

การลดการสูญเสียความร้อนจากผนังเตาหม้อไอน้ำด้วยการหุ้มฉนวน ในโรงงานอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน

Reducing Heat Loss from Steam Boilers Using Insulation in Palm Oil Mill

ภาคิน สะศิประภา

Pakin Sasiprapa

สาขาวิศวกรรมเทคโนโลยีอุณหภาพ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

Thermal Technology Program, School of Energy Environment and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi

* Email: Pakin.Sasiprapa1341@gmail.com

ส่งต้นฉบับบทความ : 3 พ.ค. 68 / ส่งบทความฉบับแก้ไข : 11 มิ.ย. 68 / ตอบรับให้เผยแพร่ : 16 มิ.ย. 68 / เผยแพร่ : 27 มิ.ย. 68

การอ้างอิง: ภาคิน สะศิประภา (2568). การลดการสูญเสียความร้อนจากผนังเตาหม้อไอน้ำด้วยการหุ้มฉนวนในโรงงานอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน. สิ่งแวดล้อมไทย, ปีที่ 29 (ฉบับที่ 1).

<https://doi.org/10.35762/TE.2568004>

บทคัดย่อ

การลดการสูญเสียพลังงานของหม้อไอน้ำเป็นหัวใจสำคัญของระบบผลิตพลังงานในโรงงานอุตสาหกรรม การหุ้มฉนวนผนังเตาเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการลดการสูญเสียความร้อน จึงได้ทำการศึกษาผลของการหุ้มฉนวนด้วยใยหินความหนา 50, 75 และ 100 มม. บนหม้อไอน้ำขนาด 25 ตัน/ชั่วโมง ในโรงงานอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน โดยวิเคราะห์ตำแหน่งผนังเตาที่มีอุณหภูมิผิวตั้งแต่ 85°C ขึ้นไปและอยู่ในระดับที่ผู้ปฏิบัติงานอาจได้รับอันตรายได้ พบว่า ตำแหน่งที่ 1 พื้นที่ 9.58 ตร.ม. อุณหภูมิผิว 263°C เมื่อทำการหุ้มฉนวนสามารถลดการสูญเสียพลังงานและประหยัดเชื้อเพลิงได้ 93,091–94,442 กก./ปี หรือคิดเป็นเงิน 64,512–65,448 บาท ขณะที่ตำแหน่งที่ 2 พื้นที่ 12.7 ตร.ม. อุณหภูมิผิว 174.5°C สามารถประหยัดเชื้อเพลิงได้ 57,323–58,460 กก./ปี หรือคิดเป็นเงิน 39,725–40,513 บาท มีระยะเวลาคืนทุน 58, 73 และ 89 วัน ในตำแหน่งที่ 1 ขณะที่ตำแหน่งที่ 2 ใช้เวลา 126, 158 และ 190 วัน ตามลำดับ การหุ้มฉนวนจึงเป็นการลงทุนที่คุ้มค่า ช่วยประหยัดพลังงานเชื้อเพลิงและลดต้นทุนระยะยาวได้อย่างชัดเจน

คำสำคัญ : หม้อไอน้ำ; การหุ้มฉนวน; การเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน

Abstract

Reducing energy loss in boilers is a critical aspect of energy production systems in industrial plants. Insulating the boiler wall is an effective method to minimize heat loss. This study investigates the effects of rock wool insulation with thicknesses of 50, 75, and 100 mm on a 25-ton/hour boiler in a palm oil industrial plant. Two wall sections were analyzed: Section 1

with an area of 9.58 m² and an initial surface temperature of 263°C, and Section 2 with an area of 12.7 m² and a surface temperature of 174.5°C. Results revealed that insulation at Section 1 reduced energy loss and saved fuel by 93,091–94,442 kg/year, equivalent to 64,512–65,448 THB. Section 2 achieved savings of 57,323–58,460 kg/year, or 39,725–40,513 THB. Payback periods for Section 1 were 58, 73, and 89 days for 50, 75, and 100 mm insulation, respectively. For Section 2, the payback periods were 126, 158, and 190 days. The findings confirm that insulation is a cost-effective investment, significantly reducing fuel consumption and long-term operating costs.

