

การเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานในหม้อไอน้ำอุตสาหกรรมด้วยการใช้สารเคลือบ ที่มีการแผ่รังสีความร้อนสูง: กรณีศึกษา

Energy Efficiency Enhancement for Industrial Boilers Utilizing High Emissivity Coating: A Case Study

ทิวฤทธิ์ วีระเศรษฐ์* และ สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์

สาขาวิชาเทคโนโลยีและการจัดการพลังงาน บัณฑิตวิทยาลัย
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330
E-mail: Tiraphut.v@gmail.com*

Tiraphut Viraset* and Sompong Putivisutisak

Department of Energy Technology and Management
Chulalongkorn University. Pathumwan, Bangkok 10330.
E-mail: Tiraphut.v@gmail.com*

Received 22 Apr 2025; Revised 24 May 2025

Accepted 20 Jun 2025; Available online 30 Jun 2025

บทคัดย่อ

ความต้องการพลังงานที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ราคาพลังงานมีแนวโน้มสูงขึ้นทุกปี ทำให้ผู้ใช้พลังงานต้องดำเนินการอนุรักษ์พลังงานอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ หม้อไอน้ำเป็นอุปกรณ์ที่มีบทบาทสำคัญในภาคอุตสาหกรรมและภาคเศรษฐกิจอื่น ๆ ที่ต้องใช้พลังงานความร้อน โดยในปัจจุบันมีหม้อไอน้ำที่ขึ้นทะเบียนกับกรมโรงงานอุตสาหกรรมมากกว่า 10,000 เครื่อง และตลาดหม้อไอน้ำทั่วโลกมีมูลค่ากว่า 500 ล้านล้านบาท ดังนั้นการอนุรักษ์พลังงานในระบบหม้อไอน้ำจึงเป็นเรื่องสำคัญอย่างยิ่ง งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำด้วยการใช้สารเคลือบที่มีการแผ่รังสีความร้อนสูง ซึ่งมีคุณสมบัติช่วยลดการสะท้อน และเพิ่มการดูดซับความร้อนที่ผิวท่อน้ำ ทำให้ความร้อนจากเตาเผาถูกถ่ายเทเข้าสู่ไอน้ำได้มากขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพพลังงานในหม้อไอน้ำเพิ่มขึ้น โดยผลที่เกิดขึ้นคือ หม้อไอน้ำสามารถผลิตไอน้ำได้มากขึ้นในปริมาณเชื้อเพลิงที่เท่าเดิม หรือใช้เชื้อเพลิงน้อยลงในกรณีที่ต้องการปริมาณไอน้ำเท่าเดิมหรือใช้เชื้อเพลิงน้อยลง โดยจากงานวิจัยพบว่า สารเคลือบที่มีค่าการแผ่รังสีความร้อนสูงสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ จาก 89.61% เป็น 91.67% คิดเป็นการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพ 2.25% หรือเทียบเท่าการประหยัดพลังงานความร้อน 3.05 GJ/h ซึ่งคิดเป็นการลดการใช้เชื้อเพลิงก๊าซ 488.57 ton/year และ ลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ 1,315.61 ton/year โดยยังคงให้ผลผลิตไอน้ำเท่าเดิม แนวทางนี้จึงเป็นอีกหนึ่งมาตรการอนุรักษ์พลังงานที่มีประสิทธิภาพ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับมาตรการอื่นได้อย่างหลากหลายและยังส่งผลต่อความสามารถในการแข่งขันของสถานประกอบการ จากต้นทุนพลังงานที่ลดลง และอายุการใช้งานของอุปกรณ์ที่เพิ่มขึ้น รวมถึงการมีส่วนช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกซึ่งเป็นแนวทางในการก้าวสู่ความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

คำหลัก: สารเคลือบที่มีค่าการแผ่รังสีความร้อนสูง, การอนุรักษ์พลังงาน, ประสิทธิภาพหม้อไอน้ำ, หม้อไอน้ำ

Abstract

The growing energy demand has driven a consistent rise in energy costs, making energy conservation imperative, particularly in the industrial sector due to its significant energy consumption. Boilers are critical in various industries and other economic sectors that rely on heat energy. Currently, more than 10,000 boilers are registered with the Thai Department of Industrial Works and a global market exceeding 500 trillion baht. Consequently, improving boiler efficiency has become both critical and urgent. This study explores the application of high-emissivity coatings to enhance boiler efficiency. These coatings, by reducing heat loss from reflection and increasing heat absorption in boiler water tubes, improve heat transfer to steam. This results in enhanced boiler performance, enabling increased production and reduced fuel consumption. The findings reveal that high-emissivity coatings can improve boiler efficiency from 89.61% to 91.67%, achieving energy savings of 2.25% or 3.05 GJ/h. This leads to an annual reduction in fuel consumption by 488.57 tons and carbon emissions by 1,315.61 tons, all without compromising steam output. These outcomes were validated through hypothesis testing. This measure provides a practical solution to energy challenges and can be implemented alongside other efficiency improvement measures. Moreover, it strengthens industrial competitiveness and aligns with environmental sustainability goals.

