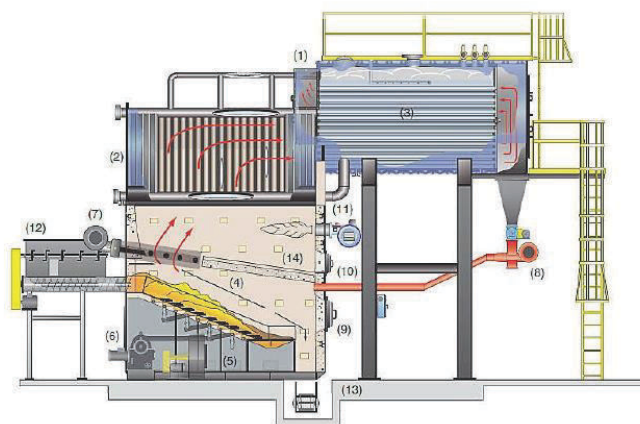
สำหรับหม้อน้ำแบบท่อน้ำ ที่มีขนาดกำลังผลิตไอน้ำมากกว่า 5,000 กิโลกรัมต่อชั่วโมง มักจะเป็นหม้อน้ำที่ผลิตไอน้ำที่ความดันสูงกว่า 1 MPa เนื่องจากลักษณะทางโครงสร้างที่สามารถรับความดันไอน้ำได้สูงกว่าหม้อน้ำแบบท่อไฟ ซึ่งใช้เปลือกหม้อน้ำเป็นส่วนรับความดัน จึงไม่สามารถรับความดันไอน้ำที่สูงได้



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของหม้อน้ำแบบท่อน้ำ [6]

ค. หม้อน้ำแบบผสม (Hybrid boiler)

เป็นหม้อน้ำที่มีทั้งหม้อน้ำแบบท่อน้ำและหม้อน้ำแบบท่อไฟอยู่ในเครื่องเดียวกัน ส่วนใหญ่จะเป็นหม้อน้ำใช้เชื้อเพลิงแข็ง โดยสร้างให้หม้อน้ำแบบท่อน้ำที่อยู่ด้านล่างเป็นส่วนของห้องเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง ส่วนโครงสร้างที่เป็นหม้อน้ำแบบท่อไฟที่อยู่ด้านบนจะเป็นส่วนที่รับการถ่ายเทความร้อนที่เหลือออกจากส่วนโครงสร้างหม้อน้ำแบบท่อน้ำ ดังในรูปที่ 2.3 ขนาดกำลังผลิตไอน้ำของหม้อน้ำแบบผสม ประมาณ 5,000-20,000 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ความดันไอน้ำจึงถูกจำกัดด้วยโครงสร้างของหม้อน้ำแบบท่อไฟ จึงผลิตความดันไอน้ำสูงสุดไม่เกิน 2 MPa

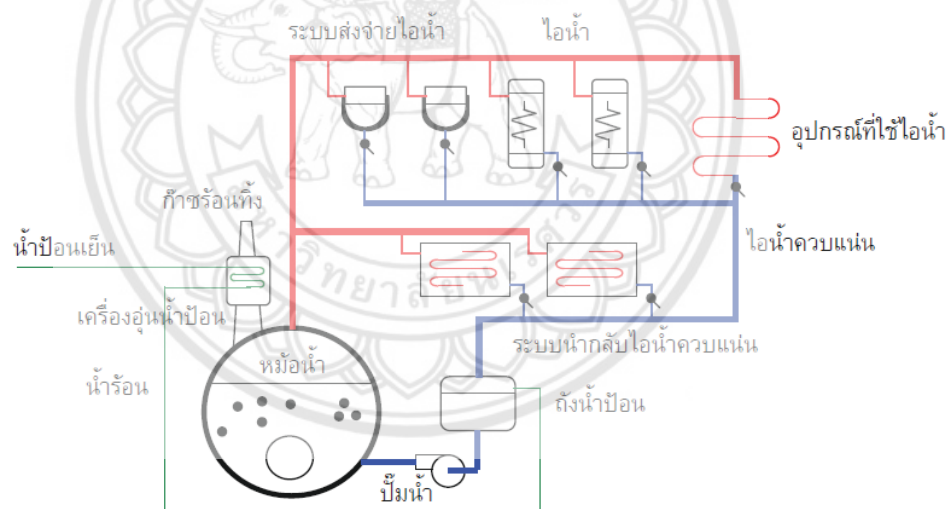


รูปที่ 2.3 หม้อน้ำแบบผสม กรณีใช้เชื้อเพลิงแข็ง [6]

2.2 พื้นฐานของระบบไอน้ำ

ระบบไอน้ำ หมายถึง ระบบที่ประกอบด้วย หม้อน้ำ และอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง ซึ่งได้แก่ หม้อน้ำ ระบบส่งจ่ายไอน้ำ ระบบนำกลับไอน้ำควบแน่นหรือคอนเดนเสท (Condensate) และ อุปกรณ์ที่ใช้ไอน้ำ (ผู้ใช้ไอน้ำปลายทาง) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ระบบไอน้ำเป็นระบบที่ใช้พลังงานพื้นฐานที่มีการใช้งานและสามารถพบเห็นได้ในหลายอุตสาหกรรม

จากรูปที่ 2.4 น้ำป้อนที่มีอุณหภูมิต่ำจะถูกผ่านเข้าไปยังหม้อน้ำ เพื่อรับความร้อนจากก๊าซเผาไหม้ของเชื้อเพลิงและเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอน้ำ ไอน้ำที่ผลิตขึ้นจะถูกส่งไปยังอุปกรณ์ที่ใช้ไอน้ำในกระบวนการผลิตในโรงงาน ผ่านระบบส่งจ่ายไอน้ำ ไอน้ำหรือน้ำร้อนควบแน่นที่เหลือจากกระบวนการผลิตจะถูกนำกลับมาเก็บไว้ในถังน้ำป้อนเพื่อรวมกับน้ำเติม ก่อนที่จะส่งไปยังหม้อน้ำ และผลิตเป็นไอน้ำต่อไป



รูปที่ 2.4 องค์ประกอบของระบบไอน้ำและการทำงานของหม้อน้ำ [6]

2.3 การประเมินสมรรถนะด้านพลังงานของระบบไอน้ำทั้ง 4 ส่วน

2.3.1 การประเมินสมรรถนะด้านพลังงานส่วนของการผลิตหม้อน้ำ

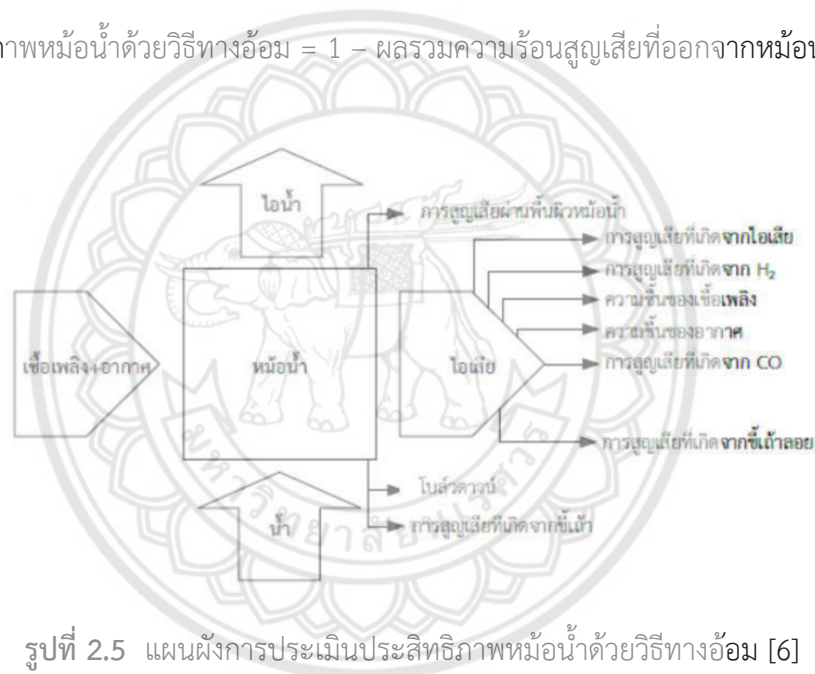
โดยทั่วไปหลักการประเมินประสิทธิภาพหม้อน้ำจะทำการประเมินได้ 2 วิธี ได้แก่ การประเมินประสิทธิภาพหม้อน้ำด้วยวิธีทางตรงและวิธีทางอ้อม การประเมินประสิทธิภาพหม้อน้ำด้วยวิธีทางตรง ประเมินโดยการเทียบอัตราส่วนระหว่างความร้อนที่สะสมในไอน้ำต่อความร้อนจากการเผา

ไหม้เชื้อเพลิง ส่วนการประเมินประสิทธิภาพหม้อน้ำด้วยวิธีทางอ้อม เป็นการประเมินผลรวมความร้อนสูญเสียที่ออกจากหม้อน้ำ

ก. การประเมินประสิทธิภาพหม้อน้ำด้วยวิธีทางอ้อม (Indirect method)

การประเมินประสิทธิภาพหม้อน้ำด้วยวิธีทางอ้อม เป็นการประเมินผลรวมความร้อนสูญเสียที่ออกจากหม้อน้ำ ความร้อนสูญเสียเกิดจากการที่หม้อน้ำไม่สามารถดูดซับพลังงานจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงไปใช้ได้หมด 100 % ซึ่งถือเป็นเรื่องธรรมชาติของเครื่องจักรความร้อน แผนผังการประเมินประสิทธิภาพหม้อน้ำด้วยวิธีทางอ้อม ดังแสดงในรูปที่ 2.5

ประสิทธิภาพหม้อน้ำด้วยวิธีทางอ้อม = $1 - \text{ผลรวมความร้อนสูญเสียที่ออกจากหม้อน้ำ}$



รูปที่ 2.5 แผนผังการประเมินประสิทธิภาพหม้อน้ำด้วยวิธีทางอ้อม [6]

ข. มาตรฐาน Japanese : JIS B8222: 1993 Land Boilers and Heat Balance

- นิยามและขอบเขตมาตรฐาน

มาตรฐาน JIS B 8222 : 1993 เป็นมาตรฐานที่ใช้ในการสมดุลพลังงานความร้อนในหม้อน้ำ รวมถึงหม้อต้มน้ำร้อนที่มีการใช้เชื้อเพลิงแข็ง เชื้อเพลิงเหลว และเชื้อเพลิงก๊าซ มาตรฐานนี้ใช้เฉพาะในการทำสมดุลพลังงานความร้อนหม้อน้ำเชิงพาณิชย์ที่มีการประยุกต์ใช้ในการทดสอบเพื่อการยอมรับระหว่างผู้ซื้อหม้อน้ำและผู้ผลิตหม้อ

- ประเมินประสิทธิภาพหม้อน้ำด้วยวิธีความสูญเสีย (Heat loss method), η_2

ความสูญเสียของหม้อน้ำในมาตรฐาน Japan; JIS B8222 ประกอบด้วย ความสูญเสียจากก๊าซไอเสียแห้ง ความสูญเสียจากไอน้ำหรือน้ำที่เป่าเข้าไปในหม้อน้ำ ความสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ความสูญเสียไปกับเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ไม่หมดในซีเถ้า ความสูญเสียจากการแผ่รังสี และความสูญเสียอื่น โดยสามารถอ้างอิงบนพื้นฐานค่าความร้อนค่าความร้อนเชื้อเพลิงทางต่ำ (LCV) และค่าความร้อนเชื้อเพลิงทางสูง (HCV)

1. อ้างอิงบนพื้นฐานค่าความร้อนเชื้อเพลิงทางสูง (HCV)

1.1 ประสิทธิภาพหม้อน้ำด้วยวิธีความสูญเสีย (Heat loss method) อ้างอิงค่าความร้อนเชื้อเพลิงทางสูง (High calorific value)

$$\eta_{2(HHV)} = (1 - \text{Heat loss}) \times 100\% = \left(1 - \frac{L_h}{H_h - Q} \right) \times 100\% \quad (2.1)$$

1.2 ความสูญเสียของหม้อน้ำอ้างอิงค่าความร้อนเชื้อเพลิงทางสูง (High calorific value)

$$\text{Heat loss} = L_h = L_{1h} + L_2 + L_3 + L_4 + L_{5h} + L_6 \quad (2.2)$$

2. อ้างอิงบนพื้นฐานค่าความร้อนเชื้อเพลิงทางต่ำ (LCV)

2.1 ประสิทธิภาพหม้อน้ำด้วยวิธีความสูญเสีย (Heat loss method) อ้างอิงค่าความร้อนเชื้อเพลิงทางต่ำ (Low calorific value)

$$\eta_{2(LHV)} = (1 - \text{Heat loss}) \times 100\% = \left(1 - \frac{L_l}{H_l - Q} \right) \times 100\% \quad (2.3)$$

2.2 ความสูญเสียของหม้อน้ำอ้างอิงค่าความร้อนเชื้อเพลิงทางต่ำ (Low calorific value)

$$\text{Heat loss} = L_l = L_{1l} + L_2 + L_3 + L_4 + L_5 \quad (2.4)$$

ความร้อนสูญเสียจากก๊าซไอเสียจะประกอบไปด้วยความร้อนสูญเสียจากก๊าซไอเสียแห้ง ความร้อนสูญเสียจากไอน้ำ (ความชื้นเชื้อเพลิง ความชื้นของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ และไอน้ำจากการเผาไหม้) และความร้อนสูญเสียจากผลต่างอุณหภูมิระหว่างก๊าซไอเสียกับบรรยากาศ

- ความร้อนสูญเสียจากก๊าซไอเสีย (L_1)

$$L_{1h} = L_1 + 25(9h + \omega) \text{ kJ / kg} \quad (2.5)$$

$$L_{1l} = GC_g (t_g + t_0) \text{ kJ / kg} \quad (2.6)$$

โดยที่	L_{1h}	คือ ความร้อนสูญเสียจากก๊าซไอเสียที่อ้างอิงค่าความร้อนเชื้อเพลิงทางสูง (High calorific value) ต่อเชื้อเพลิง 1 kg
	L_{1l}	คือ ความร้อนสูญเสียจากก๊าซไอเสียที่อ้างอิงค่าความร้อนเชื้อเพลิงทางต่ำ (Low calorific value) ต่อเชื้อเพลิง 1 kg
	L_1	คือ ความร้อนสูญเสียจากก๊าซไอเสียที่อ้างอิงค่าความร้อนเชื้อเพลิงทางต่ำ (Low calorific value) ต่อเชื้อเพลิง 1 kg
	h	คือ ปริมาณของไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง mass wet basis (%)
	ω	คือ ความชื้นหรือน้ำทั้งหมดที่สะสมในเชื้อเพลิง mass wet basis (%)
	G	คือ อัตราการไหลของไอเสีย ($\text{Nm}^3_{\text{air}} / \text{kg}_{\text{fuel}}$)
	C_g	คือ ค่าความร้อนจำเพาะของก๊าซไอเสีย ($1.38 \text{ kJ/m}^3 \text{ K}$)
	t_g	คือ อุณหภูมิก๊าซไอเสีย ($^{\circ}\text{C}$)
	t_0	คือ อุณหภูมิอ้างอิง ($^{\circ}\text{C}$)

- ความร้อนสูญเสียจากไอน้ำหรือน้ำที่เป่าเข้าไปในหม้อน้ำ (L_2)

ในกรณีที่มีการใช้ไอน้ำในฟนฝอยเชื้อเพลิงใช้ไอน้ำที่เป่าเข้าไปในหม้อน้ำเพื่อทำความสะอาดใช้ไอน้ำในการอุ่นอากาศ หรือน้ำร้อนที่เป่าเข้าไปในหม้อน้ำ เป็นต้น ความร้อนสูญเสียจากไอน้ำหรือน้ำที่เป่าเข้าไปในหม้อน้ำหาได้จาก

$$L_2 = W_b (h_g - h_s) \text{ kJ / kg (or m}^3\text{)} \quad (2.7)$$

- โดยที่ L_2 คือ ความร้อนสูญเสียจากไอน้ำหรือน้ำที่เป่าเข้าไปในหม้อน้ำ
- W_b คือ ไอน้ำหรือน้ำร้อนที่เป่าเข้าไปในหม้อน้ำต่อเชื้อเพลิง 1 kg หรือ 1 m^3 (kg / kg (or m^3))
- h_g คือ เอนทาลปีของไอน้ำ ณ อุณหภูมิก๊าซไอเสีย (kJ/kg)
- h_s คือ เอนทาลปีของไอน้ำหรือน้ำ (น้ำร้อน หรือน้ำป้อนหม้อน้ำ) ที่อุณหภูมิอ้างอิง (kJ/kg)

- ความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (L_3)

$$L_3 = 126.1 [G_0 + (m - 1)A_0] (\text{CO}) \text{ kJ / kg (or m}^3\text{)} \quad (2.8)$$

- โดยที่ L_3 คือ ความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์
- G_0 คือ ปริมาณก๊าซไอเสียแห้งทางทฤษฎีต่อเชื้อเพลิง 1 kg หรือ 1 m^3 (m^3 / kg (or m^3))
- m คือ อัตราส่วนของอากาศส่วนเกิน
- A_0 คือ ปริมาณอากาศต่อเชื้อเพลิง 1 kg หรือ 1 m^3 ทางทฤษฎี (แห้ง) (m^3 / kg (or m^3))
- (CO) คือ ปริมาณของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในก๊าซไอเสียแห้ง (% Volume)

- ความร้อนสูญเสียจากเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ไม่หมดในซีเถ้า (L_4)

$$L_4 = 339c_2 \text{ kJ / kg (or m}^3\text{)} \quad (2.9)$$

- โดยที่ L_4 คือ ความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์
- c_2 คือ $au / (100 - u)$ ปริมาณของคาร์บอนที่เผาไหม้ไม่หมด mass wet basis (%)
- a คือ ปริมาณซีเถ้าในเชื้อเพลิง mass wet basis (%)

u คือ ค่าเฉลี่ยของปริมาณคาร์บอนที่เผาไหม้ไม่หมดในกากที่เหลือจากการเผาไหม้
mass wet basis (%)

- ความร้อนสูญเสียจากการแผ่รังสี (L_5)

$$L_{5h} = \frac{1}{100} l_{rh} H_h = L_5 = \frac{1}{100} l_r H_L \quad \text{kJ / kg (or m}^3\text{)} \quad (2.10)$$

$$\text{เมื่อ } l_{rh} = l_r \frac{H_L}{H_h}$$

โดยที่	L_{5h}	คือ ความร้อนสูญเสียจากการแผ่รังสีจากตัว หม้อน้ำอ้างอิงค่าความร้อน เชื้อเพลิงทางสูง (High calorific value)
	l_r	คือ ความร้อนสูญเสียจากการแผ่รังสีจากตัวหม้อน้ำคิดเป็นร้อยละ (%) อ้างอิง ค่าความร้อนเชื้อเพลิงทางต่ำ (Low calorific value)
	l_{rh}	คือ ความร้อนสูญเสียจากการแผ่รังสีจากตัวหม้อน้ำคิดเป็นร้อยละ (%) อ้างอิงค่า ความร้อนเชื้อเพลิงทางสูง (High calorific value)
	H_L	คือ ค่าความร้อนเชื้อเพลิงทางต่ำ (Low calorific value) ฐานเปียก

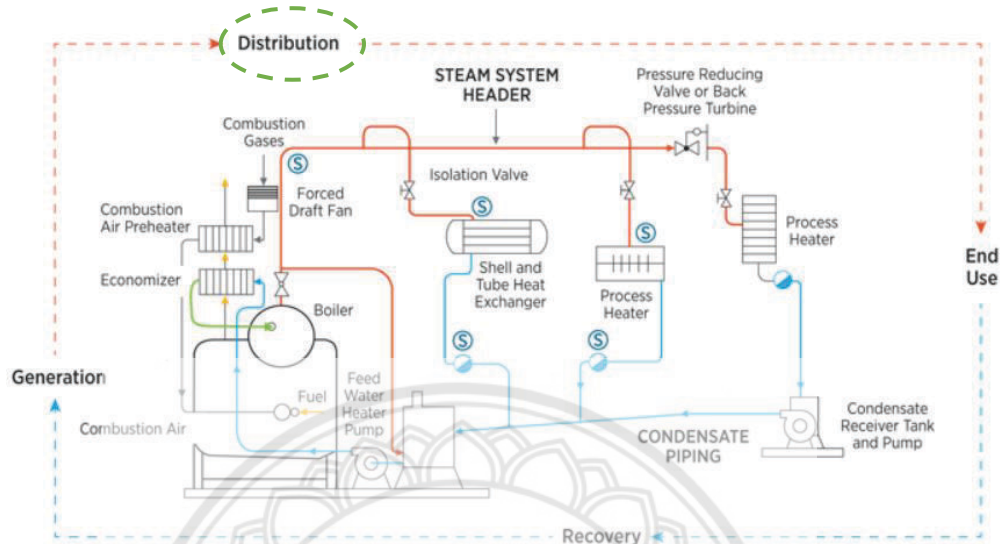
- ความร้อนสูญเสียอื่น ๆ

ความร้อนสูญเสียอื่น ๆ ที่นอกเหนือจากความร้อนสูญเสียจากก๊าซไอเสีย (L_1) ความร้อน
สูญเสียจากไอน้ำหรือน้ำที่เป่าเข้าไปในหม้อน้ำ (L_2) ความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (L_3)
ความร้อนสูญเสียจากกากเชื้อเพลิงที่เหลือจากการเผาไหม้ (L_4) ความร้อนสูญเสียจากการแผ่รังสี (L_5)
สามารถทำการเพิ่มเติมและคิดเป็นความร้อนสูญเสียอื่น ๆ (L_6)

2.3.2 การประเมินสมรรถนะด้านพลังงานส่วนของระบบส่งจ่ายไอน้ำ

ระบบส่งจ่ายไอน้ำ (Steam distribution) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ถือเป็นอีกส่วนสำคัญใน
ระบบไอน้ำ ควรได้รับการบำรุงรักษาและตรวจสอบอย่างสม่ำเสมอ เพราะหากเกิดการรั่วไหลหรือ
แม้แต่ความร้อนสูญเสียผ่านฉนวนแล้วอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานในบริเวณดังกล่าว และยัง
ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานออกจากระบบอย่างไม่จำเป็นแบ่งการสูญเสียออกเป็น 2 ประเภทหลัก

ได้แก่ ความร้อนสูญเสียจากการรั่วของไอน้ำ (Steam leak) และ ความร้อนสูญเสียผ่านผิวท่อไอน้ำ (Surface loss)



รูปที่ 2.6 ระบบส่งจ่ายไอน้ำ (Steam distribution) เส้นปะวงรีสีเขียว [6]

ก. ความร้อนสูญเสียจากการรั่วของไอน้ำในระบบส่งจ่ายไอน้ำ

การรั่วไหลของระบบไอน้ำจากการดูแลรักษาอย่างไม่ทั่วถึงหรือระบบขนาดใหญ่มักเกิดในบริเวณหน้าแปลน จุดเชื่อมต่อปะเก็น อุปกรณ์ท่อ วาล์ว ก้านวาล์ว กีบดักไอน้ำ วาล์วลดความดัน หรืออาจเกิดจากการชำรุดเสียหายของท่ออื่นเนื่องมาจากการกัดกร่อนจนทะลุเป็นรู เป็นต้น ดังนั้นระบบท่อส่งจ่ายไอน้ำโดยเฉพาะตำแหน่งสุ่มเสี่ยงดังที่กล่าวมานั้น จำเป็นต้องได้รับการบำรุงรักษาและซ่อมแซมอยู่เสมอ

- หลักการประเมินการรั่วของไอน้ำด้วยสมการ Napier's choke flow

สมการ Napier's choke flow เป็นสมการที่ได้มาจากการทดลอง (empirical equation) ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการรั่วของไอน้ำผ่านรูรั่ว ที่เรียกว่า ออริฟิซ (orifice) ที่ความดันใช้งานแตกต่างกันออกไป แสดงดังสมการที่ 2.12 และรูปที่ 2.7

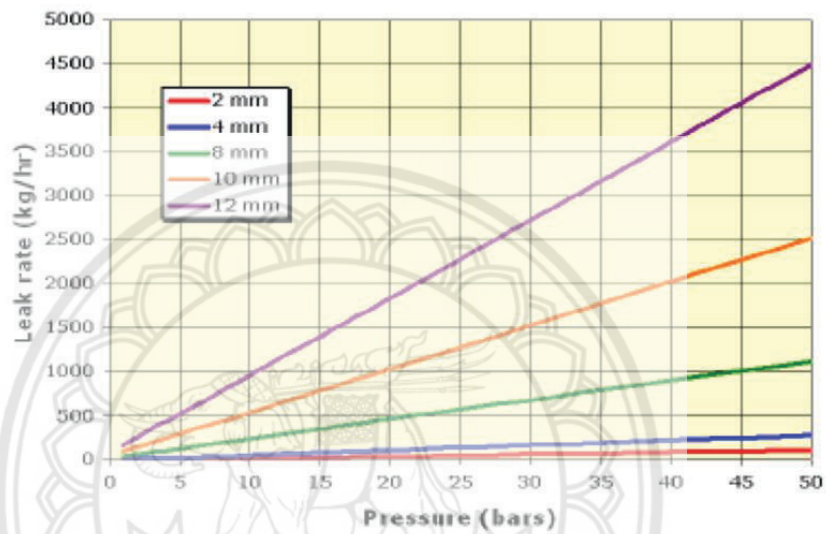
$$m_{\text{steam}} = 0.695 \times A_{\text{orifice}} \times P_{\text{steam}} \quad (2.11)$$

โดยที่ m_{steam} คือ อัตราการรั่วของไอน้ำ (kg/h)

0.695 คือ ค่าคงที่ในสมการที่ใช้คำนวณเฉพาะในช่วงความดันบริเวณรอยรั่วต่ำกว่า 0.51 เท่าของความดันสมบูรณ์ไอน้ำ

A_{orifice} คือ พื้นที่หน้าตัดของรูรั่วที่คิดเป็นพื้นที่รูปวงกลมเทียบเท่า (mm^2) สามารถใช้ hydraulic diameter ดังแสดงในรูปที่ 2.8

P_{steam} คือ ความดันสมบูรณ์ของไอน้ำ (Bar)



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการรั่วไหลและความดันสมบูรณ์ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางออริฟิตต่างกันตามสมการNapier's choke flow,US DOE SSAT [6]

Cross Section				
D_h	D	0.9523D	0.9116D	0.8862D
Cross Section				
D_h	0.8771D	0.8642D	0.8356D	0.7090D

รูปที่ 2.8 Hydraulic diameter [6]

