



บทที่ 3

การอนุรักษ์พลังงานสำหรับ เตาอุตสาหกรรม (Energy Conservation for Industrial Furnace)

ความสำคัญของเนื้อหาวิชา

เตาอุตสาหกรรมเป็นอุปกรณ์ที่มีการใช้พลังงานสูงมากอุปกรณ์หนึ่งในโรงงานโดยปกติ เตาอุตสาหกรรมจะมีประสิทธิภาพพลังงานต่ำ และมีการสูญเสียความร้อนผ่านไอเสียในระดับสูงหากเราสามารถเข้าใจหลักการทำงาน สามารถตรวจวัด วิเคราะห์และดำเนินมาตรการอนุรักษ์พลังงานกับเตาอุตสาหกรรมได้แล้ว ก็จะนำไปสู่การลดลงของค่าใช้จ่ายด้านพลังงานเป็นอย่างมาก

เตาอุตสาหกรรมมีใช้งานในโรงงานหลายประเภท เช่น โรงงานถลุงเหล็ก โรงงานหล่อ โรงงานรีดเหล็ก โรงงานแก้ว โรงงานปูนซีเมนต์ โรงงานเคมี ตลอดจนโรงงานกำจัดขยะ เป็นต้น

วัตถุประสงค์

1. รู้จักเตาประเภทต่างๆ ในอุตสาหกรรม
2. ทราบปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของเตาอุตสาหกรรม
3. เข้าใจวิธีตรวจวัดและประเมินประสิทธิภาพพลังงานของเตาอุตสาหกรรม
4. ทราบมาตรการปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเตาอุตสาหกรรม

3.1 บทนำ

เตาอุตสาหกรรมที่ใช้ทำงานอยู่ในโรงงานมีความหลากหลาย เตาแต่ละประเภทมีลักษณะและการทำงานที่ต่างกันไป นอกจากนี้ เตายังมีอุณหภูมิทำงานที่ต่างกันไป (ดังแสดงในตารางที่ 3.1-1) ซึ่งส่งผลให้การใช้พลังงานของเตาแตกต่างกันไปด้วยโดยทั่วไป เตาอุตสาหกรรมที่ต้องการอุณหภูมิสูงจะใช้พลังงานสูงและเกิดการสูญเสียความร้อนสูง เมื่อเทียบกับเตาที่มีอุณหภูมิใช้งานต่ำกว่า

ตารางที่ 3.1-1 อุณหภูมิทำงานของเตาอุตสาหกรรม

ประเภทเตา (แยกตามลักษณะการใช้งาน)	อุณหภูมิภายในเตา (°C)
เตาอบเหล็ก	600-1,100
เตาหลอมแก้ว	1,000-1,300
เตาเผาเซรามิกส์	700-1,100
เตาเผาซีเมนต์	650-700
เตาเผากำจัดของเสีย	650-1,000

3.2 ประเภทของเตาอุตสาหกรรม

3.2.1 เตาหลอมไฟฟ้า

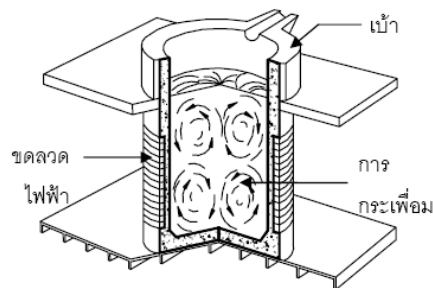
เตาหลอมไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนเพื่อใช้หลอมโลหะ เตาหลอมไฟฟ้าที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรมประเภทหล่อหลอมโลหะ ได้แก่ เตาเหนี่ยวนำและเตาอาร์คไฟฟ้า การสูญเสียพลังงานสำหรับเตาหลอมไฟฟ้าประกอบไปด้วย

- การสูญเสียทางไฟฟ้า (ระบบจ่ายไฟฟ้าหม้อแปลงไฟฟ้าคอยล์ขั้วอิเล็กโตรด)
- การสูญเสียผ่านผนังเตาโดยการนำความร้อน
- การสูญเสียเนื่องจาก Slag
- การสูญเสียจากฝาเตาโดยการแผ่รังสี

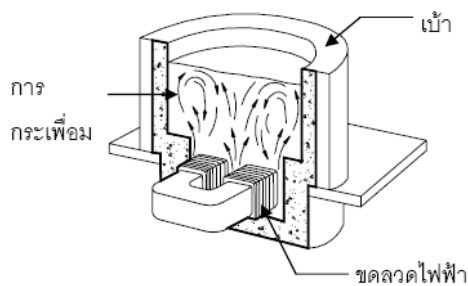
ก) เตาเหนี่ยวนำ (Induction Furnace)

เตาเหนี่ยวนำใช้ในงานหลอมโลหะทั้งในกลุ่มเหล็กและนอกกลุ่มเหล็ก เตาเหนี่ยวนำจำแนกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ เตาเหนี่ยวนำแบบไม่มีแกน (Coreless Type) และเตาเหนี่ยวนำแบบช่อง (Channel Type) รูปที่ 3.2-1 แสดงรูปร่างของเตาเหนี่ยวนำทั้งสองแบบ เตาเหนี่ยวนำแบบไม่มีแกนมีขดลวดพันอยู่รอบบ้ำ ในขณะที่เตาเหนี่ยวนำแบบช่องมีขดลวดพันอยู่รอบแกนที่ติดตั้งอยู่ส่วนนอกของบ้ำหลอม

เตาเหนี่ยวนำให้ความร้อนแก่โลหะที่ใช้หลอมโดยอาศัยการจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแก่ขดลวดเพื่อกำเนิดสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสขึ้นที่โลหะความต้านทานของโลหะที่มีต่อกระแสเหนี่ยวนำเป็นแหล่งกำเนิดความร้อนที่ใช้ในการหลอมโลหะ



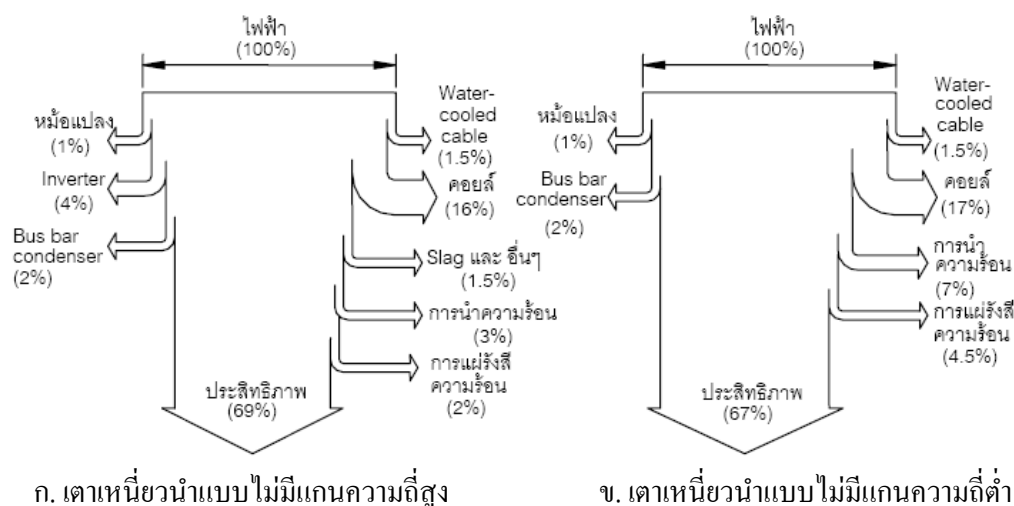
ก. เตาเหนี่ยวนำแบบไม่มีแกน



ข. เตาเหนี่ยวนำแบบช่อง

รูปที่ 3.2-1 เตาเหนี่ยวนำ

แรงที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำและสนามแม่เหล็กจะช่วยให้น้ำโลหะกระเพื่อมการกระเพื่อมช่วยกวนน้ำโลหะให้เป็นเนื้อเดียวกันโลหะผสมที่เดิมเข้าไปเพื่อปรับส่วนประกอบจะกลมกลืนไปกับน้ำโลหะได้อย่างรวดเร็วและทั่วถึงอย่างไรก็ตามการกระเพื่อมมีผลเสียคือทำให้น้ำโลหะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้มากขึ้นและผนังเตาถูกกัดกร่อนได้มากขึ้น



รูปที่ 3.2-2 สมดุลพลังงานเตาเหนี่ยวนำแบบไม่มีแกนความถี่ต่ำและความถี่สูง [UNIDO]

เตาหลอมเหนี่ยวนำยังสามารถแบ่งได้ตามความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเตาเป็นเตาเหนี่ยวนำความถี่ต่ำซึ่งมีความถี่ 50 หรือ 60 Hz และเตาเหนี่ยวนำความถี่สูงซึ่งมีความถี่มากกว่า 500 Hz รูปที่ 3.2-2 แสดงตัวอย่างสมดุลพลังงานของเตาเหนี่ยวนำแบบไม่มีแกนความถี่ต่ำและความถี่สูง

ระบบระบายความร้อนด้วยน้ำ (Water cooling system) เป็นสิ่งสำคัญ สำหรับการออกแบบเตาหลอมโลหะโดยการเหนี่ยวนำ การระบายความร้อนช่วยป้องกันขดลวดเหนี่ยวนำและฉนวนไม่ให้เกิดความเสียหายจากความร้อน ไม่ใช่แต่เฉพาะช่วงเตาทำงานเท่านั้น แต่รวมถึงช่วงที่เตาหยุดทำงานด้วยและรอให้เตาเย็นลง (Cool down) นอกจากนี้แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของเตาก็ต้องใช้ระบบระบายความร้อนเช่นเดียวกัน ซึ่งโดยปกติแล้วเตาหลอมโลหะโดยการเหนี่ยวนำจะมีระบบเตือนอัตโนมัติเมื่อเกิดปัญหาขึ้น

ความร้อนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานโลหะที่เราต้องการให้ความร้อนจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังนี้