Keywords: High-Emissivity Coating, Energy Conservation, Boiler Efficiency, Boiler

1. ที่มาและความสำคัญ

ความต้องการใช้พลังงานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกปี ประกอบกับสภาวะการณต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นส่งผลให้ราคาพลังงานในตลาดโลกสูงขึ้นทำให้ผู้ใช้พลังงานต้องอนุรักษ์พลังงานอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในภาคอุตสาหกรรมเนื่องจากเป็นภาคที่มีการใช้พลังงานสูง และเป็นภาคพื้นฐานของทุกสาขา เศรษฐกิจโดยในปี พ.ศ. 2566 ภาคอุตสาหกรรมเป็นภาคที่มีการใช้พลังงานขั้นสุดท้าย 14,551 พันตัน เทียบเท่าน้ำมันดิบ ซึ่งคิดเป็น 39.5% ของสาขาเศรษฐกิจปี 2566 ทั้งหมด [1]

หม้อไอน้ำ (Boiler) มีหน้าที่สร้างไอน้ำที่มีพลังงานความร้อนสูงซึ่งมีความสำคัญอย่างมากทั้งในภาคอุตสาหกรรมและสาขาเศรษฐกิจอื่น ๆ โดยในปัจจุบันประเทศไทยมีหม้อไอน้ำที่ขึ้นทะเบียนกับกรมโรงงานอุตสาหกรรมมากกว่า 10,000 เครื่อง [2] และมีมูลค่าตลาดการซื้อขายทั่วโลกในปี ค.ศ. 2024 อยู่ที่ประมาณ 500 ล้านล้านบาทและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นปีละ 10.3% [3]

ดังนั้นการอนุรักษ์พลังงานในหม้อไอน้ำจึงมีความสำคัญและควรทำเป็นอย่างมาก ซึ่งนอกจากจะช่วยลดการใช้พลังงานแล้ว ยังช่วยในการประหยัดค่าใช้จ่ายที่เป็นต้นทุนในการผลิต และยังเป็นการลด

การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกิจกรรมการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลอันเป็นสาเหตุของภาวะโลกร้อนอีกด้วย ซึ่งหลักการสำคัญในการอนุรักษ์พลังงานของโรงงานอุตสาหกรรมคือ ลดการใช้พลังงานลงด้วยวิธีการใช้พลังงานอย่างเหมาะสมเพื่อประโยชน์สูงสุดโดยไม่กระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานในหม้อไอน้ำอุตสาหกรรมด้วยการใช้สารเคลือบที่มีการแผ่รังสีความร้อนสูง (High Emissivity Coating) ท่อไอน้ำของหม้อไอน้ำ เนื่องจากกระบวนการถ่ายโอนความร้อนภายในหม้อไอน้ำ และเตาเผาในอุตสาหกรรม 80% มาจากการแผ่รังสีความร้อนซึ่งการใช้สารเคลือบที่มีการแผ่รังสีความร้อนสูงสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพทางความร้อนได้ ทำให้เชื้อเพลิงที่ใช้ต่อความร้อนที่ผลิตได้ลดลง อีกทั้งยังเป็นมาตรการที่ยังไม่มีการเผยแพร่อย่างแพร่หลายในประเทศไทย และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับมาตรการอื่นได้อย่างหลากหลาย

2. การแผ่รังสีความร้อน

การแผ่รังสีเป็นการถ่ายโอนความร้อนชนิดหนึ่งที่ไม่ต้องอาศัยตัวกลาง โดยจะเกิดขึ้นได้กับทุกวัตถุที่มีอุณหภูมิมากกว่า 0 เคลวิน พลังงานความร้อนจะถูก