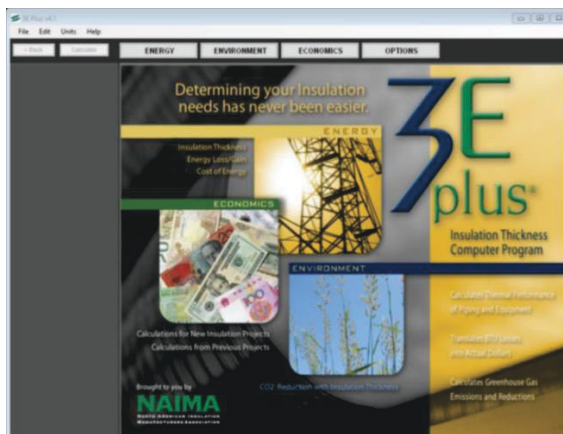
โดยค่าคงที่ในสมการจะมีค่าต่างกันออกไปตามความแตกต่างของความดันบริเวณรอยรั่วและความดันต้นทาง (discharge pressure) ในขณะที่ค่าคงที่ 0.695 ในสมการเหมาะสมกับการใช้คำนวณเฉพาะในช่วงความดันบริเวณรอยรั่วต่ำกว่า 0.51 เท่าของความดันสมบูรณ์ไอน้ำเท่านั้น ซึ่งค่าดังกล่าวมีความเพียงพอต่อการประยุกต์ใช้ในการคำนวณอัตราความร้อนสูญเสียในระบบการส่งจ่ายไอน้ำแล้ว

ข. ความร้อนสูญเสียผ่านผิวท่อไอน้ำ

ความร้อนสูญเสียผ่านผิวท่อไอน้ำส่วนใหญ่มักอยู่ในรูปแบบของการถ่ายเทความร้อนแบบการพา (ทั้งแบบการพาแบบบังคับและการพาโดยธรรมชาติ) และการแผ่รังสีความร้อน ดังนั้นปริมาณความร้อนสูญเสียจึงขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวท่อส่งจ่ายเป็นหลัก มาตรการหนึ่งในการลดการสูญเสียประเภทนี้ คือการลดปริมาณท่อที่ไม่จำเป็น และอีกวิธีที่สามารถปรับใช้โดยที่ไม่จำเป็นต้องมีการปรับเปลี่ยนโครงสร้าง คือ การหุ้มฉนวนในโรงงานอุตสาหกรรม ต้องหมั่นตรวจตราและดูแลรักษาฉนวนกันความร้อนให้คงสภาพดีอยู่เสมอ ถือเป็นสิ่งจำเป็นที่ส่งผลโดยตรงต่อการลดค่าใช้จ่ายด้านต้นทุนพลังงานโดยทั่วไปแล้วความเสียหายของฉนวนนอกจากขาดการบำรุงรักษาที่ดี แล้ววัสดุหุ้มฉนวนเกิดความเสียหายจากสภาพบรรยากาศ ทั้งนี้อาจไม่ได้มีการหุ้มฉนวนไว้ตั้งแต่การออกแบบ นอกจากนี้ การเปลือยท่อโดยไม่มีฉนวนหุ้มฉนวนมักทำให้เกิดความร้อนสูญเสียออกสู่สิ่งแวดล้อมในปริมาณสูง และยังก่อให้เกิดการควบแน่นของไอน้ำภายในท่อ ปริมาณไอน้ำที่สามารถนำไปใช้งานได้จึงลดลงเท่ากับปริมาณความร้อนที่สูญเสียไป

- **หลักการประเมินความร้อนสูญเสียผ่านผิวท่อไอน้ำโดยในโปรแกรม 3E plus**

โปรแกรม 3E plus เป็นเครื่องมือสำหรับการจัดการพลังงานในโรงงานอุตสาหกรรมที่ช่วยในการหาค่าการประหยัดพลังงานและค่าใช้จ่าย รวมทั้งความหนาของฉนวนที่คุ้มค่า จัดทำโดย North American Insulation Manufacturers Association - NAIMA ซึ่งซอฟต์แวร์ 3EPlus สามารถประเมินความหนาที่เหมาะสมของฉนวนกันความร้อนตามชนิดวัสดุต่าง ๆ จากการคำนวณความร้อนสูญเสียผ่านผิวท่อไอน้ำ ตัวอย่างโปรแกรมแสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ตัวอย่างโปรแกรม 3E Plus [6]

2.3.3 การประเมินสมรรถนะด้านพลังงานส่วนของอุปกรณ์ใช้ไอน้ำ

ส่วนของอุปกรณ์ใช้ไอน้ำ ถือเป็นอีกส่วนสำคัญในระบบไอน้ำควรได้รับการบำรุงรักษาและตรวจสอบอย่างสม่ำเสมอ เพราะหากอุปกรณ์ใช้ไอน้ำชำรุดเกิดการรั่วไหลของไอน้ำ มีความสกปรกหรือใช้งานอย่างไม่เหมาะสม จะส่งผลต่อการใช้พลังงานที่มากขึ้นในการผลิตสินค้า ดังนั้นควรทำการติดตามอุปกรณ์ใช้ไอน้ำเหล่านี้ให้สามารถใช้งานได้มีประสิทธิภาพสูงที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้

การตรวจสอบอุปกรณ์ใช้ไอน้ำ ให้ทำการตรวจสอบข้อมูลในระบบไอน้ำพฤติกรรมการใช้งานไอน้ำในกระบวนการผลิต สอบถามถึงปัญหาการใช้งานของเครื่องจักรไอน้ำ เพื่อทำวิเคราะห์ข้อมูลและทำการให้คำแนะนำในการแก้ไขจุดบกพร่อง เพื่อลดการสูญเสียในระบบไอน้ำของอุปกรณ์ใช้ไอน้ำ นอกจากนี้ในเบื้องต้น หากโรงงานไม่สามารถหยุดสายการผลิตเพื่อทำการทดสอบให้ได้ ให้ทำการประเมินอุปกรณ์ใช้ไอน้ำด้วยวิธีนี้แทน คือ การตรวจวัดสภาพฉนวนของอุปกรณ์ใช้ไอน้ำ และการตรวจวัดการรั่วไหลของอุปกรณ์ใช้ไอน้ำ ซึ่งใช้วิธีการเดียวกับเกณฑ์มาตรฐานในการตรวจประเมินส่วนระบบส่งจ่ายไอน้ำในหัวข้อ 2.3.2

มาตรฐานการตรวจวัดประสิทธิภาพอุปกรณ์ใช้ไอน้ำแบ่งการใช้เป็น 3 รูปแบบการใช้งานดังนี้

1. อุปกรณ์ใช้ไอน้ำที่ใช้ไอน้ำสัมผัสโดยตรง (Direct steam) เช่น หม้อหุงอบไอน้ำ หม้อนึ่งฆ่าเชื้อกราะป่อง เป็นต้น
2. อุปกรณ์ใช้ไอน้ำที่ใช้ไอน้ำสัมผัสโดยอ้อม (Indirect steam) เช่น หม้อต้มด้วยไอน้ำ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

3. อุปกรณ์ใช้ไอน้ำที่ใช้ไอน้ำในขับเคลื่อนจักรกล เช่น กังหันไอน้ำ

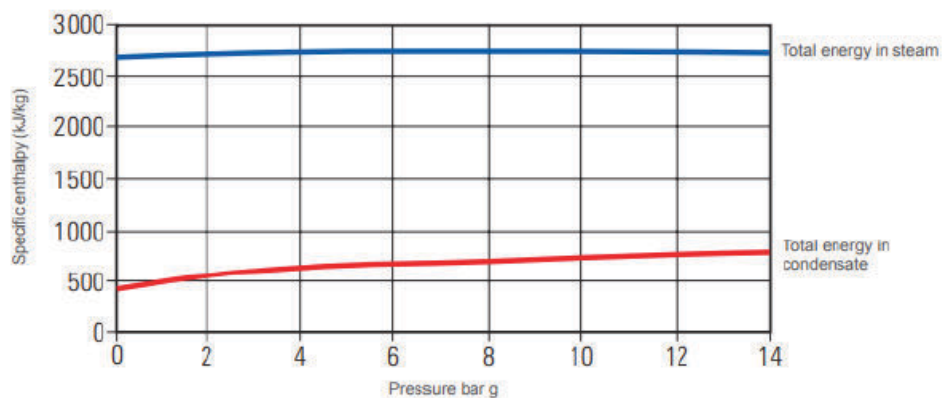
2.3.4 การประเมินสมรรถนะด้านพลังงานส่วนของระบบการนำความร้อนกลับ

ส่วนของการนำความร้อนกลับ ถือเป็นอีกส่วนสำคัญในระบบไอน้ำควรได้รับการบำรุงรักษา และตรวจสอบอย่างสม่ำเสมอ เพราะหากอุปกรณ์ในส่วนการนำกลับชำรุดเกิดการรั่วไหลของไอน้ำ แพลชและน้ำคอนเดนเสท กับดักไอน้ำรั่ว ท่อคอนเดนเสทไม่มีการหุ้มฉนวน หรือใช้งานอย่างไม่เหมาะสม จะส่งผลต่อการใช้พลังงานที่มากขึ้นในการผลิตสินค้า ทั้งนี้ การรั่วไหลของไอน้ำ แพลชและคอนเดนเสทหรือแม้แต่ความร้อนสูญเสียผ่านผิวท่อคอนเดนเสท อาจก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานในบริเวณดังกล่าว ดังนั้นควรทำการติดตามส่วนของการนำความร้อนกลับเหล่านี้ ให้สามารถใช้งานได้มีประสิทธิภาพสูงที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้

การตรวจสอบส่วนการนำกลับให้ทำการตรวจสอบข้อมูลในระบบไอน้ำ และทำสมดุลมวลของระบบน้ำที่ต้องใช้ในไอน้ำ เพื่อประเมินการนำกลับคอนเดนเสท ทั้งนี้ หากพบว่าการนำกลับคอนเดนเสทมีปริมาณที่ค่อนข้างต่ำ ให้ทำการตรวจสอบระบบการนำกลับ เช่น การตรวจสอบกับดักไอน้ำ การตรวจสอบการรั่วไหลของคอนเดนเสท การรั่วไหลของไอน้ำ แพลช รวมไปถึงการไม่หุ้มฉนวนของท่อคอนเดนเสท ได้ทำการอ้างอิงจาก Industrial Steam System Optimization (SSO) Experts Training by United Nations Development Organization (UNIDO)

ก. การนำกลับคอนเดนเสท

คอนเดนเสท คือ สิ่งที่เกิดหลังจากไอน้ำได้ถ่ายเทความร้อนแล้วไอน้ำจะควบแน่นเป็นของเหลวภายใต้ความดันเดียวกัน การนำคอนเดนเสทกลับมาใช้ประโยชน์จะช่วยให้ระบบไอน้ำมีการใช้เชื้อเพลิงลดลง คอนเดนเสทในระบบไอน้ำแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ คอนเดนเสทจากท่อส่งจ่ายไอน้ำและคอนเดนเสทจากอุปกรณ์ใช้ไอน้ำ ในส่วนการนำกลับคอนเดนเสทถือได้ว่ามีความสำคัญมาก ระดับที่จะส่งผลต่อประสิทธิภาพระบบไอน้ำ เพราะยิ่งคอนเดนเสทที่ออกจากอุปกรณ์ใช้ไอน้ำความดันสูง คอนเดนเสทจะมีพลังงานอยู่ค่อนข้างมากจึงจำเป็นต้องนำกลับให้มากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ทั้งนี้ คอนเดนเสทความดันสูงสามารถทำไอน้ำ แพลช หรือเอาไปแลกเปลี่ยนความร้อนที่ไม่ต้องการ อุณหภูมิสูงก่อนได้



ที่มา: Spirax sarco : Condensate recovery in industrial steam systems

รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันคอนเดนเสทและความร้อนที่สะสมคอนเดนเสท เมื่อเทียบกับความร้อนที่สะสมในไอน้ำอิมิตัวที่ความดันต่าง ๆ [6]

- หลักการประเมินการนำกลับคอนเดนเสทของระบบการนำกลับ

การประเมินปริมาณคอนเดนเสทที่เกิดขึ้นเพื่อนำกลับมาใช้ประโยชน์ สามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่

1. ประเมินจากอัตราการไหลของไอน้ำที่ผลิตได้
2. ประเมินจากขนาดของกักเก็บไอน้ำ
3. ประเมินโดยใช้การสมดุลมวลและพลังงาน
4. ระบายคอนเดนเสทลงถังพักและจับเวลา

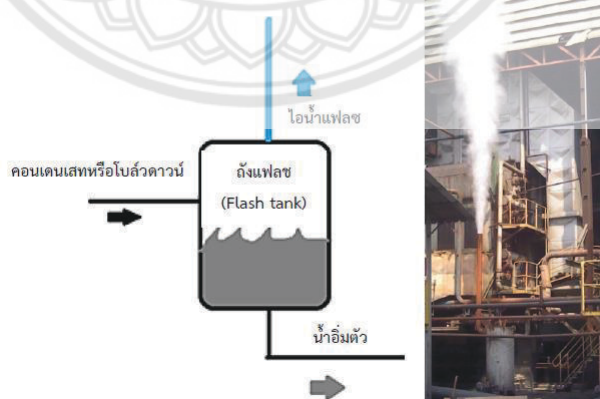
ข. การนำกลับไอน้ำแฟลช

ในระบบหม้อน้ำ ระบบส่งจ่ายไอน้ำ และในอุปกรณ์ที่ใช้ไอน้ำ เมื่อไอน้ำสูญเสียความร้อนให้แก่สิ่งแวดล้อมหรือในกระบวนการผลิต ไอน้ำจะควบแน่นกลายเป็นคอนเดนเสทที่ความดันใช้งานในระบบไอน้ำ ซึ่งปริมาณความร้อนของไอน้ำที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนนี้ เรียกว่า ปริมาณความร้อนแฝงคอนเดนเสทที่เกิดขึ้นยังคงมีพลังงานความร้อนหลงเหลืออยู่ในรูปของปริมาณความร้อนสัมผัสที่สามารถนำเอาความร้อนดังกล่าวกลับไปใช้งานได้อีกในระบบที่มีการใช้งานที่ความดันต่ำกว่าหรือมีการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำกว่าในระบบไอน้ำ ความร้อนจากคอนเดนเสทที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่นั้นสามารถนำกลับมาใช้งาน ทำได้ 2 รูปแบบ ได้แก่ การนำความร้อนกลับในรูปของของเหลว และการ

นำความร้อนกลับในรูปของไอน้ำแฟลช (Flash steam) ที่ความดันต่ำกว่าและนำไอน้ำความดันต่ำไปใช้งานในอุปกรณ์ที่ใช้ไอน้ำแรงดันต่ำ เช่น ในกระบวนการ Preheat เป็นต้น

นอกเหนือจากความร้อนจากคอนเดนเสทแล้ว น้ำทิ้งที่เกิดจากการโบลว์ดาวน์จากระบบหม้อน้ำซึ่งมีปริมาณมาก เป็นอีกหนึ่งแหล่งความร้อนทิ้งที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ในแต่ละครั้งของการโบลว์ดาวน์ น้ำอ้อมตัวในหม้อน้ำที่อยู่ภายใต้ความดันของหม้อน้ำ เมื่อถูกปล่อยสู่บรรยากาศหรือถังโบลว์ดาวน์ (Blowdown tank) จะทำให้มีไอน้ำแฟลชเกิดขึ้น ซึ่งสามารถนำเอาความร้อนจากไอน้ำแฟลชมาใช้ประโยชน์ได้

ไอน้ำแฟลช เป็นไอน้ำที่เกิดจากการลดความดันของน้ำหรือคอนเดนเสทที่มีความดันสูงไปสู่สถานะที่มีความดันต่ำ ทำให้คอนเดนเสทหรือน้ำเกิดการเปลี่ยนสถานะกลับมาเป็นไอน้ำอีกครั้ง ซึ่งสามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้กับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ไอน้ำความดันต่ำ การนำคอนเดนเสทที่เกิดขึ้นในระบบส่งจ่าย หรืออุปกรณ์ที่ใช้ไอน้ำออกจากกับดักไอน้ำมารวมกันและส่งเข้าสู่อุปกรณ์ที่ใช้ในการแยกเอาไอน้ำแฟลชออกจากคอนเดนเสทที่เรียกว่า ถังแฟลช (Flash tank) สถานะความดันในถังแฟลชจะมีความดันต่ำกว่าความดันคอนเดนเสท ทำให้คอนเดนเสทเกิดการระเหยกลายเป็นไอน้ำแฟลชที่เกิดขึ้นจัดเป็นไอน้ำที่มีความดันต่ำสามารถนำไปใช้งานต่อได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ไอน้ำแฟลชจากคอนเดนเสทหรือโบลว์ดาวน์ [6]

ค. การประเมินการรั่วไหลของก๊าดักไอน้ำ

ก๊าดักไอน้ำถือว่าเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญมากในระบบไอน้ำ ก๊าดักไอน้ำมีหน้าที่ระบายคอนเดนเสทออกจากไอน้ำ เริ่มตั้งแต่จุดเริ่มต้นของการส่งจ่ายไอน้ำจากท่อพักไอน้ำหลักกระจายมายังท่อไอน้ำ ส่งต่อไปถึงอุปกรณ์ใช้ไอน้ำและออกจากอุปกรณ์ใช้ไอน้ำ จะต้องมีการติดตั้งก๊าดักไอน้ำตลอดเส้นทางเพื่อที่จะระบายคอนเดนเสท หากคอนเดนเสทไม่มีการระบายออก จะส่งผลให้ระบบท่อไอน้ำเกิดค้อนน้ำได้ และส่งผลให้อุปกรณ์ใช้ไอน้ำไม่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพราะคอนเดนเสททั่วพื้นที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อน หากก๊าดักไอน้ำมีการรั่ว ส่งผลให้สิ้นเปลืองไอน้ำโดยใช่เหตุ ดังนั้นจึงควรทำความเข้าใจการตรวจวัดก๊าดักไอน้ำให้ดีเสียก่อน

ก๊าดักไอน้ำสามารถแบ่งประเภทได้ตามมาตรฐาน ISO 6704: 1982 ได้ 3 แบบ ได้แก่

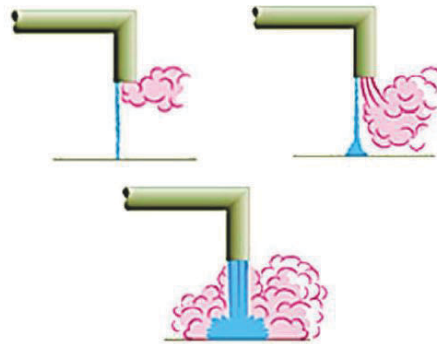
1. ก๊าดักไอน้ำแบบเทอร์โมสแตติกส์ ทำงานโดยอาศัยผลต่างอุณหภูมิของไอน้ำและคอนเดนเสท
2. ก๊าดักไอน้ำแบบเชิงกล ทำงานโดยอาศัยผลต่างของความหนาแน่นของไอน้ำและคอนเดนเสท
3. ก๊าดักไอน้ำแบบเทอร์โมไดนามิกส์ ทำงานโดยอาศัยหลักการของกลศาสตร์ของไหล เมื่อของไหลไหลผ่านรูที่เล็กจะเกิดความเร็ว และความดันลดกลายเป็นไอแฟลชดันกลับไปปิดหน้าจาน (Disc) ก๊าดักไอน้ำ

- วิธีการตรวจวัดการประเมินการรั่วไหลของก๊าดักไอน้ำของระบบการนำกลับ

การประเมินการรั่วไหลของก๊าดักไอน้ำของระบบการนำกลับในทางปฏิบัติ สามารถทำได้

3 วิธี ดังนี้

1. การตรวจสอบด้วยสายตา หากมีไอน้ำรั่วไหลจะเห็นกลุ่มหมอกไอน้ำพุ่งออกมาเป็นลำสีขาว ในกรณีการรั่วหรือมีการทำงานผิดปกติของก๊าดักไอน้ำ สามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่าเช่นเดียวกัน



รูปที่ 2.12 ลักษณะการทำงานของกักน้ำแบบปกติ [6]



รูปที่ 2.13 ลักษณะการทำงานของกักน้ำที่มีการรั่วไหลของไอน้ำความเร็วสูง [6]

2. การตรวจสอบด้วยอุณหภูมิ โดยใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนสแกนที่กักน้ำดังแสดงใน

รูปที่ 2.14 หากมีการรั่วไหลจะส่งผลให้อุณหภูมิสูงใกล้เคียงกันระหว่างด้านหน้าและด้านหลังกักน้ำ



รูปที่ 2.14 การใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนในการประเมินการรั่วไหล [6]

3. การตรวจสอบด้วยเสียง โดยใช้ประสาทสัมผัสทางหูฟังเสียงการรั่วไหลของไอน้ำ เพราะโดยปกติแล้วไอน้ำที่มีความดันสูงเมื่อรั่วไหลผ่านรูเล็ก ๆ การไหลจะมีความเร็วจะทำให้เกิดเสียงดัง

- หลักการประเมินการรั่วไหลของก๊อบดักไอน้ำของระบบการนำกลับ

สมการ Napier's choke flow เป็นสมการที่ได้มาจากการทดลอง (empirical equation) ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการรั่วของไอน้ำผ่านรูรั่วที่เรียกว่า ออริฟิศ (orifice) ที่ความดันใช้งานแตกต่างกันออกไป ประเมินที่การรั่วไหล 25 % แสดงดังสมการที่ 2.15

$$m_{\text{steam}} = 0.25 \times 0.695 \times A_{\text{orifice}} \times P_{\text{steam}} \quad (2.12)$$

โดยที่ m_{steam} คือ อัตราการรั่วของไอน้ำ (kg/h)
 0.25 คือ ค่าคงที่ของการประเมินการรั่วไหล
 0.695 คือ ค่าคงที่ในสมการที่ใช้คำนวณเฉพาะในช่วงความดันบริเวณรอยรั่วต่ำกว่า 0.51 เท่าของความดันสมบูรณ์ไอน้ำ
 A_{orifice} คือ พื้นที่หน้าตัดของรูรั่วที่คิดเป็นพื้นที่รูปวงกลมเทียบเท่า (mm^2) สามารถใช้ hydraulic diameter ดังแสดงในรูปที่ 2.8
 P_{steam} คือ ความดันสมบูรณ์ของไอน้ำ (Bar)

2.4 หลักการถ่ายเทความร้อน (Principle of heat transfer)

2.4.1 การนำความร้อน (Conduction)

การนำความร้อน คือ การถ่ายเทความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงกว่าไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำภายในตัวกลางเดียวกัน โดยเป็นการถ่ายเทความร้อนผ่านตัวกลางที่เป็นของแข็งหรือของไหลที่หยุดนิ่ง อัตราการถ่ายเทความร้อนแบบการนำความร้อนคำนวณจากกฎของฟูรีเยร์ (Fourier's law)

$$q_{\text{cond}} = -k \frac{\Delta T}{L} \quad (2.13)$$

เมื่อ	q_{cond}	คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน (W/m^2)
	ΔT	คือ ผลต่างของอุณหภูมิ (K)
	L	คือ ความหนาของผนังมีการถ่ายเทความร้อน (m)
	k	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ (W/m K) (เครื่องหมายลบ (-) หมายถึงการถ่ายเทความร้อนในทิศทางที่ลดลงของอุณหภูมิ)

2.4.2 การพาความร้อน (Convection)

การพาความร้อน คือ การที่ความร้อนเคลื่อนที่ระหว่างผิวของของแข็งและของไหล ของไหลจะเป็นตัวพาความร้อนมาให้ หรือพาความร้อนออกจากผิวของของแข็ง กลไกที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการพาได้นั้น เกิดจากผลรวมของการนำความร้อน การสะสมพลังงานและการเคลื่อนที่ของการไหล การพาความร้อนแบ่งออกเป็น 2 ชนิด การพาความร้อนแบบอิสระ (Free convection) และการพาความร้อนแบบบังคับ (Forced convection) ซึ่งอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนคำนวณได้จาก Newton's cooling law

$$q_{\text{conv}} = h(T_s - T_\infty) \quad (2.14)$$

เมื่อ	q_{conv}	คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน (W/m^2)
	h	คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ที่ผิวสัมผัสระหว่างของไหลกับวัสดุ ($\text{W/m}^2 \text{K}$)
	T	คือ อุณหภูมิของผิววัตถุ (K)
	T_∞	คือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (K)

การการพาความร้อนแบบอิสระ (Free convection) คือการเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของของแข็งและของไหล โดยไม่มีกลไกใด ๆ ทำให้ของไหลเคลื่อนที่แต่เกิดจากแรงลอยตัวของของไหลเอง ซึ่งแรงลอยตัวเกิดจากการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นที่มีอุณหภูมิของของไหลแตกต่างกัน

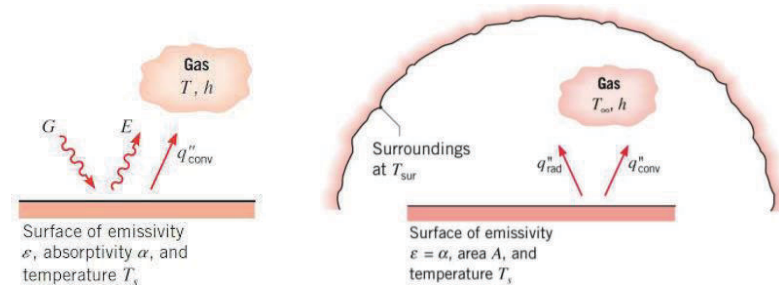
ตารางที่ 2.1 สมการสำหรับการพาความร้อนอิสระ [7]

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

การพาความร้อนแบบบังคับ (Forced Convection) คือ การเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของของแข็งและของไหล โดยของไหลถูกบังคับให้เคลื่อนที่ไปสัมผัสกับผิวของของแข็งโดยกลไกภายนอก เช่น พัดลม เครื่องสูบลม

2.4.3 การแผ่รังสีความร้อน (Radiation)

การแผ่รังสีความร้อน คือ การถ่ายเทพลังงานความร้อนออกจากวัตถุที่มีอุณหภูมิที่แน่นอน โดยวัตถุนั้นอาจเป็น ของแข็ง ของเหลว หรือแก๊สก็ได้ โดยที่ไม่อาศัยตัวกลางในการส่งถ่ายพลังงาน พลังงานของสนามการแผ่รังสีมีการถ่ายเทโดยอาศัยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือ โฟตอน (Photons) โดยพิจารณาการแลกเปลี่ยนรังสีบนพื้นผิวดังรูป 2.15



รูปที่ 2.15 การแผ่รังสีที่ผิว (ซ้าย) และ การแผ่รังสีระหว่างที่ผิวและสิ่งแวดล้อม (ขวา)

การแผ่รังสีที่ผิวของวัตถุดำ เป็นไปตามกฎของสเตฟาน-โบลต์ซมันน์ (Stefan – Boltzmann Law) โดยพลังงานที่แผ่ออกมาจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอย่างเดียว คือ

$$E = \epsilon E_b = \epsilon \sigma T_s^4 \quad (2.15)$$

เมื่อ	E	คือ พลังงานการแผ่รังสีความร้อนที่ผิว (W/m^2)
	ϵ	คือ Emissivity เป็นสมบัติของพื้นผิว, $0 \leq \epsilon \leq 1$
	E_b	คือ ลังงานการแผ่รังสีความร้อนของวัตถุดำ
	σ	คือ ค่าคงที่ Stefan-Boltzmann $5.67 \times 10^{-8} W / m^2 \cdot K^4$
	T_s	คือ อุณหภูมิของพื้นผิว (K)