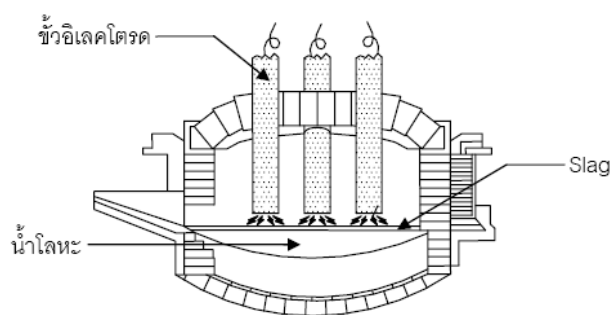
- ขนาดกำลังไฟฟ้าของเครื่องให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำ โดยมีขนาดตั้งแต่ระดับกิโลวัตต์จนถึงระดับหลายเมกะวัตต์
- ค่าความต้านทานสนามแม่เหล็ก (Reluctance) และค่าความต้านทานไฟฟ้า (Resistance) ของชิ้นงานโลหะ
- ลักษณะรูปร่างของขดลวดและชิ้นงาน
- ความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าขดลวดเหนี่ยวนำ โดยอยู่ในช่วงตั้งแต่ 50 Hz ไปจนถึงระดับหลายร้อย kHz โดยกระแสไฟฟ้าที่มีความถี่ต่ำจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำและความร้อนในระดับลึกเข้าไปในเนื้อวัสดุ โดยทั่วไปจะใช้กับกระบวนการ เช่น การหลอมโลหะ การให้ความร้อนสำหรับการตีขึ้นรูป เป็นต้น ส่วนกระแสไฟฟ้าที่มีความถี่สูงจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำและความร้อนในระดับตื้นจากผิววัสดุโดยทั่วไปใช้กับกระบวนการ เช่น การอบผิวโลหะ การอบให้ความร้อนขึ้นโลหะขนาดเล็ก เป็นต้น

การให้ความร้อนและการหลอมโดยการเหนี่ยวนำนั้นจะใช้ระยะเวลาสั้นในการทำความร้อนและควบคุมอุณหภูมิให้ได้ตามต้องการ ประสิทธิภาพของการถ่ายเทพลังงานโดยรวมประมาณร้อยละ 55 - 85 ซึ่งสูงกว่าการให้ความร้อนโดยเชื้อเพลิงที่มีประสิทธิภาพการถ่ายเทพลังงานโดยรวมประมาณร้อยละ 15 - 25 เท่านั้น

ส่วนปัญหาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกี่ยวกับเตาหลอมที่อุณหภูมิสูงก็คือ มลภาวะจากควันและไอระเหยที่เกิดขึ้น ซึ่งต้องกำจัดออกจากพื้นที่ทำงาน ผู้ปฏิบัติที่ทำงานในส่วนนี้ต้องตระหนักว่าโลหะที่หลอมละลาย สามารถทำให้เกิดก๊าซพิษและอาจติดไฟได้เอง เช่น แอมโมเนีย อะเซติลีน

ข) เตาอาร์คไฟฟ้า (Electric-Arc Furnace)

เตาอาร์คไฟฟ้ามักใช้ในงานหลอมเหล็กกล้าเตาอาร์คไฟฟ้าใช้ความร้อนที่เกิดจากการอาร์คทางไฟฟ้าเพื่อหลอมโลหะเตาอาร์คไฟฟ้าแบ่งออกเป็น 2 ประเภทได้แก่เตาอาร์คไฟฟ้าทางอ้อม(Indirect-Arc Furnace) และเตาอาร์คไฟฟ้าทางตรง (Direct-Arc Furnace) สำหรับเตาอาร์คไฟฟ้าทางอ้อมการอาร์คจะเกิดขึ้นระหว่างขั้วอิเล็กโตรด 2 ขั้วส่วนเตาอาร์คไฟฟ้าทางตรงการอาร์คจะเกิดขึ้นระหว่างขั้วอิเล็กโตรดและโลหะที่ใช้หลอมรูปที่ 3.2-3 แสดงเตาอาร์คไฟฟ้าทางตรง



รูปที่ 3.2-3 เตาอาร์คไฟฟ้าทางตรง

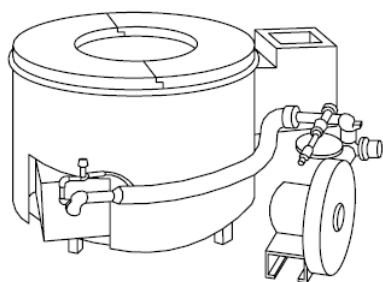
3.2.2 เตาหลอมเชื้อเพลิง

เตาหลอมเชื้อเพลิงใช้ความร้อนจากการสันดาปหลอมโลหะ ซึ่งจะใช้การถ่ายเทความร้อนภายในเตาไปยังพื้นผิวโลหะด้วยการพาความร้อนและการแผ่รังสีจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง เตาหลอมเชื้อเพลิงที่ใช้อย่างแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรมประเภทหล่อหลอมโลหะได้แก่เตาแบบเตาคิวปอลาและเตาสะท้อนความร้อนเตาหลอมเชื้อเพลิงจะมีระบบมอเตอร์เพื่อนำอากาศและเชื้อเพลิงเข้ามาผสมกันสำหรับการสันดาปการสูญเสียพลังงานในเตาหลอมเชื้อเพลิงประกอบไปด้วย

- การสูญเสียเนื่องจากการสันดาป
- การสูญเสียเนื่องจากการถ่ายเทความร้อน
- การสูญเสียผ่านผนังเตา
- การสูญเสียทางปล่องหรือการสูญเสียในก๊าซเสีย
- การสูญเสียพลังงานในระบบมอเตอร์

ก) เตาเบ้า (Crucible Furnace)

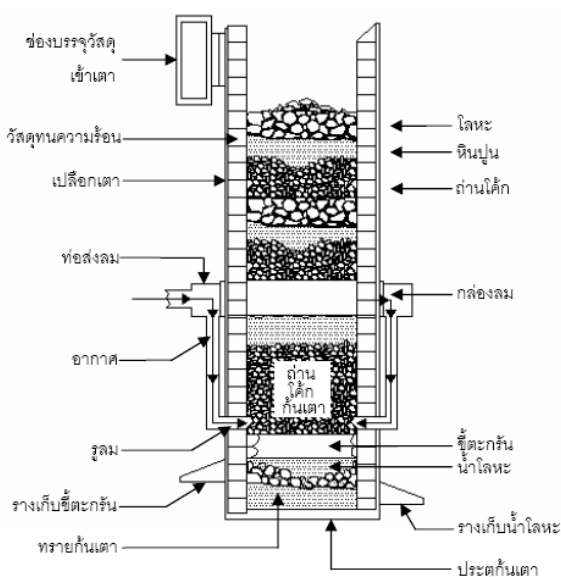
เตาเบ้ามักใช้ในงานหลอมโลหะนอกกลุ่มเหล็กที่มีปริมาณน้อยเตาเบ้าถือว่าเป็นเตาหลอมโลหะที่เก่าแก่ที่สุดและมีโครงสร้างง่ายที่สุดรูปที่ 3.2-4 แสดงรูปร่างของเตาเบ้าซึ่งประกอบด้วยเบ้าบรรจุโลหะที่ทำจากกราไฟต์ (Clay-Graphite) หรือซิลิกอนคาร์ไบด์ (Silicon-Carbide) และเปลือกที่ทำจากวัสดุทนความร้อน โดยมีเหล็กหุ้มอยู่ด้านนอกเปลือกดังกล่าวทำหน้าที่กักความร้อนจากการสันดาปให้ถ่ายเทไปยังเบ้าให้มากที่สุดความร้อนจากการสันดาปจะไม่ได้สัมผัสกับโลหะที่ใช้หลอมโดยตรงแต่ถ่ายเทโดยผ่านเบ้าที่บรรจุโลหะโดยทั่วไปแล้วเชื้อเพลิงที่ใช้กับเตาเบ้าได้แก่น้ำมันและก๊าซอย่างไรก็ตามบางครั้งอาจใช้ถ่านหินหรือถ่านโค้ก



รูปที่ 3.2-4 เตาเบ้า

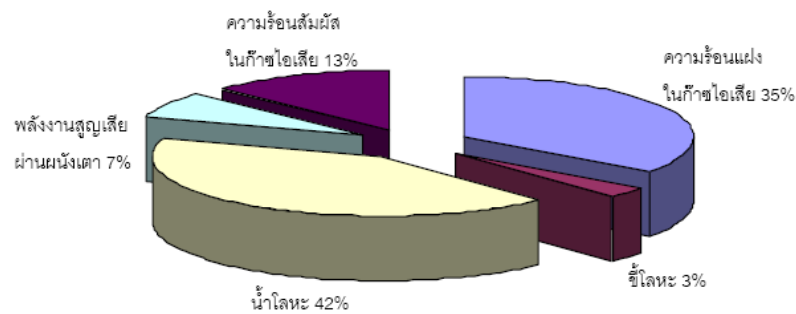
ข) เตาคิวโปลา (Cupola Furnace)

เตาคิวโปลาใช้ในงานหลอมเหล็กหล่อและใช้ถ่านโค้กเป็นเชื้อเพลิงเตาคิวโพลามีลักษณะเป็นแท่งเหล็กทรงกระบอกแนวตั้งภายในบุด้วยวัสดุทนความร้อนที่ก้นของเตาเป็นแอ่ง (Well) พักน้ำโลหะที่หลอมเหลว ก่อนที่น้ำโลหะจะถูกจ่ายออกรูปที่ 3.2-5 แสดงรูปร่างของเตาคิวโปลา



รูปที่ 3.2-5 เตาคิวโปลา

ภายในเตาคิวโปลาจะบรรจุด้วยชั้นของถ่านโค้กหินปูน (Limestone) และเหล็กที่ใช้หล่อสลับกันไปผ่านทางช่องบรรจุวัสดุที่ด้านบนของเตาชั้นของถ่านโค้กที่อยู่ใกล้กับรูจ่ายลม (Tuyere) จะเกิดการสันดาป (เราเรียกเขตนี้ว่า เขตสันดาปหรือเขตเพิ่มออกซิเจน) ความร้อนจากการสันดาปจะหลอมชั้นของโลหะที่อยู่ใกล้กับเขตสันดาป โลหะที่หลอมเหลวจะไหลลงสู่แอ่งพักน้ำโลหะเมื่อถ่านโค้กชั้นแรกถูกสันดาปจนหมดถ่านโค้กชั้นถัดไปก็จะเลื่อนลงมาแทนที่ด้วยวิธีนี้กระบวนการสันดาปและการหลอมก็สามารถดำเนินไปได้อย่างต่อเนื่องรูปที่ 3.2-6 แสดงตัวอย่างสมดุลพลังงานจากถ่านโค้กของเตาคิวโปลา