Keyword: Boiler; Insulation; Energy Efficiency Improvement

1. บทนำ

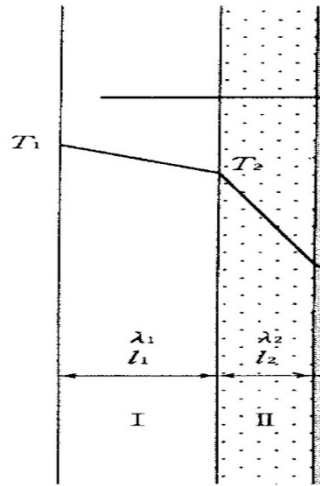
ในสถานการณ์ที่ราคาพลังงานเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องจากทั้งปัจจัยภายในประเทศและภาวะเศรษฐกิจโลก ส่งผลให้อุตสาหกรรมต่าง ๆ หันมาให้ความสำคัญกับการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น เพื่อควบคุมต้นทุนการผลิต และลดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการใช้พลังงานในปริมาณมาก โดยเฉพาะในกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการใช้หม้อไอน้ำ (Boiler) ซึ่งเป็นอุปกรณ์สำคัญที่ใช้พลังงานเชื้อเพลิงสูงในการผลิตไอน้ำเพื่อใช้ในกระบวนการต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นการให้ความร้อน การให้พลังงานกล หรือใช้ในกระบวนการเคมี หม้อไอน้ำ เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนน้ำให้กลายเป็นไอน้ำโดยใช้ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง เช่น ชีวมวล ถ่านหิน ก๊าซ หรือดีเซล ไอน้ำที่ได้จะถูกนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงานในระบบต่าง ๆ ภายในโรงงาน เช่น ระบบการอบแห้ง การกลั่น การให้ความร้อนแก่อุปกรณ์ในสายการผลิต หรือแม้แต่การหมุนกังหันผลิตไฟฟ้า ทั้งนี้หม้อไอน้ำเป็นอุปกรณ์ที่มีการใช้พลังงานในปริมาณมาก หากไม่มีการจัดการที่ดีจะทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานจำนวนมากโดยเปล่าประโยชน์ หนึ่งในแหล่งการสูญเสียพลังงานที่สำคัญในระบบหม้อไอน้ำ คือ การสูญเสียความร้อนผ่านผนังเตาหม้อไอน้ำ เนื่องจากบริเวณผนังเตามีอุณหภูมิสูงมาก ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนสู่บรรยากาศโดยรอบอย่างต่อเนื่อง การสูญเสียในลักษณะนี้ไม่เพียงส่งผลต่อประสิทธิภาพการใช้พลังงาน แต่ยังเป็นการเพิ่มต้นทุนเชื้อเพลิงโดยไม่จำเป็น เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว

การหุ้มฉนวนความร้อน (Thermal insulation) บริเวณผนังเตาจึงเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรม โดยเลือกใช้วัสดุฉนวนที่มีคุณสมบัติในการต้านทานการถ่ายเทความร้อน เช่น โยหิน (rock wool) โยแก้ว แคลเซียมซิลิเกต เป็นต้นซึ่งแต่ละชนิดก็จะมีคุณสมบัติการนำความร้อน และระดับการทนต่ออุณหภูมิสูงต่างกัน การหุ้มฉนวนนั้นสามารถช่วยลดการสูญเสียพลังงานความร้อนได้มากถึง 44% (Bosch Industriekessel GmbH, n.d.) อีกทั้งยังช่วยรักษาเสถียรภาพของแรงดันไอน้ำภายในระบบให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม ส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการทำงานโดยรวมของระบบหม้อไอน้ำและกระบวนการผลิตในโรงงาน การหุ้มฉนวนยังมีข้อดีในด้านความปลอดภัยในการทำงาน โดยสามารถลดอุณหภูมิของพื้นผิวผนังเตาให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัยให้สอดคล้องกับข้อกำหนดการปฏิบัติตามกฎหมายลดความเสี่ยงจากการสัมผัสกับบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงซึ่งเป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานในพื้นที่ดังกล่าว ให้เป็นไปตามพระราชบัญญัติ

ความปลอดภัย อาชีวอนามัย และสภาพแวดล้อมในการทำงาน พ.ศ. ๒๕๕๔ (กฎกระทรวง เรื่อง กำหนดมาตรฐานในการบริหาร จัดการ และดำเนินการด้านความปลอดภัย อาชีวอนามัย และสภาพแวดล้อมในการทำงานเกี่ยวกับความร้อน แสงสว่าง และเสียง, 2559) และจัดให้มีฉนวนกันความร้อนหุ้มหม้อน้ำที่ติดตั้งอยู่ในระดับหรือบริเวณที่ถูกจ้างผู้ปฏิบัติงานอาจได้รับอันตรายได้ ตามพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 (กฎกระทรวง กำหนดมาตรฐานในการบริหาร จัดการ และดำเนินการด้านความปลอดภัย อาชีวอนามัย และสภาพแวดล้อมในการทำงานเกี่ยวกับเครื่องจักร ปั่นจั่น และหม้อน้ำ พ.ศ. ๒๕๖๔) นอกจากนี้ ยังช่วยลดภาระของระบบระบายอากาศในอาคารโรงงานอีกด้วย มีผลการศึกษาหลายฉบับรายงานว่า การลงทุนในระบบหุ้มฉนวนความร้อนมีระยะเวลาคืนทุนที่สั้น (U.S. Department of Energy, 2014; Topçu. & Rusen, 2016.) โดยเฉพาะในระบบที่มีการสูญเสียความร้อนสูง และสามารถลดต้นทุนด้านพลังงานได้อย่างมีนัยสำคัญในระยะยาว ซึ่งสอดคล้องกับแนวทางการพัฒนาอย่างยั่งยืน (Sustainable development) ที่อุตสาหกรรมยุคใหม่ให้ความสำคัญ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2550)