ส่งผ่านในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยทั่วไปเมื่อรังสีความร้อนกระทบกับวัตถุ อาจถูกดูดกลืน (α) , สะท้อน (ρ) และทะลุผ่าน (τ) [4] โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (1)

$$\rho + \tau + \alpha = 1 \quad (1)$$

สภาพการเปล่งรังสี (Emissivity) คืออัตราส่วนของพลังงานความร้อนที่แผ่รังสีออกมาจากวัตถุทั่วไปต่อพลังงานที่ถูกปล่อยออกมาจากวัตถุในอุดมคติเรียกว่าวัตถุดำ (Black body) ที่มีอุณหภูมิเท่ากัน โดยมีค่าระหว่าง 0-1 ค่าจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ พื้นผิว และความยาวของคลื่นแสง ตามกฎของเคียร์ชฮอฟ ค่าสัมประสิทธิ์สภาพการแผ่รังสี (ε) จะมีค่าเท่ากับสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนแสง (α) [4] ดังสมการที่ (2)

$$\varepsilon = \alpha \quad (2)$$

กล่าวคือ ค่าการแผ่รังสีแปรผกผันกับค่าการสะท้อน และแปรผันตรงกับค่าการดูดกลืน ค่าการแผ่รังสีที่สูงขึ้นทำให้ค่าความสะท้อนน้อยลงและส่งผลให้ค่าการดูดกลืนเพิ่มมากขึ้น

3. สารเคลือบที่มีการแผ่รังสีความร้อนสูง

สารเคลือบที่มีการแผ่รังสีความร้อนสูงส่วนใหญ่จะประกอบด้วยสารที่ช่วยเพิ่มการดูดซับความร้อนและแผ่รังสีกลับคืน ซึ่งหากนำมาใช้กับหม้อไอน้ำหรือเตาเผาจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพทางความร้อนโดยทำได้ 2 วิธีคือการเคลือบบนผิวท่อ และบนผนังอิฐทนไฟ การเคลือบบนท่อจะช่วยลดพลังงานความร้อนที่สะท้อนออกจากผิว และเพิ่มการดูดกลืนพลังงานส่งผลให้ความร้อนสามารถถ่ายเทจากห้องเผาไหม้ไปสู่ผลิตภัณฑ์ได้มากขึ้น และเช่นเดียวกันการเคลือบบนผนังเตาจะช่วยลดการสะท้อนและเพิ่มการดูดกลืนพลังงานของผนัง ให้ความร้อนเกิดการแผ่รังสีกลับไปในห้องเผาไหม้ ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ได้รับความร้อนมากขึ้น ซึ่งทั้ง 2 วิธีการนี้มีผลทำให้ประสิทธิภาพทางความร้อนของอุปกรณ์เพิ่มขึ้น [5]

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่าสารเคลือบสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพความร้อนได้จริง Heynderickx and Nozawa 2004 [6] ทดลองเคลือบสารบริเวณผิวท่อและผนังเตาแครกกิ้งไอน้ำ (Steam

Cracking Furnace) พบว่าประสิทธิภาพทางความร้อนของเตาเผาเพิ่มขึ้น 5% ซึ่ง Stefanidis, et al 2008 [7] ได้ทดลองด้วยวิธีคล้ายคลึงกันแต่ดำเนินการเคลือบที่ผนังเตาเพียงอย่างเดียว พบว่าประสิทธิภาพทางความร้อนเพิ่มขึ้น 1% และ 1.9% ตามลำดับ

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องสามารถสรุปได้ว่าสารเคลือบที่มีค่าการแผ่รังสีสูงมีคุณสมบัติช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดกลืนและการแผ่รังสีออกมาได้ ซึ่งทำให้ความร้อนสามารถส่งไปยังผลิตภัณฑ์ได้มากขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพทางความร้อนเพิ่มขึ้น โดยจะถูกออกแบบมาให้มีความแข็งแรงสูง ทนต่อการขัดถูและแรงกระแทกจากความร้อน มีคุณสมบัติการขยายตัวจากความร้อนที่คล้ายคลึงกับวัสดุพื้นผิวและมีแรงยึดเกาะที่เพียงพอ สารเคลือบช่วยเพิ่มและรักษาค่าการแผ่รังสีให้คงที่ในอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปของกระบวนการ อีกทั้งยังยืดอายุการใช้งานของท่อหรืออิฐทนไฟได้อีกด้วย [5]

4. วิธีการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการทดลองใช้สารเคลือบกับหม้อไอน้ำในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีแห่งหนึ่ง โดยหลังจากการเคลือบจะเก็บข้อมูลจริงและนำมาสรุปผล

4.1 คุณสมบัติของวัสดุเคลือบ

สารเคลือบที่ใช้เป็นสารเคลือบอนินทรีย์โดยมี อลูมินา (Alumina), โพแทสเซียมซิลิเกต (Potassium Silicate) และ โซเดียมซิลิเกต (Sodium Silicate) เป็นส่วนประกอบหลัก โดยใช้น้ำเป็นส่วนประกอบและผสมสารเติมแต่งเพื่อเพิ่มการดูดซับรังสีและเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานที่อุณหภูมิสูงและทนต่อการกัดกร่อน โดยคุณสมบัติทั่วไปของวัสดุเคลือบ แสดงอยู่ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของวัสดุเคลือบ

Properties	Test Method	Result
Emissivity	Spectrophotometry	0.80-0.95
Hardness	ASTM D 2240	400 (10 Kgf)
Adhesion Pressure	ASTM D 4541	600 psi
Abrasion Resistivity	ASTM D 968	$\leq 0.03\%$
Service temp	-	600-1200°C



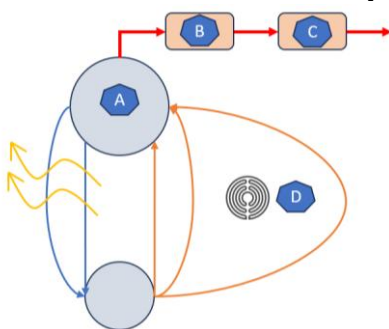
รูปที่ 2 พื้นผิวท่อน้ำก่อนทำการเคลือบสาร



รูปที่ 3 พื้นผิวท่อน้ำก่อนทำการเคลือบสาร

4.2 หม้อไอน้ำที่ใช้ทำการวิจัย

เป็นหม้อไอน้ำแบบท่อน้ำหมุนเวียนธรรมชาติ ขนาด 110 ton/h ความดัน 115 bar โดยมีอุปกรณ์สำคัญคือ ถังพักไอน้ำ (A), ซูเปอร์ฮีตเตอร์ (B), ดีซูเปอร์ฮีตเตอร์ (C) และหัวเผา (D) ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แบบจำลองหม้อน้ำที่ใช้ทำการวิจัย

4.3 การเคลือบสาร

ดำเนินการเคลือบบริเวณท่อน้ำ ซึ่งคิดเป็นพื้นที่ทั้งหมดประมาณ 255 m² ใช้เวลาดำเนินการประมาณ 14 วัน โดยรูปที่ 2-3 แสดงพื้นผิวท่อน้ำก่อนและหลังเคลือบ และการเคลือบมีวิธีการดำเนินการดังนี้

- เตรียมความพร้อมของพื้นผิวด้วยวิธีการพ่นทราย
- ทำความสะอาดท่อด้วยลมเพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีสิ่งแปลกปลอม
- ดำเนินการเคลือบ และตรวจสอบความหนา
- ทำให้แห้ง (Dry out)
- ตรวจสอบความเรียบร้อย

4.4 การเก็บข้อมูล

การเก็บข้อมูลก่อนและหลังเพื่อเปรียบเทียบ ต้องมั่นใจได้ว่าหม้อไอน้ำมีการดำเนินการ และมีสภาพสิ่งแวดล้อมใกล้เคียงกันมากที่สุด

4.4.1 วันที่ทำการเก็บข้อมูล

พิจารณาเก็บข้อมูลทั้งก่อนและหลังเคลือบ ในช่วงหลังจากที่หม้อไอน้ำมีการซ่อมบำรุงใหญ่และเริ่มเดินระบบใหม่เหมือนกัน โดยมีรายละเอียดการเก็บข้อมูลดังนี้

- ก่อนเคลือบ 12/05/2021 – 31/12/2021
- หลังเคลือบ 06/04/2024 – 30/11/2024
- เก็บข้อมูลทุก 1 ชั่วโมง

4.4.2 ตัวแปร

ค่าตัวแปรที่เก็บก่อนและหลังดำเนินการนั้นจะประกอบด้วย 2 ส่วนคือข้อมูลของไอน้ำ และข้อมูลของเชื้อเพลิง เพื่อสองจุดประสงค์คือ สรุปผลทางประสิทธิภาพและยืนยันความใกล้เคียงกันของข้อมูล โดยค่าตัวแปรที่เก็บแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ตัวแปรที่เก็บค่า

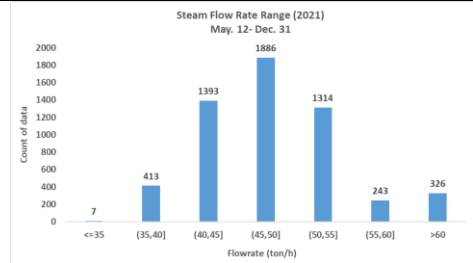
Item	Data	Unit
1	Steam Flowrate	ton/h
2	Steam Pressure	bar
3	Steam Temperature	°C
4	Boiler Feed Water (BFW) Flowrate	ton/h
5	BFW Temperature	°C
6	BFW Pressure	bar
7	Fuel Flowrate	ton/h
8	Fuel LHV	MJ/kg
9	Fuel Composition	-
10	Excess O ₂	%vol