พิจารณากรณีการแผ่รังสีระหว่างพื้นผิวขนาดเล็กและสิ่งแวดล้อมของ จาก Kirchoff's Law ให้รังสีที่ตกกระทบบนวัตถุขนาดเล็ก เท่ากับการแผ่รังสีของวัตถุดำ

$$G = G_{sur} = \sigma T_{\infty}^4 \quad (2.16)$$

จะได้

$$q_{rad} = E - G$$

$$q_{rad} = \epsilon E_b - G_{sur}$$

$$q_{rad} = \epsilon \sigma T_s^4 - \sigma T_{\infty}^4$$

$$q_{rad} = \epsilon \sigma (T_s^4 - T_{\infty}^4) \quad (2.17)$$

เมื่อ	q_{rad}	คือ อัตราการแผ่รังสีความร้อน (W/m^2)
	G	คือ การฉายรังสีความร้อน (Irradiation)
	E_b	คือ ลังงานการแผ่รังสีความร้อนของวัตถุดำ
	σ	คือ ค่าคงที่ Stefan-Boltzmann $5.67 \times 10^{-8} \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}^4$
	T_s	คือ อุณหภูมิของพื้นผิว (K)
	T_∞	คือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (K)
	ϵ	คือ Emissivity เป็นสมบัติของพื้นผิว, $0 \leq \epsilon \leq 1$

การถ่ายเทความร้อนจากพื้นผิวอาจเป็นทั้งการพาความร้อนไปยังอากาศด้วย ดังนั้น อัตราการถ่ายเทความร้อนรวมจากพื้นผิว คือ

$$q = q_{\text{conv}} + q_{\text{rad}} \quad (2.18)$$

$$q = h(T_s - T_\infty) + \epsilon\sigma(T_s^4 - T_\infty^4) \quad (2.19)$$



บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

3.1 ข้อมูลเบื้องต้นของโรงงาน

ชื่อโรงงาน	บริษัท ซีพีเอฟ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน)
เลขทะเบียนโรงงาน	3 ส.15(1)-1/2530 ลพ.
ประเภท TSIC	10801-0038
ประเภท	โรงงานผลิตอาหารสัตว์
ประกอบกิจการ	ผลิตอาหารสัตว์
สถานที่ตั้ง	เลขที่ 178 ม.4 ถ.พิชณุโลก-หล่มสัก (กม.9) ต.สมอแข อ.เมือง พิจนุโลก จ.พิจนุโลก 65000
โทรศัพท์	055-224075-8
โทรสาร	-
จำนวนพนักงาน	178 คน



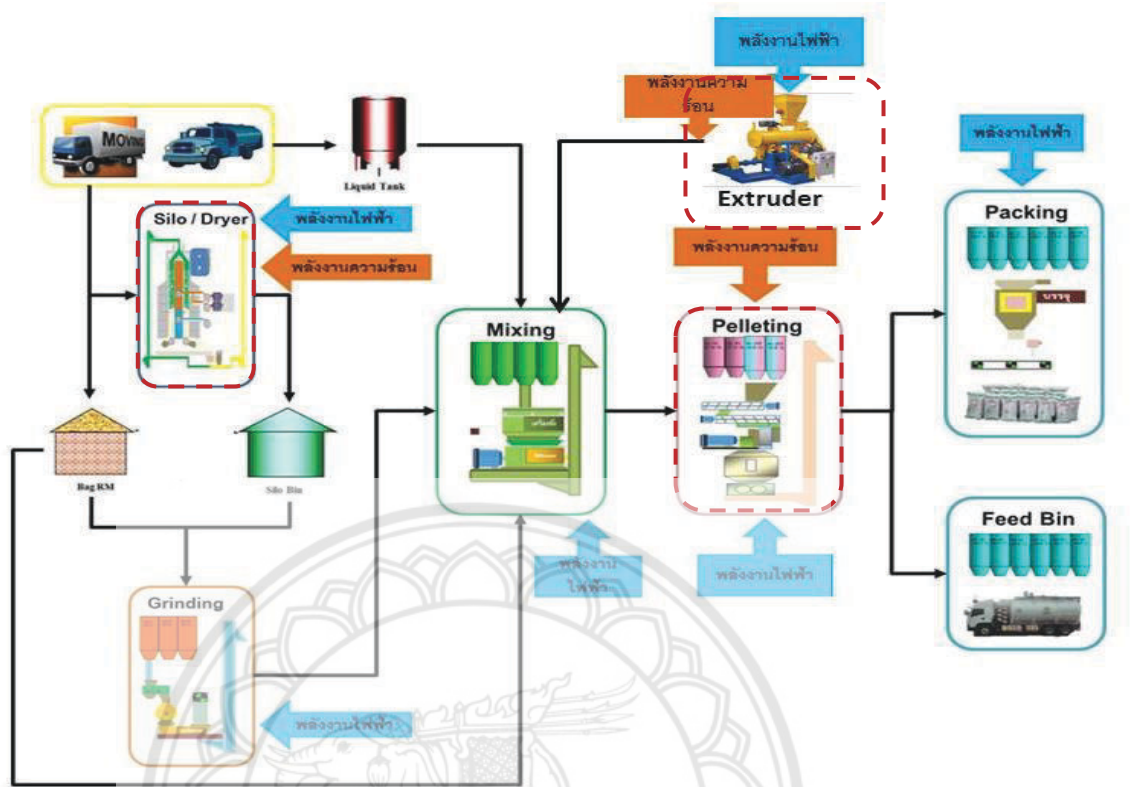
รูปที่ 3.1 ภาพถ่ายด้านหน้าโรงงาน

3.2 ข้อมูลเบื้องต้นของกระบวนการผลิต

บริษัท ซีพีเอฟ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) ดำเนินธุรกิจประเภท ผลิตอาหารสัตว์บก ได้แก่ อาหารไก่ อาหารหมู โดยมีวัตถุดิบหลักในการผลิตอาหารสัตว์ เช่น ข้าวโพดบด ถั่วบด ปลายข้าวบด และมันสำปะหลังบด ดังแสดงในรูปที่ 3.2 และแผนผังกระบวนการผลิตอาหารสัตว์ แสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.2 วัตถุดิบหลักที่ใช้ในการผลิตอาหารสัตว์



รูปที่ 3.3 แผนผังกระบวนการผลิตอาหารสัตว์

3.3 ข้อมูลเบื้องต้นของระบบผลิตไอน้ำ

บริษัท ซีพีเอฟ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) มีการติดตั้งหม้อน้ำจำนวน 1 เครื่อง หม้อน้ำที่ทำการสำรวจ ยี่ห้อ/รุ่น GETABEC เป็นหม้อน้ำแบบตะกรับนิ่งผสมกันระหว่างท่อไอน้ำและท่อไฟ (Fix grate hybrid boiler) กำลังการผลิตไอน้ำขนาด 8 ton/h ความดันใช้งาน 6.5-7.5 barg ข้อมูลหม้อน้ำเบื้องต้น แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลพื้นฐานของอุปกรณ์ผลิตความร้อน

อุปกรณ์	ผู้ผลิต	อายุการใช้งาน (ปี)	ประเภท	ขนาด	เชื้อเพลิง	สถานะ
หม้อน้ำ 1	GETABEC	1	หม้อน้ำแบบผสม	8 ton/h	ไม้สับ	ใช้งาน

3.3.1 หม้อน้ำ

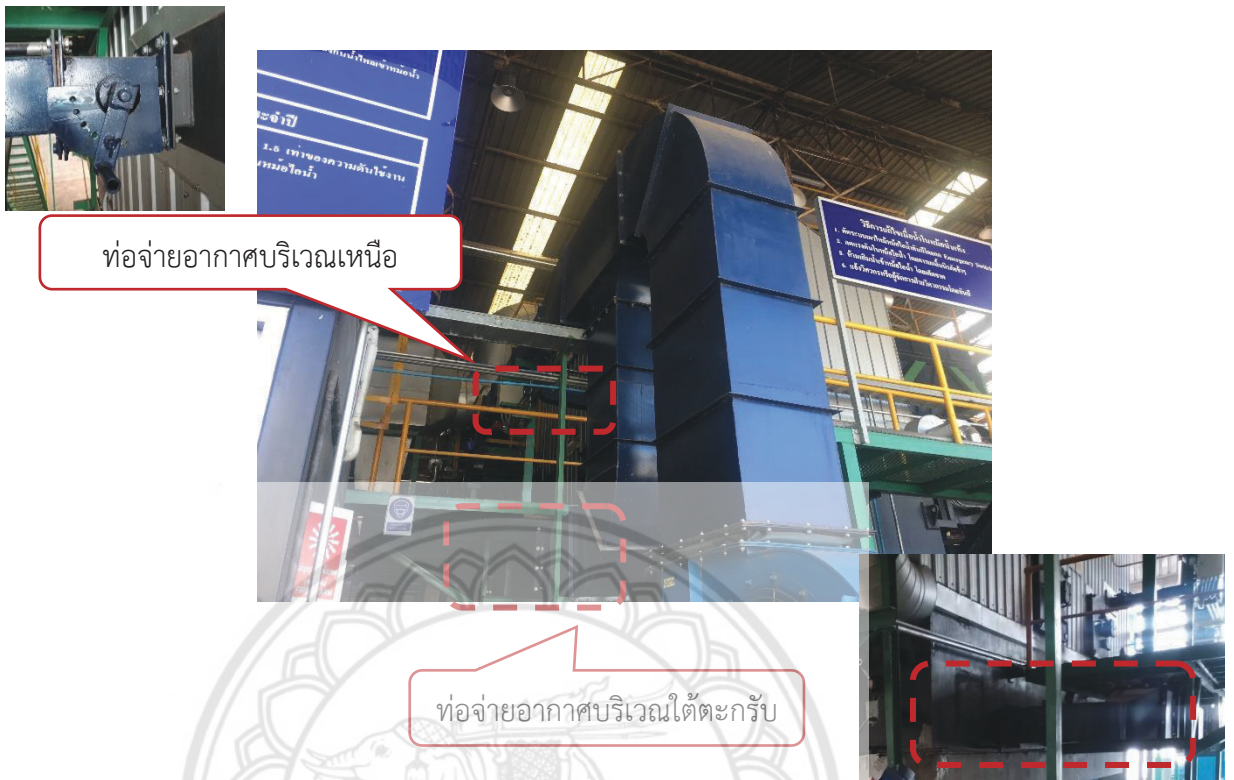
หม้อน้ำ ผลิตโดยบริษัท GETABEC ดังแสดงในรูปที่ 3.4 เป็นหม้อน้ำแบบตะแกรงนิ่งผสมกัน ระหว่างท่อน้ำและท่อไฟ (Fix grate hybrid boiler) มีกำลังผลิตไอน้ำ 8 ton/hr ความดันใช้งาน สูงสุด 10 barg เชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้ คือ ไม้สับ แสดงดังรูปที่ 3.5 มีอายุการใช้งานมาแล้ว 1 ปี ทำหน้าที่ผลิตไอน้ำเข้าสู่กระบวนการผลิต ที่ความดันใช้งาน 6.5-7.5 barg การป้อนอากาศที่ใช้ในการ เผาไหม้แบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนที่หนึ่งป้อนบริเวณใต้ตะแกรง และส่วนที่สองป้อนบริเวณเหนือ ตะแกรง



รูปที่ 3.4 หม้อน้ำที่ 1 ผลิตโดย GETABEC ขนาด 8 ton/hr



รูปที่ 3.5 แสดงเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้ คือ ไม้สับ



ท่อจ่ายอากาศบริเวณเหนือ

ท่อจ่ายอากาศบริเวณใต้ตะแกรง

รูปที่ 3.6 แสดงตำแหน่งการจ่ายอากาศ บริเวณเหนือตะแกรงและบริเวณใต้ตะแกรง



สายพานลำเลียงซีเมนต์

รูปที่ 3.7 แสดงตำแหน่งสายพานลำเลียงซีเมนต์

หม้อน้ำ ผลิตไอน้ำที่ความดันใช้งาน 6.5 – 7.5 barg มีอุณหภูมิอยู่ที่ 173 -177 °C (สถานะไอน้ำอิ่มตัว) ส่งไอน้ำไปยังถึงพักไอน้ำรวมแสดงในรูปที่ 3.8 และส่งจ่ายแยกออกเป็น 2 ท่อหลักไปยังถึงพักไอน้ำหมายเลข 1 และ 2 ดังแสดงในรูปที่ 3.9 และ 3.10 ตามลำดับ โดยถึงพักไอน้ำหมายเลข 1 จะส่งจ่ายไอน้ำให้แก่ เครื่องอัดเม็ดอาหารสัตว์ 6 เครื่อง และชุดอุ่นไขมัน ส่วนถึงพักไอน้ำหมายเลข 2 จะส่งจ่ายไอน้ำไปยังเครื่อง Extruder 7 เครื่อง และเครื่องบรรจุ ระบบไอน้ำที่ผลิตจากหม้อน้ำแสดงในรูปที่ 3.11



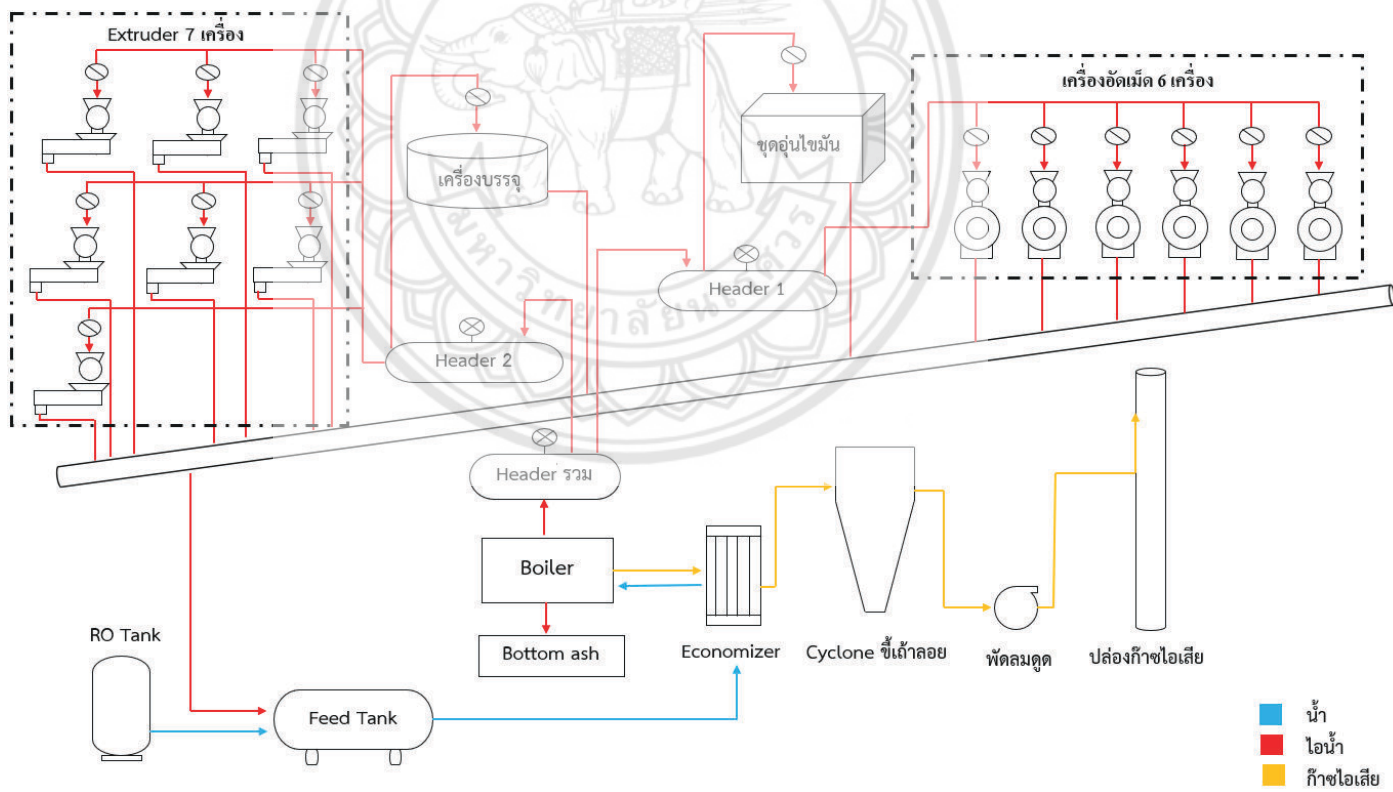
รูปที่ 3.8 ถังพักไอน้ำรวม



รูปที่ 3.9 ถังพักไอน้ำหมายเลข 1



รูปที่ 3.10 ถังพักไอน้ำหมายเลข 2



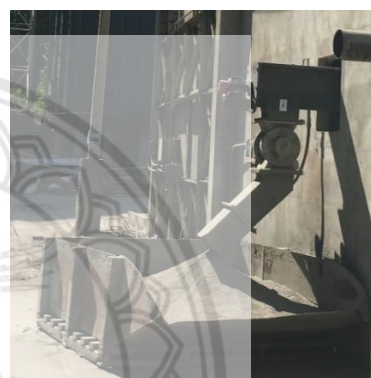
รูปที่ 3.11 ระบบไอน้ำที่ผลิตจากหม้อน้ำ

3.3.2 อุปกรณ์ดักจับซีเถ้าลอย (Cyclone)

หลังจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงเพื่อให้ได้พลังงานความร้อนไปใช้ในการผลิตไอน้ำ ก็จะมีการปล่อยแก๊สไอเสียที่เกิดขึ้นที่ผ่านปล่องระบายแก๊สไอเสีย แต่ภายในแก๊สไอเสียหลังจากการเผาไหม้นั้น จะมีส่วนผสมของซีเถ้าอยู่เป็นจำนวนมาก จึงต้องมีการนำ Cyclone ดังแสดงในรูปที่ 3.12 มาใช้ในการดักจับซีเถ้าลอย เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดมลพิษกับสิ่งแวดล้อมหลังจากการปล่อยแก๊สไอเสียทิ้ง ดังแสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.12 อุปกรณ์ดักจับซีเถ้าลอย



รูปที่ 3.13 ที่ทิ้งซีเถ้าลอยของอุปกรณ์ดักจับซีเถ้าลอย

3.3.3 ปล่องระบายแก๊สไอเสีย

เมื่อแก๊สไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงได้รับการดักจับซีเถ้าลอยแล้ว จะถูกส่งไปยังปล่องระบายแก๊สไอเสีย ซึ่งจะทำหน้าที่ ปล่อยแก๊สไอเสียออกสู่บรรยากาศต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 ปล่องระบายแก๊สไอเสีย

3.4 ข้อมูลเบื้องต้นของอุปกรณ์การใช้ไอน้ำ

อุปกรณ์ใช้ไอน้ำจะแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน โดยจะแบ่งออกจากถึงพักไอน้ำรวมตามรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.4.1 อุปกรณ์ใช้ไอน้ำส่วนที่ 1

เครื่องอัดเม็ดอาหารสัตว์ แสดงในรูปที่ 3.15 เป็นอุปกรณ์ใช้ไอน้ำที่ความดัน 7 barg โดยนำไอน้ำเข้าไปผสมกับวัตถุดิบที่ผ่านการคลุกเคล้ามาแล้วเพื่อเพิ่มความชื้นให้กับวัตถุดิบก่อนเข้าสู่กระบวนการอัดเม็ด จึงทำให้วัตถุดิบเกาะตัวเป็นก้อนได้ดี เป็นการใช้ไอน้ำแบบสัมผัสโดยตรง (Direct steam) มีจำนวน 6 เครื่อง



รูปที่ 3.15 เครื่องอัดเม็ดอาหารสัตว์

3.4.2 อุปกรณ์ใช้ไอน้ำส่วนที่ 2

Extruder (เครื่องรีดอาหารสัตว์ให้เป็นแท่ง) แสดงในรูปที่ 3.16 เป็นอุปกรณ์ใช้ไอน้ำที่ความดัน 2.5 barg โดยนำไอน้ำเข้าไปผสมกับวัตถุดิบที่ผ่านการคลุกเคล้ามาแล้วเพื่อเพิ่มความชื้นให้กับวัตถุดิบก่อนเข้าสู่กระบวนการรีดให้เป็นแท่ง เป็นการใช้ไอน้ำแบบสัมผัสโดยตรง (Direct steam) มีจำนวน 7 เครื่อง



รูปที่ 3.16 Extruder (เครื่องรีดอาหารสัตว์ให้เป็นแท่ง)

3.5 ข้อมูลเบื้องต้นของก๊ับดักไอน้ำที่มีปัญหา

จากการสำรวจการใช้ก๊ับดักไอน้ำทั้งหมดของระบบไอน้ำภายในโรงงาน พบว่ามีการใช้ก๊ับดักไอน้ำแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ เชิงกลแบบถ่วงคว่ำ (Mechanical Invert Bucket) แบบจานมีรูระบายอากาศ (Thermodynamic Disc Trap) และเชิงกลแบบลูกลอยมีคาน (Mechanical Lever Float) มีจำนวนทั้งหมด 8 ตัว ติดตั้งกระจายตามระบบส่งจ่ายไอน้ำ และอุปกรณ์ใช้ไอน้ำ ซึ่งข้อมูลของก๊ับดักไอน้ำที่มีปัญหาแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ตารางแสดงข้อมูลก๊ับดักไอน้ำที่ชำรุดในโรงงาน

ความดัน (barg)	ตำแหน่ง	จำนวนก๊ับดักไอน้ำ
2	ชุดอุ่นไขมัน ชุดที่ 1	1
2	ชุดอุ่นไขมัน ชุดที่ 2	3
2	ท่อเมนก่อนเข้าเครื่องอัดเม็ดอาหารสัตว์ ชุดที่ 1	2
7	ท่อเมนก่อนเข้าเครื่องอัดเม็ดอาหารสัตว์ ชุดที่ 2	2

3.6 อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัด

ตารางที่ 3.3 รายการอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัด

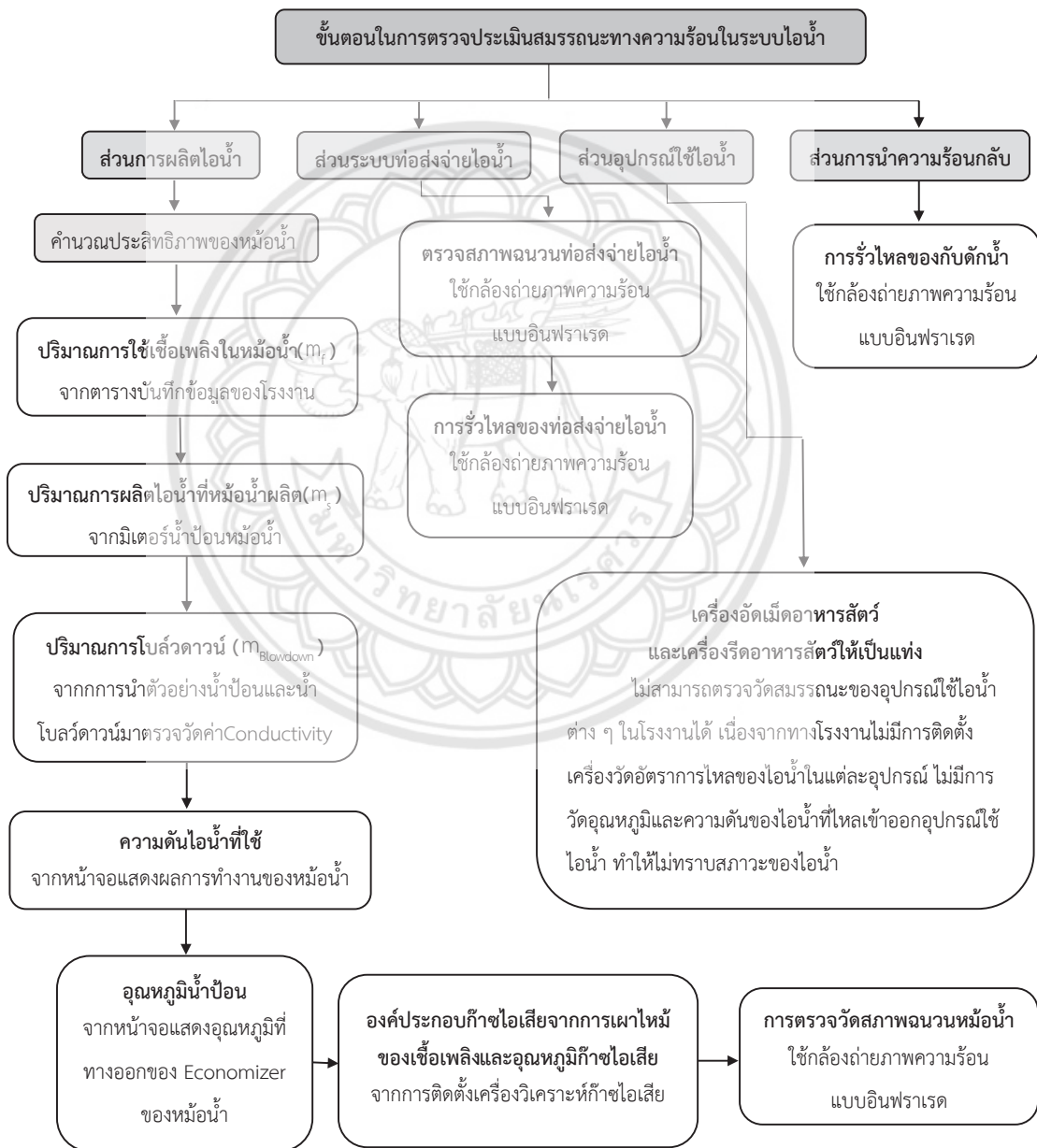
ลำดับ	รายการ	รูปภาพ	การใช้งาน	ส่วนที่ใช้
1	เครื่องวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย		ใช้วัดองค์ประกอบก๊าซไอเสียจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง ดังนี้ CO CO ₂ NO _x และ O ₂ รวมทั้งอุณหภูมิก๊าซไอเสีย	- ส่วนการผลิตไอน้ำ

ตารางที่ 3.3 รายการอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัด (ต่อ)

ลำดับ	รายการ	รูปภาพ	การใช้งาน	ส่วนที่ใช้
2	กล้องถ่ายภาพความร้อนแบบอินฟราเรด		ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิผิววัสดุหม้อน้ำ	- ส่วนการผลิตไอน้ำ - ส่วนระบบท่อส่งจ่ายไอน้ำ - ส่วนของการนำความร้อนกลับ
3	เครื่องตรวจการรั่วไหลของไอน้ำ		ใช้วัดการรั่วไหลของไอน้ำในระบบท่อส่งจ่ายไอน้ำ	- ส่วนระบบท่อส่งจ่ายไอน้ำ - ส่วนของการนำความร้อนกลับ
4	Hygrometer		ตรวจวัดความชื้นอากาศและอุณหภูมิอากาศ	- ส่วนการผลิตไอน้ำ
5	เครื่องวัดค่า pH		ใช้ในการวัดค่า pH ของน้ำป้อนและน้ำโบล์ดวาร์น	- ส่วนการผลิตไอน้ำ
6	เครื่องวัดค่า TDS และค่า Conductivity		ใช้ในการวัดค่า TDS ของน้ำ โดยการจุ่มปลาเครื่องลงในน้ำ ที่ต้องการทดสอบ เช่น น้ำก่อนเข้าหม้อน้ำหรือน้ำโบล์ดวาร์น	- ส่วนการผลิตไอน้ำ