ฉนวนใยหิน (Rock Wool) หรือที่เรียกอีกชื่อว่า Stone Wool เป็นวัสดุฉนวนที่ผลิตจากหินภูเขาไฟ เช่น บะซอลต์ โดยผ่านกระบวนการหลอมที่อุณหภูมิสูงกว่า 1,500°ซ แล้วนำไปปั่นให้เป็นเส้นใยคล้ายเส้นฝ้าย ซึ่งมีคุณสมบัติเฉพาะที่เหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการใช้งานในระบบที่ต้องรับความร้อนสูง เช่น เตาอุตสาหกรรม หม้อไอน้ำ หรือระบบท่อส่งไอน้ำในโรงงานอุตสาหกรรม ฉนวนใยหินมีคุณสมบัติทนความร้อนสูงถึงประมาณ 1000°ซ โดยไม่เกิดการหลอมละลาย อีกทั้งยังไม่ติดไฟและไม่ลามไฟ ซึ่งช่วยเพิ่มความปลอดภัยในกรณีเกิดเพลิงไหม้ โครงสร้างของเส้นใยที่พรุนยังช่วยในการลดการถ่ายเทความร้อนโดยมีค่าการนำความร้อนต่ำอยู่ที่ประมาณ 0.035–0.045 W/m·K นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติในการกันเสียง ดูดซับเสียงรบกวน และไม่เสื่อมสภาพง่ายจากความชื้นหรือการกัดกร่อน จึงมีอายุการใช้งานที่ยาวนานโดยไม่ต้องบำรุงรักษาบ่อย ด้วยคุณลักษณะทั้งหมดนี้ ฉนวนใยหินจึงเป็นวัสดุฉนวนที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรมทั่วโลก (ROCKWOOL Group, n.d.; Insulation Institute, 2016; Buy Insulation Online, n.d.)

งานวิจัยนี้จึงดำเนินการศึกษาผลของการหุ้มฉนวนแบบใยหินของหม้อไอน้ำขนาด 25 ตัน/ชั่วโมง ในโรงงานอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน ต่อประสิทธิภาพในการลดการสูญเสียความร้อนของหม้อไอน้ำ โดยศึกษาความร้อนสูญเสียจากผนังเตาหม้อไอน้ำทั้งก่อนและหลังหุ้มฉนวนใยหินที่มีความหนาต่าง ๆ รวมทั้งความคุ้มค่าในการลงทุน



รูปที่ 1 การลดลงของอุณหภูมิจากการหุ้มฉนวน

ที่มา : กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2550

2. ขั้นตอนการดำเนินงาน

ดำเนินการประเมินการสูญเสียความร้อนจากผนังเตาหม้อไอน้ำในโรงงานอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน โดยแบ่งขั้นตอนการดำเนินงานออกเป็น 4 ขั้นตอน

2.1 การเก็บข้อมูลพื้นฐาน

สำรวจเก็บข้อมูลขนาดพื้นที่ และอุณหภูมิพื้นผิวของผนังเตาโดยใช้อุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด (Thermal camera) พบว่า ผนังเตาหม้อไอน้ำที่ยังไม่ได้หุ้มฉนวนซึ่งมีอุณหภูมิผิวตั้งแต่ 85°ซ ขึ้นไปและอยู่ในระดับที่ผู้ปฏิบัติงานอาจได้รับอันตรายได้ (ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง อุปกรณ์ความปลอดภัยสำหรับหม้อน้ำและหม้อต้มที่ใช้ของเหลวเป็นสื่อทำความร้อน พ.ศ. 2549) มี 2 ตำแหน่ง ได้แก่ ตำแหน่งที่ 1 บริเวณด้านข้างผนังเตา มีพื้นที่ 9.58 ตร.ม. อุณหภูมิเฉลี่ยพื้นผิวอยู่ที่ 263°ซ และตำแหน่งที่ 2 บริเวณด้านหน้าและด้านหลังของผนังเตา มีพื้นที่ 12.7 ตร.ม. และมีอุณหภูมิเฉลี่ยพื้นผิว 174.5°ซ



