การบริหารจัดการประสิทธิภาพสำหรับหม้อไอน้ำ

โยธิน พลประถม[1*], พงศ์หรดาล[2]

[1]สาขาวิชาอาชีวอนามัยและความปลอดภัย คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา กรุงเทพมหานคร
[2]สาขาวิชาการบริหารเทคโนโลยีและนวัตกรรม บัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา กรุงเทพมหานคร
[*]Corresponding author email: yothin711@hotmail.com

ได้รับบทความ: 26 ตุลาคม 2564
ได้รับบทความแก้ไข: 17 มิถุนายน 2565
ยอมรับตีพิมพ์: 24 มิถุนายน 2565

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้ได้ทำการรวบรวมการสูญเสียพลังงานของระบบหม้อไอน้ำ อีกทั้งประเด็นปัญหาที่มักพบจากการใช้งานหม้อไอน้ำ และเสนอแนะวิธีการปรับปรุงแก้ไขที่เหมาะสม เพื่อใช้เป็นแนวทางเบื้องต้นในการทำงานของผู้ควบคุมหม้อไอน้ำให้มีประสิทธิภาพสูงสุด การบริหารจัดการประสิทธิภาพสำหรับหม้อไอน้ำนี้เกี่ยวข้องกับการควบคุมการสูญเสียพลังงานของระบบหม้อไอน้ำ อาทิเช่น การสูญเสียพลังงานความร้อนจากทางปล่องที่เกิดจากสัดส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศที่ไม่เหมาะสมและยังทำให้การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ การควบคุมและบริหารจัดการไอเสียที่ปล่อยทิ้งปล่อง การสูญเสียความร้อนจากจากการระบายน้ำออก การสูญเสียความร้อนจากการแผ่รังสีความร้อน การบริหารจัดการการใช้ไอน้ำให้เหมาะสมต่อปริมาณการใช้งานในแต่ละช่วงเวลา การนำคอนเดนเสทกลับมาใช้ใหม่ และการลดการรั่วไหลของไอน้ำในหม้อไอน้ำ

คำสำคัญ: การบริหารจัดการ / ประสิทธิภาพ / หม้อไอน้ำ

Efficiency Management for Boiler

Yothin Ponprathom[1*], Pong Horadal[2]

[1]Occupational Health and Safety Program, Faculty of Science and Technology, Bansomdejchaopraya Rajabhat University, Bangkok
[2]Technology and Innovation Management Program, Graduate School, Bansomdejchaopraya Rajabhat University, Bangkok
[*]Corresponding author email: yothin711@hotmail.com

Received: 26 October 2021
Revised: 17 June 2022
Accepted: 24 June 2022

Abstract

This article summarizes the boiler system energy losses. Additionally, it has provided summaries of the most frequent problems and the appropriate suggestions to option to optimize the problems in the boiler operation. It can be used as a guideline to effectively control for the boiler operator. The efficiency management is concerned with boiler system energy losses such as stack losses the heat in the flue gas that is caused by improper fuel-air ratio and also result in incomplete combustion, control and management of flue gas. Heat loss from blowdown, radiation heat transfer, managing the use of steam appropriately for the amount of use in each period, reusing condensate in the boiler system and reducing steam leaks in boilers.

Keywords: Management / Efficiency / Boiler

บทนำ

ประเทศไทยมีความจำเป็นที่จะต้องพึ่งพาภาคอุตสาหกรรม เพื่อขับเคลื่อนระบบเศรษฐกิจของประเทศให้ขยายตัวและเจริญก้าวหน้า อุตสาหกรรมที่โดดเด่นและมีอัตราการเจริญเติบโตสูง เช่น อุตสาหกรรมการผลิตสินค้าเพื่ออุปโภคหรือบริโภค อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมผลิตไฟฟ้า เป็นต้น การขยายตัวของอุตสาหกรรมทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของชุมชนเมืองและประชากร มีโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้พลังงานเชื้อเพลิงเป็นจำนวนมากและมีการใช้พลังงานเพิ่มสูงขึ้น [1] จากสถานการณ์การใช้พลังงานของโลกในปัจจุบันและในอนาคตมีแนวโน้มที่ราคาของพลังงานจะสูงขึ้น จากความต้องการใช้พลังงานเพิ่มมากขึ้น

การใช้พลังงานอย่างรู้ค่าและมีประสิทธิภาพทั้งในระยะสั้นและระยะยาวจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับอุตสาหกรรม ส่วนใหญ่ในภาคอุตสาหกรรมมีการใช้พลังงานในรูปแบบไฟฟ้าและความร้อนในปริมาณมาก จึงจำเป็นต้องมีการจัดการพลังงานที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการอนุรักษ์พลังงาน ซึ่งหลักการที่สำคัญของการอนุรักษ์พลังงานในโรงงานอุตสาหกรรม คือ ลดการใช้พลังงานลงด้วยวิธีการใช้พลังงานอย่างเหมาะสม เพื่อประโยชน์สูงสุดโดยไม่กระทบต่อกระบวนการผลิตและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ หลักการอนุรักษ์พลังงานที่สำคัญ ได้แก่ การบำรุง รักษาและการดูแลเบื้องต้น การปรับปรุงกระบวนการเดิมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพหรือลดการสูญเสีย [2]

ปัญหาที่เกิดจากการใช้พลังงานเชื้อเพลิงที่ไม่มีประสิทธิภาพนำไปสู่การปล่อยมลพิษออกสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งปรากฏในรูปของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากกิจกรรมการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดภาวะโลกร้อน [3] และยังก่อให้เกิดการสูญเสียพลังงานโดยไม่จำเป็นซึ่งส่งผลให้ต้นทุนด้านพลังงานเพิ่มสูงขึ้นตามมา ดังนั้นทุกภาคส่วนที่เกี่ยวข้องจำเป็นต้องให้ความสำคัญและให้ความร่วมมือในการอนุรักษ์พลังงานใช้พลังงานให้น้อยลงและเรียนรู้ว่าการอนุรักษ์พลังงานเป็นเรื่องที่สำคัญยิ่ง [4] การเลือกใช้เทคโนโลยีที่เหมาะสม โดยเฉพาะเทคโนโลยีหม้อไอน้ำจะช่วยแก้ปัญหาดังกล่าว เนื่องจากมีอุตสาหกรรมจำนวนมากที่มีการนำหม้อไอน้ำมาใช้ในกระบวนการผลิต [5]