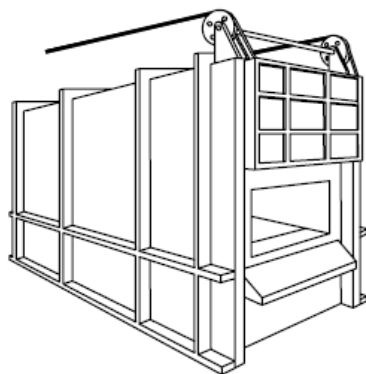


รูปที่ 3.2-6 สมดุลพลังงานจากถ่านโค้กของเตาคิวโปลา

ค) เตาสะท้อนความร้อน (Reverberatory Furnace)

เตาสะท้อนความร้อนใช้ในงานหลอมโลหะนอกกลุ่มเหล็กครั้งละปริมาณมากๆ โครงสร้างของเตาสะท้อนความร้อนจะเป็นห้องที่บุด้วยวัสดุทนไฟภายในห้องมีอ่างสำหรับบรรจุโลหะที่ใช้หลอมหัวเผา (Burner) จะฉีดเชื้อเพลิงซึ่งเป็นน้ำมันหรือก๊าซให้มาสันดาปในห้องดังกล่าวความร้อนจากการสันดาปถ่ายเทเข้าสู่โลหะที่ใช้หลอมโดยวิธีการแผ่รังสีทั้งจากเปลวไฟโดยตรงและจากเพดานเตาที่ดูดซับความร้อนจากเปลวไฟ

เตาสะท้อนความร้อนบางตัวอาจมีปั๊มหมุนเวียนน้ำโลหะเพื่อเพิ่มผลผลิตลดการใช้เชื้อเพลิงและให้น้ำโลหะผสมเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้นรูปที่ 3.2-7 แสดงลักษณะของเตาสะท้อนความร้อน



รูปที่ 3.2-7 เตาสะท้อนความร้อน

3.3 การตรวจวัดการใช้พลังงานเตาอุตสาหกรรม

ดังได้กล่าวแล้วว่า เตาอุตสาหกรรมเป็นอุปกรณ์ที่ใช้พลังงานและสูญเสียความร้อนสูง เพื่ออนุรักษ์พลังงานและลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานของเตา เราควรตรวจวัดเพื่อวิเคราะห์การใช้พลังงานของเตาอุตสาหกรรม ตารางที่ 3.3-1 และ 3.3-2 แสดงการตรวจวัดและวิเคราะห์ข้อมูลสำหรับเตาหลอมแบบเชื้อเพลิงและแบบไฟฟ้าตามลำดับ สำหรับรูปที่ 3.3-1 แสดงแผนภาพของเตาและตำแหน่งที่ควรทำการตรวจวัดเพื่อการอนุรักษ์พลังงานของเตาหลอมเชื้อเพลิง

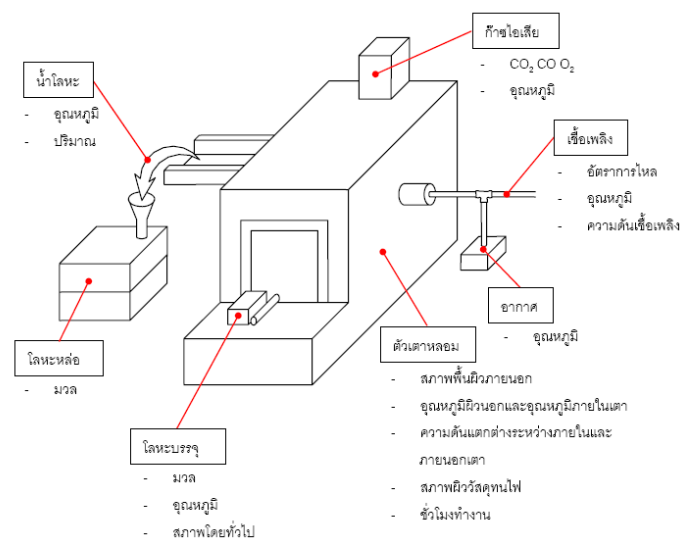
ตารางที่ 3.3-1 การตรวจวัดวิธีเก็บข้อมูลและการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อการอนุรักษ์พลังงานของเตาหลอมเชื้อเพลิง

ข้อมูล	ค่าตรวจวัด	การวิเคราะห์
1. โลหะบรรจุ	- มวล - อุณหภูมิ	ผลได้จากการหลอม (Yield of Melting) ประสิทธิภาพเตาหลอม ประสิทธิภาพเตาหลอม
2. เชื้อเพลิง	- อัตราการไหล - อุณหภูมิ - ความดัน	ประสิทธิภาพเตาหลอมและดัชนีการใช้พลังงาน ประสิทธิภาพเตาหลอม อุณหภูมิเป็นไปตามข้อกำหนดของหัวเผา ความดันเชื้อเพลิงเป็นไปตามข้อกำหนดของหัวเผา
3. อากาศ	- อุณหภูมิ, อัตราการไหล	ประสิทธิภาพเตาหลอม
4. ไอเสีย	- CO ₂ CO O ₂ - อุณหภูมิ	ปริมาณ O ₂ และ CO ไม่สูงเกินไป, ปริมาณ CO ₂ ไม่ต่ำเกินไปไปพลังงานสูญเสียในก๊าซไอเสีย, ประสิทธิภาพเตาหลอม และความจำเป็นในการปรับแต่งหัวเผา พลังงานสูญเสียในก๊าซไอเสีย ประสิทธิภาพเตาหลอม ศักยภาพในการนำความร้อนจากก๊าซไอเสียไปใช้ประโยชน์
5. ตัวเตาหลอม	- สภาพผิวภายนอก - อุณหภูมิผิวภายนอก - อุณหภูมิภายในเตา - ความแตกต่างระหว่างความดันภายในและภายนอกเตา - สภาพผิววัสดุทนไฟ - ชั่วโมงการทำงาน	สำรวจจุดชำรุดเพื่อดำเนินการซ่อมแซม ความร้อนสูญเสียผ่านพื้นผิว ประสิทธิภาพเตาหลอม ศักยภาพในการซ่อมแซมและหุ้มฉนวน อุณหภูมิภายในเตาไม่สูงเกินความจำเป็นสำหรับการหลอม ความดันภายในเตาควรมากกว่าความดันภายนอกเตาเล็กน้อยเพื่อควบคุมอากาศรั่ว สำรวจจุดชำรุดเพื่อดำเนินการซ่อมแซม คำนวณความคุ้มค่าและผลตอบแทนการลงทุน

ข้อมูล	ค่าตรวจวัด	การวิเคราะห์
6. น้ำโลหะ	- อุณหภูมิ - ปริมาณ	อุณหภูมิ น้ำโลหะ ไม่สูงเกินความจำเป็น สังเกตว่ามีปริมาณน้ำโลหะที่เหลือจากการเทแบบมาก เกินไปหรือไม่เพื่อดำเนินการปรับปรุงแก้ไข
7. โลหะหล่อ	- มวล	ผลได้จากการหลอม (Yield of Melting) ผลได้จากการ หล่อ (Yield of Casting) และดัชนีการใช้พลังงาน

ตารางที่ 3.3-2 การตรวจวัดวิธีเก็บข้อมูลและการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อการอนุรักษ์พลังงานของเตาหลอมไฟฟ้า

จุดที่ตรวจสอบ	วิธีการตรวจวัดและเก็บ ข้อมูล	การวิเคราะห์ข้อมูล
	- -	
	-	
2. ค่าทางไฟฟ้า	- พลังไฟฟ้า (kWh) - กำลังไฟฟ้า (kW) - ความต่างศักย์ (V) - กระแสไฟฟ้า (A) - ตัวประกอบกำลัง (PF)	ดัชนีการใช้พลังงาน, เปรียบเทียบค่าที่วัดได้เข้ากับค่า พิกัดของอุปกรณ์, ความเป็นไปได้ในการปรับปรุงตัว ประกอบกำลัง, ความเป็นไปได้ในการเปลี่ยนตารางการ ทำงานของอุปกรณ์เพื่อหลบช่วง On Peak
3. ตัวเตาหลอม	- สภาพผิวภายนอก - อุณหภูมิผิวภายนอก - อุณหภูมิภายในเตา - สภาพผิววัสดุทนไฟ - ชั่วโมงการทำงาน	สำรวจจุดชำรุดเพื่อดำเนินการซ่อมแซม ความร้อนสูญเสียผ่านพื้นผิว ประสิทธิภาพเตาหลอม ศักยภาพในการซ่อมแซมและหุ้มฉนวน อุณหภูมิภายในเตา ไม่สูงเกินความจำเป็นในการหลอม สำรวจจุดชำรุดเพื่อดำเนินการซ่อมแซม คำนวณความคุ้มค่าและผลตอบแทนการลงทุน
4. น้ำโลหะ 4.1 อุณหภูมิ	- อุณหภูมิ - ปริมาณ	อุณหภูมิ น้ำโลหะ ไม่สูงเกินความจำเป็น สังเกตว่ามีปริมาณน้ำโลหะที่เหลือจากการเทแบบมาก เกินไปหรือไม่เพื่อดำเนินการปรับปรุงแก้ไข
5. โลหะหล่อ	- มวล	ผลได้จากการหลอม (Yield of Melting) ผลได้จากการ หล่อ (Yield of Casting) และดัชนีการใช้พลังงาน



รูปที่ 3.3-1 จุดที่ควรทำการตรวจวัดเพื่อการอนุรักษ์พลังงานของเตาหลอมเชื้อเพลิง

ในการประเมินประสิทธิภาพของเตาอุตสาหกรรมเราต้องทำสมดุลพลังงาน โดยต้องทราบปริมาณพลังงานที่ป้อนเข้าและปริมาณพลังงานที่จ่ายออกไปยังผลิตภัณฑ์และการสูญเสียที่เกิดขึ้นในส่วนต่างๆดังแสดงในตารางที่ 3.3-3