3.7 ขั้นตอนในการตรวจประเมินประสิทธิภาพและมาตรการประหยัดพลังงานในระบบ ไอน้ำ

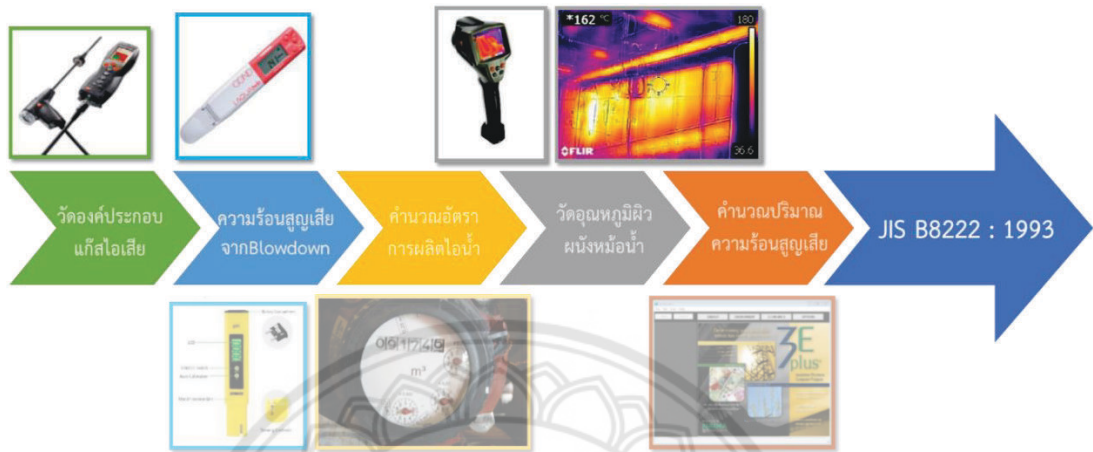
โดยขั้นตอนในการตรวจประเมินประสิทธิภาพและมาตรการประหยัดพลังงานในระบบไอน้ำ แสดงดังแผนภาพรูปที่ 3.17 แบ่งเป็น 4 ส่วน ดังนี้



รูปที่ 3.17 แผนผังขั้นตอนในการตรวจประเมินประสิทธิภาพในระบบผลิตไอน้ำ

3.7.1 ขั้นตอนการตรวจวัดส่วนการผลิตไอน้ำ

ในการตรวจวัดส่วนการผลิตไอน้ำ จะมีลำดับขั้นตอนในการตรวจวัดดังนี้



รูปที่ 3.18 กระบวนการตรวจวัดส่วนการผลิตไอน้ำ

- การตรวจวัดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงในหม้อน้ำ

สามารถตรวจวัดได้จากตารางบันทึกข้อมูลระบบไอน้ำของโรงงานดังแสดงในรูปที่ 3.19 และทำการคำนวณหาค่าเฉลี่ยการใช้เชื้อเพลิงต่อหนึ่งชั่วโมงเพื่อนำค่าที่ได้คำนวณหาค่าประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำต่อไป

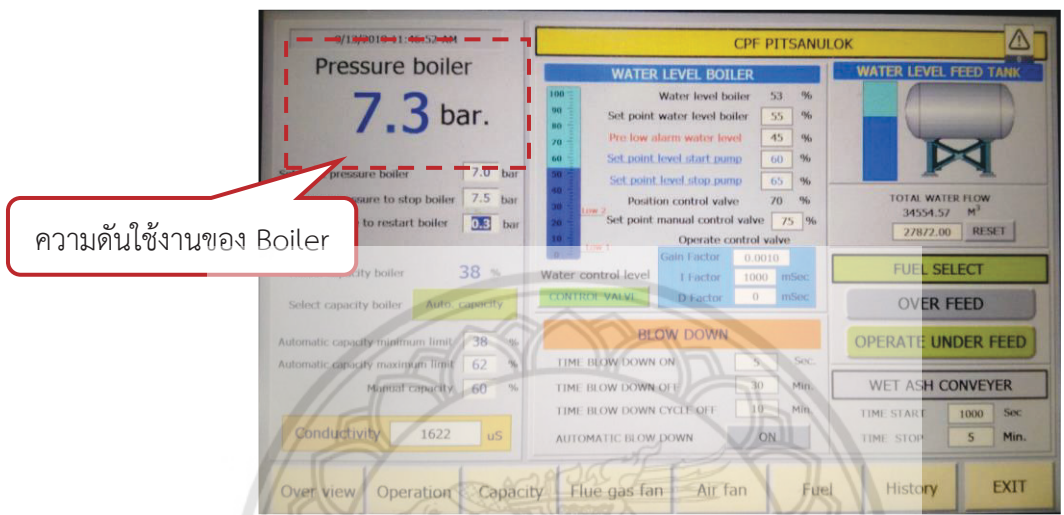
ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงต่อวัน

9350
4640
8140

รูปที่ 3.19 ตารางบันทึกข้อมูลระบบไอน้ำ

- การตรวจวัดความดันไอน้ำที่ใช้งาน

สามารถทราบค่าได้จากการอ่านหน้าจอแสดงผลการทำงานของ Boiler ภายในห้องควบคุม ดังแสดงในรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 หน้าจอแสดงผลการทำงานของ Boiler

- การตรวจวัดปริมาณการผลิตไอน้ำที่หม้อน้ำผลิตได้ต่อชั่วโมง

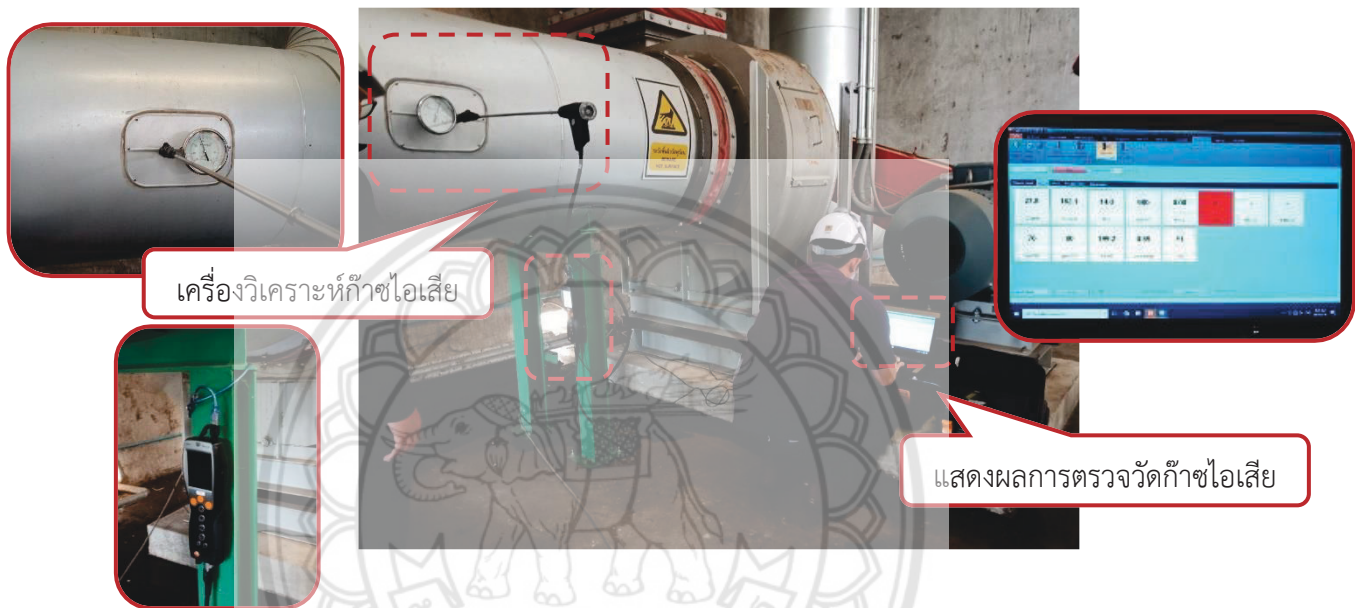
สามารถคำนวณได้จากมิเตอร์น้ำเข้า Boiler ที่มีการจดบันทึกข้อมูลการควบคุมหม้อน้ำรายชั่วโมงจากรางบันทึกข้อมูลของโรงงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.21 ทำให้ทราบปริมาณการผลิตไอน้ำที่หม้อน้ำผลิตได้ต่อชั่วโมง

The image shows a data recording sheet with a grid for logging boiler control data. A red box highlights a specific row of data. The sheet contains various columns for recording parameters over time.

รูปที่ 3.21 ตารางบันทึกข้อมูลการควบคุมหม้อน้ำรายชั่วโมง

- การตรวจวัดก๊าซไอเสียของหม้อน้ำเพื่อดูพฤติกรรมการเผาไหม้

มีการติดตั้งเครื่องวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย เพื่อใช้วัดองค์ประกอบก๊าซไอเสียจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง เช่น CO CO₂ NO_x และ O₂ รวมทั้งอุณหภูมิก๊าซไอเสีย ในการหามาตรการปรับแต่งการเผาไหม้ให้เหมาะสมกับโรงงาน



รูปที่ 3.22 การเก็บข้อมูลการตรวจวัดก๊าซไอเสียของหม้อน้ำ

- การตรวจวัดคุณภาพน้ำป้อน และน้ำโบลว์ดาวน์

มีการขอตัวอย่างน้ำป้อนก่อนเข้าหม้อน้ำและน้ำโบลว์ดาวน์ของหม้อน้ำ (ท่อไฟ) ของทางโรงงาน เพื่อนำมาตรวจวัดคุณภาพด้วยเครื่องวัดค่า TDS PH และค่า Conductivity ดังแสดงในรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 การตรวจวัดค่าPH Conductivity และTDS

- การตรวจวัดอุณหภูมิน้ำป้อน

สามารถทราบค่าได้จากการอ่านหน้าจอสถงอุณหภูมิที่เกี่ยวข้องกับ Boiler ภายในห้องควบคุม ดังแสดงในรูปที่ 3.24 โดยทราบค่าอุณหภูมิน้ำป้อนของ Boiler ได้จากอุณหภูมิน้ำป้อนที่ทางออก Economizer



รูปที่ 3.24 หน้าจอสถงอุณหภูมิที่เกี่ยวข้องกับ Boiler

- การตรวจวัดอัตราการโบลด์าวน์

มีการขอตัวอย่างน้ำป้อนก่อนเข้าหม้อน้ำ และน้ำโบลด์าวน์ของหม้อน้ำ (ท่อไฟ) เพื่อนำมาตรวจวัดคุณภาพด้วยเครื่องวัดค่า TDS และค่า Conductivity เมื่อทราบค่าจากการตรวจวัด จะนำมาคำนวณเพื่อหาอัตราการโบลด์าวน์ของ Boiler ด้วยสมการที่คำนวณหา % Blowdown (% B)

$$\beta = \frac{\text{Feedwater conductivity}}{\text{Blowdown conductivity}} \times 100 \quad (3.1)$$

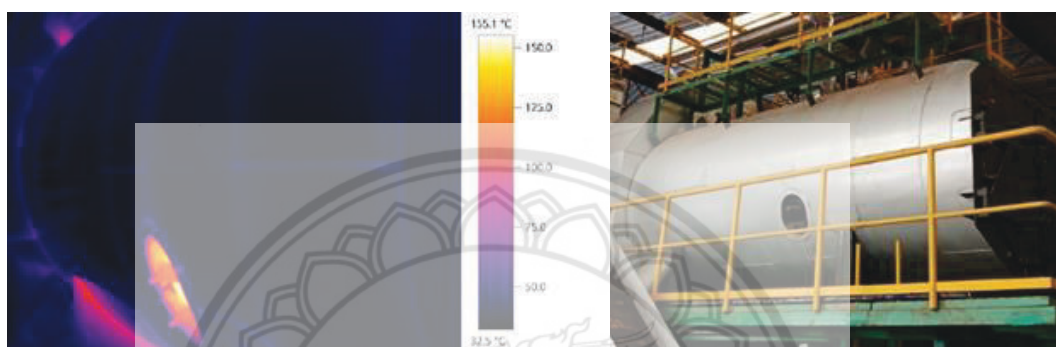
เมื่อได้ค่า % B จะสามารถหาค่าอัตราการโบลด์าวน์ได้ โดยการใช้สมการดังต่อไปนี้

$$\text{Blowdown rate} = \frac{\beta}{100 - \beta} \times \dot{m}_{\text{steam}} \quad (3.2)$$

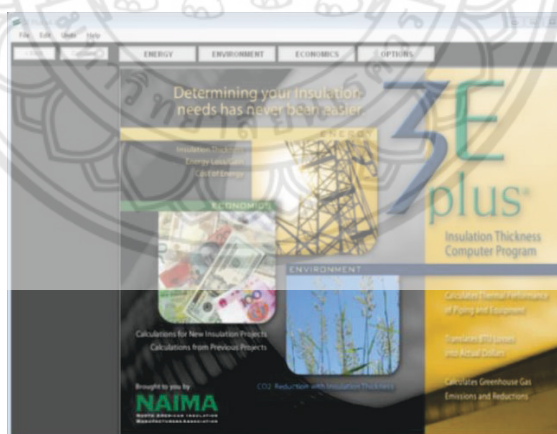
$$\dot{m}_{\text{Blowdown}} = \beta \times \dot{m}_{\text{Feedwater}} \quad (3.3)$$

- การตรวจวัดสภาพฉนวนหม้อน้ำ

มีการใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนแบบอินฟราเรด เพื่อวัดอุณหภูมิผิววัสดุหม้อน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 3.25 จากนั้นนำภาพที่ได้มาหาอุณหภูมิเฉลี่ยของผนังหม้อน้ำด้วยโปรแกรม IR Soft เมื่อได้อุณหภูมิเฉลี่ยของผนังหม้อน้ำ จึงนำไปคำนวณหาความร้อนสูญเสียที่เกิดขึ้นจากผนังหม้อน้ำในโปรแกรม 3E Plus ดังแสดงในรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.25 ตัวอย่างการวัดอุณหภูมิผิววัสดุหม้อน้ำ



รูปที่ 3.26 ตัวอย่างโปรแกรม 3E Plus

3.7.2 ขั้นตอนการตรวจวัดส่วนระบบท่อส่งจ่ายไอน้ำ

ในการตรวจวัดส่วนระบบท่อส่งจ่ายไอน้ำ จะมีลำดับขั้นตอนในการตรวจวัดดังนี้



รูปที่ 3.27 กระบวนการตรวจวัดระบบท่อส่งจ่ายไอน้ำ

- การตรวจวัดสภาพฉนวนท่อส่งจ่ายไอน้ำ

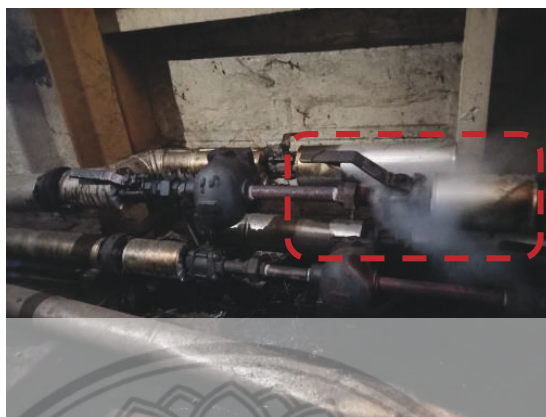
การตรวจวัดสภาพฉนวนทำได้โดยการการใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนแบบอินฟราเรด เพื่อวัดอุณหภูมิบริเวณท่อส่งจ่ายไอน้ำ จากนั้นนำภาพที่ได้มาหาอุณหภูมิเฉลี่ยของท่อส่งจ่ายไอน้ำด้วยโปรแกรม IR Soft ต่อไป



รูปที่ 3.28 สภาพฉนวนท่อส่งจ่ายไอน้ำ

- การตรวจวัดการรั่วไหลของไอน้ำ

การตรวจวัดที่บริเวณท่อส่งจ่ายไอน้ำ ทำได้โดยการตรวจสอบโดยใช้สายตา ถ้ามีการรั่วไอน้ำจะสามารถเห็นถึงกลุ่มไอน้ำหนาแน่นอย่างชัดเจนออกมาจากบริเวณท่อส่งจ่ายไอน้ำ



รูปที่ 3.29 บริเวณท่อส่งจ่ายไอน้ำที่การรั่วไหล

3.7.3 ขั้นตอนการตรวจวัดส่วนของอุปกรณ์ใช้ไอน้ำ

ไม่สามารถตรวจวัดสมรรถนะของอุปกรณ์ใช้ไอน้ำต่าง ๆ ในโรงงานได้ เนื่องจากทางโรงงานไม่มีการติดตั้งเครื่องวัดอัตราการไหลของไอน้ำในแต่ละอุปกรณ์ ไม่มีการวัดอุณหภูมิและความดันของไอน้ำที่ไหลเข้าออกอุปกรณ์ใช้ไอน้ำ ทำให้ไม่ทราบสถานะของไอน้ำ จึงจะทำการตรวจสอบข้อมูลในระบบไอน้ำถึงพฤติกรรมการใช้งานไอน้ำในกระบวนการผลิต สอบถามถึงปัญหาการใช้งานของเครื่องจักรไอน้ำ เพื่อทำวิเคราะห์ข้อมูลและทำการให้คำแนะนำในการแก้ไขจุดบกพร่องเพื่อลดการสูญเสียในระบบไอน้ำของอุปกรณ์ใช้ไอน้ำ

3.7.4 ขั้นตอนการตรวจวัดส่วนของการนำความร้อนกลับ

ในการตรวจวัดส่วนของการนำความร้อนกลับ จะมีลำดับขั้นตอนในการตรวจวัดดังนี้



รูปที่ 3.30 กระบวนการตรวจวัดส่วนการนำความร้อนกลับ

- การตรวจวัดการรั่วไหลของกับดักไอน้ำ

การตรวจวัดที่กับดักไอน้ำบริเวณท่อส่งจ่ายไอน้ำทำได้โดยการการใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนแบบอินฟราเรด เพื่อวัดอุณหภูมิบริเวณกับดักไอน้ำ หากมีการรั่วไหลจะส่งผลให้อุณหภูมิสูงใกล้เคียงกันระหว่างด้านหน้าและด้านหลังกับดักไอน้ำ

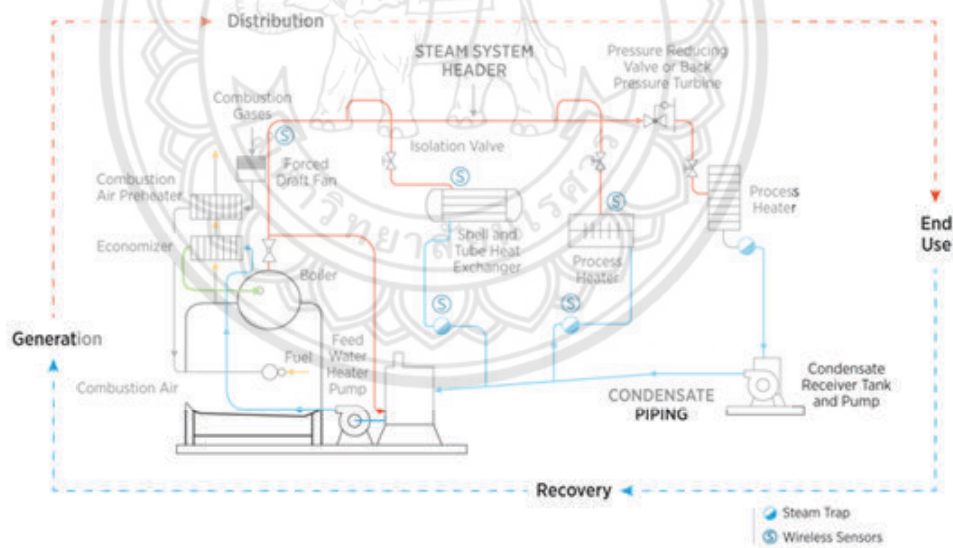


รูปที่ 3.31 ภาพจากกล้องถ่ายภาพความร้อนแบบอินฟราเรด

บทที่ 4

วิเคราะห์ผลการดำเนินงาน

ในการสำรวจเชิงลึก มีการดำเนินการสำรวจและทำการตรวจสอบการทำงานของระบบไอน้ำที่ประกอบด้วย 4 ส่วน คือ ส่วนการผลิตไอน้ำ ส่วนการส่งจ่ายไอน้ำ ส่วนของอุปกรณ์ใช้ไอน้ำและส่วนของการนำความร้อนกลับ รวมถึงอุปกรณ์ส่วนควบคุมต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับระบบไอน้ำในโรงงาน แล้วจึงดำเนินการตรวจวัดเพื่อเก็บข้อมูลมาใช้ในการวิเคราะห์หามาตรการที่มีความเป็นไปได้ในการเพิ่มศักยภาพให้กับอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับระบบไอน้ำ โดยการสำรวจเชิงลึกและการตรวจวัดจะประกอบไปด้วย 4 ระบบไอน้ำที่สำคัญดังต่อไปนี้ ส่วนการผลิตไอน้ำ ส่วนการส่งจ่ายไอน้ำ ส่วนของอุปกรณ์ใช้ไอน้ำและส่วนของการนำความร้อนกลับ



รูปที่ 4.1 ส่วนประกอบระบบไอน้ำ (U.S. Department of Energy)

4.1 การสำรวจเชิงลึกส่วนการผลิตไอน้ำ

4.1.1 การตรวจวัดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงในหม้อน้ำ

จากการสำรวจพบว่าโรงงานแห่งนี้มีการใช้เชื้อเพลิงไม้สับ ในสัดส่วน 100% ในการเผาไหม้ เพื่อให้ความร้อนในการผลิตไอน้ำ แต่โดยภาพรวมโรงงานนี้ทางโรงงานไม่มีอุปกรณ์วัดอัตราการป้อนเชื้อเพลิง อัตราการผลิตไอน้ำ การวัดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงจะใช้ค่าที่ทางโรงงานจดบันทึกตารางบันทึกข้อมูลการควบคุมหม้อน้ำรายชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 4.2 พบว่าหม้อน้ำของทางโรงงานทำการผลิตไอน้ำใช้งานในกระบวนการตลอด 24 ชั่วโมง ซึ่งโดยเฉลี่ยในหนึ่งวัน มีการใช้ไม้สับในปริมาณ 26,630 kg คิดเป็นอัตราการป้อนเชื้อเพลิงได้เท่ากับ 1,109.58 kg/h สำหรับไม้สับ ข้อมูลการรายงานผลค่าองค์ประกอบเชื้อเพลิงแบบ Ultimate analysis แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบเชื้อเพลิง (กรณีมาตรฐานแห้ง) [9]

รายการผลการตรวจวัด	หน่วย	ไม้สับ
คาร์บอน (Carbon, C)	%	48.68
ไฮโดรเจน (Hydrogen, H)	%	6.02
ไนโตรเจน (Nitrogen, N)	%	0.21
ออกซิเจน (Oxygen, O)	%	43
ขี้เถ้า (Ash, a)	%	2
ซัลเฟอร์ (Sulfur, S)	%	0.09
ความชื้น (Moisture)	%	-
รวม	%	100
HHV	kJ/kg	19,217

รูปที่ 4.2 ตารางบันทึกข้อมูลการควบคุมหม้อน้ำรายชั่วโมง

4.1.2 การตรวจวัดความดันไอน้ำที่ใช้งาน

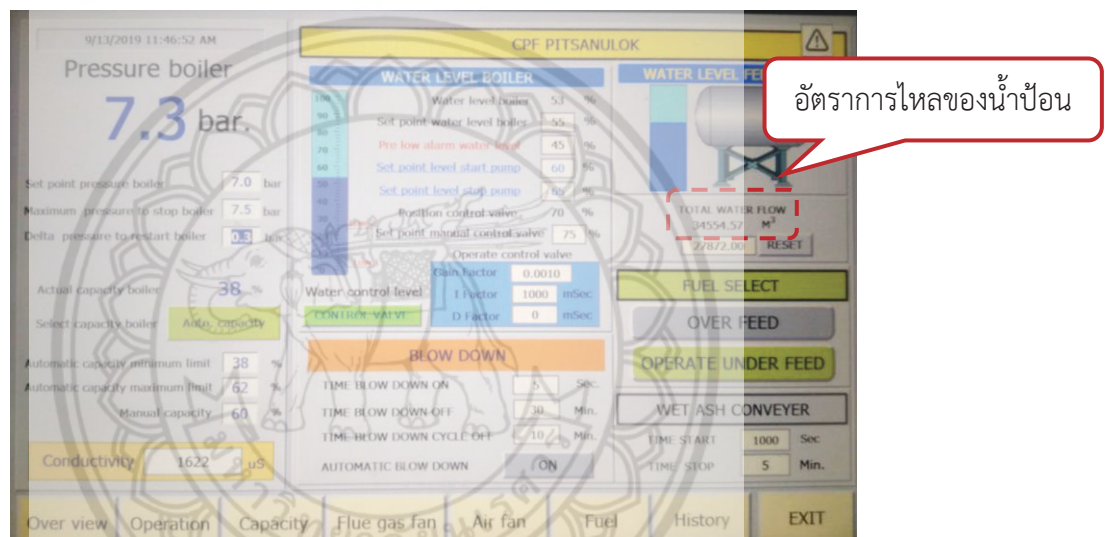
โรงงานแห่งนี้ผลิตไอน้ำส่งเข้าถังพักไอน้ำที่ความดัน 6.5 Barg และส่งไอน้ำไปใช้ที่อุปกรณ์ใช้ไอน้ำหรือใช้ในกระบวนการผลิตตามตำแหน่งต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.2 (อุปกรณ์ใช้ไอน้ำส่วนใหญ่ไม่มีเกจวัดความดันใช้งาน)

ตารางที่ 4.2 ตำแหน่งของความดันไอน้ำที่ใช้งาน

ความดันไอน้ำใช้งาน (Barg)	ตำแหน่ง
6.5	ถังพักไอน้ำรวม
6.5	ถังพักไอน้ำ 1
6.5	ถังพักไอน้ำ 2
2.5	เครื่อง Extruder 1
2.5	เครื่อง Extruder 2
7	เครื่องอัดเม็ด 1
7	เครื่องอัดเม็ด 2
7	เครื่องอัดเม็ด 3
7	เครื่องอัดเม็ด 4

4.1.3 การตรวจวัดปริมาณการผลิตไอน้ำที่หม้อน้ำผลิตได้ต่อชั่วโมง

โรงงานแห่งนี้ไม่มีการติดตั้ง steam flow meter เพื่อวัดอัตราการไหลของไอน้ำที่จะถูกส่งจ่ายไปยังกระบวนการผลิต ดังนั้นจึงทำการวัดอัตราการไหลน้ำป้อนเพื่อนำไปใช้คำนวณหาอัตราการผลิตไอน้ำ โดยวัดจากมิเตอร์น้ำก่อนป้อนเข้าสู่หม้อน้ำตลอดระยะเวลาการทดสอบดังแสดงในรูป 4.3 จากการตรวจวัดพบว่าอัตราการไหลน้ำป้อนเท่ากับ 3,957.377 kg/h โดยโรงงานแห่งนี้มีอัตราการโบลว์ดาวนอยู่ที่ 249.047 kg/h เพราะฉะนั้นอัตราการผลิตไอน้ำของโรงงานนี้ ณ วันที่ทำการตรวจวัดมีค่าเท่ากับ 3,708.33 kg/h