บทความนี้จึงรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับการบริหารจัดการประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ ประกอบด้วย การสูญเสียพลังงานความร้อนจากทางปล่อง การควบคุมการบริหารจัดการไอเสียที่ปล่อยทิ้ง การสูญเสียความร้อนจากจากการระบายน้ำออก ปัญหาการเกิดตะกรันที่การกัดกร่อน เหล็กเกิดสนิม และปัญหาเกี่ยวกับแคร์รี่โอเวอร์ การสูญเสียความร้อนจากการแผ่รังสี การบริหารจัดการการใช้ไอน้ำ การนำคอนเดนเสทกลับมาใช้ใหม่ การลดการรั่วไหลของไอน้ำในหม้อไอน้ำ เป็นต้น เหล่านี้ล้วนเป็นเทคนิคทางด้านวิศวกรรมที่ต้องมีการควบคุมเพื่อให้นำไปใช้เป็นข้อมูลสำหรับสถานประกอบการที่มีหม้อไอน้ำ ที่จะต้องให้ความสำคัญและดำเนินการแก้ไขเพื่อให้การใช้พลังงานเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

การควบคุมประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ จำเป็นต้องทำความเข้าใจเกี่ยวกับประเภทและหลักการทำงานของหม้อไอน้ำ โดยหม้อไอน้ำสามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภท คือ 1) หม้อไอน้ำแบบท่อไฟ เป็นหม้อไอน้ำที่แบ่งแยกส่วนการไหลของแก๊สร้อนอยู่ภายในท่อไฟ ส่วนน้ำจะอยู่ล้อมรอบท่อภายนอก ท่อไฟทั้งหมดจะอยู่ภายในเปลือก เปลือกทำหน้าที่เป็นภาชนะใส่น้ำทั้งหมดรวมถึงรับความดันไอน้ำ กระบวนการถ่ายเทความร้อนจะเกิดจากแก๊สร้อนถ่ายเทให้กับผิวท่อด้านในและส่งผ่านไปยังผิวท่อด้านนอกทำให้น้ำที่อยู่รอบท่อไฟได้รับพลังงานความร้อนในปริมาณหนึ่งที่มากพอที่จะทำให้น้ำเดือดกลายเป็นไอ จุดเดือดของน้ำจะแปรผันตามความดันของน้ำในขณะนั้น 2) หม้อไอน้ำแบบท่อน้ำ เป็นหม้อไอน้ำที่แบ่งแยกส่วนการไหลของแก๊สร้อนอยู่ภายนอกท่อ ส่วนน้ำจะอยู่ภายในท่อหม้อกักเก็บไอจะทำหน้าที่เป็นภาชนะใส่น้ำทั้งหมดรวมถึงเป็นภาชนะรับความดันไอน้ำ การถ่ายเทพลังงานความร้อนจะเกิดจากผิวภายนอกท่อ แล้วส่งผ่านไปยังผิวท่อด้านในทำให้น้ำที่อยู่ภายในท่อได้รับพลังงานความร้อนจนเดือดกลายเป็นไอ

หม้อไอน้ำเป็นเครื่องจักรต้นกำลังที่ทำหน้าที่ผลิตไอน้ำเพื่อนำไปใช้ในกระบวนการผลิต ไอน้ำที่ได้สามารถนำไปใช้งานในรูปของพลังงานความร้อนและแรงดัน การทำให้เกิดไอน้ำต้องอาศัยพลังงานอยู่หลายรูปแบบ เช่น พลังงานจากการสันดาปของเชื้อเพลิง พลังงานความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิง พลังงานความร้อนสัมผัสของอากาศ และพลังงานน้ำร้อนที่ป้อนเข้าสู่หม้อไอน้ำ จำแนกได้เป็น ปัจจัยนำเข้า (Input) ประกอบด้วย น้ำป้อน อากาศ และเชื้อเพลิง ปัจจัยนำออก (Output) คือ ไอน้ำ โดยในระหว่างการใช้งานหม้อไอน้ำจะเกิดการสูญเสียความร้อนในรูปแบบต่าง ๆ ดังนี้

1. การสูญเสียความร้อนจากทางปล่อง

คือก๊าซเสียจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงซึ่งถูกปล่อยทิ้งไปทางปล่องปล่อยก๊าซเสียความร้อนที่ถูกปล่อยทิ้งออกปล่องจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปัจจัยดังนี้

1.1 สัดส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศ

กระบวนการเผาไหม้ต้องใช้การสันดาปเชื้อเพลิง โดยปริมาณอากาศที่ป้อนเข้าห้องเผาไหม้ต้องมีสัดส่วนเหมาะสม ทำให้อนุภาคเชื้อเพลิงซึ่งมีโมเลกุลของไฮโดรเจนและคาร์บอนรวมทั้งโมเลกุลของออกซิเจนในอากาศ เผาไหม้กันอย่างสมบูรณ์ โดยจะต้องควบคุมให้ปริมาณเชื้อเพลิงและอากาศผสมกันในสัดส่วนที่พอเหมาะ ในทางปฏิบัติมักพบว่ามีการปรับตั้งให้มีอากาศส่วนเกินเข้าห้องเผาไหม้ ทำให้มีอากาศส่วนเกินมากเกินไปจนเกิดการสูญเสียความร้อนจากทางปล่องสูง การแก้ไขอาจใช้ระบบการควบคุมการเผาไหม้แบบอัตโนมัติ [6] ซึ่งระบบอัตโนมัติจะอาศัยสัญญาณจากโพรบวัดอุณหภูมิและปริมาณออกซิเจน

ที่เหลืออยู่ในก๊าซเสีย นำมาปรับสัดส่วนของปริมาณอากาศและเชื้อเพลิงให้เหมาะสม ทำให้มีออกซิเจนในอากาศที่เผาไหม้กับโมเลกุลของไฮโดรคาร์บอนของเชื้อเพลิงเกิดขึ้นได้ดี

Zaporozhets [7] ได้กล่าวว่าการปรับปรุงวิธีควบคุมอัตโนมัติของกระบวนการเผาไหม้ในหม้อไอน้ำ โดยการวัดความเข้มข้นของออกซิเจนในก๊าซไอเสียอย่างต่อเนื่องโดยใช้เซ็นเซอร์ออกซิเจน ซึ่งจะทำการควบคุมการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงทำให้ประหยัดพลังงานอย่างมากต่อระบบการเผาไหม้หม้อไอน้ำ