ตารางที่ 3.3-3 ตารางสมดุลพลังงานสำหรับเตาอุตสาหกรรม

พลังงานเข้า	พลังงานออก	สัดส่วนโดยประมาณ (%)
เชื้อเพลิง + อากาศ (100%)	พลังงานที่ชิ้นงานได้รับ	20-40
	พลังงานที่สูญเสียไปกับก๊าซไอเสีย	51-54
	พลังงานสูญเสียผ่านพื้นผิว	3
	พลังงานสูญเสียทางช่องเปิด	9
	พลังงานสูญเสียจากน้ำระบายความร้อนและอื่นๆ	8-15

จากตารางที่ 3.3-3 จะเห็นได้ว่าแนวทางการประหยัดพลังงานของเตาอุตสาหกรรม ก็คือ การทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์ที่สุดการถ่ายเทความร้อนไปสู่ชิ้นงานให้มากที่สุด และการลดการสูญเสียพลังงานในรูปแบบต่างๆให้เหลือน้อยที่สุด

3.3.1 พลังงานจากเชื้อเพลิงป้อน

พลังงานความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงในเตาอุตสาหกรรมขึ้นกับปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้และค่าความร้อนของเชื้อเพลิงซึ่งเชื้อเพลิงแต่ละชนิดจะมีค่าความร้อนที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 3.5

$$Q_C = \dot{m}_F \cdot LHV \quad (3.1)$$

เมื่อ Q_C = ปริมาณความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้, MJ/h
 $\dot{m}_F$ = อัตราการใช้เชื้อเพลิง, L/h หรือ kg/h
 LHV = ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง, MJ/L หรือ MJ/kg หรือ Nm³/kg

ตารางที่ 3.3-4 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงประเภทต่างๆ

เชื้อเพลิงแข็ง		เชื้อเพลิงเหลว		เชื้อเพลิงก๊าซ	
เชื้อเพลิง	ค่าความร้อน	เชื้อเพลิง	ค่าความร้อน	เชื้อเพลิง	ค่าความร้อน
- ถ่านหินบิทูมินัส	26.37MJ/kg	- น้ำมันก๊าด	34.53MJ/L	- ก๊าซธรรมชาติ	36.72MJ/Nm ³
- ถ่านหินลิกไนต์	10.47MJ/kg	- น้ำมันดีเซล	36.42MJ/L	- ก๊าซปิโตรเลียมเหลว	50.22 MJ/kg
- ไม้เลื่อย	10.88 MJ/kg	- น้ำมันเตา	39.77MJ/L		
- แกลบ	14.40MJ/kg				
- ชานอ้อย	7.53MJ/kg				

เช่นเดียวกับการเผาไหม้น้ำมันหรือไอน้ำ อัตราส่วนอากาศ (Air Ratio) แสดงถึงปริมาณอากาศป้อนจริงว่ามีสัดส่วนเป็นอย่างไรเมื่อเทียบกับปริมาณอากาศป้อนที่ต้องการตามทฤษฎี เช่น ถ้าเราควบคุมให้ปริมาณอากาศป้อนจริงเกินจากทฤษฎี 20% หมายความว่า อัตราส่วนอากาศเท่ากับ $120/100 = 1.2$ เป็นต้นเราสามารถคำนวณค่าอัตราส่วนอากาศได้จากสมการที่ (3.2) เมื่อทราบปริมาณ O₂ เป็นร้อยละในก๊าซไอเสีย

$$m = \frac{21}{21 - O_2} \quad (3.2)$$

เมื่อ m = อัตราส่วนอากาศ
 O_2 = ร้อยละของก๊าซออกซิเจนในก๊าซไอเสีย (%)

ตัวอย่างที่ 1 ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงของเตาหลอมโลหะ

เตาอบโลหะของโรงงานแห่งหนึ่งใช้น้ำมันเตาในปริมาณ 1,000,000 ลิตรต่อเดือนปริมาณความต้องการใช้พลังงานของเตาอบต่อเดือนมีค่าเท่าไร

วิธีคำนวณ

จากตารางที่ 3.3-4 ค่าความร้อนของน้ำมันเตาเท่ากับ 39.77 MJ/L ดังนั้น ปริมาณพลังงานความร้อนที่ป้อนให้เตาอบโลหะ = 1,000,000 L x 39.77 MJ/L คิดเป็นพลังงาน = 39,770,000 MJ/ Month

3.3.2 การสูญเสียความร้อนทางปล่องไอเสีย

ความร้อนจากการสันดาปเชื้อเพลิงจะถูกใช้ให้ความร้อน (Heating) หรือหลอมละลาย (Melting) ชิ้นงาน โดยความร้อนส่วนใหญ่จะสูญเสียออกทางปล่องไอเสีย

ความร้อนที่สูญเสียไปกับก๊าซไอเสียขึ้นอยู่กับชนิดของเชื้อเพลิงและประสิทธิภาพการเผาไหม้ เราสามารถประเมินการสูญเสียความร้อนในก๊าซไอเสียอย่างคร่าวๆ โดยใช้สมการตามที่แสดงในตารางที่ 3.3-5 และตารางที่ 3.3-6 โดยข้อมูลตรวจวัดที่ต้องการ ได้แก่

- ชนิดและปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้
- ปริมาณ O_2 ในก๊าซไอเสีย (วัดที่ตำแหน่งไอเสียออกจากห้องเผาไหม้)
- อุณหภูมิไอเสีย (วัดที่ตำแหน่งไอเสียออกจากห้องเผาไหม้)

ตารางที่ 3.3-5 ความสัมพันธ์ของค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง ปริมาณอากาศป้อนและก๊าซไอเสียเชิงทฤษฎี

เชื้อเพลิง (LHV: kCal/kg)	อากาศป้อนเชิงทฤษฎี (A_o) (Nm ³ /kg)	ก๊าซไอเสียเชิงทฤษฎี (G_o) (Nm ³ /kg)
เชื้อเพลิงแข็ง	$A_o = \frac{1.01 \cdot LHV}{1000} + 0.5$	$G_o = \frac{0.89 \cdot LHV}{1000} + 1.65$
เชื้อเพลิงเหลว	$A_o = \frac{0.85 \cdot LHV}{1000} + 2.0$	$G_o = \frac{1.11 \cdot LHV}{1000}$
เชื้อเพลิงก๊าซ	$A_o = \frac{1.09 \cdot LHV}{1000} - 0.25$	$G_o = \frac{1.14 \cdot LHV}{1000} + 0.25$
ปริมาณก๊าซไอเสียจริง	$G = G_o + (m-1)A_o$	
ปริมาณความร้อนทิ้งในก๊าซไอเสีย	$Q_g = G \cdot C_p \cdot (T_g - T_a)$	

T_g = อุณหภูมิไอเสีย (C) , T_a = อุณหภูมิแวดล้อม (C)

ตารางที่ 3.3-6 ค่าความร้อนจำเพาะของก๊าซไอเสีย

อุณหภูมิก๊าซไอเสีย (°C)	200	400	600	800
ค่าความร้อนจำเพาะเฉลี่ย (C_p ; kCal/Nm ³ C)	0.332	0.340	0.348	0.358

“ข้อสังเกต ค่าความร้อนจำเพาะเฉลี่ยจะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิไอเสียเล็กน้อยมาก”

ตัวอย่างที่ 2 การสูญเสียความร้อนจากปล่อง

จากตัวอย่างที่ 1 เตาอบโลหะของโรงงานใช้น้ำมันเตาเกรด C เดือนละ 1,000,000 ลิตร และจากการตรวจวัดไอเสียออกปล่อง พบว่ามีปริมาณ O_2 8% และอุณหภูมิไอเสีย 900°C อุณหภูมิอากาศแวดล้อม 35°C เมื่อโรงงานได้ดำเนินการปรับปรุงประสิทธิภาพเตาใหม่พบว่าอุณหภูมิไอเสียลดลงเป็น 750°C และปริมาณ O_2 ลดลงเป็น 4% โรงงานสามารถลดการสูญเสียความร้อนทางปล่องได้เท่าใด

วิธีคำนวณ

$$\begin{aligned}
 \text{ความหนาแน่นน้ำมันเตา } C &= 0.94 && \text{kg/L} \\
 \text{ค่าความร้อนน้ำมันเตา } C &= 39.77 && \text{MJ/L (จาก ตร.3.3-4)} \\
 &= 39.77 / 0.94 = 42.31 && \text{MJ/kg} \\
 &= 42.31 \times 239 = 10,112 && \text{kCal/kg} \\
 \text{จากตารางที่ 3.3-5} \quad A_o &= \frac{0.85 \cdot LHV}{1000} + 2.0 = 10.60 \\
 G_o &= \frac{(1.11) \cdot (10,112)}{1000} \\
 &= 11.22
 \end{aligned}$$

รายการ	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง
อัตราส่วนอากาศป้อน	$m = \frac{21}{21-8}$ $= 1.62$	$m = \frac{21}{21-4}$ $= 1.24$
ปริมาณก๊าซไอเสีย (Nm ³ /kg)	$G = G_o + (m-1)A_o$ $= 11.22 + (1.62-1)(10.60)$ $= 17.74$	$G = G_o + (m-1)A_o$ $= 11.22 + (1.24-1)(10.60)$ $= 13.72$
ความร้อนทิ้งในก๊าซไอเสีย (kcal)	$Q_g = G \cdot C_p \cdot (T_g - T_a)$ $= (17.74)(0.358)(900 - 35)$ $= 5,493.55$	$Q_g = G \cdot C_p \cdot (T_g - T_a)$ $= (13.72)(0.358)(750 - 35)$ $= 3,511.91$
ร้อยละของความร้อนทิ้งในก๊าซไอเสีย (%)	$= (5,493.55 / 10,112) \times 100$ $= 54.3$	$= (3,511.91 / 10,112) \times 100$ $= 34.7$

ดังนั้น การสูญเสียความร้อนจากปล่องลดลง	$= 54.3 - 34.7$	$= 19.6 \quad \%$
จากตัวอย่างที่ 1 เตาใช้พลังงาน	$= 39,770,000$	MJ/ Month
การสูญเสียพลังงานจากปล่องที่ลดลง	$= 0.196 \times 39,770,000$	MJ/ Month
	$= 7,794,920$	MJ/ Month
ลดปริมาณการใช้น้ำมันเตาได้	$= 7,794,920 / 39.77$	
	$= 196,000$	L/Month