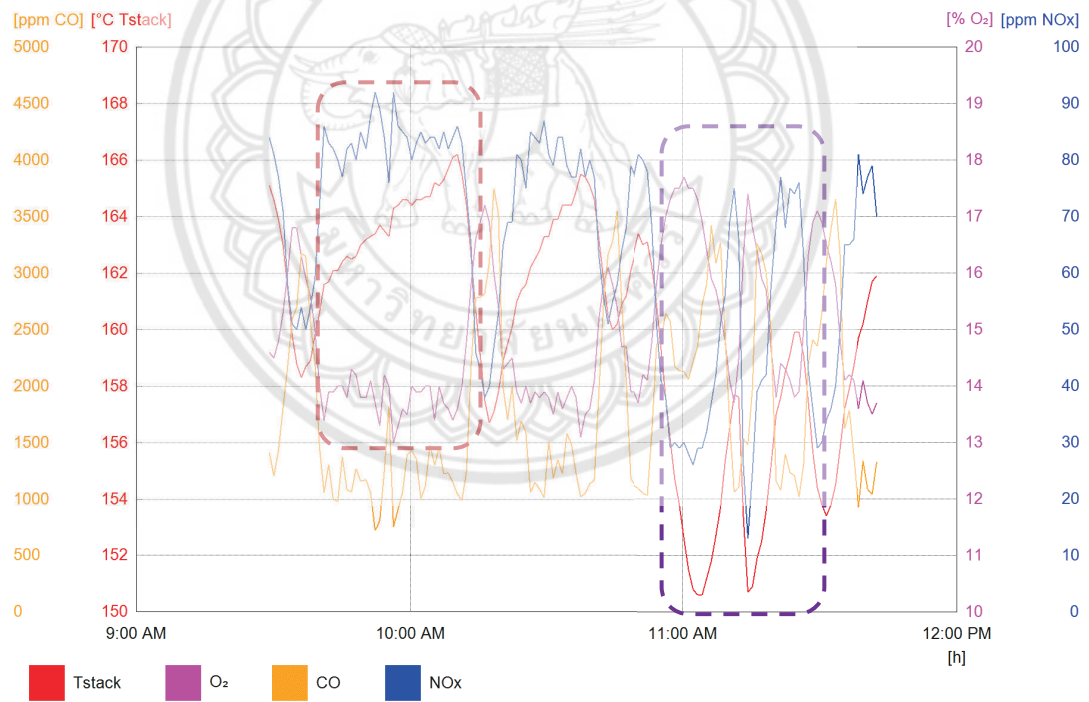
รูปที่ 4.3 มิเตอร์วัดอัตราการไหลน้ำป้อน

4.1.4 การตรวจวัดก๊าซไอเสียของหม้อน้ำเพื่อดูพฤติกรรมการเผาไหม้

โรงงานนี้ใช้หม้อน้ำยี่ห้อ GETABEC ในการผลิตไอน้ำใช้ในกระบวนการผลิต ซึ่งทางเราได้ทำการติดตั้งเครื่องวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย (Testo 330 2L) ที่ตำแหน่งท่อไอเสียด้านหลังหม้อน้ำดังแสดงในรูปที่ 4.4 ได้ผลการตรวจวัดดังแสดงในรูปที่ 4.5 และตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.4 การติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดก๊าซไอเสีย



รูปที่ 4.5 ผลการตรวจวัดก๊าซไอเสียของหม้อน้ำ

ตารางที่ 4.3 ผลการตรวจวัดก๊าซไอเสีย

ก๊าซไอเสีย	หน่วย	ค่า
ปริมาณก๊าซออกซิเจน (O ₂)	%	13.9
ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)	ppm	1,327.44
ปริมาณก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NO _x)	ppm	77.90
อุณหภูมิก๊าซไอเสีย	° C	162.20
อุณหภูมิบรรยากาศ	° C	35
ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์	%	65
อัตราส่วนความชื้น	kg _{water} /kg _{air}	0.0233

จากผลการตรวจวัด พบว่ามีประเด็นสำคัญดังนี้

- ปริมาณก๊าซออกซิเจน (O₂)

ปริมาณอากาศส่วนเกินมีมาก ซึ่งสังเกตได้จากปริมาณ %O₂ ที่มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 13.9 % ซึ่งปกติแล้วหม้อน้ำที่ใช้เชื้อเพลิงแข็งควรมีค่าเฉลี่ยของ %O₂ อยู่ในช่วง 7-10% แสดงให้เห็นว่ายังสามารถปรับแต่งการเผาไหม้ระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงได้ ถ้าปรับสัดส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงให้เหมาะสม อาจทำให้ปริมาณออกซิเจนหลุดออกมาพร้อมแก๊สไอเสียลดลงได้ ดังนั้นการปรับแต่งการเผาไหม้ให้เหมาะสม สามารถนำมาใช้กับโรงงานนี้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของหม้อน้ำและลดปริมาณออกซิเจนส่วนเกินลง

- ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)

ปริมาณเฉลี่ยของ CO มีค่าสูงเท่ากับ 1,327.44 ppm เกินมาตรฐาน ซึ่งอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้มีเพียงพอแต่สัดส่วนการจ่ายอากาศระหว่างลมใต้ตะกรับและลมเหนือตะกรับยังไม่เหมาะสม จึงทำให้การเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ อย่างไรก็ตามหากทำการปรับสัดส่วนการจ่ายอากาศระหว่างลมใต้ตะกรับและลมเหนือตะกรับ จะทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์มากขึ้น ปริมาณ CO จะมีค่าลดลง

- ปริมาณก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x)

NO_x ที่เกิดขึ้นมีค่าเฉลี่ย 77.90 ppm ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ต่ำกว่ามาตรฐาน ค่า NO_x มีค่าต่ำเนื่องจากปริมาณ N₂ ในเชื้อเพลิงมีค่าน้อยมาก อีกทั้งอุณหภูมิการเผาไหม้ค่อนข้างต่ำ (อุณหภูมิในห้องเผาไหม้ต่ำกว่า 590°C) จึงไม่มีการก่อเกิด NO_x ประเภท Fuel NO_x และ Thermal NO_x คาดว่า NO_x ที่วัดได้เป็น Prompt NO_x ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยากันระหว่าง ไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลเล็กกับ N₂ ในอากาศซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ

- อุณหภูมิก๊าซไอเสีย

อุณหภูมิของก๊าซไอเสีย ณ ตำแหน่งที่ตรวจวัดมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 162.20 °C ที่ออกจาก economizer

- ข้อสังเกต

ในช่วงเวลาที่ความดันไอน้ำสูงถึงระดับที่ตั้งไว้ พัดลมและระบบป้อนเชื้อเพลิงจะหยุดตัดการทำงาน (กรอบเส้นประสีม่วง) จะสังเกตเห็นได้ว่าอุณหภูมิไอเสียและปริมาณ NO_x มีค่าลดลง สอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของปริมาณ O₂

ในช่วงเวลาที่ความดันไอน้ำอยู่ต่ำกว่าเกณฑ์ พัดลมและระบบป้อนเชื้อเพลิงจะทำงานอยู่ตลอดเวลา (กรอบเส้นประสีแดง) ทำให้เกิดการเผาไหม้เชื้อเพลิงอย่างต่อเนื่อง จะสังเกตเห็นได้ว่าอุณหภูมิไอเสียและปริมาณ NO_x มีค่าเพิ่มขึ้นและเกิดการบริโภค O₂ เพื่อใช้ในการเผาไหม้ส่งผลให้มีปริมาณลดลง

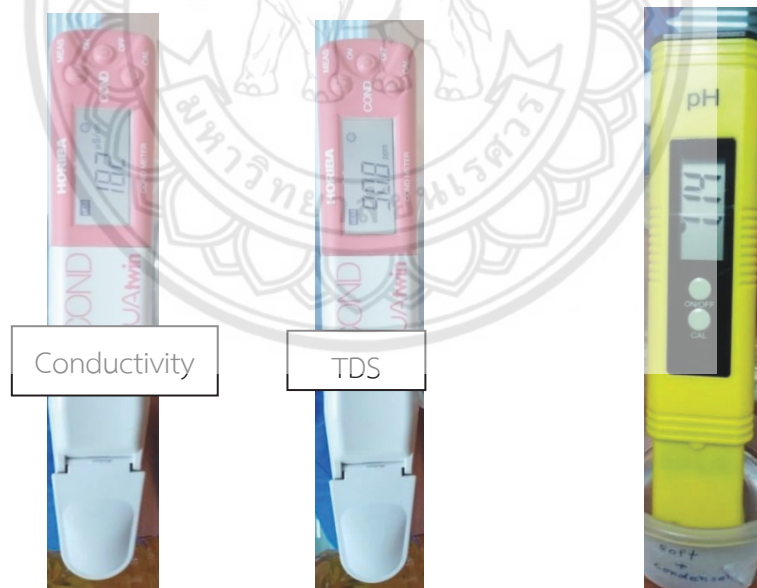
4.1.5 การตรวจวัดคุณภาพน้ำป้อนและน้ำโบล์ดวาร์น

จากการสำรวจพบว่าการโบล์ดวาร์นของหม้อน้ำเครื่องนี้เป็นแบบ automatic ทุกๆ 2 ชั่วโมง เปิดวาล์วค้าง 10 วินาที ในการตรวจวัดคุณภาพน้ำที่ใช้ในหม้อน้ำหรือน้ำโบล์ดวาร์น จะใช้เครื่องมือวัดคุณภาพน้ำแบบพกพาโดยจะทำการสุ่มเก็บตัวอย่างน้ำป้อนหม้อน้ำ ในกรณีที่เป็นน้ำโบล์ดวาร์นจะสุ่มเก็บ ณ เวลาใกล้เคียงกับการโบล์ดวาร์นจริงของโรงงานเพื่อให้ได้ผลการตรวจวัดที่ใกล้เคียงความเป็นจริงและสามารถนำผลการตรวจวัดไปเปรียบเทียบกับข้อมูลน้ำของโรงงานได้อีกด้วย ทั้งนี้ทาง

โรงงานมีการนำน้ำคอนเดนเสทกลับมาใช้ใหม่ รูปการตรวจวัดดังแสดงในรูปที่ 4.6 - 4.7 และสรุปผลการตรวจวัดดังตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.6 การตรวจวัดน้ำ Blowdown



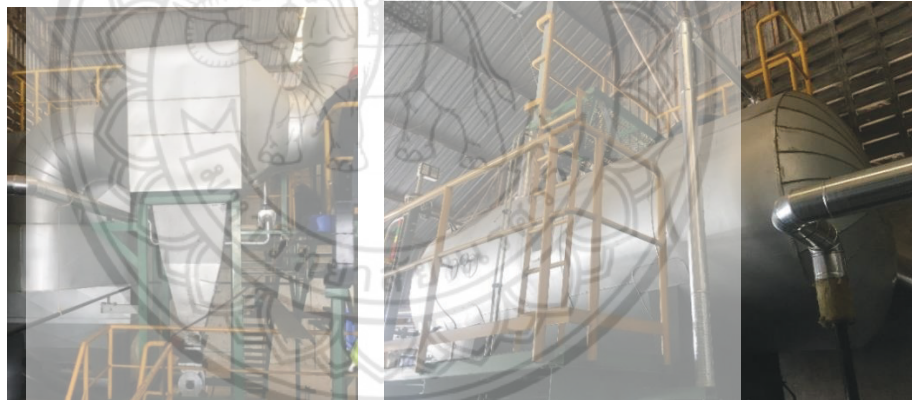
รูปที่ 4.7 การตรวจวัดน้ำ Feed water

ตารางที่ 4.4 ผลการตรวจวัดค่าน้ำ

ค่าตรวจวัด	น้ำโบล์ดาวน์	น้ำป้อน
ค่าการนำไฟฟ้า ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	2,710	182
ค่า TDS (ppm)	1,350	90.8
ค่า PH	12.13	7.14

4.1.6 การตรวจวัดอุณหภูมิน้ำป้อน

จากการสำรวจพบว่าน้ำป้อนที่ใช้ในหม้อน้ำมีอุณหภูมิประมาณ 59 °C ตรวจวัดจากเกจวัดอุณหภูมิของทางโรงงาน ทางโรงงานมีการอุ่นน้ำป้อน โดยใช้ไอน้ำที่ผลิตได้จากหม้อน้ำและติดตั้ง Economizer เพิ่มอุณหภูมิน้ำจนถึง 71 °C ก่อนป้อนเข้าสู่หม้อน้ำ แสดงดังรูปที่ 4.8 และ 4.9



รูปที่ 4.8 Economizer (ซ้าย) และ ถังพักอุ่นน้ำป้อน (ขวา)



รูปที่ 4.9 เกจวัดอุณหภูมิน้ำป้อนก่อนเข้าสู่หม้อน้ำ

4.1.7 การตรวจวัดอัตราการโบล์ดาวน์

จากผลการตรวจวัดคุณภาพน้ำป้อนและน้ำโบล์ดาวน์ในตารางที่ 4.4 สามารถนำข้อมูลตั้งตารางมาคำนวณหาอัตราการโบล์ดาวน์ด้วยสมการที่ (4.1) (4.2) และ (4.3) ซึ่งพบว่าโรงงานแห่งนี้มีอัตราการโบล์ดาวน์อยู่ที่ 249.05 kg/h หรือคิดเป็น 6.72 % ดังแสดงในตารางที่ 4.5

$$\beta = \frac{\text{Feedwater conductivity}}{\text{Blowdown conductivity}} \times 100 \quad (4.1)$$

$$\text{Blowdown rate} = \frac{\beta}{100 - \beta} \times m_{\text{steam}} \quad (4.2)$$

$$m_{\text{Blowdown}} = \beta \times m_{\text{Feedwater}} \quad (4.3)$$

ตารางที่ 4.5 อัตราการโบล์ดาวน์ของหม้อน้ำ

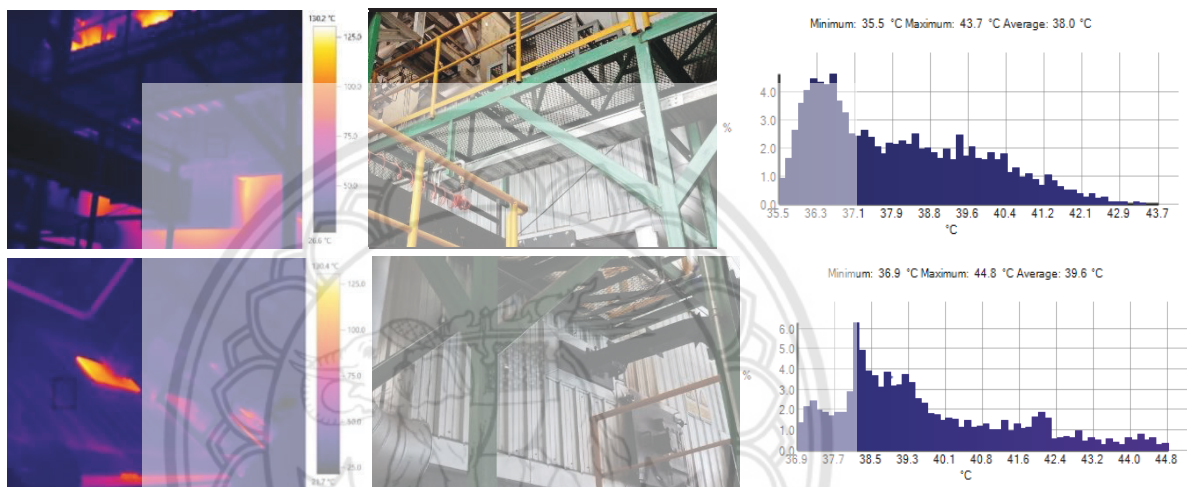
ค่า	หม้อน้ำ
β (%)	6.72
ปริมาณการโบล์ดาวน์ (kg/h)	249.05

4.1.8 การตรวจวัดสภาพนวนหม้อน้ำ

จากการตรวจวัดนวนหม้อน้ำด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนอินฟราเรด พบว่านวนบริเวณผนังรอบหม้อน้ำโดยภาพรวมอยู่ในสภาพที่ดี (อุณหภูมิผิวนวนไม่เกิน 60 °C) แต่ยังมีบางส่วนที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากเป็นส่วนที่ไม่มีการหุ้มนวนเพียงพอ เช่น ผนังฝาหลังของหม้อน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 4.10 - 4.15 และตารางที่ 4.7



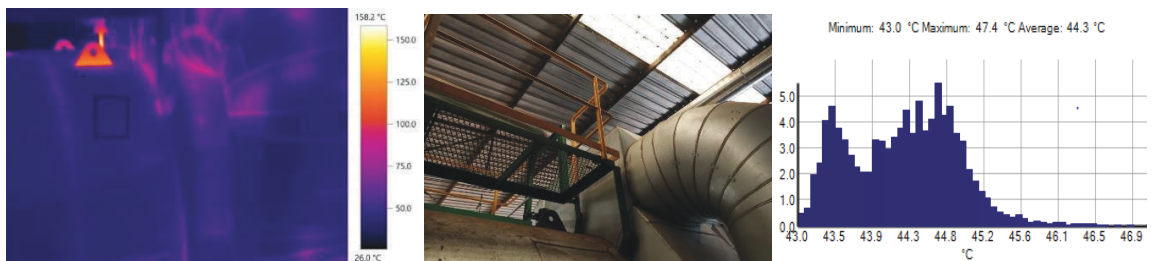
รูปที่ 4.10 อุณหภูมิผนังด้านหน้าห้องเผาไหม้



รูปที่ 4.11 อุณหภูมิผนังด้านข้างห้องเผาไหม้



รูปที่ 4.12 อุณหภูมิผนังด้านหลังห้องเผาไหม้



รูปที่ 4.13 อุณหภูมิผนังด้านหน้าหม้อน้ำ



รูปที่ 4.14 อุณหภูมิผนังด้านข้างหม้อน้ำ

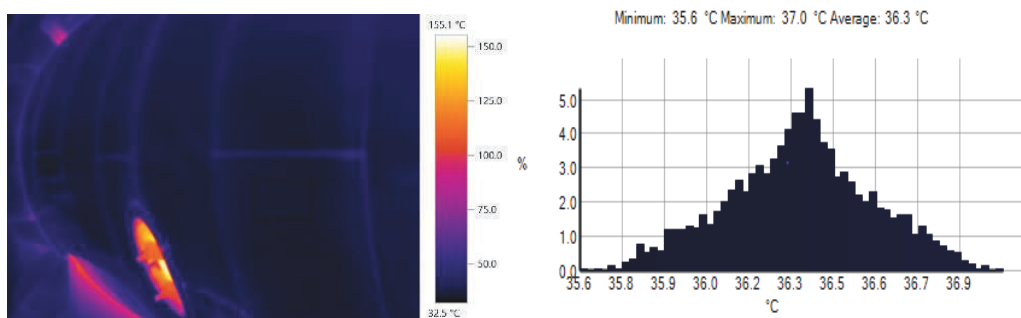


รูปที่ 4.15 อุณหภูมิผนังด้านหลังหม้อน้ำ

- การคำนวณอัตราการสูญเสียความร้อนของผนังหม้อน้ำ

จากการตรวจวัดและเก็บข้อมูลของฉนวนหม้อน้ำด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนอินฟราเรด และนำภาพจากกล้องถ่ายภาพความร้อนมาวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิด้วยโปรแกรม Testo IR Software เพื่อนำมาคำนวณหาอัตราการสูญเสียความร้อนผ่านพื้นผิวของหม้อน้ำ

ตัวอย่าง : การคำนวณอัตราการสูญเสียความร้อนผนังด้านข้างของหม้อน้ำแบบท่อ



รูปที่ 4.16 ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิเฉลี่ยด้วยโปรแกรม Testo IR Software

อุณหภูมิเฉลี่ยของผนังด้านข้างของหม้อน้ำแบบท่อน้ำ จากการวิเคราะห์ คือ 36.3°C เท่ากับ 309.45K

อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมรอบหม้อน้ำ จากการตรวจวัด คือ 35°C เท่ากับ 308.15K

จากสมการที่ 2.18 และ 2.19 หาอัตราการสูญเสียความร้อนผ่านพื้นผิว

$$q = q_{\text{conv}} + q_{\text{rad}}$$

$$q = h(T_s - T_{\infty}) + \epsilon\sigma(T_s^4 - T_{\infty}^4)$$

จากการสำรวจหม้อน้ำพบว่าลักษณะหม้อน้ำเป็นรูปทรงกระบอกบอวกวางแนวนอนและการ

ไหลภายในเป็นการไหลแบบปั่นป่วน จากตารางที่ 2.1 จะได้ค่า $h = 1.25 \times (\Delta T / D)^{1/3}$

แทนค่า

$$h = 1.25 \times \left(\frac{309.45 - 308.15}{2.6} \right)^{1/3} = 0.992 \text{ W / m}^2\text{K}$$

จากภาคผนวก ก Emissivity of Various Surfaces จะได้ $\epsilon = 0.94$ (Steel Plate)

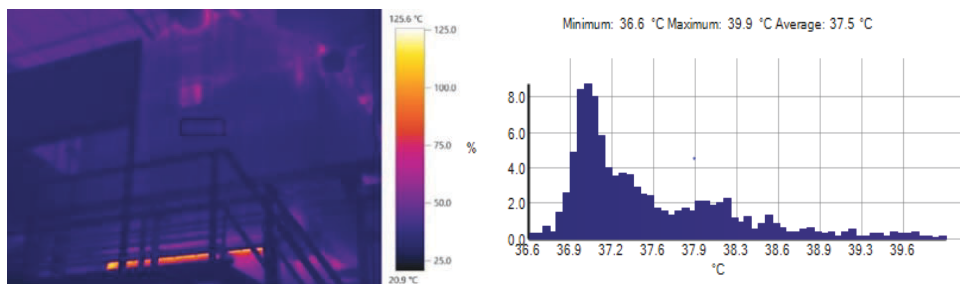
แทนค่า h และ ϵ ลงในสมการที่ 2.19

$$q = h(T_s - T_{\infty}) + \epsilon\sigma(T_s^4 - T_{\infty}^4)$$

$$\begin{aligned} q &= 0.992(309.45 - 308.15) + 0.94 \times (5.67 \times 10^{-8}) \times (309.45^4 - 308.15^4) \\ &= 1.29 + 8.16 \\ &= 9.45 \text{ W / m}^2 \end{aligned}$$

ดังนั้น อัตราการสูญเสียความร้อนผนังด้านข้างของหม้อน้ำแบบท่อน้ำ คือ 9.45 W/m^2

ตัวอย่าง : การคำนวณอัตราการสูญเสียความร้อนผนังด้านหน้าของห้องเผาไหม้



รูปที่ 4.17 ผลการวิเคราะห์วิเคราะห์อุณหภูมิเฉลี่ยด้วยโปรแกรม Testo IR Software

อุณหภูมิเฉลี่ยของผนังด้านหน้าของห้องเผาไหม้ จากการวิเคราะห์ คือ $37.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ เท่ากับ 310.65 K

อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมรอบหม้อน้ำ จากการตรวจวัด คือ $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ เท่ากับ 308.15 K

จากสมการที่ 2.18 และ 2.19 หาอัตราการสูญเสียความร้อนผ่านพื้นผิว

$$q = q_{\text{conv}} + q_{\text{rad}}$$

$$q = h(T_s - T_{\infty}) + \epsilon\sigma(T_s^4 - T_{\infty}^4)$$

จากการสำรวจหม้อน้ำพบว่าลักษณะหม้อน้ำเป็นทรงสี่เหลี่ยมวางแนวนอนและการไหล

ภายในเป็นการไหลแบบราบเรียบ จากตารางที่ 2.1 จะได้ค่า $h = 1.32 \times (\Delta T / L)^{1/4}$

แทนค่า

$$h = 1.32 \times \left(\frac{310.65 - 308.15}{4.75} \right)^{1/4} = 1.124 \text{ W / m}^2\text{K}$$

จากภาคผนวก ก Emissivity of Various Surfaces จะได้ $\epsilon = 0.94$ (Steel Plate)

แทนค่า h และ ϵ ลงในสมการที่ 2.19

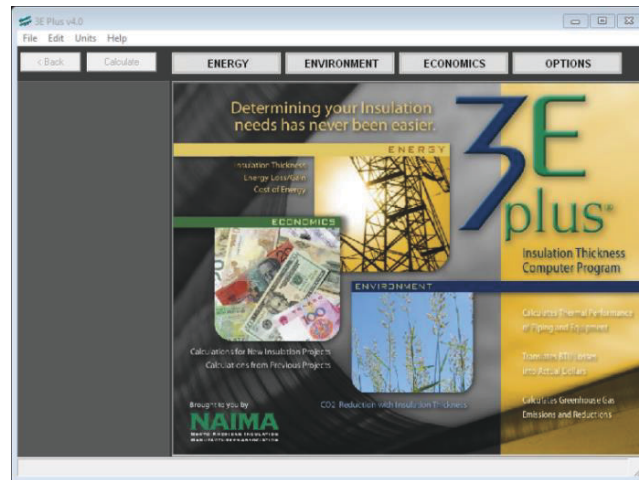
$$q = h(T_s - T_{\infty}) + \epsilon\sigma(T_s^4 - T_{\infty}^4)$$

$$\begin{aligned} q &= 1.124(310.65 - 308.15) + 0.94 \times (5.67 \times 10^{-8}) \times (310.65^4 - 308.15^4) \\ &= 2.81 + 15.79 \\ &= 18.60 \text{ W / m}^2 \end{aligned}$$

ดังนั้น อัตราการสูญเสียความร้อนผ่านผนังด้านหน้าของห้องเผาไหม้ คือ 18.596 w/m^2

- การคำนวณอัตราการสูญเสียความร้อนของผนังหม้อน้ำโดยใช้โปรแกรม 3E Plus

การสูญเสียความร้อนจากผนังหม้อน้ำจะประเมินจากโปรแกรม 3E-PLUS ดังแสดงในรูปที่ 4.18 ซึ่งมีผลการประเมินการสูญเสียความร้อนจากผนังบริเวณผนังหม้อน้ำในส่วนต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.19 - 4.24 และตารางที่ 4.6



รูปที่ 4.18 ตัวอย่างโปรแกรม 3E-PLUS

Variable Insulation Thickness	Surface Temp (°C)	Heat Loss (W/m ²)	Efficiency (%)
Bare	37.5	18.12	
15.0	35.7	5.07	72.04
25.0	35.4	2.91	83.93

รูปที่ 4.19 การประเมินการสูญเสียความร้อนที่ผนังด้านหน้าห้องเผาไหม้ จากโปรแกรม 3E-PLUS

Variable Insulation Thickness	Surface Temp (°C)	Heat Loss (W/m ²)	Efficiency (%)
Bare	39.6	35.41	
15.0	36.3	9.45	73.30
25.0	35.7	5.44	84.63

รูปที่ 4.20 การประเมินการสูญเสียความร้อนที่ผนังด้านข้างห้องเผาไหม้ จากโปรแกรม 3E-PLUS

Variable Insulation Thickness	Surface Temp (°C)	Heat Loss (W/m ²)	Efficiency (%)
Bare	41.9	55.63	
15.0	36.9	14.35	74.21
25.0	36.1	8.23	85.21

รูปที่ 4.21 การประเมินการสูญเสียความร้อนที่ผนังด้านหลังห้องเผาไหม้ จากโปรแกรม 3E-PLUS

Variable Insulation Thickness	Surface Temp (°C)	Heat Loss (W/m ²)	Efficiency (%)
Bare	44.3	77.90	
15.0	37.5	19.54	74.92
25.0	36.5	11.18	85.65