4.4.3 การจัดการข้อมูล

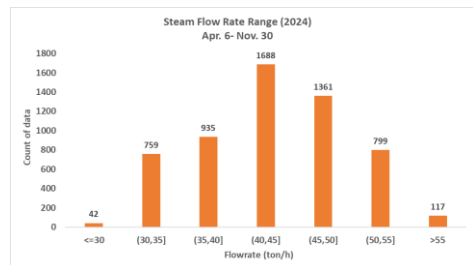
หลังจากได้ข้อมูลดิบจะนำมาจัดการข้อมูลโดยพิจารณาใช้ข้อมูลที่มีการใช้เชื้อเพลิงเหมือนกัน โดยหม้อไอน้ำมีการใช้เชื้อเพลิงทั้งหมด 3 ชนิดคือ Fuel Gas (FG), Pyrolysis Fuel Oil (PFO), Pyrolysis Gas Oil (PGO), Bunker C oil (B-C Oil) โดย FG เป็นเชื้อเพลิงหลักที่ต้องซื้อมาจากภายนอก ที่เหลือเป็นเชื้อเพลิงที่ได้จากกระบวนการผลิตจะพิจารณานำมาใช้ตามปริมาณที่มี, กำจัดค่าผิดปกติ (Outliner) และเลือกช่วงข้อมูลที่มีค่าอัตราการไหล, ออกซิเจน, อุณหภูมิน้ำป้อน ใกล้เคียงกันมากที่สุด

4.4.4 อัตราการไหลที่นำมาพิจารณา

ทำการเก็บข้อมูลตัวแปรในตารางที่ 2 ทุกๆ 1 ชั่วโมง ในช่วงวันที่กำหนด โดยจะใช้ช่วงอัตราการไหลที่มีข้อมูลมากที่สุดในการพิจารณา ซึ่งช่วงอัตราการไหลที่ใช้พิจารณาสรุปผลคือ 40-45 ton/h เนื่องจากเป็นช่วงที่มีข้อมูลหลังเคลือบมากที่สุดที่ 1,688 ข้อมูลและมีข้อมูลก่อนเคลือบเพียงพอที่ 1,393 ข้อมูล ดังแสดงในรูปที่ 4 และรูปที่ 5



รูปที่ 4 จำนวนข้อมูลอัตราการไหลในช่วงต่างๆ ก่อนการเคลือบ



รูปที่ 5 จำนวนข้อมูลอัตราการไหลช่วงต่างๆ หลังการเคลือบ

4.5 การตรวจสอบผลการดำเนินการ

การตรวจสอบผลจะประกอบไปด้วยวิธีการ 3 ส่วนคือการตรวจสอบทางตรง, การตรวจสอบทางอ้อม, และการทดสอบสมมติฐาน

4.5.1 การตรวจสอบทางตรง

ประกอบไปด้วยการตรวจสอบปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ และอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ที่ลดลง ผ่านกล้องถ่ายภาพความร้อน (เทอร์โมสแกน)

4.5.2 การตรวจสอบผลทางอ้อม

ใช้การคำนวณประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ และดัชนีชี้วัดการใช้พลังงาน (SEC) เพื่อคำนวณการประหยัดเชื้อเพลิงตามสมการที่ (3-5)

$$\eta_b = \frac{m_s \times (h_s - h_w)}{m_f \times LHV} \quad (3)$$

$$SEC = 1/\eta_b \quad (4)$$

$$Energy Saving = (SEC_{before} - SEC_{After}) / SEC_{before} \quad (5)$$

โดยที่ η_b คือประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ (%), SEC คือดัชนีชี้วัดการใช้พลังงาน, m_s คืออัตราการไหลของไอน้ำ (ton/h), m_f คืออัตราการใช้เชื้อเพลิง (ton/h), h_s คือเอนทาลปีของไอน้ำ (kJ/kg), h_w คือเอนทาลปีของน้ำป้อน (kJ/kg) และ LHV คือค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง (MJ/kg)

4.5.3 การทดสอบความน่าเชื่อถือ

การทดสอบสมมติฐาน (Hypothesis Testing) เป็นกระบวนการทางสถิติที่ช่วยในการตัดสินใจว่าตัวแทนข้อมูลที่มีขัดแย้งกับสมมติฐานที่ตั้งไว้หรือไม่ โดยเริ่มจากการกำหนดสมมติฐานว่าง (H_0) และสมมติฐานทางเลือก (H_1) จากนั้นใช้วิธีการทางสถิติทดสอบเพื่อคำนวณค่าความน่าจะเป็น (P-value) เพื่อเปรียบเทียบกับระดับนัยสำคัญ (α) หาก P-value ต่ำกว่า α จะยอมรับ H_1 (มีหลักฐานพอที่จะสนับสนุน H_1) [8]