3.3.3 การสูญเสียความร้อนทางผนังเตา

ผนังเตาเป็นอีกช่องทางหนึ่งของการสูญเสียความร้อนและส่งผลให้ประสิทธิภาพพลังงานโดยรวมของเตาลดลง การสูญเสียที่ผิวเตาเกิดจากการพาความร้อน โดยอากาศแวดล้อมและการแผ่รังสีความร้อนเนื่องจากผิวเตาที่มีอุณหภูมิสูงกว่าสิ่งแวดล้อม การคำนวณการถ่ายเทความร้อนที่ผิวเตาสามารถทำได้โดยการเขียนสมการสมดุลพลังงานที่บริเวณผิวเตา

$$Q_{Sur} = Q_{Conv} + Q_{Rad}$$

$$= hA(T_s - T_a) + \varepsilon\sigma A(T_s^4 - T_a^4) \quad (3.3)$$

เมื่อ	Q_{Conv}	=	การสูญเสียความร้อนจากการพา (W)
	Q_{Rad}	=	การสูญเสียความร้อนจากการแผ่รังสี (W)
	A	=	พื้นที่ผิวของผนังเตา (m^2)
	T_s	=	อุณหภูมิผิวของผนังเตา (K)
	T_a	=	อุณหภูมิอากาศแวดล้อม (K)
	ε	=	สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน
	σ	=	ค่าคงที่ Stefan Boltzman = $5.67 \times 10^{-8} (W/m.K^4)$
	h	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพา = $1.42 \left[\frac{T_s - T_a}{H} \right]^{0.25} (W/m^2.K)$
	H	=	ความสูงของเตา พื้นที่ ที่ไม่ได้หุ้มฉนวน (m.)

จากสมการที่ (3.3) เราสามารถคำนวณอัตราการสูญเสียความร้อนที่เกิดขึ้นเมื่อทราบพื้นที่ผิวเตา และอุณหภูมิผิวเตาและอากาศแวดล้อม ซึ่งค่าเหล่านี้หาได้จากการวัด

ตัวอย่างที่ 3 การสูญเสียความร้อนจากผิวเตา

จากตัวอย่างข้างต้น ผนังเตาสูง 1.20 m. ยาว 2.5 m. ไม่ได้หุ้มฉนวน เมื่อตรวจวัดได้ค่าอุณหภูมิที่ผนังเตาพบว่า เท่ากับ $400^\circ C$ พลังงานความร้อนที่สูญเสียจากการถ่ายเทความร้อนผ่านผิวเตามีค่าเท่าไร

วิธีคำนวณ

$$\begin{aligned} \text{อุณหภูมิผิวผนังเปลี่ยนที่ ไม่ได้หุ้มฉนวน} &= 400^\circ C \\ \text{ความยาวและความสูงผนังทั้งหมดที่ ไม่ได้หุ้มฉนวน} &= \text{ผนังสูง 1.20m. และยาว 2.5m.} \\ Q_{Sur} &= Q_{Conv} + Q_{Rad} \\ &= hA(T_s - T_a) + \varepsilon\sigma A(T_s^4 - T_a^4) \\ &= 1.42 \left[\frac{T_s - T_a}{H} \right]^{0.25} A(T_s - T_a) + \varepsilon\sigma A(T_s^4 - T_a^4) \\ &= 1.42 \left[\frac{(400 + 273.15) - (35 + 273.15)}{1.2} \right]^{0.25} (1.2 \times 2.5) [(400 + 273.15) - (35 + 273.15)] \\ &\quad + 0.9 \times 5.67 \times 10^{-8} \times (1.2 \times 2.5) [(400 + 273.15)^4 - (35 + 273.15)^4] \\ &= 36,546.76 \text{ W} \\ &= 36.5 \text{ kW} \\ \text{ชั่วโมงการใช้งานเตาอบของโรงงาน} &= 312 \text{ (d/y)} \times 24 \text{ (h/d)} \\ &= 7,488 \text{ h/y} \\ \text{คิดเป็นปริมาณพลังงานความร้อนที่สูญเสียต่อปี} &= 36.5 \text{ (kW)} \times 7,488 \text{ (h/y)} \\ &= 273,312 \text{ kWh/y} \end{aligned}$$

3.3.4 การสูญเสียความร้อนจากช่องเปิดหรือรูรั่วของเตา

พลังงานความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงส่วนหนึ่งจะสูญเสียออกไปทางช่องเปิดหรือรูรั่วต่างๆ ของผนังเตาซึ่งสามารถคำนวณหาอัตราการสูญเสียดังกล่าวได้จากตารางที่ 3.3-7

ตารางที่ 3.3-7 อัตราการสูญเสียความร้อนผ่านช่องเปิด (MJ/ hr/ m²)

ความดันภายในเตา (mm H ₂ O)	อุณหภูมิก๊าซร้อนภายในเตา (°C)								
	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400
1.0	2,498.1	2,737.3	2,949.1	3,152.0	3,326.3	3,494.5	3,654.4	3,793.3	3,914.6
2.0	3,583.2	3,926.3	4,230.0	4,521.0	4,771.1	5,012.3	5,241.7	5,440.9	5,614.9
3.0	4,605.1	5,046.1	5,436.4	5,810.5	6,131.9	6,441.9	6,736.7	6,992.7	7,216.3
4.0	5,551.4	6,082.9	6,553.5	7,004.4	7,391.8	7,765.6	8,120.9	8,429.6	8,699.1
5.0	6,447.2	7,064.5	7,611.0	8,134.6	8,584.6	9,018.7	9,431.3	9,789.8	10,102.9
6.0	7,267.3	7,963.1	8,579.1	9,169.4	9,676.6	10,165.9	10,631.0	11,035.1	11,387.9
7.0	8,024.3	8,792.6	9,472.8	10,124.5	10,684.5	11,224.8	11,738.4	12,184.6	12,574.2
8.0	8,705.6	9,539.2	10,277.1	10,984.1	11,591.7	12,177.9	12,735.0	13,219.1	13,641.8
9.0	9,336.4	10,230.4	11,021.8	11,780.1	12,431.7	13,060.3	13,657.9	14,177.0	14,630.4
10.0	9,891.5	10,838.7	11,677.2	12,480.5	13,170.9	13,836.9	14,470.0	15,020.0	15,500.3
11.0	10,371.0	11,364.1	12,243.1	13,085.5	13,809.3	14,507.6	15,171.3	15,748.0	16,251.6
12.0	10,800.0	11,834.1	12,749.6	13,626.7	14,380.5	15,107.6	15,798.8	16,399.4	16,923.8

ตัวอย่างที่ 4 การสูญเสียความร้อนจากช่องเปิด

เตาอบในกรณีศึกษาข้างต้น มีช่องเปิดที่ประตูเพื่อนำชิ้นงานขนาดใหญ่ออกความดันภายในเตามีค่าต่ำกว่าภายนอกซึ่งส่งผลให้อากาศเย็นที่อุณหภูมิ 35°C จากภายนอกไหลเข้าไปในเตาเผาโดยความดันภายในเตาเท่ากับ -3 mm H₂O และพื้นที่ช่องเปิดเหนือชิ้นงาน 0.1 m² จงหาว่าเมื่อลดขนาดพื้นที่ช่องหรือเพิ่มความดันภายในเตาให้เป็น 0 mm H₂O จะส่งผลให้ลดการสูญเสียความร้อนเท่าใด (ค่าความร้อนค่าน้ำมันเตา 38.17 MJ/L)

วิธีคำนวณ -กรณีมีอุปกรณ์ตรวจวัดความดันภายในเตา

จากตารางที่ 3.3-7 ที่อุณหภูมิภายในเตา 900°C และความดันภายในเตา 3 mmH₂O จะได้อัตราการสูญเสียความร้อนผ่านช่องเปิดต่อตารางเมตรเท่ากับ 5,810.5 MJ/h/m²

เตามีพื้นที่ช่องเปิด = 0.1 m²

อัตราการสูญเสียผ่านช่องเปิด = 5,810.5 x 0.1

= 581.1 MJ/h

อัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง = 581.1 / 38.17

= 15.22 L/h

= 15.22 x 7,488 (312 d x 24 h = 7,488 h)

= 113,997 L/y

3.3.5 การสูญเสียความร้อนจากน้ำระบายความร้อน

เตาอุตสาหกรรมบางชนิดจะต้องใช้น้ำระบายความร้อนให้กับชิ้นส่วนหรือโครงสร้างเพื่อรักษาคุณสมบัติของวัสดุ ดังนั้นอัตราการระบายความร้อนจะต้องเหมาะสมซึ่งหากระบายความร้อนมากจะส่งผลให้เกิดการสูญเสียความร้อนมากยิ่งขึ้นอีกทั้งจะสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าที่ขับปั๊มน้ำ และพลังงานไฟฟ้าที่ใช้กับหอผึ่งเย็นที่ต้องทำให้น้ำที่ระบายความร้อนออกจากน้ำ เพื่อหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ใหม่

พลังงานความร้อนที่อยู่ในน้ำระบายความร้อนเป็นความร้อนสัมผัส (Sensible Heat) ดังนั้น เราสามารถคำนวณปริมาณความร้อนในน้ำระบายได้ดังนี้

$$Q = \dot{m}_w C_p (T_{Wout} - T_{Win}) \quad (3.4)$$

เมื่อ	Q	=	อัตราการระบายความร้อนของน้ำ (kW)
	$\dot{m}_w$	=	อัตราการไหลของน้ำระบายความร้อน (kg/s)
	C_p	=	ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ (kJ/kg/°K) , (น้ำบริสุทธิ์ = 4.187 kJ/kg/°K)
	T_{Win}	=	อุณหภูมิน้ำระบายความร้อนที่ป้อนเข้าเตา (°C)
	T_{Wout}	=	อุณหภูมิน้ำระบายความร้อนที่ออกจากเตา (°C)

ตัวอย่างที่ 5 การสูญเสียความร้อนจากน้ำระบายความร้อน

เตาอบข้างต้นใช้น้ำในการระบายความร้อน จากการวัดโดยเครื่องอัลตราโซนิกส์พบว่า อัตราการไหลของน้ำเท่า 10 m³/h อุณหภูมิน้ำเข้าและออกเตา 30°C และ 50°Cตามลำดับโรงงานได้ลดอัตราการไหลของน้ำโดยการหรีวาล์วเพื่อให้ได้ตามมาตรฐานการระบายความร้อนของเตาเป็น 5 m³/h ส่งผลให้อุณหภูมิของน้ำออกจากเตาสูงขึ้นเป็น 60°C จงหาว่าโรงงานลดการสูญเสียความร้อนที่เกิดจากน้ำระบายความร้อนได้เท่าใด