รูปที่ 2 ตำแหน่งหุ้มฉนวนที่ 1 (ซ้าย) และ 2 (ขวา)

2.2 การคำนวณอัตราการสูญเสียความร้อนก่อนและหลังการหุ้มฉนวน

พิจารณาทั้งการถ่ายเทความร้อนด้วยการพา (Convection) และการแผ่รังสี (Radiation) ซึ่งสัมพันธ์กับการถ่ายเทความร้อนจากการพา (hc) คำนวณได้จากเลข Nusselt ที่สัมพันธ์กับค่า Rayleigh และ Prandtl โดยวิธีการคำนวณแสดงไว้ในรูปสมการที่ 1 – 7 (Cengel, 2020) และผลลัพธ์ดังตารางที่ 1

$$Q_1 = \epsilon \sigma A (T_s^4 - T_{amb}^4) + h_c A_s (T_s - T_{amb}) \quad (1)$$

$$Ra = \frac{g \beta (T_s - T_{amb}) L_c^3}{\nu^2} Pr \quad (2)$$

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (3)$$

$$T_f = \frac{(T_s + T_{amb})}{2} \quad (4)$$

$$\beta = \frac{1}{T_f} \quad (5)$$

$$Nu = \left[0.825 + \frac{\left(0.387 Ra_L^{\frac{1}{4}} \right)}{1 + \left(\frac{0.492}{Pr} \right)^{\frac{4}{9}}}]^{\frac{4}{3}} \right]^2 \quad (6)$$

$$h_c = \frac{Nu K}{L_c} \quad (7)$$

โดยที่

Q1	หมายถึง อัตราการสูญเสียความร้อนรวมจากพื้นผิวผนังเตาก่อนหุ้มฉนวน (W)
ϵ	หมายถึง ค่าความแผ่รังสี (Emissivity) ของพื้นผิวผนังเตา (ไม่มีหน่วย)
σ	หมายถึง ค่าคงที่ของสเตฟาน-โบลซ์มันน์ ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$)
Area	หมายถึง พื้นที่ของผนังเตาที่ทำการวิเคราะห์ (m^2)
T_s	หมายถึง อุณหภูมิพื้นผิวผนังเตา (K)
T_{amb}	หมายถึง อุณหภูมิของบรรยากาศโดยรอบ (K)
hc	หมายถึง สัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติ ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$)
Ra	หมายถึง ค่า Rayleigh number
g	หมายถึง ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (9.81 m/s^2)
β	หมายถึง ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของอุณหภูมิ ($1/\text{K}$)
L_c	หมายถึง ความยาวลักษณะ (Characteristic length) ของพื้นผิวที่วิเคราะห์ (m)
ν	หมายถึง ค่าความหนืดจลน์ของอากาศ (Kinematic viscosity) (m^2/s)
α	หมายถึง ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อน (Thermal diffusivity) (m^2/s)
Pr	หมายถึง ค่า Prandtl number

Tf	หมายถึง อุณหภูมิเฉลี่ยของฟิล์มอากาศระหว่างผนังเตาและบรรยากาศ
Nu	หมายถึง ค่า Nusselt number
k	หมายถึง ค่าการนำความร้อนของอากาศที่อุณหภูมิ Tf (W/m·K)

ตารางที่ 1 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติ อัตราการสูญเสียความร้อนที่ผนังเตาแต่ละตำแหน่ง ก่อนหุ้มฉนวน

ตำแหน่งการหุ้มฉนวน	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน แบบธรรมชาติ hc (W.mK)	อัตราการสูญเสียความร้อน ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (W/m ²)	อัตราการสูญเสีย ความร้อนรวม Q1 (W)
1. บริเวณด้านข้างผนังเตา พื้นที่ 9.58 ตารางเมตร อุณหภูมิเฉลี่ย พื้นผิว 263°ซ	6.696	4,795	45,943
2. บริเวณด้านหน้าและด้านหลัง ของผนังเตา พื้นที่ 12.7 ตารางเมตร อุณหภูมิเฉลี่ยพื้นผิว 174.5°ซ	6.018	2,252	28,606

2.3 การวิเคราะห์ปริมาณพลังงานเชื้อเพลิงที่สามารถลดได้

คำนวณปริมาณพลังงานเชื้อเพลิงที่สามารถลดได้เมื่อติดตั้งฉนวนใยหินที่มีความหนา 25, 50, 75 และ 100 มม. โดยใช้หลักการถ่ายเทความร้อนผ่านชั้นวัสดุและทำการคำนวณอัตราความร้อนที่ลดลงจากเดิม (Q_{saved}) รวมถึงปริมาณเชื้อเพลิงที่สามารถประหยัดได้ต่อปีจากอัตราการสูญเสียความร้อนที่ลดลง ผลการคำนวณในแต่ละความหนาฉนวนแสดงไว้ในรูปของตารางเปรียบเทียบ