ซึ่งเพื่อยืนยันว่าข้อมูลก่อนและหลังการเคลือบเป็นข้อมูลที่มีความใกล้เคียงกันจึงทำการนำข้อมูลอัตราการไหลของไอน้ำมาทดสอบด้วยวิธีการ two-sample t-test ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยมีสมมติฐานดังนี้

$$H_0: \mu_0 - \mu_1 = 0 \quad (6)$$

$$H_1: \mu_0 - \mu_1 \neq 0 \quad (7)$$

โดยที่ μ_0 คือค่าเฉลี่ยของอัตราการไหลของไอน้ำก่อนการเคลือบ (ton/h) และ μ_1 คือค่าเฉลี่ยของอัตราการไหลของไอน้ำหลังการเคลือบ (ton/h)

4.6 การสรุปผลอื่นๆ

มีการสรุปผลอื่นๆเพิ่มเติมคือ ผลลัพธ์ทางเศรษฐศาสตร์, การลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และเปรียบเทียบผลการเพิ่มประสิทธิภาพกับช่วงอัตราไหลต่างๆ

5. ผลลัพธ์

5.1 การประหยัดพลังงาน

หลังจากการเคลือบพบว่าประสิทธิภาพทางความร้อนของหม้อไอน้ำเพิ่มขึ้นจาก 89.61 % เป็น 91.67 % เพิ่มขึ้น 2.25% และมีอัตราการประหยัดพลังงานอยู่ที่ 2.25% หรือคิดเป็นพลังงานความร้อน

3.05 GJ/h โดยตารางที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบค่าตัวแปรต่างๆ ก่อนและหลังเคลือบในช่วงอัตราการไหล 40-45 ton/h และ ตารางที่ 4 แสดงถึงผลการคำนวณประสิทธิภาพและการประหยัดพลังงาน

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบข้อมูลก่อนและหลังเคลือบ

Parameter	Unit	Before	After
Steam Flowrate	ton/h	43.10	43.02
Steam Pressure	bar	116.77	114.60
Steam Temperature	°C	511.22	513.39
Excess O2	%vol	3.77	3.97
BFW Flowrate	ton/h	44.40	45.12
BFW Temperature	°C	131.58	131.04
FG Flowrate	ton/h	1.90	1.73
FG LHV	MJ/kg	43.45	44.48
B-C Oil Flowrate	ton/h	0	0.94
B-C Oil LHV	MJ/kg	44.06	44.06
PFO Flowrate	ton/h	0.88	0
PFO LHV	MJ/kg	37.50	37.50
PGO Flowrate	ton/h	0.53	0.38
PGO LHV	MJ/kg	38.5	38.5

หมายเหตุ:

- ปี 2021 ไม่มีการใช้ B-C Oil, ปี 2024 ไม่มีการใช้ PFO
- BFW Pressure ทั้งก่อนและหลังเคลือบมีค่าเท่ากันคือ 155 bar

ตารางที่ 4 ประสิทธิภาพและผลการประหยัดพลังงาน

Parameter	Unit	Before	After
Steam Enthalpy (h_s)	kJ/kg	3383.96	3392.29
BFW Enthalpy (h_w)	kJ/kg	563.46	561.19
Heat Output	GJ/h	121.55	121.79
Heat Input	GJ/h	135.65	132.86
η_b	%	0.8961	0.9167
SEC	-	1.1160	1.0909
Saving	%	2.2511	

5.2 ความแตกต่างในแต่ละช่วงการไหล

หลังจากทำการเปรียบเทียบช่วงข้อมูล 3 ช่วง คือ 35-40 ton/h, 40-45 ton/h และ 45-50 ton/h พบว่า อัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น ไม่มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพของสารเคลือบหลังจากการเคลือบอย่างเห็นได้ชัด แต่พบว่าสารเคลือบสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำได้คงที่ในทุกๆอัตราการไหล ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในแต่ละช่วงอัตราการไหล

Flowrate (ton/h)	Before	After	Saving
35-40	89.20%	91.56%	2.58%
40-45	89.61%	91.67%	2.25%
45-50	89.40%	91.82%	2.64%

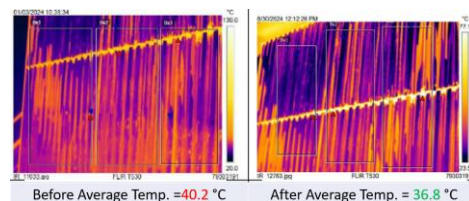
5.3 ผลการวัดอุณหภูมิ

รูปที่ 6-7 แสดงผลการวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆก่อนและหลังเคลือบ พบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยลดลงทุกตำแหน่งแสดงให้เห็นว่าสารเคลือบช่วยเพิ่มการ