ธนกร พุ่มชุมพล และวิภาวี ธรรมาภรณ์พิลาศ [8] กล่าวว่า การเผาไหม้เชื้อเพลิงและอากาศที่ถูกป้อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้ที่มีการควบคุมอุณหภูมิและความดันจนเกิดการสันดาประหว่างสารอินทรีย์หรือสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (C) กับก๊าซออกซิเจน (O_2) ซึ่งหากสามารถควบคุมสภาวะการเผาไหม้และมีการป้อนเชื้อเพลิงกับอากาศที่เหมาะสม (Air to fuel ratio, AF ratio) จะทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และน้ำ (H_2O) แต่หากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์จะเกิดเป็นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ที่ยังสามารถเผาไหม้และให้พลังงานได้อีก ซึ่งหากสูญเสียก๊าซที่สามารถเผาไหม้ได้นี้ออกไปกับก๊าซร้อนที่ระบายออกทางปล่องระบาย จะทำให้สูญเสียพลังงานในระบบ รวมถึงหากการป้อนอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้มากเกินไปความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ก็จะสูญเสียไปกับอากาศที่ระบายออกทางปล่องด้วยเช่นกัน [9] ทั้งนี้ก๊าซร้อนที่ปล่อยทางปล่อง จะมีองค์ประกอบอื่น ๆ ที่มากับอากาศป้อนด้วย เช่น ไนโตรเจน (N_2) และน้ำ (H_2O) เป็นต้น

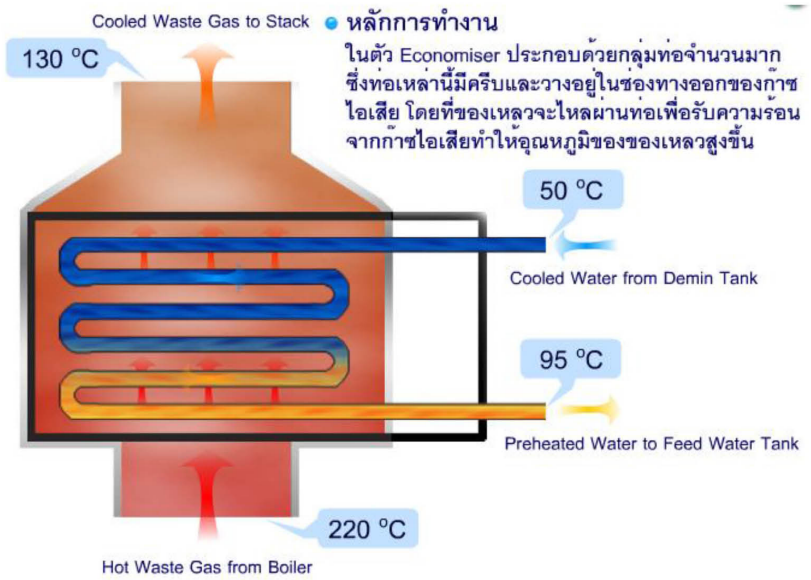
ดังนั้นการควบคุมการเผาไหม้เชื้อเพลิงให้มีประสิทธิภาพสามารถทำได้ด้วยการสังเกตที่สีของควันไอเสียและลักษณะของเปลวไฟ คือ ถ้าปริมาณสัดส่วนของอากาศพอดีสีและรูปร่างของเปลวไฟจะเป็นสีแสดรูปร่างของเปลวไฟจะสั้นและคงที่สีของควันที่ออกจากปล่องไอเสียจะมีสีเทาอ่อนหรือไม่มีสี กรณีที่ปริมาณสัดส่วนของอากาศมากเกินไปสีและรูปร่างของเปลวไฟจะเป็นสีขาวสว่างจ้าลักษณะของเปลวไฟยาวเคลื่อนไหวรุนแรงสีของควันที่ออกจากปล่องไอเสียจะมีสีขาวหรือไม่มีสี และกรณีปริมาณสัดส่วนของอากาศไม่พอหรือน้อยเกินไปสีและรูปร่างของเปลวไฟจะเป็นสีแดงคล้ำลักษณะของเปลวไฟมีเขม่าและสีของควันที่ออกจากปล่องไอเสียจะมีสีดำ

ปัญหาการสูญเสียความร้อนจากทางปล่องโดยสรุป จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนผสมของเชื้อเพลิงและอากาศ ดังนั้นผู้ควบคุมหม้อไอน้ำจะต้องหมั่นตรวจสอบว่าอัตราส่วนผสมเป็นไปอย่างเหมาะสม หากหม้อไอน้ำใช้อุปกรณ์ที่เป็นระบบอัตโนมัติต้องตรวจสอบอุปกรณ์ว่าทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และต้องหมั่นสังเกตสีของควันไอเสียที่ถูกปล่อยออกไปต้องเป็นสีที่เหมาะสมตามที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น รวมถึงตรวจสอบอุณหภูมิที่ปล่องไอเสียจะต้องไม่สูงเกินไป

1.2 การบริหารจัดการไอเสียที่ปล่อยทิ้ง

อุณหภูมิไอเสียที่ปล่อยทิ้งจากปล่องไอเสียของหม้อไอน้ำ หากสูงเกินไปอาจเกิดจากอากาศส่วนเกินมากเกินไป ซึ่งการตรวจวัดจะใช้เครื่องมือวัดและวิเคราะห์ก๊าซเสีย ซึ่งถูกติดตั้งบริเวณทางออกใกล้กับตัวหม้อไอน้ำ เพื่อดูว่ามีปริมาณก๊าซเสีย เช่น ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ที่ถูกปล่อยออกทางปล่องมีปริมาณมากน้อยเพียงใด และเพื่อตรวจสอบอุณหภูมิก๊าซเสียที่ถูกปล่อย หากพบว่าอุณหภูมิที่ปล่อยออกจากปล่องสูงเกินไป แสดงว่ามีการสูญเสียพลังงานความร้อนทิ้งไปโดยเปล่าประโยชน์ ซึ่งสอดคล้องกับ โสภา แคนสี [10] ได้กล่าวว่า ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของหม้อไอน้ำนั้นเป็นดัชนีที่จะบ่งชี้ได้ถึงความสามารถในการแปลงพลังงานที่ได้จากหม้อไอน้ำต่อพลังงานที่ให้หรือป้อนเข้าไปในหม้อไอน้ำ หม้อไอน้ำที่มีการปรับปรุงระบบการเผาไหม้ และลดการปล่อยความร้อนจากปล่องที่ดี จะส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพทางความร้อน และสอดคล้องกับ ศุภชัย ชุมนุมวัฒน์ และคณะ [11] กล่าวว่า เพื่อเป็นการประหยัดพลังงานในการผลิตไอน้ำจะต้องมีกระบวนการที่สามารถลดการใช้พลังงานเชื้อเพลิงลง และต้องจัดให้มีการนำเอาความร้อนที่ถูกทิ้งออกปล่องนำกลับมาใช้ใหม่ เพื่อเป็นการลดการใช้พลังงานหลักของหม้อไอน้ำลง ซึ่งทำได้ด้วยการนำความร้อนที่ถูกทิ้งออกปล่องนำกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการอุ่นน้ำป้อนของหม้อไอน้ำ