รูปที่ 4.22 การประเมินการสูญเสียความร้อนที่ผนังด้านหน้าหม้อน้ำ จากโปรแกรม 3E-PLUS

Variable Insulation Thickness	Surface Temp (°C)	Heat Loss (W/m ²)	Efficiency (%)
Bare	36.3	8.94	
15.0	35.4	2.58	71.13
25.0	35.2	1.51	83.14

รูปที่ 4.23 การประเมินการสูญเสียความร้อนที่ผนังด้านข้างหม้อน้ำ จากโปรแกรม 3E-PLUS

Variable Insulation Thickness	Surface Temp (°C)	Heat Loss (W/m ²)	Efficiency (%)
Bare	103.6	852.70	
15.0	52.3	171.30	79.91
25.0	45.4	95.82	88.76

รูปที่ 4.24 การประเมินการสูญเสียความร้อนที่ผนังด้านหลังหม้อน้ำ จากโปรแกรม 3E-PLUS

ตารางที่ 4.6 ผลประเมินการสูญเสียความร้อนที่ผนังของหม้อน้ำ

รายการผลการตรวจวัด	หน่วย	ค่า
อุณหภูมิผนังด้านหน้าห้องเผาไหม้(ท่อน้ำ)	°C	37.5
อุณหภูมิผนังด้านข้างห้องเผาไหม้(ท่อน้ำ)	°C	39.6
อุณหภูมิผนังด้านหลังห้องเผาไหม้(ท่อน้ำ)	°C	41.9
อุณหภูมิผนังด้านหน้าหม้อน้ำ	°C	44.3
อุณหภูมิผนังด้านข้างหม้อน้ำ	°C	36.3
อุณหภูมิผนังด้านหลังหม้อน้ำ	°C	103.7
ปริมาณความร้อนสูญเสียต่อหน่วยพื้นที่ผนังด้านหน้าห้องเผาไหม้	W/m ²	18.12
ปริมาณความร้อนสูญเสียต่อหน่วยพื้นที่ผนังด้านข้างห้องเผาไหม้	W/m ²	35.41
ปริมาณความร้อนสูญเสียต่อหน่วยพื้นที่ผนังด้านหลังห้องเผาไหม้	W/m ²	55.63
ปริมาณความร้อนสูญเสียต่อหน่วยพื้นที่ผนังด้านหน้าหม้อน้ำ	W/m ²	77.9
ปริมาณความร้อนสูญเสียต่อหน่วยพื้นที่ผนังด้านข้างหม้อน้ำ	W/m ²	8.94
ปริมาณความร้อนสูญเสียต่อหน่วยพื้นที่ผนังด้านหลังหม้อน้ำ	W/m ²	852.7
พื้นที่ผนังด้านหน้าห้องเผาไหม้ (ท่อน้ำ)	m ²	11.258
พื้นที่ผนังด้านข้างห้องเผาไหม้ (ท่อน้ำ)	m ²	11.258
พื้นที่ผนังด้านหลังห้องเผาไหม้ (ท่อน้ำ)	m ²	11.258
พื้นที่ผนังด้านหน้าหม้อน้ำ	m ²	8.168
พื้นที่ผนังด้านข้างหม้อน้ำ	m ²	57.99
พื้นที่ผนังด้านหลังหม้อน้ำ	m ²	8.168
ความร้อนสูญเสียรวมผ่านพื้นผิว	kW	9.348

จากที่มีการนำโปรแกรม 3E Plus มาช่วยในการหาอัตราการสูญเสียความร้อนผ่านพื้นผิวของผนังหม้อน้ำ จึงมีการเปรียบเทียบการคำนวณอัตราการสูญเสียความร้อนผ่านพื้นผิวหม้อน้ำจากการคำนวณด้วยมือเพิ่มเติม เพื่อความแม่นยำของการหาอัตราการสูญเสียความร้อนที่ถูกต้อง โดยเมื่อใช้โปรแกรม 3E plus ในการคำนวณจะได้ค่าใกล้เคียงกับค่าจากการคำนวณ (ทั้งนี้ค่ามีการคลาดเคลื่อนเนื่องจากใช้ค่า Emissivity ไม่เท่ากัน)

ตารางที่ 4.7 การเปรียบเทียบการคำนวณอัตราการสูญเสียความร้อนผ่านพื้นผิวหม้อน้ำจากการคำนวณและโปรแกรม 3E Plus

ลำดับ	ผนังหม้อน้ำ	คำนวณจากสูตร (W/m ²)	คำนวณจากโปรแกรม (W/m ²)	% ความคลาดเคลื่อน
1	ผนังด้านหน้าห้องเผาไหม้	18.60	18.12	2.65%
2	ผนังด้านข้างห้องเผาไหม้	35.37	35.41	0.11%
3	ผนังด้านหลังห้องเผาไหม้	54.37	55.63	2.32%
4	ผนังด้านหน้าหม้อน้ำ	78.48	77.90	0.74%
5	ผนังด้านข้างหม้อน้ำ	9.45	8.94	5.70%
6	ผนังด้านหลังหม้อน้ำ	850.14	852.70	0.30%

4.1.9 การตรวจวัดประสิทธิภาพหม้อน้ำ

การตรวจวัดประสิทธิภาพหม้อน้ำจะอ้างอิงการตรวจวัดตามมาตรฐาน JIS B8222 : 1993 โดยมีข้อมูลและรายละเอียดการตรวจวัดแสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ข้อมูลแสดงการคำนวณประสิทธิภาพหม้อน้ำ

คำนวณประสิทธิภาพหม้อน้ำ	Unit	LHV	HHV
ความร้อนสูญเสียจากก๊าซไอเสีย	kJ/kg fuel	1,668	3,450
ความร้อนสูญเสียจากการ Blow in furnace	kJ/kg fuel	0	0
ความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์	kJ/kg fuel	139	139
ความร้อนสูญเสียจากกากคาร์บอน	kJ/kg fuel	25	25
ความร้อนสูญเสียจากผนังหม้อน้ำ	kJ/kg fuel	30	30
การสูญเสียความร้อนจากก๊าซไอเสีย (L1)	%	16.2	28.6
การสูญเสียความร้อนจากการ Blow in furnace (L2)	%	0.0	0.0
การสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (L3)	%	1.4	1.2
การสูญเสียจากการกากคาร์บอน (L4)	%	0.2	0.2
การสูญเสียความร้อนทางพื้นผิวผนังหม้อน้ำ (L5)	%	0.3	0.3
ประสิทธิภาพหม้อน้ำ	%	81.86	69.75

4.2 การสำรวจเชิงลึกส่วนของระบบท่อส่งจ่ายไอน้ำ

4.2.1 การตรวจวัดสภาพฉนวนท่อส่งจ่ายไอน้ำ

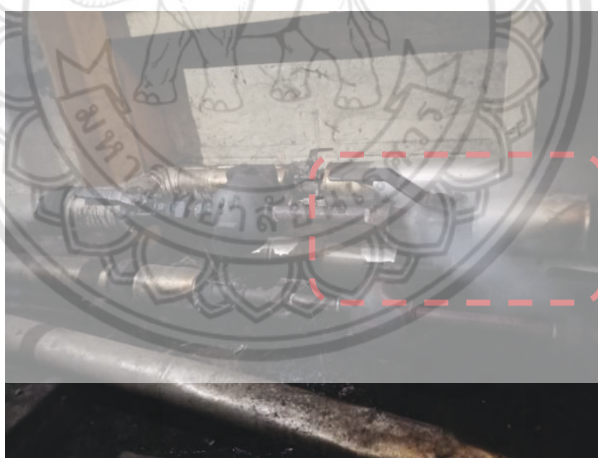
จากการสำรวจและตรวจวัดสภาพฉนวนของท่อส่งจ่ายไอน้ำด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนอินฟราเรด พบว่าสภาพฉนวนท่อส่งจ่ายไอน้ำโดยรวมอยู่ในสภาพดี ดังแสดงในรูปที่ 4.25 เนื่องจากการดูแลและบำรุงรักษาอย่างดี



รูปที่ 4.25 ฉนวนท่อส่งจ่ายไอน้ำ

4.2.2 การตรวจวัดการรั่วไหลของท่อส่งจ่ายไอน้ำ

จากการสำรวจการรั่วไหลของท่อส่งจ่ายไอน้ำในโรงงานพบว่าสภาพของท่อส่งจ่ายอยู่ในเกณฑ์ที่ค่อนข้างดี มีการตรวจสอบอย่างสม่ำเสมอ อย่างไรก็ตามพบเฉพาะบางจุดที่มีการรั่วไหล แสดงดังรูปที่ 4.26 รายละเอียดการคำนวณแสดงในตารางที่ 4.9



รูปที่ 4.26 การรั่วของท่อส่งจ่ายไอน้ำบริเวณหม้อน้ำเก่า

ตารางที่ 4.9 ผลประเมินการรั่วไหลไอน้ำที่ท่อส่งจ่าย

ตำแหน่งรั่วไหล	ความดัน, P (barg)	ขนาด Orifice (mm)	พื้นที่, A (mm ²)	ปริมาณ การรั่วไหล (kg/h)
ท่อส่งจ่ายไอน้ำบริเวณหม้อน้ำเก่า	6.5	1	0.785	4.094
ผลรวม				4.094

หมายเหตุ:

[1] การคำนวณพื้นที่ของรูรั่ว หาได้จาก $A \text{ (mm}^2\text{)} = (\pi/4) \times \text{ขนาดรู orifice}^2$

[2] การคำนวณปริมาณการรั่วไหลของไอน้ำที่กักเก็บใช้ Napier's Flow equation ดังนี้

$$m \text{ (kg/h)} = 0.695 \times A \text{ (mm}^2\text{)} \times P \text{ (bar,a)} \times \text{Hydraulic diameter}$$

4.3 การสำรวจเชิงลึกส่วนของอุปกรณ์ใช้ไอน้ำ

การสำรวจเชิงลึกส่วนของอุปกรณ์ใช้ไอน้ำจะทำการตรวจสอบข้อมูลในระบบไอน้ำ พฤติกรรม การใช้งานไอน้ำในกระบวนการผลิต สอบถามถึงปัญหาการใช้งานของเครื่องจักรไอน้ำ เพื่อทำ วิเคราะห์ข้อมูลและทำการให้คำแนะนำในการแก้ไขจุดบกพร่องเพื่อลดการสูญเสียในระบบไอน้ำ ทั้งนี้ โรงงานมีการใช้ไอน้ำโดยแบ่งออกเป็น 9 ความดันที่ใช้งาน และมีการใช้ความดันไอน้ำตามตารางที่ 4.3 จากการสำรวจและการสอบถามผู้ที่เกี่ยวข้องพบว่าอุปกรณ์ที่ใช้ไอน้ำ ทางเราไม่สามารถตรวจวัด สมรรถนะของอุปกรณ์ใช้ไอน้ำได้ เนื่องจากทางโรงงานไม่มีการติดตั้งเครื่องวัดอัตราการไหลของไอน้ำ ในแต่ละอุปกรณ์และไม่มีการวัดอุณหภูมิและความดันของไอน้ำที่ไหลเข้าออกอุปกรณ์ใช้ไอน้ำ ทำให้ ไม่ทราบสถานะของไอน้ำ

4.4 การสำรวจเชิงลึกส่วนของการนำความร้อนกลับ

4.4.1 การตรวจวัดการรั่วไหลของกักเก็บไอน้ำ

จากการตรวจวัดรวมถึงการสอบถามกักเก็บไอน้ำ พบว่ากักเก็บไอน้ำมีการชำรุดจำนวน 8 ตัว ดัง แสดงในตารางที่ 4.10 และแสดงในรูปที่ 4.27 - 4.30 ซึ่งในการตรวจวัดกักเก็บไอน้ำจะใช้กล้อง ถ่ายภาพความร้อนอินฟราเรดในการตรวจสอบ เมื่อพบจุดที่ชำรุดหรือมีการรั่วไหลของไอน้ำจะทำการ แจ้งเบื้องต้นให้กับโรงงานรับทราบเพื่อดำเนินการซ่อมแซมจุดที่ชำรุดหรือมีการรั่วไหลของไอน้ำต่อไป

ตารางที่ 4.10 ผลประเมินการรั่วไหลของก๊าดักไอน้ำ

ความดัน (barg)	ประเภท	ขนาดท่อ (นิ้ว)	ขนาดรู (orifice) (mm)	พื้นที่ ^[1] (mm ²)	จำนวน	Steam leak ^[2] (kg/h)
2	Thermodynamics	3/4	3	7.069	1	3.68
2	Thermodynamics	3/4	3	7.069	1	3.68
2	ลูกลอย	3/4	3	7.069	1	3.68
2	Thermodynamics	3/4	3	7.069	1	3.68
2	Thermodynamics	3/4	3	7.069	1	3.68
2	Thermodynamics	3/4	3	7.069	1	3.68
7	Bucket	3/4	3	7.069	1	9.82
7	Bucket	3/4	3	7.069	1	9.82
ผลรวม					2 barg	22.11
					7 barg	19.65

หมายเหตุ:

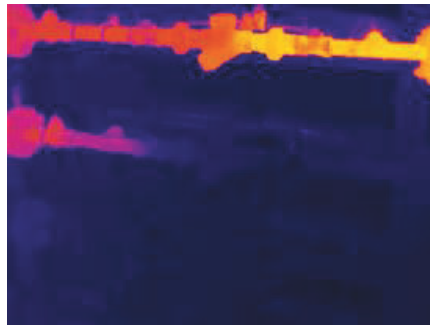
[1] การคำนวณพื้นที่ของรูรั่ว หาได้จาก $A \text{ (mm}^2\text{)} = (\pi/4) \times \text{ขนาดรู orifice}^2$

[2] การคำนวณปริมาณการรั่วไหลของไอน้ำที่ก๊าดักใช้ Napier's Flow equation ดังนี้

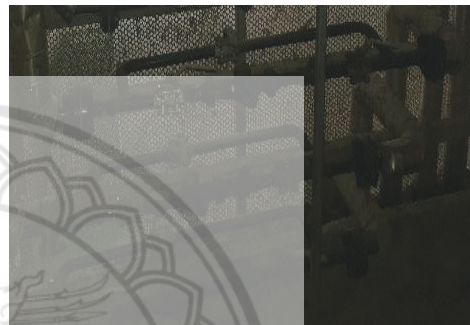
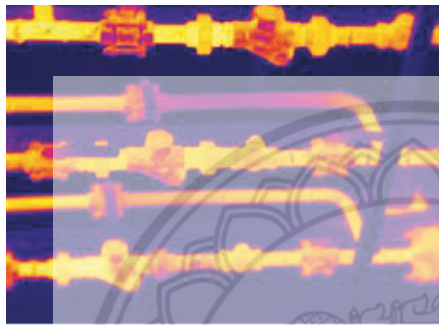
$$m \text{ (kg/h)} = 0.25 \times 0.695 \times A \text{ (mm}^2\text{)} \times P \text{ (bar,a)} \times \text{Hydraulic diameter}$$

ตารางที่ 4.11 ก๊าดักไอน้ำที่มีการชำรุด

ลำดับ	ตำแหน่ง	จำนวน
1	ชุดอุ่นไขมัน ชุดที่ 1	1
2	ชุดอุ่นไขมัน ชุดที่ 2	3
3	ท่อเมนก่อนเข้าเครื่องอัดเม็ดอาหารสัตว์ ชุดที่ 1	2
4	ท่อเมนก่อนเข้าเครื่องอัดเม็ดอาหารสัตว์ ชุดที่ 2	2



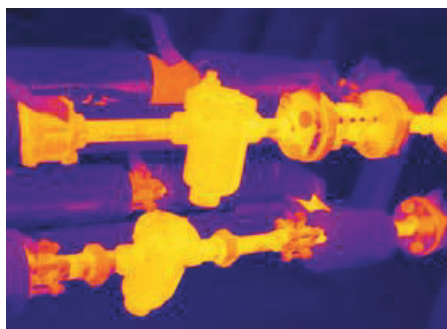
รูปที่ 4.27 ชุดอุโมงค์ไขมัน ชุดที่ 1



รูปที่ 4.28 ชุดอุโมงค์ไขมัน ชุดที่ 2



รูปที่ 4.29 ท่อเมนก่อนเข้าเครื่องอัดเม็ดอาหารสัตว์ ชุดที่ 1



รูปที่ 4.30 ท่อเมนก่อนเข้าเครื่องอัดเม็ดอาหารสัตว์ ชุดที่ 2

บทที่ 5

สรุปผลการดำเนินงาน

จากการที่ได้เข้าตรวจวัดและประเมินศักยภาพระบบไอน้ำของโรงงาน พร้อมนำข้อมูลมาวิเคราะห์เพื่อนำเสนอมาตรการ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบไอน้ำให้กับโรงงาน โดยจะนำเสนอผลการประหยัดพลังงานในระบบไอน้ำทั้ง 4 ส่วน คือ ส่วนการผลิตไอน้ำ ส่วนการส่งจ่ายไอน้ำ ส่วนของอุปกรณ์ใช้ไอน้ำ และ ส่วนของการนำความร้อนกลับ ดังนี้

ตารางที่ 5.1 ตารางสรุปศักยภาพและการดำเนินมาตรการสำหรับระบบไอน้ำของโรงงาน

ระบบไอน้ำ	ปัญหาที่พบจากการตรวจวัด	มาตรการ
ส่วนการผลิตไอน้ำ	- ปริมาณก๊าซออกซิเจน (O ₂) เกินมาตรฐาน - ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เกินมาตรฐาน	การปรับแต่งการเผาไหม้
	ฉนวนบริเวณผนังรอบหม้อน้ำบางส่วน มีอุณหภูมิสูง	ปรับปรุงฉนวนหม้อน้ำ
ส่วนการส่งจ่ายไอน้ำ	มีการรั่วไหลของท่อส่งจ่ายไอน้ำบางส่วน	ลดการรั่วไหลของไอน้ำในระบบไอน้ำ
ส่วนอุปกรณ์ใช้ไอน้ำ		-
ส่วนการนำความร้อนกลับ	ก๊าดักไอน้ำมีการชำรุด	ลดการรั่วไหลของก๊าดักไอน้ำ

5.1 การดำเนินมาตรการส่วนการผลิตไอน้ำ

5.1.1 มาตรการปรับแต่งการเผาไหม้ของหม้อน้ำ

จากการสำรวจพบว่าปริมาณออกซิเจนโดยเฉลี่ยจะมีค่า 13.9 % ส่งผลให้เกิดการสูญเสียความร้อนในการเผาไหม้ไปกับอากาศส่วนเกิน โดยทำการปรับช่องจ่ายอากาศส่วนอากาศเข้าบริเวณเหนือตะแกรงให้เหมาะสมจนได้ปริมาณออกซิเจนอยู่ที่ 9 % จะทำให้หม้อน้ำสามารถรักษาปริมาณอากาศส่วนเกินได้ค่อนข้างคงที่ และสามารถปรับลดปริมาณ O_2 ในก๊าซไอเสียลงได้อีก โดยในการปรับแต่งการเผาไหม้คาดการณ์ว่าจะสามารถควบคุม $\%O_2$ ได้ให้ประสิทธิภาพหม้อน้ำสูงขึ้นที่ 5.62 % (อ้างอิงการคำนวณด้วยมาตรฐาน JIS B8222) ดังแสดงในตารางที่ 5.2 จะใช้ค่าประสิทธิภาพหม้อน้ำที่ใช้ค่าความร้อนทางสูง และนำมาคำนวณหาผลประหยัดส่งผลให้เกิดผลประหยัด 1,200,662.22 บาท/ปี ดังแสดงในตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.2 ประสิทธิภาพหม้อน้ำ (มาตรการปรับแต่งการเผาไหม้)

Boiler efficiency based (JIS B8222)	ประสิทธิภาพหม้อน้ำ (%)	
	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง
LHV based	81.86	88.45
HHV based	69.75	75.37

ตารางที่ 5.3 ผลประหยัดจากการดำเนินมาตรการปรับแต่งการเผาไหม้ของหม้อน้ำ

รายการ	สัญลักษณ์	หน่วย	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง
ปริมาณก๊าซออกซิเจน	O	%	13.90	9.00
ประสิทธิภาพหม้อน้ำ	Eff _b	%	69.75	75.37
ความร้อนสูญเสีย	HV	kJ/kgfuel	3,449.84	2,830.36
ปริมาณการใช้เชื้อเพลิง		kg/h	1,109.58	
ชั่วโมงทำงาน	hy	h/y	8,760	
ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง	HHV	kJ/kg	12,047	
ศักยภาพการประหยัดพลังงาน	DE	GJ/y	33,532.15	27,510.92
คิดเป็นเชื้อเพลิงเทียบเท่า	Dmf	kg/y	3,990,425.68	3,029,895.90
ราคาเชื้อเพลิง	fc	Baht/ton	1,250	
จำนวนเงินที่สูญเสีย	MS	Baht/y	4,988,032.10	3,787,369.88
มูลค่าผลประหยัด		Baht/y	1,200,662.22	

5.1.2 มาตรการปรับปรุงจำนวนหม้อน้ำ

จากการตรวจวัดอุณหภูมิหม้อน้ำด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนอินฟราเรด พบว่าอุณหภูมิผิวผนังรอบหม้อน้ำโดยภาพรวมอยู่ในสภาพที่ดี (อุณหภูมิผิวผนังไม่เกิน 60 °C) แต่ยังมีส่วนผนังผาหลังของหม้อน้ำที่มีอุณหภูมิสูง เนื่องจากเป็นส่วนที่มีการหุ้มฉนวนไม่เพียงพอ เมื่อทางโรงงานทำการหุ้มฉนวนจะส่งผลให้เกิดผลประหยัด 28,992.25 บาท/ปี ดังแสดงในตารางที่ 5.4

Variable Insulation Thickness	Surface Temp (°C)	Heat Loss (W/m ²)	Efficiency (%)	ก่อนปรับปรุง
Bare	103.6	852.70		
15.0	52.3	171.30	79.91	
25.0	45.4	95.82	88.76	หลังปรับปรุง

รูปที่ 5.1 ความร้อนสูญเสียของผนังด้านหลังหม้อน้ำ

ตารางที่ 5.4 ผลประหยัดจากการดำเนินมาตรการปรับปรุงฉนวนหม้อน้ำ

รายการ	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่า
รวมปริมาณความร้อนสูญเสียก่อนหุ้มฉนวน	HL_1	kW	9.35
รวมปริมาณความร้อนสูญเสียหลังหุ้มฉนวน	HL_2	kW	3.17
ประสิทธิภาพหม้อน้ำ	Eff_b	%	69.75
ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง	HHV	kJ/kg	12,047
ชั่วโมงการทำงาน	hy	h/y	8,760
การใช้พลังงานก่อนปรับปรุง	E_1	GJ/year	294.86
การใช้พลังงานหลังปรับปรุง	E_2	GJ/year	99.97
ศักยภาพการประหยัดพลังงาน	DE	GJ/year	194.89
คิดเป็นเชื้อเพลิงเทียบเท่า	Dmf	kg/year	23,193.80
ราคาเชื้อเพลิง	fc	Baht/ton	1,250
มูลค่าผลประหยัด	MS	Baht/year	28,992.25

5.2 การดำเนินมาตรการส่วนของระบบส่งจ่ายไอน้ำ

5.2.1 มาตรการลดการรั่วไหลของไอน้ำในระบบส่งจ่ายไอน้ำ

จากการสำรวจการรั่วไหลของท่อส่งจ่ายไอน้ำในโรงงาน พบว่ามีการรั่วไหลของท่อส่งจ่ายไอน้ำบริเวณหม้อน้ำเก่า ขนาดท่อ $\frac{3}{4}$ นิ้ว เมื่อทางโรงงานทำการปรับปรุงจะส่งผลให้เกิดผลประหยัด 14,747.33 บาท/ปี ดังแสดงในตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 ผลประหยัดจากการดำเนินมาตรการลดการรั่วไหลของไอน้ำในระบบไอน้ำ

รายการ	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่า
ปริมาณไอน้ำรั่วไหล	Cpf	kg/h	4.09
ชั่วโมงทำงาน	hy	h	8,760
ประสิทธิภาพหม้อน้ำ,HHV	Eff	%	69.75
ค่าความร้อนเชื้อเพลิง	HHV	kJ/kg	12,047
เอนทาลปีของไอน้ำ	hs	kJ/kg	2,765.71
ศักยภาพการประหยัดพลังงาน	DE	GJ/y	99.1
คิดเป็นเชื้อเพลิงเทียบเท่า	Dmf	kg/y	11,797.9
ราคาเชื้อเพลิง	Fc	Baht/ton	1,250
มูลค่าผลประหยัด	MS	Baht/y	14,747.33

5.3 การดำเนินมาตรการส่วนของอุปกรณ์ใช้ไอน้ำ

จากการดำเนินการสำรวจพบว่า ไม่มีมาตรการสำหรับส่วนการใช้ไอน้ำของโรงงาน เนื่องจากอุปกรณ์ไอน้ำของโรงงานมีการบำรุงรักษาอย่างสม่ำเสมอ

5.4 การดำเนินมาตรการส่วนของการนำความร้อนกลับ

5.4.1 มาตรการลดการรั่วของไอน้ำผ่านก๊อบดักไอน้ำ

จากการตรวจวัดรวมถึงการสอบถามกับดักไอน้ำ พบว่าก๊อบดักไอน้ำอยู่ในสภาวะผิดปกติ (ชำรุด) จำนวน 8 ตัว และเมื่อทางโรงงานทำการเปลี่ยนก๊อบดักไอน้ำจะส่งผลให้เกิดผลประหยัด 149,396.96 บาท/ปี ดังแสดงในตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.6 ผลประหยัดจากการดำเนินมาตรการลดการรั่วของไอน้ำผ่านกับดักไอน้ำ

รายการ	สัญลักษณ์	หน่วย	2 barg	7 barg
ปริมาณไอน้ำรั่วไหล	Cpf	kg/h	22.11	19.65
ชั่วโมงทำงาน	hy	h	8,760	8,760
ประสิทธิภาพหม้อน้ำ, HHV	Eff	%	69.75	69.75
ค่าความร้อนเชื้อเพลิง	HHV	kJ/kg	12,047	12,047
เอนทาลปีของไอน้ำ	hs	kJ/kg	2,725.09	2,768.37
ศักยภาพการประหยัดพลังงาน	DE	GJ/y	527.7	476.5
คิดเป็นเชื้อเพลิงเทียบเท่า	Dmf	kg/y	62,804.6	56,713.0
ราคาเชื้อเพลิง	Fc	Baht/ton	1,250	1,250
มูลค่าผลประหยัด	MS	Baht/y	78,505.8	71,0891.2
รวมมูลค่าผลประหยัด		Baht/y	149,396.96	

5.5 ผลการตรวจติดตามการดำเนินมาตรการประหยัดพลังงานในระบบไอน้ำ

จากการดำเนินการตรวจติดตามการดำเนินมาตรการต่าง ๆ ของโรงงานนั้น ทำให้เกิดผลประหยัดจริงรวม 1,393,798.76 บาท/ปี ดังแสดงในตารางที่ 5.7