ภายใต้สมมุติฐานว่า หม้อไอน้ำทำงานอย่างต่อเนื่อง 24 ชั่วโมง/วัน ตลอด 365 วัน/ปี และคำนวณโดยใช้ค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิง (Higher Heating Value, HHV) โดยอ้างอิงผลการตรวจวัดเชื้อเพลิงของทางโรงงาน 10,350 กิโลจูล/กิโลกรัม (kJ/kg) และอุณหภูมิบรรยากาศที่ 35°ซ ดังสมการที่ 8 (Cengel, 2020)

$$Q_2 = A_s \times (T_s - T_{amb}) / [(L/k) + (1 / h_c)] \quad (8)$$

โดยที่

Q ₂	หมายถึง อัตราการสูญเสียความร้อนจากผนังเตาหลังการหุ้มฉนวน (W)
L	หมายถึง ความหนาของวัสดุฉนวน (m)
k	หมายถึง ค่าการนำความร้อนของวัสดุฉนวน (W/m·K)
hc	หมายถึง สัมประสิทธิ์การพาความร้อนรวมของอากาศภายนอก (W/m ² ·K)

คำนวณปริมาณความร้อนที่สามารถประหยัดได้หลังการติดตั้งฉนวน (Q_{saving}) ซึ่งได้จากการลบค่าความร้อนสูญเสียก่อนหุ้มฉนวน Q_1 ออกจากค่าหลังหุ้มฉนวน Q_2 ดังสมการที่ 9

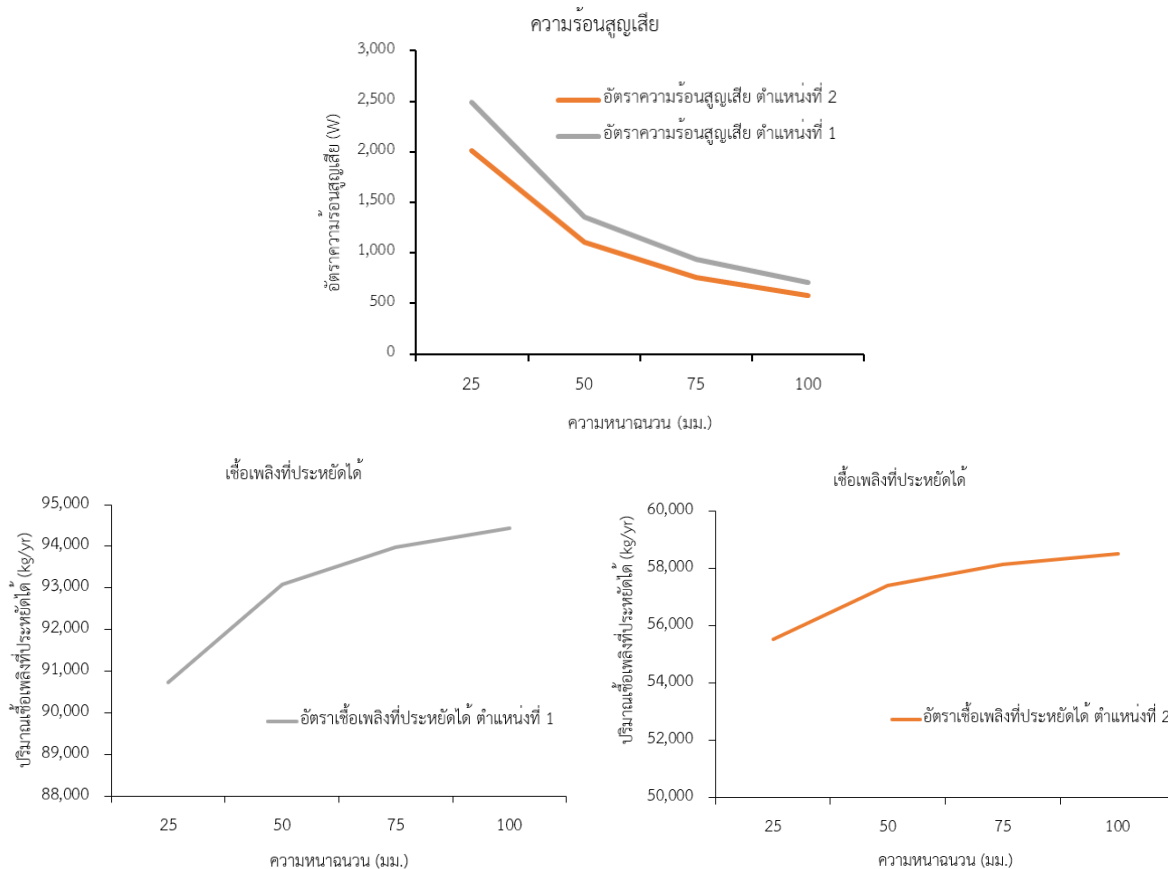
$$Q_{\text{saving}} = Q_1 - Q_2 \quad (9)$$