กระบวนการอุ่นน้ำป้อนด้วยการนำเอาความร้อนที่ถูกทิ้งจากปล่องกลับมาใช้ใหม่โดยอาศัยอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) แบบ Economiser อุณหภูมิของก๊าซเสียที่จะถูกปล่อยทิ้งออกปล่อง มีอุณหภูมิสูงถึง 220 องศาเซลเซียส เพื่อไม่ให้เกิดความสูญเสียความร้อนนี้ ต้องทำการติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเข้าไปที่ปล่อง กระบวนการทำงานของระบบนี้ คือ ก๊าซเสียที่เกิดจากการเผาไหม้ของหม้อไอน้ำ จะถูกนำมาให้ความร้อนกับน้ำด้วยอุปกรณ์อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งจะมีท่อขดที่มีน้ำอยู่ภายในท่อ น้ำที่วิ่งเข้าในท่อขดมีอุณหภูมิเพียง 50 องศาเซลเซียส แต่เมื่อผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสามารถทำให้น้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้นถึง 95 องศาเซลเซียส ซึ่งน้ำที่ได้นี้จะถูกนำไปเป็นน้ำป้อนให้กับหม้อไอน้ำโดยที่ไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายที่เป็นต้นทุนในการสร้างความร้อนให้กับน้ำป้อน และเป็นการลดการสูญเสียความร้อนทิ้งไปโดยเปล่าประโยชน์ ซึ่งจากภาพจะพบว่า ความร้อนที่ถูกทิ้งในระบบนี้มีอุณหภูมิลดเหลือเพียง 130 องศาเซลเซียส เท่านั้น แสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 หลักการทำงานของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) แบบ Economiser [12]

สอดคล้องกับการศึกษาของ อุทัย ผ่องรัศมี [13] พบว่า เครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อสามารถสามารถที่จะเพิ่มอุณหภูมิน้ำป้อนเข้าสู่หม้อไอน้ำได้ถึง 42 องศาเซลเซียส เป็นผลทำให้เกิดการประหยัดพลังงานได้ถึง 12,207.18 บีทียูต่อปี และประหยัดค่าใช้จ่ายเชื้อเพลิง 2,213,283 บาทต่อปี มีระยะเวลาคืนทุนอยู่ที่ 8 เดือน

การใช้งานอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน มีข้อเสียอยู่บางประการคือ การนำระบบนี้มาใช้จะมีต้นทุนในการสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่จะนำไปเชื่อมต่อกับเส้นทางการไหลของทางเดินก๊าซไอเสีย และจำเป็นที่จะต้องทำชุดท่อน้ำที่จะเข้ามารับความร้อนซึ่งจะต้องมีการดูแลรักษาระบบนี้อย่างต่อเนื่องทั้งในเรื่องของการจัดการเขม่าที่เกิดจากก๊าซไอเสียที่จะมาเกาะท่อแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งจะเป็นสาเหตุที่ก่อให้เกิดการอัดตัวและทำให้กีดขวางการไหลจนทำให้การแลกเปลี่ยนความร้อนของก๊าซไอเสียกับน้ำป้อนน้อยลงเนื่องจากชั้นเขม่าและกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ที่อยู่บนท่อ และเมื่อมีการใช้งานเป็นระยะเวลานานอาจจะทำให้เกิดการกัดกร่อนขึ้นได้ สอดคล้องกับ ธิติญาณ์ เปลี่ยนมณี และ มิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล [14] กล่าวว่า อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Economiser ซึ่งโดยทั่วไปอุปกรณ์ชนิดนี้จะถูกสร้างจากโลหะที่มีความทนต่ออุณหภูมิของก๊าซเสียได้ ในการใช้งานจะต้องคำนึงถึงอุณหภูมิการกลั่นตัวของกรดที่จะเกิดขึ้นจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงด้วย เช่น กรดซัลฟูรัส (H_2SO_3) และ กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) กรดเหล่านี้เกิดจากเชื้อเพลิงที่มีองค์ประกอบของกำมะถัน (S) ผสมอยู่ แต่ถึงอย่างไรอุปกรณ์ชนิดนี้ ยังมีข้อจำกัดอยู่บาง

ประการคือ สามารถที่จะนำไปใช้งานกับหม้อไอน้ำที่มีขนาดตั้งแต่ 3 ตันขึ้นไปเท่านั้น และเชื้อเพลิงของหม้อไอน้ำจะต้องเป็นเชื้อเพลิงที่มีค่ากำมะถันน้อย เนื่องจากหากมีค่ากำมะถันในเชื้อเพลิงมากอาจทำให้เกิดการกัดกร่อนที่สูง และข้อจำกัดของอุปกรณ์ชนิดนี้อีกอย่างคือมีราคาที่สูง ส่วนอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Plate heat exchanger มีข้อจำกัดคือ เกิดการอุดตันได้ง่าย และไม่สามารถใช้งานกับหม้อไอน้ำที่มีแรงดันสูงได้ และแบบ Shell and tube heat exchanger มีข้อจำกัดในเรื่องของขนาดที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่ แต่อย่างไรก็ตามจากการศึกษาปัญหาของ ธนกร พุ่มชุมพล และวิภาวี ธรรมาภรณ์พิลาศ [8] ยังพบว่าการใช้เชื้อเพลิงที่มีความหลากหลายก่อให้เกิดปัญหาด้านการผลิต ฝ่ายผลิตต้องทำการปรับเปลี่ยนสภาวะการเดินเครื่องตลอดเวลาส่งผลให้ปริมาณไอน้ำที่ผลิตและปริมาณการใช้เชื้อเพลิงไม่คงที่ ส่งผลต่อต้นทุนในการผลิต

2. การสูญเสียความร้อนจากจากการระบายน้ำออก

น้ำป้อนจะถูกส่งเข้าไปในหม้อไอน้ำและสัมผัสกับความร้อนจนกลายเป็นไอน้ำ และจะทำให้ปริมาณน้ำภายในหม้อไอน้ำลดลง น้ำที่เหลืออยู่ภายในหม้อไอน้ำอาจมีสารละลายสะสมอยู่ในปริมาณที่เข้มข้นและจะทำให้เกิดปัญหาที่เกี่ยวกับระบบน้ำ คือ