วิธีคำนวณ

ก่อนปรับปรุง

$$\text{อุณหภูมิแตกต่างของน้ำระบายความร้อนเข้า-ออกจากเตา} = 50 - 30 = 20^\circ\text{C}$$

$$\begin{aligned} \text{อัตราการสูญเสียความร้อน} &= 10 \text{ m}^3/\text{h} \times 1,000 \text{ kg/m}^3 \times 4.2 \text{ (kJ/kg.K)} \times 20 / 1000 \\ &= 840 \text{ MJ/h} \end{aligned}$$

หลังปรับปรุง

$$\text{อุณหภูมิแตกต่างของน้ำระบายความร้อนเข้า-ออกจากเตา} = 60 - 30 = 30^\circ\text{C}$$

$$\begin{aligned} \text{อัตราการสูญเสียความร้อน} &= 5 \text{ m}^3/\text{h} \times 1,000 \text{ kg/m}^3 \times 4.2 \text{ (kJ/kg.K)} \times 30 / 1000 \\ &= 630 \text{ MJ/h} \end{aligned}$$

$$\text{อัตราการสูญเสียลดลง} = 840 - 630 = 210 \quad \text{MJ/h}$$

$$\text{จำนวนชั่วโมงใช้งานต่อปี} = 7,488 \quad \text{h/y}$$

พลังงานที่ลดลงได้ต่อปี	=	210 x 7,488	=	1,572,480	MJ/y
อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงลดลง	=	1,572,480 / 39.77	=	39,539.4	L/y

3.4 มาตรการปรับปรุงประสิทธิภาพและอนุรักษ์พลังงานสำหรับเตาอุตสาหกรรม

มาตรการและเทคนิคต่างๆ มากมายสามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่ออนุรักษ์และลดการใช้พลังงานสำหรับเตาอุตสาหกรรม ในหัวข้อนี้เราจะกล่าวถึงเทคนิคการปรับปรุงประสิทธิภาพเตาอุตสาหกรรมได้ดังนี้

การปรับปรุงประสิทธิภาพเตาอุตสาหกรรม
• การปรับปรุงประสิทธิภาพการเผาไหม้
• การลดการสูญเสียความร้อนทางปล่องไอเสีย
• การลดการสูญเสียความร้อนผ่านพื้นผิว
• การลดการสูญเสียความร้อนจากช่องเปิดหรือรูรั่วของเตา
• การลดการสูญเสียความร้อนจากน้ำระบายความร้อน

3.4.1 การปรับปรุงประสิทธิภาพการเผาไหม้

เตาอุตสาหกรรมใช้หลักการของการเผาไหม้เช่นเดียวกับหม้อไอน้ำ กล่าวคือประสิทธิภาพของการเผาไหม้ขึ้นอยู่กับ ชนิดของเชื้อเพลิงปริมาณอากาศเข้าเผาไหม้ และลักษณะการเผาไหม้โดยองค์ประกอบที่ทำให้เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ก็คือ

- มีการผสมกันระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศอย่างทั่วถึง
- มีเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้เพียงพอ เพื่อไม่ให้สูญเสียเชื้อเพลิงที่ยังไม่ถูกเผาไหม้ออกไปจากห้องเผาไหม้
- มีอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ ระหว่างการเผาไหม้สูงกว่าจุดติดไฟของเชื้อเพลิง เพื่อที่จะทำให้เกิดการเผาไหม้อย่างต่อเนื่อง

ก) การปรับอัตราส่วนอากาศ

ในทางปฏิบัติ ปริมาณอากาศที่ป้อนจริงให้กับเตาจะต้องมีมากกว่าปริมาณอากาศเชิงทฤษฎีเพื่อให้อากาศสามารถผสมกับเชื้อเพลิงได้ทั่วถึง หากอัตราส่วนอากาศมีค่าน้อยเกินไป จะเกิดการสูญเสียเนื่องมาจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ และในทางตรงกันข้าม หากอัตราส่วนอากาศมีค่ามากเกินไป ก๊าซไอเสียที่มากขึ้นจะพาความร้อนสูญเสียออกทางปล่องเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นอัตราส่วนอากาศที่เหมาะสมคืออัตราส่วนอากาศที่ให้ผลรวมของการสูญเสียเนื่องมาจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ และการสูญเสียเนื่องมาจากการพาความร้อนโดยก๊าซไอเสียมีค่าน้อยที่สุด ตารางที่ 3.4-1 สรุปอัตราส่วนอากาศที่เหมาะสมสำหรับเตาอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ

ตารางที่ 3.4-1 อัตราส่วนอากาศที่เหมาะสมสำหรับเตาอุตสาหกรรม

ประเภท	อัตราส่วนอากาศมาตรฐาน
เตาหลอมสำหรับหล่อโลหะ	1.30
เตาให้ความร้อนขึ้นเหล็กกล้าอย่างต่อเนื่อง	1.25
เตาให้ความร้อนโลหะที่ไม่ใช่เตาให้ความร้อนขึ้นเหล็กกล้าอย่างต่อเนื่อง	1.30
เตา Heat Treatment อย่างต่อเนื่อง	1.30
เตาให้ความร้อนแก่น้ำมันเตา	1.40
เตา Thermal Cracking และเตาปรุงแต่งคุณภาพ	1.30

ตัวอย่างที่ 6 การหาอัตราส่วนอากาศ

จากตัวอย่างที่ 2 เมื่อโรงงานได้ทำการตรวจวัดปริมาณ O_2 ในก๊าซไอเสียของเตาอบ พบว่ามีค่าเท่ากับ 8% จากข้อมูลที่มีอยู่นี้ ค่าอัตราส่วนอากาศป้อนเป็นเท่าไร และเหมาะสมหรือไม่อย่างไร

วิธีคำนวณ

$$\begin{aligned}
 m &= \frac{21}{21 - O_2} \\
 \text{จากสมการที่ (3.2)} \quad &= \frac{21}{21 - 8} \\
 &= 1.615
 \end{aligned}$$

จากตารางที่ 3.4-1 อัตราส่วนของอากาศมาตรฐานสำหรับเตาอบมีค่าประมาณ 1.3 ดังนั้น ในปัจจุบันค่าอัตราส่วนอากาศของเตาอบสูงเกินไป และควรต้องปรับลด

ข) การเลือกใช้หัวเผาที่เหมาะสม

เลือกใช้หัวเผาที่มีภาระพิคกิ้งใกล้เคียงกับภาระที่ต้องการการใช้งานหัวเผาที่ต่ำกว่าภาระพิคกิ้งมากเกินไปจะมีผลเสียไม่เพียงแต่การฟุ้งสอยของหัวเผาจจะเลวลงเพราะความดันเชื้อเพลิงตกต่ำลงเท่านั้นแต่สภาวะของการสันดาปจะเลวลงด้วยเพราะการผสมของเชื้อเพลิงและอากาศเกิดขึ้นไม่เพียงพอเนื่องจากความเร็วของอากาศที่ป้อนเข้าช้าลงด้วยเหตุนี้ก็จะเกิดเขม่าขึ้นถ้าไม่ใช้อัตราส่วนอากาศที่มีค่าค่อนข้างมากกว่าของการสันดาปตามที่ออกแบบไว้ซึ่งทำให้การสูญเสียโดยการพาความร้อนทางก๊าซไอเสียเพิ่มมากขึ้น

เลือกใช้หัวเผาที่มี Turn-Down Ratio สูงสำหรับการใช้งานที่ภาระการสันดาปมีการเปลี่ยนแปลงมากเพื่อปรับการสันดาปให้เหมาะสมกับภาระการควบคุมปริมาณความร้อนโดยวิธีเปิดปิดเป็นสิ่งที่ไม่แนะนำเพราะเมื่อจำนวนครั้งของการเปิดปิดมีมากขึ้นนอกจากความร้อนที่สูญเสียไปในขณะปิดหัวเผาก็จะเพิ่มขึ้นการจุดไฟซ้ำๆ ซากๆ จะมีผลเสียต่อหัวเผาดังนั้นจึงควรเลือกใช้หัวเผาที่มี Turn-Down Ratio สูงซึ่งสามารถปรับอัตราการสันดาปให้เหมาะสมกับภาระที่เปลี่ยนแปลงแทนการใช้วิธีเปิดปิด

ค) การบำรุงรักษาหัวเผา

ข้อแนะนำในการบำรุงรักษาหัวเผามีดังนี้

- ทำความสะอาดหัวเผาที่มีสิ่งสกปรกและคาร์บอนเกาะอยู่หัวเผาที่มีสิ่งสกปรกและคาร์บอนเกาะอยู่ทำให้ละอองของเหลวที่พ่นฝอยมีขนาดโตขึ้นและเกิดการกระจายของละอองเหลวไม่สม่ำเสมอผลก็คือเกิดบริเวณที่มีการสันดาปไม่สมบูรณ์และเกิดบริเวณที่มีอากาศเกินพอดีนั้นจึงควรทำความสะอาดหัวเผาที่มีสิ่งสกปรกและคาร์บอนเกาะอยู่ด้วยน้ำมันล้างแล้วจึงเช็ดออกด้วยผ้าแห้งๆ ไม่ควรทำความสะอาดด้วยของแข็งเช่น ไขควงหรือมีดเพราะอาจทำให้เกิดรอยแผลขึ้นที่ปลายหัวเผาทำให้การพ่นฝอยเลวลงได้อีก
- ตรวจสอบอุณหภูมิของน้ำมันเตาและความดันพ่นฝอยว่าเป็นไปตามข้อกำหนดของหัวเผาหรือไม่การอุ่นน้ำมันเตาที่ไม่เพียงพอและความดันพ่นฝอยที่น้อยเกินไปเป็นสาเหตุของการพ่นฝอยที่เลวและนำมาซึ่งการเกาะติดของสิ่งสกปรกและคาร์บอนที่หัวเผา