ถ่ายโอนความร้อนจากห้องเผาไหม้สู่ผลิตภัณฑ์ได้มากขึ้น



รูปที่ 6 อุณหภูมิเฉลี่ยในตำแหน่งต่างๆของหม้อไอน้ำ



รูปที่ 7 ตัวอย่างผลการวัดอุณหภูมิด้านหน้าของหม้อไอน้ำ

5.4 การทดสอบความน่าเชื่อถือ

ทำการทดสอบ Hypothesis test – 2-sample t test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% , ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ พบว่าค่าเฉลี่ยของอัตราการไหลทั้งก่อนและหลังเคลือบของทุกช่วงที่ทำการทดลองไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ผลการทดสอบสมมติฐาน

Flowrate (ton/h)	P-Value	Statistic
35-40	0.920	Do not reject H_0 อัตราการไหลก่อนและหลังไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ
40-45	0.306	
45-50	0.634	

5.5 ผลทางเศรษฐศาสตร์

ประหยัดเชื้อเพลิงได้	
=	3.05 GJ/h
คิดเป็นเชื้อเพลิงก๊าซ	
=	488.57 ton/year
ราคาเชื้อเพลิง	
=	14.18 baht/kg
ประหยัดค่าใช้จ่ายทั้งหมด	
=	6,927,889 baht/year
ค่าดำเนินการประมาณ	
=	5,000,000 baht
ระยะเวลาคืนทุน	
=	0.72 years
=	9 months

หมายเหตุ

1. ค่าดำเนินการประกอบไปด้วยค่าวัสดุ, ค่าแรง, ค่าอุปกรณ์ ฯลฯ
2. การคำนวณตั้งอยู่ในสมมติฐานที่ว่าประสิทธิภาพของสารเคลือบจะไม่ลดลงในระยะเวลาอันสั้น หรือภายใน 1 ปีสารเคลือบมีประสิทธิภาพเท่าเดิม

5.6 การลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

การเคลือบสารสามารถประหยัดพลังงานได้ 3.05 GJ/h คิดเป็นเชื้อเพลิงก๊าซ 488.567 ton/year เมื่อนำมาคูณกับ Emission factor ที่ 2.6928 tCO₂eq/tfuel ตามมาตรฐาน IPCC Standard [9] จะได้ว่าสามารถลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ 1,315.61 ton/year

6. สรุป

การใช้สารเคลือบที่ทนน้ำของหม้อไอน้ำอุตสาหกรรมจะช่วยลดการสะท้อน และเพิ่มการดูดซับความร้อนที่ผิว ทำให้ความร้อนจากห้องเผาไหม้ถ่ายเทสู่น้ำได้มากยิ่งขึ้น ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพพลังงานของหม้อไอน้ำเพิ่มมากขึ้น โดยผลที่เกิดขึ้นคือสามารถผลิตไอน้ำได้มากขึ้นในปริมาณเชื้อเพลิงเท่าเดิม หรือใช้เชื้อเพลิงน้อยลงในกรณีที่ต้องการไอน้ำเท่าเดิม โดยสามารถตรวจสอบได้จากการเทียบปริมาณเชื้อเพลิงหลังจากการเคลือบที่ลดลงโดยตรง

หรือตรวจสอบอุณหภูมิหลังเคลือบที่ลดลงเนื่องจากความร้อนในห้องเผาไหม้ถูกถ่ายเทเข้าสู่ไอน้ำมากขึ้น และ สามารถประเมินได้จากการคำนวณประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำก่อนและหลังเคลือบ

โดยจากงานวิจัยพบว่าการเคลือบสารที่ทนน้ำสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำแรงดัน 115 bar จาก 89.61% เป็น 91.67% คิดเป็นการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพ 2.25% หรือเทียบเท่าการประหยัดพลังงานความร้อน 3.05 GJ/h ส่งผลให้สามารถลดการใช้เชื้อเพลิงก๊าซ 488.57 ton/year และลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ 1,315.61 ton/year โดยยังคงให้ผลผลิตไอน้ำเท่าเดิม นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราการไหลที่แตกต่างกันไม่มีผลต่อประสิทธิภาพหม้อไอน้ำหลังจากการเคลือบสาร

จึงสามารถสรุปได้ว่า แนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพด้วยสารเคลือบที่มีค่าการแผ่รังสีความร้อนสูงนี้ เป็นแนวทางที่สามารถช่วยแก้ไขปัญหาการใช้พลังงานในภาคอุตสาหกรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพ สามารถนำไปใช้ร่วมกับมาตรการอนุรักษ์พลังงานอื่น ๆ ได้ และยังส่งผลต่อความสามารถในการแข่งขันของสถานประกอบการจากต้นทุนพลังงานที่ลดลง และอายุการใช้งานของอุปกรณ์ที่เพิ่มขึ้น รวมถึงการมีส่วนช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกซึ่งเป็นแนวทางในการก้าวสู่ความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