2.1 ปัญหาการเกิดตะกรัน น้ำที่มีความเข้มข้นของสารละลายมากมีความจำเป็นต้องปล่อยน้ำทิ้งออกไป เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดตะกรันในหม้อไอน้ำและในระบบท่อ และยังช่วยป้องกันการปนของน้ำร้อนไปกับไอน้ำ อันเนื่องมาจากการเดือดของน้ำในหม้อไอน้ำอย่างรุนแรง ตลอดจนช่วยป้องกันไม่ให้ชิ้นส่วนของหม้อไอน้ำเกิดการสูญเสียสมบัติความเหนียว หรือเปราะ ซึ่งอาจทำให้เกิดการการแตกหัก เสียรูป หม้อไอน้ำชนิดท่อไฟมีหลักการทำงานโดยส่งผ่านความร้อนไปยังท่อจากนั้นความร้อนที่อยู่ภายในท่อจะส่งผ่านไปยังน้ำทำให้น้ำที่อยู่โดยรอบท่อเดือดและให้ไอน้ำออกมา [15] ซึ่งจากหลักการดังกล่าวหากกระบวนการส่งผ่านความร้อนไปยังน้ำเกิดอุปสรรค เช่น ท่อมีตะกรันหนาจะทำให้หม้อไอน้ำนั้นเดือดช้าลง และสูญเสียความร้อนในการผลิตไอน้ำมาก การระบายน้ำที่มีคุณภาพต่ำออกไป จะช่วยให้หม้อไอน้ำลดการเกิดตะกรัน ตะกรันที่ท่อไฟทำให้กีดขวางการส่งผ่านความร้อนไปยังน้ำ เป็นสาเหตุให้เกิดการสะสมความร้อนที่ท่อไฟจนเกิดการฉีกขาดได้

2.2 ปัญหาการกัดกร่อนภายในหม้อไอน้ำเกิดจากออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำ รวมทั้งกรดคาร์บอนิก (H_2CO_3) ที่เกิดจากคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) แตกตัวออกมาจากสารประกอบไบคาร์บอเนตในน้ำป้อน การกัดกร่อนจะทำให้กระบวนการการถ่ายเทความร้อนของหม้อไอน้ำลดลงเนื่องจากผิวท่อที่ถูกกัดกร่อนจะมีลักษณะขรุขระไม่เรียบหรือหากมีการกัดกร่อนมากอาจจะทำให้ผิวของท่อเกิดรูพรุนขนาดเล็กซึ่งหากปล่อยไว้นาน ๆ ไปจะทำให้ท่อของหม้อไอน้ำเกิดการรั่วได้ [16]

2.3 ปัญหาเหล็กเกิดสนิม ก๊าซออกซิเจนนั้นโดยคุณสมบัติแล้วสามารถที่จะละลายอยู่ในน้ำได้ซึ่งจะมีผลทำให้ชิ้นส่วนของหม้อไอน้ำที่เป็นเหล็กเกิดสนิมขึ้นได้โดยง่าย การแก้ปัญหาก๊าซออกซิเจนละลายในน้ำสามารถทำได้โดยการใช้น้ำจากคอนเดนเสทซึ่งมีความร้อนที่สูงนำมามาผสมเข้ากับน้ำป้อน และให้ความร้อนเพิ่มเติมเข้าไปที่น้ำเพื่อทำการไล่ออกซิเจนให้ออกไปจากน้ำแล้วจึงทำการป้อนน้ำนั้นเข้าสู่หม้อไอน้ำต่อไป

2.4 ปัญหาเกี่ยวกับแคร์รี่โอเวอร์ ปัญหาดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากมีหยดน้ำที่ไม่บริสุทธิ์ที่เกิดจากการกลั่นตัวของไอน้ำหลุดผ่านท่อส่งไอน้ำ ปะปนไปกับไอน้ำโดยหยดน้ำที่ไม่บริสุทธิ์นี้จะไปส่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิตที่มีการใช้ไอน้ำ เช่น ทำให้ชิ้นงานที่กำลังทำการผลิตเสียหาย เป็นต้น

สรุปได้ว่าการระบายน้ำออกมีความสำคัญ ช่วยลดปัญหาการเกิดตะกรัน ปัญหาการกัดกร่อน ปัญหาเหล็กเกิดสนิม และปัญหาเกี่ยวกับแคร์รี่โอเวอร์ โดยทั่วไปหม้อไอน้ำจะทำการระบายน้ำออกไม่บ่อยนักเนื่องจากหากมีการระบายน้ำออกบ่อยเกินไปจะทำให้เกิดความสูญเสียความร้อน เพราะการระบายน้ำออกในแต่ละครั้งจะต้องปล่อยน้ำทิ้งออกไป และความร้อนที่อยู่ในน้ำก็จะสูญเสียไปด้วย ซึ่งทั้งสองล้วนเป็นต้นทุนที่ต้องจ่ายทั้งสิ้น น้ำที่ถูกระบายออกจากพื้นที่เก็บน้ำ (Drum) ของหม้อไอน้ำนั้นมีความร้อนอยู่ค่อนข้างสูง ดังนั้นการนำความร้อนนี้กลับมาใช้ประโยชน์จึงเป็นการอนุรักษ์พลังงาน การระบายน้ำออกจะเกิดขึ้นบ่อยแค่ไหนขึ้นอยู่กับคุณภาพน้ำป้อนและคุณภาพน้ำภายในหม้อไอน้ำ ดังนั้นน้ำที่จะนำมาใช้เป็นน้ำป้อนให้กับหม้อไอน้ำนั้นจะต้องมีคุณสมบัติที่เหมาะสม ซึ่งโดยทั่วไปคุณภาพน้ำป้อนตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องคุณสมบัติของน้ำสำหรับหม้อน้ำ พ.ศ. 2549 กำหนดว่าคุณภาพน้ำป้อนหม้อไอน้ำ (Boiler feed water) จะต้องมีค่า pH อยู่ระหว่าง 5.8 – 9.5 และมีค่า Total hardness ไม่เกิน 10 ppm as $CaCO_3$ คุณภาพน้ำในหม้อไอน้ำ (Boiler water) จะต้องมีค่า pH อยู่ระหว่าง 8.5 - 11.8 และมีค่า Total dissolved solid (TDS) ไม่เกิน 3500 ppm