ตารางที่ 3.4-2 อุณหภูมิอุ่นน้ำมันเชื้อเพลิงที่เหมาะสม

เชื้อเพลิง	อุณหภูมิอุ่นเชื้อเพลิงที่เหมาะสม (°C)
น้ำมันเตาเอ	90 -100
น้ำมันเตาซี	110 -120

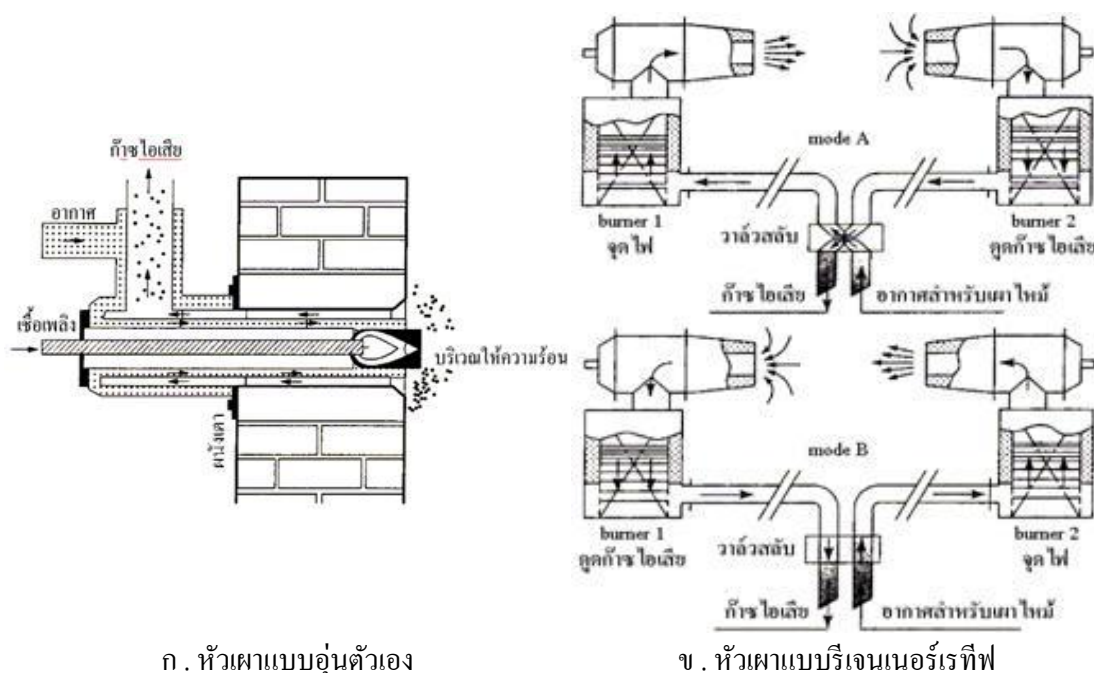
- ล้างกรองน้ำมันเชื้อเพลิงเป็นประจำและปล่อยน้ำก้นถังอย่างน้อยปีละครั้ง
- กรณีสื่อเพลิงแข็งควรลดความชื้นและขนาดของเชื้อเพลิงก่อนเข้าเผาไหม้
- ตรวจสอบขนาดหัวเผาหากพบว่าหัวเผาทำงานที่ภาระต่ำอยู่ตลอด หรือหยุดบ่อย
- ปรับตั้งทิศทางของหัวเผาให้เหมาะสมอย่าให้เปลวไฟสัมผัสวัสดุภายในเตาโดยตรง เพื่อไม่ให้เกิดปัญหาเขม่าและปรับความยาวของเปลวให้เหมาะสม อย่าให้ลวดออกทางปล่องควันหรือประตู
- ถ้าใช้งานหัวเผาแบบธรรมดาควรพิจารณาเปลี่ยนเป็นหัวแบบรีกูเนอเรทีฟหรือรีเจนเนอเรทีฟที่มีการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้งาน

ง) หัวเผาประสิทธิภาพสูง

ปัจจุบันมีการพัฒนาหัวเผาให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นเพื่อใช้กับการเผาไหม้เชื้อเพลิงสูง เช่น เตาอุตสาหกรรมโดยอาศัยหลักการนำความร้อนเหลือทิ้งจากก๊าซไอเสียกลับมาอุ่นอากาศก่อนเข้าเผาไหม้หัวเผาประเภทนี้มี 2 แบบคือ

- **แบบอุ่นตัวเอง (Self Recuperative Burner)** ซึ่งจะดึงก๊าซร้อนจากการเผาไหม้ไหลสัมผัสผิวท่อของอากาศใหม่ที่เข้าเผาไหม้หัวเผาแบบนี้ติดตั้งทดแทนหัวเผาเดิมได้ง่าย และสามารถประหยัดเชื้อเพลิงได้ถึงร้อยละ 30 (ดูรูปที่ 3.4-1 ก)
- **แบบรีเจนเนอเรทีฟ (Regenerative Burner)** ซึ่งจะเป็นหัวเผากู้ทำงานสลับกัน ขณะที่หัวเผาชุดที่ 1 ทำงานก๊าซไอเสียจากชุดที่ 1 จะถูกดูดเข้าไปอุ่นอากาศก่อนเข้าเผาไหม้ของชุดที่ 2 ซึ่งจะมีอุปกรณ์สะสมความร้อน

ไว้ใช้เมื่อหัวเผาชุดที่ 2 ติดขึ้น และทำงานสลับกันไปมา (ดูรูปที่ 3.4-1 ข) หัวเผาแบบนี้จะประหยัดเชื้อเพลิงได้ถึงร้อยละ 50 แต่จะมีใช้เฉพาะในเตาขนาดใหญ่ เช่น เตาหลอมแก้ว เตาหลอมเหล็ก เป็นต้น



รูปที่ 3.4-1 หัวเผาประสิทธิภาพสูง

3.4.2 การลดความสูญเสียความร้อนทางปล่องไอเสีย

- ปริมาณอากาศที่ใช้เผาไหม้ไม่เหมาะสมถ้าใช้ปริมาณอากาศมากเกินไป อากาศส่วนที่ไม่ได้ช่วยในการเผาไหม้จะนำความร้อนจากห้องเผาไหม้ทั้งทางปล่องไอเสียมากขึ้น โดยสังเกตจากอุณหภูมิไอเสียที่สูงขึ้น ดังนั้นจะต้องทำการปรับอัตราส่วนอากาศ (Air Ratio) ให้เหมาะสมกับชนิดของเตาอุตสาหกรรม
- ความดันภายในเตาไม่สมดุลกับความดันบรรยากาศถ้าความดันภายในเตาต่ำกว่าความดันบรรยากาศอากาศเย็นจากภายนอกจะเข้าสู่เตาส่งผลให้อุณหภูมิเตาลดลงและการสูญเสียความร้อนออกทางปล่องจะสูงขึ้น ดังนั้นควรควบคุมความดันภายในเตาโดยการติดตั้งบานปรับ (Damper) ที่ปล่องไอเสียเพื่อให้ความดันสูงกว่าบรรยากาศเล็กน้อยประมาณ $1 \text{ mm H}_2\text{O}$
- อุณหภูมิภายในเตาไม่เหมาะสมโดยทั่วไปมาตรฐานจะควบคุมอุณหภูมิที่แกนกลาง (Core Temperature) ของชิ้นงานดังนั้นถ้าอุณหภูมิที่ใช้สูงกว่ามาตรฐานจะส่งผลให้คุณภาพลดลงและการสูญเสียความร้อนทางปล่องจะมากขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิไอเสียสูงขึ้น

3.4.3 การลดความสูญเสียความร้อนที่ผิวเตาโดยการติดตั้งฉนวน

ผิวเตาเป็นแหล่งหนึ่งของการสูญเสียความร้อน และส่งผลให้ประสิทธิภาพของเตาลดลง การติดตั้งฉนวนกับผนังของเตาสามารถลดความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิผิวภายนอกเตาและอากาศแวดล้อม ทำให้ลดการสูญเสีย

ความร้อนและประสิทธิภาพเตาเพิ่มขึ้นได้อย่างไรก็ตาม ในท้องตลาดฉนวนมีอยู่หลายประเภทและมีความเหมาะสมในการใช้งานที่แตกต่างกัน ดังนั้น ในการเลือกใช้นวนเราจะต้องพิจารณาด้วยความระมัดระวัง เพื่อให้การใช้นวนเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและประสิทธิผล รวมทั้งมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน

ก) การสังเกตสภาพฉนวนความร้อนที่เสื่อมสภาพ

ฉนวนความร้อนที่หมดอายุ หรือเสื่อมสภาพดูได้จาก

- อุณหภูมิผิวฉนวนที่สูงเกินกว่าเกณฑ์อุณหภูมิผิวนอกเตาที่ความหนาใช้งานที่เหมาะสมหรืออุณหภูมิผิวฉนวนสูงกว่าตอนหลังการติดตั้งใช้งานใหม่ๆ เกินกว่า 20°C อาจเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานในตารางที่ 3.4-3
- การเกาะยึดตัวของเนื้อฉนวนความร้อน โดยปกติเมื่อฉนวนความร้อนถูกใช้งานไปนานๆ เนื้อฉนวนความร้อนจะเริ่มเปื่อยยุ่ยไม่เกาะติดกันเมื่อใช้มือจับดึงเนื้อฉนวนความร้อนจะหลุดติดมือออกมาจำนวนมากได้ง่ายโดยที่ใช้แรงดึงน้อย หรือสังเกตจากการที่มีเศษฉนวนความร้อนหลุดร่วงลงพื้น

ข) การป้องกันฉนวนความร้อนเสื่อมสภาพและมลพิษจากฉนวนความร้อน

ในการป้องกันฉนวนความร้อนเสื่อมสภาพสามารถทำได้โดยการใช้วัสดุห่อหุ้มฉนวนอีกชั้นหนึ่งโดยมากมักหุ้มด้วยแผ่นอะลูมิเนียมฟลอยด์, แผ่นเหล็กอาบสังกะสีบางหรือแผ่นอะลูมิเนียมบาง ซึ่งเรียกว่า หุ้ม แจ็คเก็ต หลังจากหุ้มแล้วต้องยาแนวรอยต่อด้วยซิลิโคนเพื่อป้องกันความชื้นและน้ำเข้าสู่ฉนวนความร้อนและป้องกันเศษฉนวนความร้อนหลุดร่วงทำอันตรายแก่คนหรือหลุดร่วงลงสู่ผลิตภัณฑ์ ซึ่งเป็นการป้องกันการเกิดมลพิษจากฉนวนความร้อน