ตารางที่ 5.7 ตารางสรุปผลประหยัดจากการดำเนินมาตรการระบบไอน้ำของโรงงาน

ระบบไอน้ำ	มาตรการ	ศักยภาพ (บาท/ปี)
ส่วนการผลิตไอน้ำ	การปรับแต่งการเผาไหม้	1,200,662.22
	ปรับปรุงฉนวนหม้อน้ำ	28,992.25
ส่วนการส่งจ่ายไอน้ำ	ลดการรั่วไหลของไอน้ำในระบบไอน้ำ	14,747.33
ส่วนอุปกรณ์ใช้ไอน้ำ	-	-
ส่วนการนำความร้อนกลับ	ลดการรั่วไหลของกับดักไอน้ำ	149,396.96
รวมผลประหยัดทั้งหมด (บาท/ปี)		1,393,798.76

5.6 สรุปผลของโครงการ

จากการเข้าสำรวจระบบผลิตไอน้ำของบริษัท ซีพีเอฟ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) จังหวัด พิษณุโลกพบว่า ในส่วนของการผลิตไอน้ำมีการติดตั้งหม้อน้ำจำนวน 1 เครื่อง รุ่น GETABEC เป็น หม้อน้ำแบบตะแกรงรับน้ำผสมกันระหว่างท่อน้ำและท่อไฟ (Fix grate hybrid boiler) กำลังการผลิตไอน้ำขนาด 8 ton/hr ความดันใช้งาน 6.5-7.5 barg และมีไม้สับเป็นเชื้อเพลิง จากการตรวจวัดจะเห็นได้ว่าปริมาณก๊าซออกซิเจน (O_2) อยู่ที่ 13.9 % ซึ่งมีความสูงกว่ามาตรฐานที่กำหนดไว้คือไม่เกิน 9 % และอุณหภูมิผนังด้านหลังหม้อน้ำมีค่าสูง เนื่องจากมีการหุ้มฉนวนที่ไม่เพียงพอ จึงมีการออกมาตรการ การปรับแต่งการเผาไหม้และปรับปรุงฉนวนหม้อน้ำ ในส่วนท่อส่งจ่ายไอน้ำ สภาพฉนวนของท่อส่งจ่ายไอน้ำอยู่ในสภาพดีและมีบางส่วนท่อส่งจ่ายไอน้ำมีการรั่วไหล จึงมีการออกมาตรการลดการรั่วไหลของไอน้ำในระบบท่อส่งจ่ายไอน้ำ ในส่วนอุปกรณ์ใช้ไอน้ำแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ เครื่องอัดเม็ดอาหารสัตว์และเครื่องรีดอาหารสัตว์ให้เป็นแท่ง ในส่วนนี้ไม่สามารถตรวจวัดสมรรถนะของอุปกรณ์ใช้ไอน้ำต่าง ๆ ในโรงงานได้ เนื่องจากทางโรงงานไม่มีการติดตั้งเครื่องวัดอัตราการไหลของไอน้ำในแต่ละอุปกรณ์ ไม่มีการวัดอุณหภูมิและความดันของไอน้ำที่ไหลเข้าออกอุปกรณ์ใช้ไอน้ำ ทำให้ไม่ทราบสถานะของไอน้ำ และในส่วนของ การนำความร้อนกลับ กับดักไอน้ำบางส่วนมีการชำรุดจำนวน 8 ตัว จึงมีการออกมาตรการลดการรั่วไหลของกับดักไอน้ำ จากการตรวจวัดระบบไอน้ำของทางโรงงานพบว่า มีศักยภาพการประหยัดพลังงานประกอบด้วย มาตรการการปรับแต่งการเผาไหม้ มาตรการปรับปรุงฉนวนหม้อน้ำ มาตรการลดการรั่วไหลของไอน้ำในระบบไอน้ำและมาตรการลดการรั่วไหลของกับดักไอน้ำ มาตรการทั้งหมดทำให้เกิดผลประหยัดจริงรวม 1,393,798.76 บาท/ปี

เอกสารอ้างอิง

- [1] กระทรวงพลังงาน. (2561, มีนาคม 2). แผนอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ.2558–2579. Retrieved from Green Network: <https://greennetworkthailand.com/wp-content/uploads/2018/04/EEP2015-min.pdf>
- [2] ผู้ดูแลเว็บไซต์. (2560, สิงหาคม 25). กรมโรงงานฯ ยกระดับหม้อน้ำสมองกลตั้งเป้านำร่อง โรงงานลดใช้พลังงาน กว่า 1,000 ล้านบาทต่อปี. Retrieved from ศูนย์ข่าวข้อมูลข่าวสารกรมโรงงานอุตสาหกรรม: aep.diw.go.th/diw_info/ข่าวประชาสัมพันธ์/กรมโรงงานฯ-ยกระดับหม้อน้ำสมองกลตั้งเป้านำร่องโรงงานลดใช้พลังงาน-กว่า-1000-ล้านบาทต่อปี.html
- [3] กรมโรงงานอุตสาหกรรม. (2562, กุมภาพันธ์ 1). คู่มือสำหรับการตรวจสอบความปลอดภัยของหม้อน้ำและพลังงานของระบบไอน้ำ. Retrieved from <http://php.diw.go.th/safety/wp-content/uploads/2015/01/boiler2.pdf>
- [4] ORGANIZATION, U. N. (2012, October). Generic Steam System and Components. Retrieved from energyefficiency: http://energyefficiency.clima.md/public/files/Constientzare/Seminare/081112/Experts_SSO_Manual.pdf
- [5] กรมโรงงานอุตสาหกรรม. (2549, พฤษภาคม 30). กำหนดมาตรการความปลอดภัยเกี่ยวกับหม้อไอน้ำ หม้อต้มที่ใช้ของเหลวเป็นสื่อทำความร้อน และภาชนะแรงดันในโรงงาน พ.ศ. 2549 . Retrieved from กรมโรงงานอุตสาหกรรม: http://www.diw.go.th/hawk/law/%E0%B8%81%E0%B8%8F%E0%B8%81%E0%B8%A3%E0%B8%B0%E0%B8%97%E0%B8%A3%E0%B8%A7%E0%B8%87%E0%B8%AB%E0%B8%A1%E0%B9%89%E0%B8%AD%E0%B9%84%E0%B8%AD%E0%B8%99%E0%B9%89%E0%B8%B3_49.pdf

เอกสารอ้างอิง

- [6] กรมโรงงานอุตสาหกรรม. (2553). คู่มือการใช้งานและการดูแลรักษาหม้อน้ำ. Retrieved from <http://php.diw.go.th/safety/wp-content/uploads/2015/01/boiler2.pdf>
- [7] สำนักพัฒนาทรัพยากรบุคคลด้านพลังงาน. (2004). Thermal system and steam utilizing equipment. Retrieved from iEnergyGuru: http://www2.dede.go.th/bhrd/old/Download/file_handbook/Pre_Heat/pre_heat_9.pdf
- [8] ผู้ดูแลเว็บไซต์. Heat Transfer : Physical Origins and Rate Equations. Retrieved from: http://www.baskent.edu.tr/~lcolak/ENE542/ENE542_Isi_Transferi_Mekanizmalari.pdf
- [9] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2554, มกราคม). องค์ประกอบเชื้อเพลิงไม้สับ. คู่มือการพัฒนาและการลงทุนผลิตพลังงานทดแทน.
- [10] Mikron Instrument Company, Inc. Table of emissivity of various surfaces. Retrieved from [transmetra.ch : http://www-eng.lbl.gov/~dw/projects/DW4229_LHC_detector_analysis/calculations/emissivity2.pdf](http://www-eng.lbl.gov/~dw/projects/DW4229_LHC_detector_analysis/calculations/emissivity2.pdf)





TOTAL EMISSIVITY OF VARIOUS SURFACES

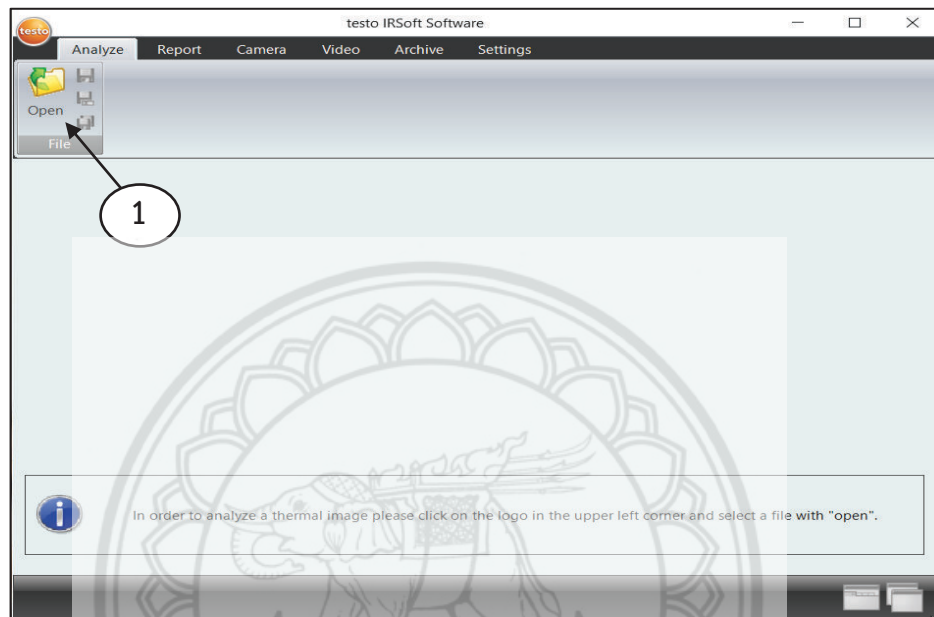
MATERIAL	TEMPERATURE °C	*EMISSIVITY
Dull Nickel Plated.....	20.....	0.11
Flat, Rough Surface.....	50.....	0.95-0.98
Cast, Polished.....	750-1050.....	0.52-0.56
Calorized, Oxidized.....	200.....	0.52
.....	600.....	0.57
Sheet Steel, Ground.....	938-1100.....	0.550-0.610
Sheet Steel, Rolled.....	21.....	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



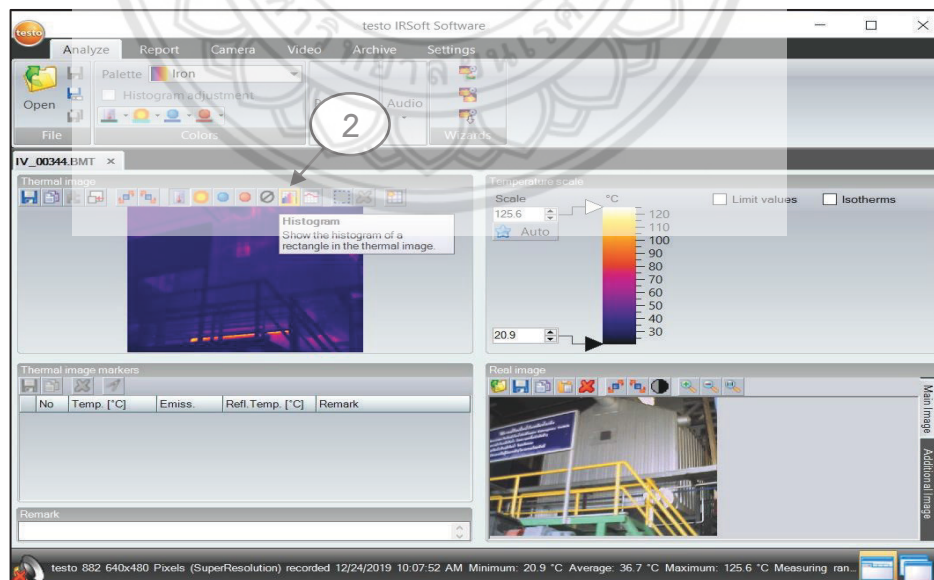
โปรแกรม Testo IR Soft

มีการใช้งานเพื่อวิเคราะห์หาการกระจายของอุณหภูมิ ขั้นตอนการใช้โปรแกรมมีดังนี้

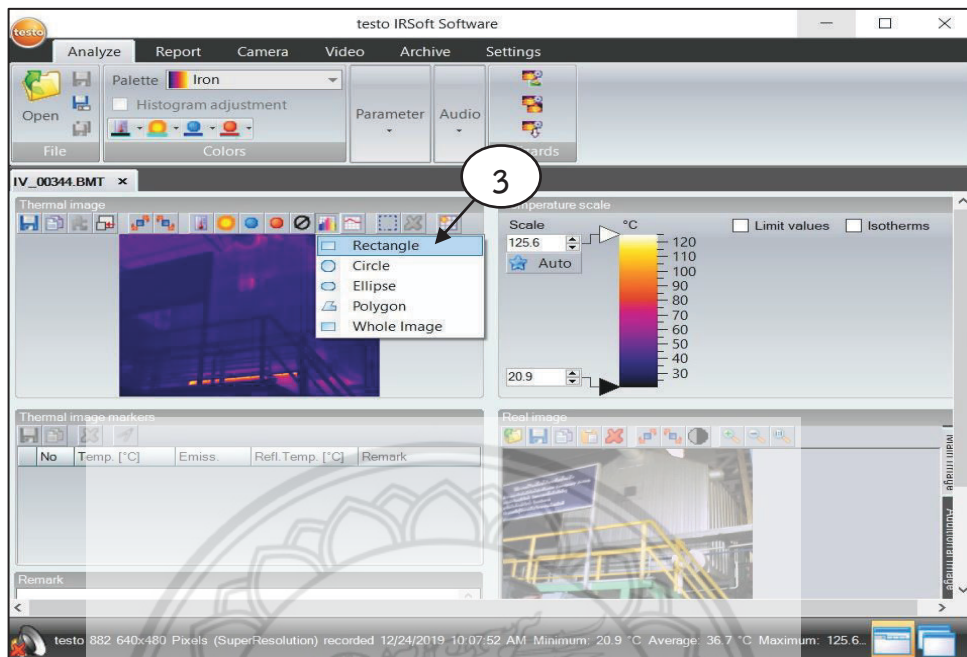
1. เปิดไฟล์ภาพที่ได้จากกล้องถ่ายภาพความร้อนแบบอินฟราเรด



2. เลือกคำสั่ง Histogram

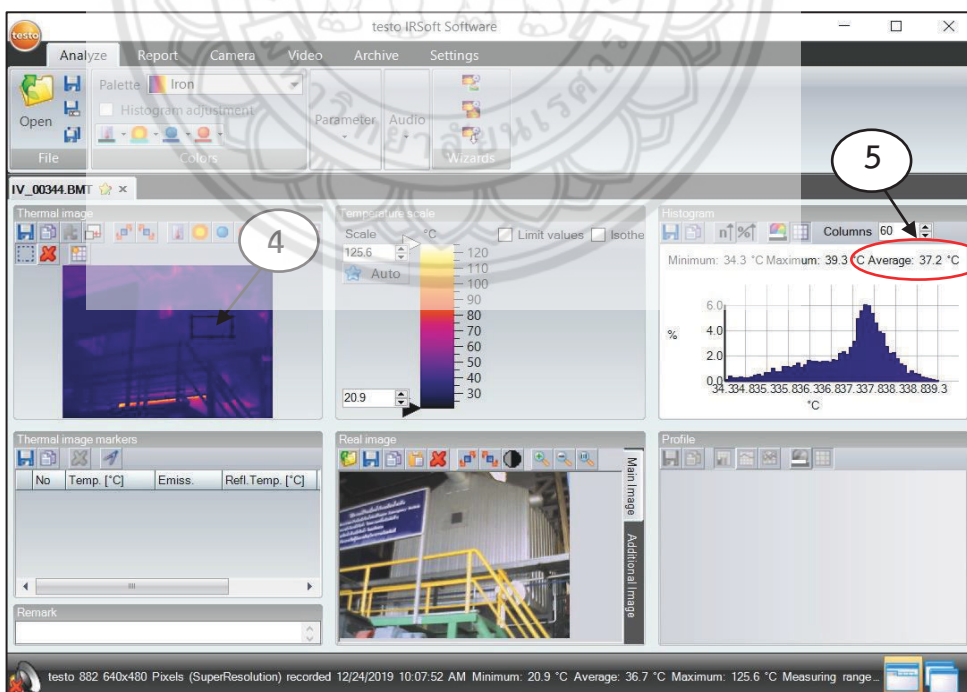


3. เลือกคำสั่ง Rectangle



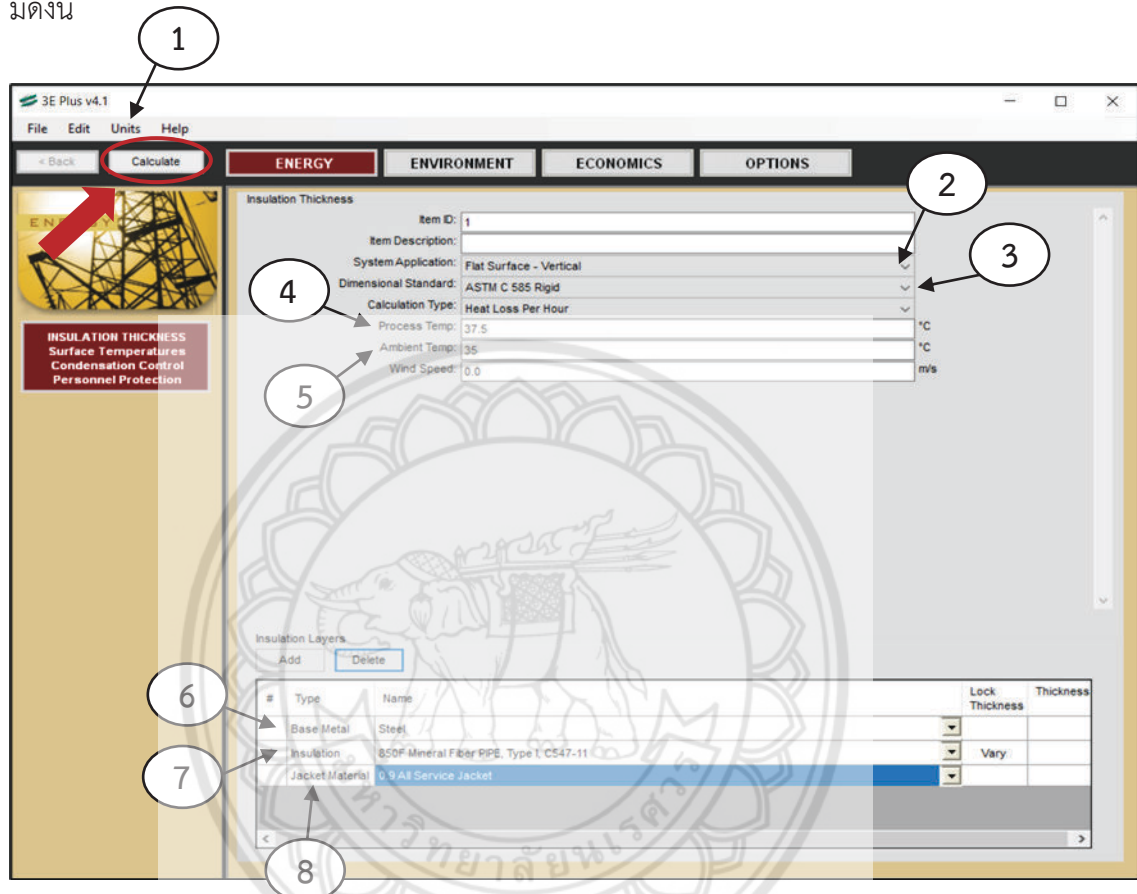
4. วาดคำสั่งลงในภาพบริเวณที่ต้องการทราบอุณหภูมิเฉลี่ย

5. อุณหภูมิเฉลี่ยบริเวณที่ต้องการ



โปรแกรม 3E PLUS

มีการใช้งานเพื่อหาอัตราการสูญเสียความร้อนของผนังหม้อน้ำ ขั้นตอนการใช้โปรแกรมมีดังนี้



1. ใส่ข้อมูลตามหมายเลข 1-8 โดย

- หมายเลข 1 เปลี่ยนหน่วย เป็น SI
- หมายเลข 2 ลักษณะการวางท่อ
- หมายเลข 3 รูปแบบการคำนวณ
- หมายเลข 4 อุณหภูมิที่วัดได้ (จากโปรแกรม IR Soft)
- หมายเลข 5 อุณหภูมิบรรยากาศ
- หมายเลข 6 วัสดุของหม้อน้ำ
- หมายเลข 7 ประเภทฉนวนที่ใช้
- หมายเลข 8 เสื่อหุ้มฉนวน

2. กด Calculate (ลูกศรสีแดง)

3. ผลที่ได้ คือ หมายเลข 1 ความหนาฉนวน
 หมายเลข 2 อุณหภูมิผิว
 หมายเลข 3 ความร้อนสูญเสีย

3E Plus v4.1

File Edit Units Help

< Back Calculate ENERGY ENVIRONMENT ECONOMICS OPTIONS

Heat Loss Per Hour Report

Item ID: 1

Item Description:

System Application: Flat Surface - Vertical

Dimensional Standard: ASTM C 585 Rigid

Calculation Type: Heat Loss Per Hour

Process Temp: 37.5 °C

Ambient Temp: 35 °C

Wind Speed: 0.0 m/s

Material: All Canada Insulat

Open Audit File:

Quantity (ft or ft²):

Append To Audit:

INSULATION THICKNESS
 Surface Temperatures
 Condensation Control
 Personnel Protection

Variable Insulation Thickness	Surface Temp (°C)	Heat Loss (W/m²)	Efficiency (%)
Base	37.5	18.12	
15.0	35.7	5.07	72.04
25.0	35.4	2.91	83.93
40.0	35.3	2.06	88.65
50.0	35.2	1.59	91.23
65.0	35.2	1.30	92.85
80.0	35.2	1.09	93.97
90.0	35.1	0.95	94.76
100.0	35.1	0.83	95.40
115.0	35.1	0.75	95.89
125.0	35.1	0.67	96.26
140.0	35.1	0.61	96.61
150.0	35.1	0.57	96.88

ก่อนปรับปรุง

หลังปรับปรุง

โปรแกรม Microsoft Excel ที่ใช้คำนวณตามมาตรฐาน JIS B822:1993

มีการใช้งานเพื่อช่วยคำนวณหาประสิทธิภาพของหม้อน้ำ ซึ่งในโปรแกรมมีการผูกสูตรการคำนวณไว้แล้ว โดยต้องกรอกค่าต่าง ๆ ลงในช่องที่แรเงาสีเหลือง ดังนี้

1. องค์ประกอบเชื้อเพลิง

เชื้อเพลิง	หน่วย	Wet basis	Dry basis
คาร์บอน (Carbon, C)	%	48.68	48.68
ไฮโดรเจน (Hydrogen, H)	%	6.02	6.02
ไนโตรเจน (Nitrogen, N)	%	0.21	0.21
ออกซิเจน (Oxygen, O)	%	43	43
ขี้เถ้า (Ash, a)	%	2	2
ซัลเฟอร์ (Sulfur, S)	%	0.09	0.09
ความชื้น (Moisture)	%	0	0
รวม	%	100	100
HHV	kJ/kg	19,217	19,217

โดย หมายเลข 1 คือ ค่าองค์ประกอบของไม้สับจากฐานข้อมูลของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน

หมายเลข 2 คือ ค่าที่ได้จากการเปลี่ยน Wet basis เป็น Dry basis เพื่อนำไปใช้ในการ

$$\text{คำนวณ จากสมการ } \frac{\text{องค์ประกอบของเชื้อเพลิง}}{100 - \text{ความชื้น}} \times 100$$

2. ปริมาณขององค์ประกอบในเชื้อเพลิง mass wet basis เทียบเป็น %

เชื้อเพลิง	หน่วย	ค่า
u = % Carbon content in ash	%	5.49
C = Carbon content from supplier	%	30.52
C2 = unburned carbon content	%	0.07
C1 = Carbon as fired	%	30.44
H	%	3.77
O	%	26.96
N	%	0.13
S	%	0.06
Water	%	37.31
Ash	%	1.254
SUM	%	100.0
HHV ar.	kJ/kg	12,047
LHV ar.	kJ/kg	10,265
ความร้อน/พลังงาน อื่นๆ ที่ป้อนเข้าหม้อไอน้ำ (Qadd in)	kJ/kg	0
Fuel mass flow	kg/h	1,109.583
Slang mass flow	kg/h	0
Fine ash mass flow	kg/h	0
% unburned C in slang	%	0
% unburned C in fine ash	%	0
% volatile	%	0
Heat of combustion HHV	kW	3,713
Heat of combustion LHV	kW	3,164

โดย หมายเลข 3 คือ ค่าเฉลี่ยของปริมาณคาร์บอนที่เผาไหม้ไม่หมดในกากที่เหลือจากการเผาไหม้ mass wet basis (%)

หมายเลข 4 คือ ความชื้นหรือน้ำทั้งหมดที่สะสมในเชื้อเพลิง mass wet basis (%) ได้จากการตรวจวัดเชื้อเพลิงของทางโรงงาน

หมายเลข 5 คือ ไอน้ำหรือน้ำร้อนที่เป่าเข้าไปในหม้อน้ำต่อเชื้อเพลิง

หมายเลข 6 คือ อัตราการป้อนเชื้อเพลิงใน 1 วันที่เข้าตรวจวัด

ตัวอย่าง	Carbon (%)
1. CPD Fly	3.62
2. CPD Bottom	7.36

รูปที่ 1 ปริมาณคาร์บอนที่เผาไหม้ไม่หมด
(หมายเลข 3)



รูปที่ 2 ความชื้นที่สะสมในเชื้อเพลิง
(หมายเลข 4)

3. ผลการตรวจวัดก๊าซไอเสียของหม้อน้ำ

	ก๊าซไอเสีย	หน่วย	ค่า
Excess oxygen in flue gas		%	13.90
Carbon monoxide		ppm	1327.44
Flue gas Temperature		°C	162.20
Ambient Temperature		°C	35.00
Relative humidity		%	65.00
Humidity ratio		kgwater/kgair	0.02330

โดย หมายเลข 7 คือ ค่าเฉลี่ยของก๊าซไอเสียในช่วงเกิดการเผาไหม้หาจากได้การตรวจวัด
 หมายเลข 8 คือ ค่าเฉลี่ยในช่วงการตรวจวัด
 หมายเลข 9 คือ ค่า Humidity ratio หาได้จาก App Air lite (Android) โดยทำการกรอกค่า Altitude (ความสูง), Ambient และ Relative humidity ลงใน App

4. การวิเคราะห์เชิงปฏิบัติการตรวจสอบสภาพนวนหม้อน้ำ

ความร้อนสูญเสียผ่านผนังหม้อน้ำ	หน่วย	ค่า
อุณหภูมิผนังด้านหน้าห้องเผาไหม้	°C	37.5
อุณหภูมิผนังด้านข้างห้องเผาไหม้	°C	39.6
อุณหภูมิผนังด้านหลังห้องเผาไหม้	°C	41.9
อุณหภูมิผนังด้านหน้าหม้อน้ำ	°C	44.3
อุณหภูมิผนังด้านข้างหม้อน้ำ	°C	36.3
อุณหภูมิผนังด้านหลังหม้อน้ำ	°C	103.7
ปริมาณความร้อนสูญเสียต่อหน่วยพื้นที่ผนังด้านหน้าห้องเผาไหม้	W/m ²	18.12
ปริมาณความร้อนสูญเสียต่อหน่วยพื้นที่ผนังด้านข้างห้องเผาไหม้	W/m ²	35.41
ปริมาณความร้อนสูญเสียต่อหน่วยพื้นที่ผนังด้านหลังห้องเผาไหม้	W/m ²	55.63
ปริมาณความร้อนสูญเสียต่อหน่วยพื้นที่ผนังด้านหน้าหม้อน้ำ	W/m ²	77.9
ปริมาณความร้อนสูญเสียต่อหน่วยพื้นที่ผนังด้านข้างหม้อน้ำ	W/m ²	8.94
ปริมาณความร้อนสูญเสียต่อหน่วยพื้นที่ผนังด้านหลังหม้อน้ำ	W/m ²	852.7
พื้นที่ผนังด้านหน้าห้องเผาไหม้	m ²	11.258
พื้นที่ผนังด้านข้างห้องเผาไหม้	m ²	11.258
พื้นที่ผนังด้านหลังห้องเผาไหม้	m ²	11.258
พื้นที่ผนังด้านหน้าห้องเผาไหม้	m ²	8.168
พื้นที่ผนังด้านข้างหม้อน้ำ	m ²	57.99
พื้นที่ผนังด้านหลังหม้อน้ำ	m ²	8.168
ความร้อนสูญเสียรวมผ่านพื้นผิว	kW	9.34849468