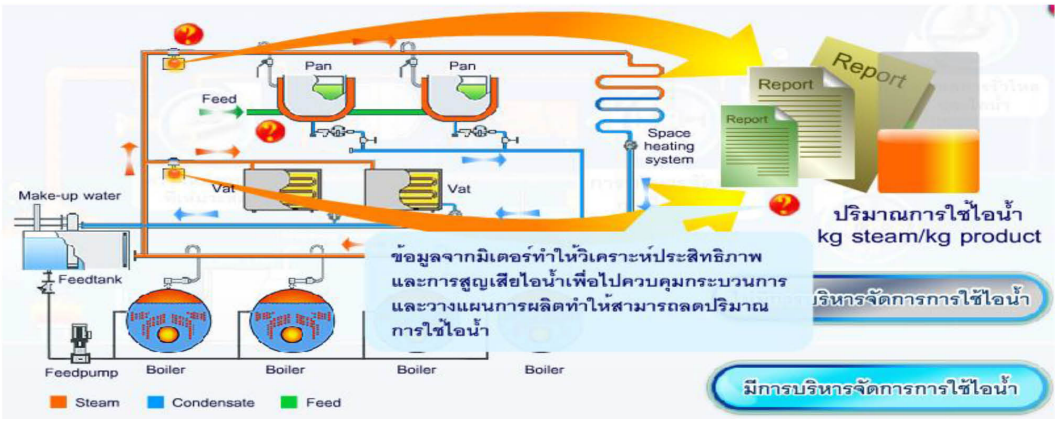
3. การสูญเสียความร้อนจากการแผ่รังสี

ความร้อนที่ถูกส่งผ่านเข้าไปยังหม้อไอน้ำเพื่อทำให้น้ำเดือดกลายเป็นไอน้ำจะเกิดการสูญเสียโดยการถ่ายเทออกมาสู่บรรยากาศภายนอก หรือที่เรียกว่า การแผ่รังสี ซึ่งการแผ่รังสีจะเกิดขึ้นมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับฉนวนที่หุ้มส่วนต่าง ๆ ของหม้อไอน้ำ เช่น ฉนวนหุ้มเปลือกหม้อไอน้ำ ฉนวนหุ้มท่อส่งไอน้ำ เป็นต้น ดังนั้นความหนาของฉนวนและสภาพของฉนวนจึงมีผลต่อการสูญเสียพลังงานความร้อนของหม้อไอน้ำทั้งสิ้น ในการพิจารณาเลือกว่าจะใช้ฉนวนที่มีขนาดความหนามากน้อยแค่ไหน จะต้องพิจารณาให้รอบคอบเนื่องจากการใช้ฉนวนที่หนาเกินไปทำให้มีค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสูง แต่ในทางกลับกันหากเลือกติดตั้งฉนวน

ที่บางจนเกินไปอาจจะช่วยลดต้นทุนในการติดตั้งได้แต่จะเกิดการสูญเสียจากการแผ่รังสีมากกว่า ดังนั้นในการติดตั้งฉนวนจะต้องมีการคำนวณจุดคุ้มทุนหรือค่าใช้จ่ายรวม เพื่อหาว่าควรจะติดตั้งฉนวนที่มีความหนามากน้อยแค่ไหนจึงจะช่วยลดค่าติดตั้งและลดค่าสูญเสียพลังงานจากการแผ่รังสีได้ดีและมีค่าใช้จ่ายรวมที่เหมาะสมที่สุด [17] ในการสูญเสียความร้อนจากการแผ่รังสีจะเกิดขึ้นได้มากหรือน้อยยังขึ้นอยู่กับสภาพของฉนวน หม้อไอน้ำที่ผ่านการใช้งานมาเป็นระยะเวลานาน ๆ นั้นอาจทำให้ฉนวนเสื่อมสภาพดังนั้นจะต้องมีการตรวจสอบและปรับปรุงสภาพฉนวนอยู่อย่างสม่ำเสมอ

4. การบริหารจัดการการใช้ไอน้ำ

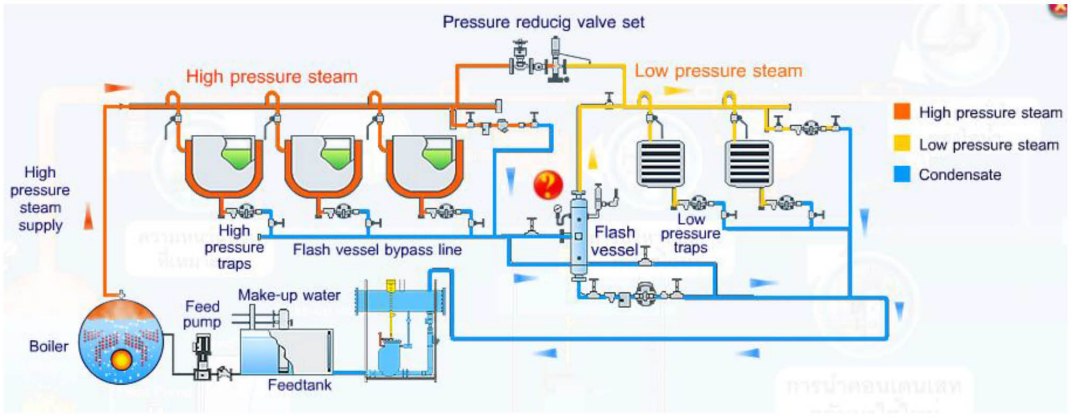
การบริหารจัดการการใช้ไอน้ำเป็นเป็นขั้นตอนของการตรวจติดตามการใช้ไอน้ำในกระบวนการผลิตว่ามีการใช้มากน้อยเพียงใด การบริหารจัดการการใช้ไอน้ำโดยการจดบันทึกข้อมูลปริมาณการใช้ไอน้ำจากมิเตอร์ เพื่อนำมาจัดทำเป็นรายงานสำหรับนำไปใช้ในการวิเคราะห์ถึงอัตราการใช้ไอน้ำในแต่ละช่วงเวลา ตลอดจนใช้เป็นข้อมูลในการควบคุมการสูญเสีย และเป็นข้อมูลในการวางแผนการผลิตให้เหมาะสมและมีประสิทธิภาพ แสดงในภาพที่ 2 สอดคล้องกับ โอภาส สุขหวาน และอุปวิทย์ สุวคันธกุล [5] กล่าวว่า การใช้ไอน้ำให้เหมาะสมกับงาน เช่น ไอน้ำชนิดอิ่มตัวใช้ในการฆ่าเชื้อ ไอเปียกใช้ในงานอบแห้ง ไอดงใช้ในการผลิตไฟฟ้า การลดความดันจะสามารถลดปริมาณไอน้ำที่ต้องใช้ต่อหน่วยของผลิตภัณฑ์ลงได้โดยใช้อุปกรณ์ลดความดัน การเลือกขนาดท่อที่ถูกต้องที่มีความดันและ ปริมาณที่ต้องการได้ช่วยให้ประสิทธิภาพการใช้งานสูงขึ้น ด้วยการไล่อากาศออกจากระบบ อากาศที่เข้าไปในระบบไอน้ำจะทำให้เพิ่มประสิทธิภาพของการส่งผ่านความร้อน ตลอดจนการนำข้อมูลดังกล่าวนี้ไปปรับปรุงข้อบกพร่องที่จะเกิดจากการใช้ไอน้ำที่ไร้ประสิทธิภาพได้ถูกต้องและแม่นยำ ซึ่งจะทำให้สามารถที่จะควบคุมกระบวนการผลิตให้ดำเนินไปอย่างราบรื่นไม่สะดุดจากปัญหาในเรื่องของปริมาณไอน้ำไม่เพียงพอหรือไอน้ำมีแรงดันไม่เพียงพอต่อการใช้งาน ช่วยลดความสูญเสียทำให้ค่าใช้จ่ายลดลง