7. ข้อจำกัดและข้อเสนอแนะ

7.1 ข้อจำกัดของสารเคลือบและงานวิจัย

การใช้สารเคลือบยังมีข้อจำกัดหรือข้อควรระวังบางประการ ได้แก่ ต้นทุนเริ่มต้นสูง, ต้องการผู้เชี่ยวชาญติดตั้งและซ่อมบำรุง, เสียงต่อความเสียหายหากใช้งานเกินอุณหภูมิที่กำหนดและประสิทธิภาพที่ลดลงเมื่อใช้งานต่อเนื่อง ดังนั้นการเลือกใช้สารเคลือบที่มีค่าการแผ่รังสีความร้อนสูงควรพิจารณาทั้งในด้านเทคนิค เศรษฐศาสตร์ และการบำรุงรักษา เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดและคุ้มค่ากับการใช้งานในระยะยาว และเนื่องจากหม้อไอน้ำไม่ได้ถูกออกแบบมาเพื่อการทดลองโดยเฉพาะ แต่มีภารกิจหลักคือการผลิตไอน้ำเพื่อใช้ในกระบวนการ

ผลิตต่อเนื่อง ส่งผลให้สภาวะการทำงานมีความผันผวนสูงขึ้นอยู่กับความต้องการใช้งานในแต่ละช่วงเวลา จึงเกิดข้อจำกัดในการเก็บรวบรวมข้อมูล และเนื่องจากข้อมูลมีความอ่อนไหวสูง จึงจำเป็นต้องคัดกรองและตัดข้อมูลที่มีความแตกต่างหรือผิดปกติดอกไปให้มากที่สุด เพื่อรักษาความถูกต้องของผลการวิเคราะห์ อย่างไรก็ตาม การดำเนินการในลักษณะนี้อาจส่งผลให้จำนวนข้อมูลที่ใช้ในการสรุปผลไม่เพียงพอ

7.2 งานวิจัยในอนาคต

การวิจัยในอนาคตอาจพิจารณาใช้หม้อไอน้ำขนาดเล็กลงเพื่อใช้ในการทดลองโดยเฉพาะ ซึ่งจะช่วยให้สามารถควบคุมตัวแปรต่าง ๆ ได้ดีขึ้น และลดความผันแปรของข้อมูลที่เกิดจากการใช้งานในกระบวนการผลิตจริง นอกจากนี้ยังสามารถขยายขอบเขตการศึกษาไปสู่ประเด็นที่งานวิจัยฉบับนี้ยังไม่สามารถดำเนินการได้ เช่น การวิเคราะห์ผลของการเพิ่มประสิทธิภาพภายใต้เงื่อนไขของตัวแปรที่แตกต่างกัน เช่น ชนิดของเชื้อเพลิง การออกแบบและตำแหน่งเกลียวเป็นต้น รวมถึงการศึกษาค่าเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพเมื่อเวลาผ่านไป เพื่อหาแนวทางที่เหมาะสมที่สุดในการกำหนดรอบระยะเวลาสำหรับการเคลือบซ้ำให้เกิดความคุ้มค่าสูงสุดทางเศรษฐศาสตร์และพลังงาน

8. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนในสาขาวิชาเทคโนโลยีและการจัดการพลังงาน บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกท่านที่ได้มอบความรู้และแนวทางในการจัดทำงานวิจัยฉบับนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. รายงานคุณภาพพลังงานของประเทศไทย. 2566
- [2] โอภาส สุขหวาน และอุพิทย์ สุคันธกุล. "การอนุรักษ์พลังงานในโรงงานอุตสาหกรรม." วารสารวิชาการอุตสาหกรรมศึกษา. 2555. ปีที่ 6 ฉบับที่ 1: 30-35

- [3] Industrial Boiler Market Size, Share & Trends Analysis Report By Application, By Region, And Segment Forecasts 2023 – 2030. [internet] [cited 2024 Dec 31] Available from: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/industrial-boilers-market>
- [4] He X, et al. "High emissivity coatings for high temperature application: Progress and prospect." Thin Solid Films. 2009; 517(17): 5120-5129.
- [5] Heynderickx G, Nozawa M. "High-emissivity coatings on reactor tubes and furnace walls in steam-cracking furnaces." Chemical Engineering Science. 2004; 59: 5657-5662.
- [6] Stefanidis G.D., et al. "Evaluation of high-emissivity coatings in steam cracking furnaces using a non-grey gas radiation model." Chemical Engineering Journal. 2008; 137(2): 411-421.
- [7] Martin B.R., Hurwitz M.F. Probability and Statistics for Physical Sciences, 2nd ed., Academic Press; 2024
- [8] Gomez D., Watterson J. "IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories" Vol.2 Stationary combustion table 2.2. 2006