โดย หมายเลข 10 คือ ค่าการกระจายอุณหภูมิในแต่ละด้านของหม้อน้ำ หาได้จากโปรแกรม Testo IR Software

หมายเลข 11 คือ ค่าปริมาณความร้อนสูญเสียในแต่ละด้านของหม้อน้ำ หาได้จากโปรแกรม 3E Plus

หมายเลข 12 คือ พื้นที่ผนังในแต่ละด้านของหม้อน้ำ หาได้จากรายงานการตรวจหม้อน้ำประจำปีของทางโรงงาน

5. คำนวณค่าต่าง ๆ ที่ใช้ในสมการการประเมินประสิทธิภาพหม้อน้ำ

รายการคำนวณ	หน่วย	LHV	HHV
ก๊าซออกซิเจน (O ₂) ส่วนเกินจากการเผาไหม้	%	13.9	13.9
ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)	ppm	1327.44	1327.4
อุณหภูมิก๊าซไอเสีย	°C	162.2	162.2
ค่าความจุความร้อนของก๊าซไอเสียเฉลี่ย	kJ/m ³ .k	1.38	1.38
อัตราส่วนอากาศส่วนเกิน (m)	-	2.958	2.958
ปริมาณอากาศโดยทฤษฎี (A ₀)	Nm ³ -air/kg-fuel	2.816	2.82
ปริมาณก๊าซไอเสียแห้งโดยทฤษฎี (G ₀)	Nm ³ -flue/kg-fuel	2.792	2.79
ปริมาณไอน้ำจากการเผาไหม้ + น้ำจากเชื้อเพลิง (G _w)	Nm ³ -flue/kg-fuel	0.884	0.88
ปริมาณความชื้นจากอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ (G _{w,1})	Nm ³ -flue/kg-fuel	0.31	0.31
อัตราการไหลของก๊าซไอเสีย (G = G ₀ + G _w + (m-1)A ₀ + G _{w,1})	Nm ³ -flue/Nm ³ -fuel	9.50	9.50
อุณหภูมิผนังหม้อน้ำเฉลี่ย shell side	°C	60	70
ปริมาณความร้อนสูญเสียต่อหน่วยพื้นที่	W/m ²	486	486
พื้นที่ผิวหม้อน้ำ	m ²	90.00	90.00
รวมปริมาณความร้อนสูญเสีย	KW	9.35	9.35
ความร้อนสูญเสียจากก๊าซไอเสีย	kJ/kgfuel	1,668	3,449.84
ความร้อนสูญเสียจากการ Blow in furnace	kJ/kgfuel	0	0
ความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์	kJ/kgfuel	139.03	139.03
ความร้อนสูญเสียจากกากคาร์บอน	kJ/kgfuel	24.7	24.7
ความร้อนสูญเสียจากผนังหม้อน้ำ	kJ/kgfuel	30.33	30.33

6. คำนวณประสิทธิภาพหม้อน้ำ

คำนวณประสิทธิภาพหม้อน้ำ	หน่วย	LHV	HHV
การสูญเสียความร้อนจากก๊าซไอเสีย (L1)	%	16.2	28.6
การสูญเสียความร้อนจากการ Blow in furnace (L2)	%	0	0.0
การสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (L3)	%	1.4	1.2
การสูญเสียจากการกากคาร์บอน (L4)	%	0.2	0.2
การสูญเสียความร้อนทางพื้นผิวผนังหม้อน้ำ (L5)	%	0.3	0.3
ประสิทธิภาพหม้อน้ำ (100 - ((L1+L2+L3+L4+L5) / H + Qadd in))	%	81.86	69.75



ภาคผนวก ค

การคำนวณ

1. การคำนวณประสิทธิภาพของระบบไอน้ำทั้ง 4 ส่วน

1.1 ส่วนการผลิตไอน้ำ

- **คำนวณปริมาณการใช้เชื้อเพลิงในหม้อน้ำ**

จากตารางบันทึกข้อมูลของโรงงานพบว่า ใน 1 วัน มีการป้อนเชื้อเพลิง 3 ครั้ง คือ

$$9,350 + 8,640 + 8,640 = 26,630 \text{ kg/day}$$

$$\text{ดังนั้น อัตราการป้อนเชื้อเพลิง (m}_f\text{)} = 26,630 \frac{\text{kg}}{\text{day}} \times \frac{1 \text{ day}}{24 \text{ hr}} = 1,109.58 \text{ kg/hr}$$

- **คำนวณอัตราการโบลด์าวน์**

ตารางที่ 1 ผลการตรวจวัดคุณภาพน้ำ

ค่าตรวจวัด	น้ำโบลด์าวน์	น้ำป้อน
ค่าการนำไฟฟ้า ($\mu\text{S/cm}$)	2,710	182

$$\text{ร้อยละการโบลด์าวน์ } (\beta) = \frac{\text{Feedwater conductivity}}{\text{Blowdown conductivity}} \times 100 = \frac{182}{2,710} \times 100 = 6.72\%$$

$$\text{ดังนั้น ปริมาณการโบลด์าวน์ (Blowdown rate)} = \frac{6.72 \times 3,708.33}{100} = 249.05 \text{ kg/hr}$$

- **คำนวณประสิทธิภาพหม้อน้ำ**

1. ประสิทธิภาพหม้อน้ำด้วยวิธีความร้อนสูญเสีย (Heat loss method) อ้างอิงค่าความร้อนเชื้อเพลิงทางต่ำ (Low calorific value)

$$\eta_{2(\text{LHV})} = (1 - \text{Heat loss}) \times 100\% = \left(1 - \frac{L_L}{H_L - Q} \right) \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{Heat loss} = L_l = L_{1l} + L_2 + L_3 + L_4 + L_5 \quad (2)$$

2. ประสิทธิภาพหม้อน้ำด้วยวิธีความร้อนสูญเสีย (Heat loss method) อ้างอิงค่าความร้อนเชื้อเพลิงทางสูง (High calorific value)

$$\eta_{2(\text{HHV})} = (1 - \text{Heat loss}) \times 100\% = \left(1 - \frac{L_h}{H_h - Q}\right) \times 100\% \quad (3)$$

$$\text{Heat loss} = L_H = L_{1h} + L_2 + L_3 + L_4 + L_5 \quad (4)$$

- ความร้อนสูญเสียจากก๊าซไอเสีย (L_1)

$$L_{1l} = GC_g (t_g + t_o) \text{ kJ/kg} \quad (5)$$

$$L_{1h} = L_{1l} + 25(9h + \omega) \text{ kJ/kg} \quad (6)$$

อัตราการไหลของไอเสีย (G)

$$G = G_o + G_w + (m - 1)A_o + G_{w1} \quad (7)$$

ปริมาณก๊าซไอเสียแห้งตามทฤษฎี (G_o)

$$\begin{aligned} G_o &= \frac{1}{100} \left[(8.89c_1) + 21.1 \times \left(h - \frac{o}{8} \right) + 3.3s + 0.8n \right] \\ &= \frac{1}{100} \times \left[(8.89 \times 30.44) + \left(21.1 \times \left(3.774 - \left(\frac{26.957}{8} \right) \right) \right) + (3.3 \times 0.056) + (0.8 \times 0.132) \right] \\ &= 2.79 \text{ Nm}^3_{\text{flue}} / \text{kg}_{\text{fuel}} \end{aligned}$$

ดังนั้น ปริมาณก๊าซไอเสียแห้งตามทฤษฎี คือ $2.792 \text{ Nm}^3_{\text{flue}} / \text{kg}_{\text{fuel}}$

ปริมาณไอน้ำในไอเสียที่เกิดจากไฮโดรเจนและความชื้นในเชื้อเพลิง (G_w)

$$\begin{aligned} G_w &= \frac{1}{100} \times \left[1.24 \times (9h + \text{Water}_{\text{fuel}}) \right] \\ &= \frac{1}{100} \times \left[1.24 \times \left((9 \times 3.774) + 37.31 \right) \right] \\ &= 0.88 \text{ Nm}^3_{\text{flue}} / \text{kg}_{\text{fuel}} \end{aligned}$$

ดังนั้น ปริมาณไอน้ำในไอเสียที่เกิดจากไฮโดรเจนและความชื้นในเชื้อเพลิง คือ

$$0.884 \text{ Nm}^3_{\text{flue}} / \text{kg}_{\text{fuel}}$$

อัตราส่วนอากาศเกิน (m)

$$m = \frac{21}{21 - \%O_{\text{fuel gas}}} = \frac{21}{21 - 13.9} = 2.958$$

ดังนั้น อัตราส่วนอากาศเกิน คือ 2.958

ปริมาณอากาศที่ใช้ตามทฤษฎี (A_0)

$$\begin{aligned} A_0 &= \frac{1}{100} \times \left[8.89c_1 + 26.7 \left(h - \frac{o}{8} \right) + 3.3s \right] \\ &= \frac{1}{100} \times \left[\left(8.89 \times 30.44 \right) + \left(26.7 \times \left(3.774 - \left(\frac{26.957}{8} \right) \right) \right) + \left(3.3 \times 0.056 \right) \right] \\ &= 2.82 \text{ Nm}^3_{\text{air}} / \text{kg}_{\text{fuel}} \end{aligned}$$

ดังนั้น ปริมาณอากาศที่ใช้ตามทฤษฎี คือ $2.82 \text{ Nm}^3_{\text{air}} / \text{kg}_{\text{fuel}}$

ปริมาณไอน้ำในไอเสียที่เกิดจากความชื้นในอากาศ (G_{w1})

$$\begin{aligned} G_{w1} &= 1.61 \times \text{Humidity ratio} \times m \times A_0 \\ &= 1.61 \times 0.0233 \times 2.96 \times 2.82 \\ &= 0.31 \text{ Nm}^3_{\text{air}} / \text{kg}_{\text{fuel}} \end{aligned}$$

ดังนั้น ปริมาณไอน้ำในไอเสียที่เกิดจากความชื้นในอากาศ คือ $0.31 \text{ Nm}^3_{\text{air}} / \text{kg}_{\text{fuel}}$

แทนค่า G_0, G_w, m, A_0, G_{w1} ลงในสมการ (7)

$$\begin{aligned} G &= G_0 + G_w + (m - 1)A_0 + G_{w1} \\ &= 2.79 + 0.88 + (2.958 - 1)2.82 + 0.31 \\ &= 9.50 \text{ Nm}^3_{\text{air}} / \text{kg}_{\text{fuel}} \end{aligned}$$

ดังนั้น อัตราการไหลของไอเสีย คือ $9.50 \text{ Nm}^3_{\text{air}} / \text{kg}_{\text{fuel}}$

แล้วแทนค่า G ลงในสมการ (5) และ (6)

$$\begin{aligned} L_{1l} &= GC_g (t_g + t_0) \text{ kJ / kg} \\ &= 9.50 \times 1.38 (162.2 - 35) = 1,667.592 \text{ kJ / kg}_{\text{fuel}} \end{aligned}$$

ดังนั้น ความร้อนสูญเสียจากก๊าซไอเสียที่อ้างอิงค่าความร้อนเชื้อเพลิงทางต่ำ $1,668.821 \text{ kJ / kg}_{\text{fuel}}$

$$\begin{aligned} L_{1h} &= L_{1l} + 25(9h + \omega) \text{ kJ / kg} \\ &= 1,667.592 + \left[25 \left((9 \times 3.774) + 37.31 \right) \right] = 3,449.492 \text{ kJ / kg}_{\text{fuel}} \end{aligned}$$

ดังนั้น ความร้อนสูญเสียจากก๊าซไอเสียที่อ้างอิงค่าความร้อนเชื้อเพลิงทางสูง $3,449.492 \text{ kJ / kg}_{\text{fuel}}$

- ความร้อนสูญเสียจากไอน้ำหรือน้ำที่เป่าเข้าไปในหม้อน้ำ (L_2)

$$L_2 = W_b (h_g - h_s) \text{ kJ / kg} \quad (8)$$

แทนค่า $L_2 = 0(2,759.83 - 246.971) = 0 \text{ kJ / kg}_{\text{fuel}}$

ดังนั้น ความร้อนสูญเสียจากไอน้ำหรือน้ำที่เป่าเข้าไปในหม้อน้ำ $0 \text{ kJ / kg}_{\text{fuel}}$

- ความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (L_3)

$$L_3 = 126.1 [G_o + (m - 1)A_o] (\text{CO}) \text{ kJ / kg} \quad (9)$$

$$\text{แทนค่า } L_3 = 126.1 [2.79 + (2.958 - 1)2.82] \left(\frac{1,327.44}{10,000} \right) = 139.127 \text{ kJ / kg}_{\text{fuel}}$$

ดังนั้น ความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ $139.127 \text{ kJ / kg}_{\text{fuel}}$

- ความร้อนสูญเสียจากเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ไม่หมดในซีเถ้า (L_4)

$$L_4 = 339c_2 \text{ kJ / kg} \quad , C_2 = \frac{au}{100 - u} \quad (10)$$

$$\text{แทนค่า } L_4 = 339 \left(\frac{1.254 \times 5.49}{100 - 5.49} \right) = 24.694 \text{ kJ / kg}_{\text{fuel}}$$

ดังนั้น ความร้อนสูญเสียจากเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ไม่หมดในซีไต้ 24.694 kJ / kg_{fuel}

- ความร้อนสูญเสียจากการแผ่รังสี (L₅)

$$L_{5l} = \frac{\text{ปริมาณความร้อนสูญเสีย}}{\text{Fuel mass flow}} \quad (11)$$

$$\text{แทนค่า } L_{5l} = \frac{9.35}{1,109.583 / 3,600} = 30.34 \text{ kJ / kg}_{\text{fuel}}$$

ดังนั้น ความร้อนสูญเสียจากการแผ่รังสีจากตัวหม้อน้ำอ้างอิงค่าความร้อนเชื้อเพลิงทางต่ำ 30.34 kJ / kg_{fuel}

$$L_{5h} = \frac{1}{100} L_{rHl} \quad (12)$$

$$\text{แทนค่า } L_{5h} = \frac{1}{100} \times \left(\frac{30.34 \times 100}{12,047} \right) \times 12,047 = 30.34 \text{ kJ / kg}_{\text{fuel}}$$

ดังนั้น ความร้อนสูญเสียจากการแผ่รังสีจากตัวหม้อน้ำอ้างอิงค่าความร้อนเชื้อเพลิงทางสูง 30.34 kJ / kg_{fuel}

แทนค่า L_{1l}, L_{1h}, L₂, L₃, L₄, L₅ ลงในสมการ (2) และ (4)

ความร้อนสูญเสียของหม้อน้ำอ้างอิงค่าความร้อนเชื้อเพลิงทางสูง

$$\begin{aligned} \text{Heat loss} &= L_H = L_{1h} + L_2 + L_3 + L_4 + L_5 \\ &= 3,449.492 + 0 + 139.127 + 24.694 + 30.34 \\ &= 3,643.653 \text{ kJ / kg}_{\text{fuel}} \end{aligned}$$

ดังนั้น ความร้อนสูญเสียของหม้อน้ำอ้างอิงค่าความร้อนเชื้อเพลิงทางสูง 3,643.653 kJ / kg_{fuel}

ความร้อนสูญเสียของหม้อน้ำอ้างอิงค่าความร้อนเชื้อเพลิงทางต่ำ

$$\begin{aligned}\text{Heat loss} &= L_l = L_{1l} + L_2 + L_3 + L_4 + L_5 \\ &= 1,667.592 + 0 + 139.127 + 24.694 + 30.34 \\ &= 1,861.753 \text{ kJ / kg}_{\text{fuel}}\end{aligned}$$

ดังนั้น ความร้อนสูญเสียของหม้อน้ำอ้างอิงค่าความร้อนเชื้อเพลิงทางต่ำ 1,861.753 kJ / kg_{fuel}

ดังนั้น ประสิทธิภาพของหม้อน้ำค่าความร้อนเชื้อเพลิงทางสูง (HCV)

$$\eta_{2(\text{HHV})} = \left(1 - \frac{L_h}{H_h - Q} \right) \times 100\% = \left(1 - \frac{3,643.653}{12,047 - 0} \right) \times 100\% = 69.75\%$$

ดังนั้น ประสิทธิภาพของหม้อน้ำค่าความร้อนเชื้อเพลิงทางต่ำ (LCV)

$$\eta_{2(\text{LHV})} = \left(1 - \frac{L_l}{H_l - Q} \right) \times 100\% = \left(1 - \frac{1,861.753}{10,265 - 0} \right) \times 100\% = 81.86\%$$

1.2 ส่วนของระบบท่อส่งจ่ายไอน้ำ

- คำนวณการรั่วไหลของท่อส่งจ่ายไอน้ำ

จากการตรวจวัดพบว่า มีความดัน (P_{steam}) = 6.5 bar_g และ ขนาดรู Orifice = 1 mm โดย

พื้นที่ หน้าตัดของรูรั่วที่คิดเป็นพื้นที่รูปวงกลมเทียบเท่า (A_{orifice}) = $\frac{\pi}{4} \times 1^2 = 0.785 \text{ mm}^2$

จากสมการ Napier's choke flow จะได้

$$m_{\text{steam}} = 0.695 \times A_{\text{orifice}} \times P_{\text{steam}} = 0.695 \times 0.785 \times (6.5 + 1) = 4.092 \text{ kg / hr}$$

ดังนั้น อัตราการรั่วของไอน้ำของท่อส่งจ่ายไอน้ำ คือ 4.092 kg / hr

1.3 ส่วนของการนำความร้อนกลับ

- คำนวณการรั่วไหลของก๊าดกไอน้ำ (ชำรุด 8 ตัว)

จากการตรวจวัด พบว่ามีควมดัน (P_{steam}) = 2 barg (6 ตัว), 7 barg (2 ตัว) และ ขนาดรู Orifice = 3 mm พื้นที่หน้าตัดของรูรั่วที่คิดเป็นพื้นที่รูวงกลมเทียบเท่า

$$(A_{\text{orifice}}) = \frac{\pi}{4} \times 3^2 = 7.069 \text{ mm}^2$$

จากสมการ Napier's choke flow $m_{\text{steam}} = 0.25 \times 0.695 \times A_{\text{orifice}} \times P_{\text{steam}}$

- ที่ควมดัน 2 barg จำนวน 6 ตัว

$$m_{\text{steam@2barg}} = 0.25 \times 0.695 \times 7.069 \times (2 + 1) = 3.685 \text{ kg / hr}$$

$$m_{\text{steam@2barg}} = 3.685 \times 6 = 22.11 \text{ kg / hr}$$

ดังนั้น อัตราการรั่วของไอน้ำของก๊าดกไอน้ำที่ควมดัน 2 barg คือ 22.11 kg / hr

- ที่ควมดัน 7 barg จำนวน 2 ตัว

$$m_{\text{steam@7barg}} = 0.25 \times 0.695 \times 7.069 \times (7 + 1) = 9.826 \text{ kg / hr}$$

$$m_{\text{steam@7barg}} = 9.826 \times 2 = 19.65 \text{ kg / hr}$$

ดังนั้น อัตราการรั่วของไอน้ำของก๊าดกไอน้ำที่ควมดัน 7 barg คือ 19.65 kg / hr

2. การคำนวณมาตรการประหยัดพลังงานในระบบไอน้ำ

2.1 ส่วนการผลิตไอน้ำ

- มาตรการการปรับแต่งการเผาไหม้ของหม้อน้ำ
 - ก่อนปรับปรุงมีปริมาณก๊าซออกซิเจน (O_2) 13.9%

$$\begin{aligned}\dot{m}_f &= \frac{\dot{m}_{s@13.9\%}}{\eta_{@13.9\%} \times \text{HHV}} \\ \dot{m}_f &= \frac{3,449.84 \text{ kJ / kg}}{\frac{69.75}{100} \times 12,047 \text{ kJ / kg}} \\ &= 0.4106 \times 1,109.58 \frac{\text{kg}}{\text{hr}} \times 8,760 \frac{\text{hr}}{\text{y}} \times 1,250 \frac{\text{Bath}}{\text{Ton}} \times \frac{1 \text{Ton}}{1000 \text{kg}} \\ &= 4,988,749.351 \text{ Bath / y}\end{aligned}$$

ดังนั้น ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงก่อนปรับปรุงมาตรการมีค่าใช้จ่าย 4,988,749.351 บาทต่อปี

- หลังปรับปรุงมีปริมาณก๊าซออกซิเจน (O_2) 9%

$$\begin{aligned}\dot{m}_f &= \frac{\dot{m}_{s@9\%}}{\eta_{@9\%} \times \text{HHV}} \\ \dot{m}_f &= \frac{2,830.365 \text{ kJ / kg}}{\frac{75.37}{100} \times 12,047 \text{ kJ / kg}} \\ &= 0.3117 \times 1,109.58 \frac{\text{kg}}{\text{hr}} \times 8,760 \frac{\text{hr}}{\text{y}} \times 1,250 \frac{\text{Bath}}{\text{Ton}} \times \frac{1 \text{Ton}}{1000 \text{kg}} \\ &= 3,787,367.14 \text{ Bath / y}\end{aligned}$$

ดังนั้น ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงหลังปรับปรุงมาตรการมีค่าใช้จ่าย 3,787,367.14 บาทต่อปี

ดังนั้น ผลประหยัด = ก่อนปรับปรุง - หลังปรับปรุง

$$= 4,988,749.351 - 3,787,367.14$$

$$= 1,201,382.211 \text{ Bath / y}$$

ดังนั้น ผลประหยัดของมาตรการการปรับแต่งการเผาไหม้ของหม้อน้ำ คือ 1,201,382.211 บาทต่อปี

- มาตรการปรับปรุงจนวนหม้อน้ำ

$$\begin{aligned}\dot{m}_f &= \frac{Q_{\text{loss(before)}} - Q_{\text{loss(after)}}}{\eta \times \text{HHV}} \\ \dot{m}_f &= \frac{(9.35 - 3.17) \text{ kW}}{\frac{69.75}{100} \times 12,047 \text{ kJ / kg}} \\ &= 7.355 \times 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 8,760 \frac{\text{hr}}{\text{y}} \times \frac{3,600 \text{ s}}{1 \text{ hr}} \times 1,250 \frac{\text{Bath}}{\text{Ton}} \times \frac{1 \text{ Ton}}{1000 \text{ kg}} \\ &= 28,993.41 \text{ Bath / y}\end{aligned}$$

ดังนั้น ถ้าไม่มีการปรับปรุงจนวนหม้อน้ำจะมีค่าใช้จ่าย 28,993.41 บาทต่อปี

2.2 ส่วนของระบบท่อส่งจ่ายไอน้ำ

- มาตรการลดการรั่วไหลของไอน้ำในระบบส่งจ่ายไอน้ำ

$$\begin{aligned}\dot{m}_f &= \frac{m_{\text{steam}} \times h_s}{\eta \times \text{HHV}} \\ \dot{m}_f &= \frac{(4.09 \text{ kg / hr})(2,765.71 \text{ kJ / kg})}{\frac{69.75}{100} \times 12,047 \text{ kJ / kg}} \\ &= 1.35 \frac{\text{kg}}{\text{hr}} \times 8,760 \frac{\text{hr}}{\text{y}} \times 1,250 \frac{\text{Bath}}{\text{Ton}} \times \frac{1 \text{ Ton}}{1000 \text{ kg}} \\ &= 14,782.5 \text{ Bath / y}\end{aligned}$$

ดังนั้น ถ้าไม่ลดการรั่วไหลของไอน้ำในระบบส่งจ่ายไอน้ำ จะมีค่าใช้จ่าย 14,782.5 บาทต่อปี

2.3 ส่วนของการนำความร้อนกลับ

- มาตรการลดการรั่วของไอน้ำผ่านกับดักไอน้ำ

- ที่ความดัน 2 barg

$$\dot{m}_f = \frac{m_{\text{steam@2barg}} \times h_{s@2barg}}{\eta \times \text{HHV}}$$

$$\dot{m}_f = \frac{(22.11 \text{ kg/hr})(2,725.09 \text{ kJ/kg})}{\frac{69.75}{100} \times 12,047 \text{ kJ/kg}}$$

$$= 7.17 \frac{\text{kg}}{\text{hr}} \times 8,760 \frac{\text{hr}}{\text{y}} \times 1,250 \frac{\text{Bath}}{\text{Ton}} \times \frac{1 \text{ Ton}}{1000 \text{ kg}}$$

$$= 78,511.5 \text{ Bath/y}$$

ดังนั้น ถ้าไม่ลดการรั่วไหลของไอน้ำผ่านกับดักไอน้ำที่ความดัน 2 barg จะมีค่าใช้จ่าย 78,511.5 บาทต่อปี

- ที่ความดัน 7 barg

$$\dot{m}_f = \frac{m_{\text{steam@7barg}} \times h_{s@7barg}}{\eta \times \text{HHV}}$$

$$\dot{m}_f = \frac{(19.65 \text{ kg/hr})(2,768.37 \text{ kJ/kg})}{\frac{69.75}{100} \times 12,047 \text{ kJ/kg}}$$

$$= 6.474 \frac{\text{kg}}{\text{hr}} \times 8,760 \frac{\text{hr}}{\text{y}} \times 1,250 \frac{\text{Bath}}{\text{Ton}} \times \frac{1 \text{ Ton}}{1000 \text{ kg}}$$

$$= 70,890.3 \text{ Bath/y}$$

ดังนั้น ถ้าไม่มีลดการรั่วไหลของไอน้ำผ่านกับดักไอน้ำที่ความดัน 7 barg จะมีค่าใช้จ่าย 70,890.3 บาทต่อปี

$$\begin{aligned}\text{ดังนั้น ผลประหยักรวม} &= \text{มูลค่าเงินที่ความดัน 2 barg} + \text{มูลค่าเงินที่ความดัน 7 barg} \\ &= 78,511.5 + 70,890.3 \\ &= 149,401.8 \text{ Bath / y}\end{aligned}$$

ดังนั้น ผลประหยักรวมของมาตรการลดการรั่วของไอน้ำผ่านกักไอน้ำคือ 149,401.8 บาทต่อปี
เมื่อรวมผลประหยักรวมทั้งหมดจากมาตรการทั้งหมดของระบบไอน้ำทั้ง 4 ส่วนจะได้
 $= 1,201,382.211 + 28,993.41 + 14,782.5 + 149,401.8 = 1,394,559.921 \text{ Bath / y}$