ภาพที่ 2 รูปแบบการบริหารจัดการการใช้ไอน้ำ [12]

5. การนำคอนเดนเสทกลับมาใช้ใหม่

ไอน้ำที่ผ่านการใช้งานจะมีอุณหภูมิหรือแรงดันที่ลดลง และเกิดการกลั่นตัวเกิดเป็นหยดน้ำหรือที่เรียกว่า คอนเดนเสท ซึ่งคอนเดนเสทเป็นหยดน้ำที่ยังมีความร้อนสะสมอยู่มาก สามารถที่จะนำกลับมาใช้เป็นน้ำป้อนให้กับหม้อไอน้ำใหม่ได้ [18] ข้อดีของคอนเดนเสท คือ จะทำให้อุณหภูมิน้ำป้อนสูงขึ้นโดยที่ไม่จำเป็นต้องให้ความร้อนแก่น้ำป้อน ลดการสูญเสียพลังงาน และยังลดปริมาณน้ำที่จะใช้เป็นน้ำป้อนเข้าหม้อไอน้ำ ทำให้ค่าใช้จ่ายในส่วนนี้ลดลงด้วยเช่นเดียวกัน



ภาพที่ 3 รูปแบบการนำคอนเดนเสทกลับมาใช้ใหม่ [12]

เมื่อไอน้ำที่ถูกผลิตขึ้นถูกส่งไปตามท่อจ่ายไอเพื่อนำไปใช้ในกระบวนการผลิต ไอน้ำที่ผ่านการใช้งานจะเย็นตัวลงจนเป็นหยดน้ำที่ยังมีอุณหภูมิสูง หากไม่มีระบบการนำคอนเดน

เสท เพื่อวนกลับมาเป็นน้ำป้อนใหม่ อาจต้องระบายน้ำนี้ทิ้งและเกิดการสูญเสียทั้งความร้อนและน้ำที่จะนำมาใช้ในระบบ แสดงในภาพที่ 3

โดยสรุป คอนเดนเสท จะต้องถูกนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์แทนการระบายทิ้ง การบริหารจัดการหม้อไอน้ำให้มีประสิทธิภาพ สถานประกอบการที่มีการใช้งานหม้อไอน้ำจะต้องติดตั้งระบบเพื่อนำคอนเดนเสท กลับมาวนใช้ในระบบใหม่ เพื่อลดต้นทุนที่จะเกิดจากการสูญเสียดังกล่าว

6. การลดการรั่วไหลของไอน้ำในหม้อไอน้ำ

ระบบท่อส่งจ่ายไอน้ำจะมีข้อต่อต่าง ๆ จำนวนมาก หากเกิดการชำรุดหรือติดตั้งไม่ได้คุณภาพ จะทำให้เกิดการรั่วของไอน้ำ เป็นการสูญเสียพลังงานที่สูงมาก หากพบว่ามีการรั่วไหลของไอน้ำควรทำการซ่อมแซมอย่างรวดเร็ว สำหรับการใช้งานหม้อไอน้ำมักประสบปัญหาจากการที่ไอน้ำกลั่นตัวกลายเป็นหยดน้ำ และหยดน้ำที่เกิดขึ้นภายในท่อนี้จะเคลื่อนที่ไปตามแรงดันไอน้ำที่ไหลไปตามท่ออย่างรวดเร็ว และเกิดการชนกระแทกโดยเฉพาะบริเวณที่เป็นจุดหักเลี้ยวของท่อ จนทำให้ท่อเกิดการชำรุดและรั่วซึม เพื่อเป็นการแก้ปัญหาดังกล่าวจึงมีความจำเป็นที่จะต้องติดตั้งอุปกรณ์ที่เรียกว่ากับดักไอน้ำ (Steam trap) ซึ่งทำหน้าที่ระบายคอนเดนเสท หยดน้ำและก๊าซต่าง ๆ ที่ไม่กลั่นตัวออกไปจากระบบส่งจ่ายไอน้ำ และป้องกันไม่ให้ไอน้ำไหลออกไปได้ทำให้การส่งจ่ายไอน้ำมีประสิทธิภาพ

สรุปได้ว่าการรั่วไหลของไอน้ำจะทำให้เกิดความสูญเสีย ทั้งในรูปของไอน้ำ ความร้อน และน้ำ ซึ่งล้วนแล้วแต่เป็นต้นทุนที่ต้องจ่ายทั้งสิ้น ผู้ควบคุมหม้อไอน้ำจะต้องหมั่นตรวจสอบการรั่วซึม หากพบต้องรีบหาสาเหตุและดำเนินการแก้ไขอย่างเร่งด่วน เนื่องจากหากเพิกเฉยหรือปล่อยทิ้งไว้ จะกลายเป็นค่าใช้จ่ายจากการสูญเสียที่สูงมาก

สรุป

การบริหารจัดการประสิทธิภาพสำหรับหม้อไอน้ำเป็นการควบคุมการสูญเสียพลังงานความร้อนในรูปแบบต่าง ๆ ประกอบด้วย การสูญเสียความร้อนจากทางปล่อง เป็นการควบคุมสัดส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศให้มีสัดส่วนที่เหมาะสมเพื่อควบคุมประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ การเผาไหม้ที่สมบูรณ์สามารถสังเกตได้จากสีของควันถ้าปริมาณสัดส่วนของอากาศพอดีสีและรูปร่างของเปลวไฟจะเป็นสีแสดรูปร่างของเปลวไฟจะสั้นและคงที่สีของควันที่ออกจากปล่องไอเสียจะมีสีเทาอ่อนหรือไม่มีสี ผู้ควบคุมหม้อไอน้ำต้องคอยตรวจสอบเป็นระยะเพื่อปรับปรุงแก้ไขสัดส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศให้เหมาะสม ในกรณีที่ไอเสียที่ปล่อยออกจากปล่องมีอุณหภูมิสูงเกินไป แสดงว่ามีการสูญเสียความร้อนโดยไม่จำเป็นจะต้องนำความร้อนนั้นกลับมาใช้ด้วยการติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