คำนวณพลังงานความร้อนรวมที่ประหยัดได้ต่อชั่วโมง (Annual benefit per hour) คิดเป็นค่าความร้อนของเชื้อเพลิง ซึ่งได้จากการแปลงพลังงานที่ประหยัดได้จากหน่วยวัตต์เป็นหน่วยกิโลกรัมเชื้อเพลิงโดยใช้ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (HHV) ตามสมการที่ 10 และปริมาณเชื้อเพลิงที่สามารถประหยัดได้ต่อปี (Fuel savings per year) ตามสมการที่ 11

$$\text{Annual benefit per hour} = \frac{Q_{\text{saving}} \times 3600}{\text{HHV of fuel}} \quad (10)$$

$$\text{Fuel savings per year} = \text{Annual benefit per hour} \times \text{จำนวนชั่วโมงการทำงาน/ปี} \quad (11)$$

ผลการคำนวณอัตราการสูญเสียความร้อนภายหลังการหุ้มฉนวนที่ความหนาของฉนวนระดับ 25, 50, 75 และ 100 มม. พบว่า มีแนวโน้มการลดลงของการสูญเสียพลังงานตามความหนาที่เพิ่มขึ้น (รูปที่ 3)



รูปที่ 3 ความร้อนสูญเสีย และเชื้อเพลิงที่ประหยัดได้จากการหุ้มฉนวนที่ความหนาต่าง ๆ ในแต่ละตำแหน่ง

2.4 เศรษฐศาสตร์การหุ้มฉนวน

หลังจากการประเมินอัตราการสูญเสียความร้อนของผนังเตาในสภาวะก่อนและหลังการติดตั้งฉนวนแล้ว พร้อมทั้งการวิเคราะห์ปริมาณพลังงานที่สามารถประหยัดได้ต่อปี จึงได้นำข้อมูลดังกล่าวมาประเมินด้านเศรษฐศาสตร์ เพื่อพิจารณาความคุ้มค่าของการลงทุนในการติดตั้งฉนวนในระดับอุตสาหกรรม โดยพิจารณาในมิติของต้นทุนการลงทุนเริ่มต้น (Initial investment) มูลค่าพลังงานที่สามารถประหยัดได้ต่อปี (Annual energy saving value) และระยะเวลาคืนทุนของโครงการ (Payback period) ต้นทุนการลงทุนในการหุ้มฉนวนคำนวณจากพื้นที่ผิวของผนังเตาที่ทำการติดตั้งฉนวน ประกอบกับราคาของวัสดุฉนวน ค่าดำเนินการติดตั้ง และวัสดุบุผิว (Jacket) โดยประเมินจากสมการต้นทุนรวมของโครงการ ดังสมการที่ 12 – 13

$$\text{Investment cost of insulation} = \text{Area} \times (\text{Insulation} + \text{Installation} + \text{Jacket}) \quad (12)$$

$$\text{PB} = \text{Investment cost of insulation} / \text{Cost of fuel saving} \quad (13)$$

โดยที่

Area	คือ พื้นที่ผิวผนังเตาที่ทำการติดตั้งฉนวน (m ²)
Insulation	คือ ราคาต่อหน่วยของวัสดุฉนวน (บาท/m ²)
Installation	คือ ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งฉนวน (บาท/m ²)
Jacket	คือ ราคาของวัสดุหุ้มภายนอก (บาท/m ²)
PB	คือ ระยะเวลาคืนทุนของการหุ้มฉนวน
Investment cost of insulation	คือ เงินลงทุนในการหุ้มฉนวนผนังเตา
Cost of fuel saving	คือ ราคาเชื้อเพลิงที่ประหยัดได้จากการหุ้มฉนวน

จากการสำรวจข้อมูลวัสดุฉนวนที่มีจำหน่ายจริงในท้องตลาด พบว่า ขนาดความหนาที่สามารถจัดหาและใช้งานได้จริงมีเพียง 3 ขนาด ได้แก่ 50, 75 และ 100 มม. ดังนั้น ในการประเมินด้านเศรษฐศาสตร์ จึงเลือกการวิเคราะห์ต้นทุนและผลตอบแทนของการลงทุนเฉพาะในกรณีของความหนานวนทั้ง 3 ขนาดดังกล่าว เพื่อให้ผลการวิเคราะห์สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางประกอบการตัดสินใจในภาคปฏิบัติได้อย่างเป็นรูปธรรม