น้ำที่มีคุณสมบัติไม่เหมาะสมก่อให้เกิดปัญหาการเกิดตะกรันทำให้การส่งผ่านความร้อนถูกขัดขวางและอาจถูกปล่อยออกปล่องไป การสะสมความร้อนที่ท่อไฟอาจทำให้ท่อฉีกขาด ปัญหาการกัดกร่อนเกิดจากออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำรวมทั้งกรดคาร์บอนิกที่เป็นสาเหตุให้เกิดการรั่วของท่อ ปัญหาเหล็กเกิดสนิมเกิดจากออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำทำให้ชิ้นส่วนของหม้อไอน้ำเกิดการชำรุดเสียหาย และปัญหาเกี่ยวกับแคร์รี่โอเวอร์ทำให้เกิดผลเสียต่อกระบวนการผลิตเนื่องจากหยดน้ำที่ไม่บริสุทธิ์จะสร้างความเสียหายให้กับชิ้นส่วนที่กำลังทำการผลิต ทำให้ต้องมีการระบายน้ำออกเกิดความสูญเสียความร้อนและน้ำ

การสูญเสียความร้อนจากการแผ่รังสีเป็นการถ่ายเทความร้อนออกมาสู่บรรยากาศภายนอกเกิดจากความหนาฉนวนไม่เพียงพอ การบริหารจัดการการใช้ไอน้ำเป็นการตรวจติดตามการใช้ไอน้ำในกระบวนการผลิตเพื่อทราบปริมาณการใช้ไอน้ำและต้องติดตั้งระบบเพื่อนำคอนเดนเสทกลับมาใช้ใหม่เพื่อลดการสูญเสียพลังงานและต้องมีการควบคุมการรั่วไหลของไอน้ำ

เอกสารอ้างอิง

1. กฤตภาส มงคลธำรงกุล, พัชราภรณ์ สุขกันตะ, เมธิณ ใจเกื้อ. การประเมินการอนุรักษ์พลังงานในบริษัทผลิตชิ้นส่วนรถยนต์. วารสารหน่วยวิจัยวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อมเพื่อการเรียนรู้ 2563;11:345-58.
2. สมพร ปานดำ. แนวทางยกระดับคุณภาพช่างอุตสาหกรรมพันธุ์ใหม่ 4.0 ตามยุทธศาสตร์การพัฒนาอุสาหกรรมไทย 4.0. วารสารวิชาสถาบันการอาชีวภาคใต้ 1 2563;5:8-13.
3. เฉลิมชัย บุญเยี้ยม, ธีระวัฒน์ จันทึก. การพัฒนามาตรฐานการขนส่งเพื่อจัดการการส่งมอบผลิตภัณฑ์น้ำมันเตาทดแทน. วารสารอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยศิลปากร 2559;9:1979-98.
4. Zhang Q. Energy-exergy analysis and energy efficiency improvement of coal-fired industrial boilers based on thermal test data. Appl Therm Eng 2018;144:614-27.
5. โอภาส สุขหวาน, อุปวิทย์ สุวคันธกุล. การอนุรักษ์พลังงานในงานอุตสาหกรรม. วารสารวิชาการอุตสาหกรรมศึกษา 2555;6:30-5.
6. Marshalla E, Steinberger J, Dupont V, Foxon T. Combining energy efficiency measure approaches and occupancy patterns in building modelling in the UK residential context. Energ Build 2016;111:98-108.

7. Zaporozhets A. Analysis of control system of fuel combustion in boilers with oxygen sensor. Period Polytech Mech Eng 2019;64:241-8.
8. ธนกร พุ่มชุมพล, วิภาวี ธรรมาภรณ์พิลาศ. การวิเคราะห์ปัจจัยในการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลของหม้อกำเนิดไอน้ำฟลูอิไดซ์เบดแบบฟองแก๊ส. วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา 2562;30:147-57.
9. Nagar V, Soni K, Khare K. Boiler efficiency improvement through analysis of losses. Int J Sci Res Dev 2013;1:1-5.
10. โสภา แคนสี. ผลของท่อความร้อนและปล่องไฟต่อสมรรถนะของหม้อไอน้ำสำหรับนึ่งก้อนเชื้อเห็ด. วารสารเกษตรพระวรุณ 2563;17:89-98.
11. ศุภชัย ชุมนุมวัฒน์, นิติกร หลีชัย, ธงชัย เคลือผือ. การศึกษาความเป็นไปได้ในการลงทุนของตัวรับรังสีแสงอาทิตย์สำหรับการอุ่นน้ำป้อนในระบบหม้อไอน้ำเชื้อเพลิงไม้. วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 2562;12:12-26.
12. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น). ผู้ควบคุมประจำหม้อน้ำหรือหม้อต้มที่ใช้ของเหลวเป็นสื่อนำความร้อน [อินเทอร์เน็ต]. 2561 [เข้าถึงเมื่อ 27 ตุลาคม 2564]. เข้าถึงได้จาก: https://www.shawpat.or.th/index.php?option=com_content&view=article&id=683:-m-m-s&catid=71:training-news&Itemid=263
13. อุทัย ผ่องรัศมี, เสนีย์ ศิริไชย, สำรวจ อินแบน. การนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์สำหรับหม้อน้ำขนาดเล็ก. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา 2556;18:203-14.
14. ธิติญาณ์ เปลี่ยนมณี, มิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล. การควบคุมอุณหภูมิน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์เพื่อป้องกันกรดจากก๊าซเสียกลั่นตัว. วารสารวิจัยพลังงาน 2555;9:36-46.
15. Satyavada H, Baldib S. Monitoring energy efficiency of condensing boilers via hybrid first-principle modelling and estimation. Energy 2018;142:121-9.
16. Orihuela P, Gomez-Martin A, Becerra A, Chacartegui R, Ramirez-Rico J. Performance of biomorphic silicon carbide as particulate filter in diesel boilers. J Environ Manag 2017;203:907-19.
17. Soares J, Oliveira A, Dieckmann S, Kruger D, Orioli F. Evaluation of the performance of hybrid CSP/biomass power plants. Int J Low Carbon Tech 2018;13:380-7.
18. Wang C, Chou M, Hsu H, Wang J, Selvarai S. The efficiency improvement by combining HHO gas coal and oil in boiler for electricity generation. Energies 2017;10:1-13.