ผลวิเคราะห์ต้นทุนและผลตอบแทนของการหุ้มฉนวนผนังเตาหม้อไอน้ำในระดับอุตสาหกรรม พบว่า ต้นทุนการลงทุนประกอบด้วยค่าวัสดุฉนวนใยหินในแต่ละความหนา ได้แก่ 586 บาท/ตร.ม. สำหรับความหนา 50 มม. 879 บาท/ตร.ม. สำหรับ 75 มม. และ 1,170 บาท/ตร.ม. สำหรับ 100 มม. ค่าติดตั้งฉนวน 250 บาท/ตร.ม. และค่าหุ้มภายนอก (Jacket) 245 บาท/ตร.ม. เมื่อนำไปคำนวณรวมกับพื้นที่ติดตั้งจริงในแต่ละตำแหน่งของผนังเตา ได้ต้นทุนการลงทุนรวมตามความหนานวนที่แตกต่างกันสำหรับผนังเตาในตำแหน่งที่ 1 ซึ่งมีพื้นที่ 9.58 ตารางเมตร เมื่อหุ้มด้วยฉนวนใยหินที่ความหนา 50, 75 และ 100 มม. จะมีเงินลงทุนรวม 10,355, 13,162 และ 15,950 บาท ตามลำดับ โดยสามารถลดการใช้เชื้อเพลิงได้ 93,091, 93,978 และ 94,442 กก./ปี

ทำให้เงินที่ประหยัดได้ต่อปีมีมูลค่า 64,512, 65,126 และ 65,448 บาท ตามลำดับ ในขณะที่ผนังเตาในตำแหน่งที่ 2 ซึ่งมีพื้นที่ 12.7 ตร.ม. มีต้นทุนการลงทุนรวมสำหรับความหนา 50, 75 และ 100 มม. อยู่ที่ 13,728, 17,449 และ 21,145 บาท สามารถลดการใช้เชื้อเพลิงได้ 57,323, 58,067 และ 58,460 กก./ปี และส่งผลให้เงินที่ประหยัดได้ต่อปีมีมูลค่า 39,725, 40,241 และ 40,513 บาท ตามลำดับ (ตารางที่ 2)

ระยะเวลาคืนทุน พบว่า ในตำแหน่งที่ 1 ระยะเวลาคืนทุนสำหรับความหนา 50, 75 และ 100 มม. 58, 73 และ 89 วัน ตามลำดับ ส่วนในตำแหน่งที่ 2 มีระยะเวลาคืนทุน 126, 158 และ 190 วัน ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า ความหนาของฉนวนที่เพิ่มขึ้นช่วยให้สามารถประหยัดพลังงานได้ในอัตราที่สูงขึ้น โดยเฉพาะในบริเวณที่มีอุณหภูมิพื้นผิวสูง การลงทุนในระบบฉนวนความร้อน จึงเป็นทางเลือกที่มีความเหมาะสมทั้งในเชิงพลังงานและเศรษฐศาสตร์ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบผลิตพลังงานอื่น ๆ ที่มีลักษณะการสูญเสียความร้อนคล้ายคลึงกันในภาคอุตสาหกรรม

ตารางที่ 2 เงินลงทุนเงินและที่ประหยัดได้จากการหุ้มฉนวนที่ความหนาต่าง ๆ

ความหนาฉนวน (มิลลิเมตร)	เงินลงทุนการหุ้ม ฉนวน (บาท)	เชื้อเพลิงที่ประหยัดได้ (กิโลกรัม/ปี)	เงินที่ประหยัดได้ (บาท/ปี)	ระยะเวลาคืนทุน (วัน)
ตำแหน่งที่ 1				
50	10,355	93,091	64,512	58
75	13,162	93,978	65,126	73
100	15,950	94,442	65,448	89
ตำแหน่งที่ 2				
50	13,728	57,323	39,725	126
75	17,449	58,067	40,241	158
100	21,145	58,460	40,513	190

หมายเหตุ : ค่าวัสดุฉนวนใยหิน 50 mm ราคา 586 บาท/m² 75 mm ราคา 879 บาท/m² และ 100 mm ราคา 1170 บาท/m²
ค่าติดตั้งฉนวน 250 บาท/ตร.ม. ค่าหุ้มภายนอก (jacket) 245 บาท/ตร.ม.

3. บทสรุป

การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า การหุ้มฉนวนผนังเตาหม้อไอน้ำด้วยวัสดุใยหินเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการลดการสูญเสียความร้อนจากระบบผลิตไอน้ำในอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน โดยความหนาของฉนวนมีอิทธิพลต่อระดับการลดพลังงานสูญเสียอย่างมีนัยสำคัญ สะท้อนผลเชิงบวกทั้งในด้านการประหยัดเชื้อเพลิงและการเพิ่มประสิทธิภาพทางพลังงานของโรงงาน จากข้อมูลการคำนวณ พบว่า การหุ้มฉนวนสามารถลดความสูญเสียพลังงานลงได้มากกว่า 70% ซึ่งส่งผลให้ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ลดลง นอกจากนั้น ยังมีผลเชิงบวกต่อความปลอดภัยของพื้นที่ปฏิบัติงาน ลดความเสี่ยงต่อการสัมผัสผิวร้อน และส่งเสริมแนวทางการพัฒนาอุตสาหกรรมอย่างยั่งยืน ผลการวิจัยสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรมที่มีลักษณะระบบผลิตพลังงานคล้ายคลึงกัน และเป็นข้อมูลสนับสนุนสำหรับการตัดสินใจเชิงวิศวกรรมและการลงทุนในระบบอนุรักษ์พลังงานในระดับโรงงานอย่างเป็นรูปธรรม

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอแสดงความขอบคุณเป็นอย่างยิ่งต่อสำนักนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน สำหรับการสนับสนุนทุนการศึกษาภายใต้โครงการทุนทักษะบัณฑิตพลังงาน ซึ่งเป็นแรงผลักดันสำคัญในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ขอขอบคุณนางสาววลัยพร ศะติประภา ที่กรุณาให้คำแนะนำด้านการเขียนและการเรียบเรียงเนื้อหาอย่างต่อเนื่อง ตลอดจนขอแสดงความขอบคุณอย่างสูงต่อ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนิต สวัสดิ์เสวี อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้ให้คำชี้แนะและคำแนะนำอันทรงคุณค่าในทุกขั้นตอนของการศึกษา นอกจากนี้ ข้าพเจ้าขอขอบคุณนายยุทธชัย อนุธรรมสมบัติ ที่ได้ช่วยตรวจสอบความถูกต้องของการคำนวณด้านเทคนิคอย่างละเอียดรอบคอบ อันส่งผลให้ผลงานวิจัยมีความสมบูรณ์และน่าเชื่อถือยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2550). Pre อาวุโสทฤษฎี. กรุงเทพมหานคร: กระทรวงพลังงาน.
- กฎกระทรวง เรื่อง กำหนดมาตรฐานในการบริหาร จัดการ และดำเนินการด้านความปลอดภัย อาชีวอนามัย และสภาพแวดล้อมในการทำงานเกี่ยวกับความร้อน แสงสว่าง และเสียง พ.ศ. 2559. (17 ตุลาคม 2559). ราชกิจจานุเบกษา, 133(91 ก), 48–54.
- ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง อุปกรณ์ความปลอดภัยสำหรับหม้อน้ำและหม้อต้มที่ใช้ของเหลวเป็นสื่อทำความร้อน พ.ศ. 2549. พระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535.
- Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2020). Thermodynamics: An engineering approach (9th ed.). McGraw-Hill Education.
- Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2020). Heat and mass transfer: Fundamentals and applications (6th ed.). McGraw-Hill Education.
- Kumar, D., & Singh, R. K. (2013). Boiler efficiency improvement through energy management techniques. International Journal of Scientific and Research Publications, 3(8), 1–4.
- Topçu, M. A., & Rusen, A. (2016). Insulation of boiler to save energy. In Proceedings of the 8th International Edge Energy Symposium and Exhibition.
- U.S. Department of Energy. (2014). Improving steam system performance: A sourcebook for industry (2nd ed.). Retrieved from <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/05/f16/steamsourcebook.pdf>
- Anonymous. (2015). Insulation material and properties. Retrieved from https://tiac.ca/wp-content/uploads/2015/12/TIAC_Guide_English_2013-Section-02.pdf
- Bosch Industriekessel GmbH. (n.d.). Insulation: Increasing efficiency at the boiler and system. Retrieved April 30, 2025, from <https://www.boiler-planning.com/en/efficiency/increasing-efficiency-at-the-boiler-and-system/insulation.html>
- Insulation Institute. (n.d.). Rock and slag wool insulation: Sustainable choices for conserving energy. Retrieved from <https://insulationinstitute.org/wp-content/uploads/2016/01/N046-Rock-and-Slag-Wool-Insulation-Sustainable-Choices-for-Conserving-Energy.pdf>
- Insulation Institute. (n.d.). Why insulation matters in industrial applications. Retrieved from <https://insulationinstitute.org>