ตารางที่ 3.4-3 เกณฑ์อุณหภูมิที่ผิวนอกของเตาอุตสาหกรรม

อุณหภูมิในเตา(°C)	อุณหภูมิผิวนอกของเตาหลังหุ้มฉนวนความร้อน(°C)	
	เพดานเตา	ผนังข้างเตา
>1,300	148	128
1,100 – 1,300	133	118
900 – 1,100	118	103
700 – 900	98	88
500 – 700	71	66

3.4.4 การลดการสูญเสียความร้อนจากช่องเปิดหรือรูรั่วของเตา

พลังงานความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง นอกจากจะส่งถ่ายให้กับชิ้นงานแล้ว ยังต้องสูญเสียไปในทางต่างๆ เช่น ก๊าซไอเสียออกปล่อง ผนังเตา น้ำระบายความร้อน รวมทั้งการสูญเสียความร้อนออกไปทางช่องเปิดหรือรูรั่วต่างๆ ของผนังเตา ดังนั้น ผู้ใช้ควรลดการสูญเสียความร้อนในส่วนนี้ลงโดยมีแนวทางดังนี้

- ขนาดของพื้นที่ช่องเปิดหรือรูรั่วถ้ามีขนาดใหญ่การสูญเสียจะมากขึ้น ดังนั้นควรลดขนาดให้เล็กที่สุดหรืออุดรูรั่วทั้งหมด

- อุณหภูมิของก๊าซภายในเตา ถ้าอุณหภูมิสูงการสูญเสียจะมากขึ้นดังนั้นควรลดอุณหภูมิให้ได้มาตรฐาน
- อุณหภูมิบรรยากาศแวดล้อมที่ลดต่ำลงจะส่งผลให้อัตราอากาศหรือก๊าซที่รั่วผ่านช่องเปิดมากขึ้นและสูญเสียมากขึ้น
- การควบคุมความดันภายในเตาความดันภายในเตาควรควบคุมให้ใกล้เคียงกับความดันบรรยากาศโดยค่าที่เหมาะสมควรจะให้สูงกว่าบรรยากาศเล็กน้อย ประมาณ 1 mm H₂O ถ้าความดันภายในเตาสูงกว่าความดันบรรยากาศมากจะส่งผลให้ก๊าซร้อนรั่วออกทางช่องเปิดหรือรั่วมากขึ้นและถ้าความดันต่ำกว่าบรรยากาศจะส่งผลให้อากาศเย็นจากภายนอกถูกดูดเข้าไปในเตาส่งผลให้อุณหภูมิในเตาไม่สม่ำเสมอ โดยจุดที่ใกล้รูรั่วจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดอื่นซึ่งอาจทำให้คุณภาพของชิ้นงานลดต่ำลง

3.4.5 การลดการสูญเสียพลังงานจากการระบายความร้อน

- ลดอัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนเมื่ออุณหภูมิน้ำที่ออกจากเตาต่ำกว่ามาตรฐานของผู้ผลิต ซึ่งสามารถทำได้โดย
 - การหีวาล์วทางออกของน้ำที่ออกจากปั๊มน้ำ
 - การลดขนาดใบพัดของปั๊มน้ำ
 - การลดความเร็วรอบของปั๊มน้ำ
 - การเปลี่ยนขนาดของปั๊มน้ำซึ่งจะส่งผลให้การสูญเสียความร้อนลดลงและพลังงานไฟฟ้าที่ใช้กับปั๊มน้ำลดลง
- เพิ่มประสิทธิภาพของหอผึ่งเย็น หอผึ่งเย็นเมื่อขาดการบำรุงรักษาที่ดี จะส่งผลให้น้ำที่ได้มีอุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ต้องเดินหอผึ่งเย็นในจำนวนมากขึ้นส่งผลให้สิ้นเปลืองพลังงานในพัดลมที่ไ้มากขึ้นดังนั้นผู้ใช้จะต้องสมดุลน้ำในหอระบายให้เหมาะสม ทำความสะอาดหัวฉีดและแผ่นพลาสติกที่ใช้แลกเปลี่ยนความร้อนเป็นประจำ

3.5 การตรวจวินิจฉัยเพื่อหาแนวทางการอนุรักษ์พลังงาน

สิ่งผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบเตาอุตสาหกรรมนั้น เหตุของการสูญเสียพลังงาน ดังนั้นควรทำการตรวจวินิจฉัยเพื่อหาสิ่งผิดปกติ เพื่อทำการแก้ไขอย่างสม่ำเสมอ ดังตาราง

รายการตรวจ	เกณฑ์พิจารณา	แนวทางปฏิบัติที่ดี
1. ตรวจสอบสีของเปลวไฟในแต่ละภาระ	ประสิทธิภาพการเผาไหม้ดี สามารถตรวจสอบเบื้องต้นจากเปลวไฟ - เชื้อเพลิงเหลวเปลวไฟควรมีสีส้ม - เชื้อเพลิงก๊าซเปลวไฟควรมีสีฟ้าปลายสีส้ม - เปลวไฟควรมีสภาพคงตัว	• จัดทำแผนการตรวจสอบทุกวัน • ปรับตั้งหัวเผาให้อยู่ในจุดที่ประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงสุด • เปลี่ยนแปลง ปรับปรุงหัวเผาเมื่อสึกหรอ • ความดันและอุณหภูมิเชื้อเพลิงต้องเหมาะสม
2. ตรวจสอบสีควันไฟที่ออกจากปล่อง	ประสิทธิภาพการเผาไหม้ดี สามารถตรวจสอบเบื้องต้นจากสีของควันไฟที่ออกจากปล่องโดยควันไฟควรมีสีเทาอ่อน	• ลดปริมาณอากาศเมื่อควันไฟสีขาวหรือไม่มีสี • ลดปริมาณเชื้อเพลิงเมื่อควันไฟสีดำ
3. ตรวจสอบความสว่างภายในห้องเผาไหม้	ประสิทธิภาพการเผาไหม้ดี สามารถตรวจสอบเบื้องต้นจากความสว่างภายในห้องเผาไหม้ โดยภายในห้องเผาไหม้ไม่สว่างจ้าหรือคล้ำ	• ลดปริมาณอากาศเมื่อห้องเผาไหม้สว่างจ้า • ลดปริมาณเชื้อเพลิงเมื่อห้องเผาไหม้คล้ำ
4. ตรวจสอบอุณหภูมิน้ำมันเชื้อเพลิง	น้ำมันเชื้อเพลิงที่มีความหนืดสูง การพ่นเป็นฝอยจะไม่ดีส่งผลให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ดังนั้นควรอุ่นเชื้อเพลิงให้มีอุณหภูมิเหมาะสม น้ำมันเตาเกรด เอ ที่ 90-100 °C น้ำมันเตาเกรด ซี ที่ 110-120 °C	• ปรับตั้งอุณหภูมิในการอุ่นให้เหมาะสม • ควรใช้ไฟฟ้าในการอุ่นช่วงแรกและอุ่นด้วยไอน้ำเมื่อมีไอน้ำ • ลดจำนวน Heater ในการอุ่นให้เหมาะสมกับการใช้งาน • หุ้มฉนวนถังป้อนน้ำมันและระบบท่อ
5. ตรวจสอบความดันน้ำมันเชื้อเพลิง	ความดันน้ำมันเชื้อเพลิงต่ำกว่ามาตรฐานของหัวเผาจะทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ลดลง	• ตรวจสอบและปรับตั้งความดันให้ได้ตามมาตรฐานของหัวเผาแต่ละชนิด

รายการตรวจ	เกณฑ์พิจารณา	แนวทางปฏิบัติที่ดี
6. ตรวจวัดปริมาณ O_2 ส่วนเกินที่ออกจากห้องเผาไหม้	ปริมาณ O_2 ส่วนเกินควรจะน้อยที่สุดที่ทำให้ CO ไม่เกิน 200 ppm - เชื้อเพลิงก๊าซไม่เกิน 2 % - เชื้อเพลิงเหลวไม่เกิน 4 % - เชื้อเพลิงแข็งขึ้นอยู่กับสภาพเชื้อเพลิง	• ตรวจวัดและปรับตั้งหัวเผาทุกครั้งเมื่อทำการบำรุงรักษาหัวเผา • ติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมการเผาไหม้อัตโนมัติ
7. ตรวจสอบอุณหภูมิใช้งานภายในเตาแต่ละโซน	อุณหภูมิใช้งานในแต่ละโซนไม่ควรสูงกว่ามาตรฐานเพราะจะทำให้การสูญเสียความร้อนสูงขึ้นและคุณภาพผลิตภัณฑ์ต่ำ	• ปรับลดอุณหภูมิแต่ละโซนให้ได้มาตรฐาน • จัดตำแหน่งหัวเผาให้เกิดการกระจายความร้อนได้ดี • จัดตำแหน่งการวางชิ้นงานให้เกิดการกระจายความร้อนได้ดี
8. ตรวจสอบอุณหภูมิผนังเตาด้านข้างและด้านบน	อุณหภูมิผนังเตาต้องได้ตามมาตรฐานการออกแบบของเตาแต่ละชนิดและขึ้นอยู่กับอุณหภูมิภายในเตา ถ้าอุณหภูมิผิวผนังเตาสูงขึ้นการสูญเสียจะมากขึ้น ดังนั้นควรบันทึกอุณหภูมิและเปรียบเทียบกับข้อมูลในอดีต	• ช่อมฉนวนที่สึกหรอ • เปลี่ยนฉนวนที่เสื่อมสภาพ • เปลี่ยนอิฐทนไฟที่สึกหรอ • ติดตั้งฉนวนเซรามิกสไฟเบอร์ที่ผนังด้านใน
9. ตรวจสอบสภาพอิฐทนไฟ	อิฐทนไฟต้องไม่สึกหรอมาก เพราะจะทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนตามผนังเตาเพิ่มขึ้น	• ทำแผนการตรวจสอบเป็นประจำ • เปลี่ยนชนิดอิฐทนไฟถ้าเกิดการสึกหรอเร็ว • แก้ไขปัญหาที่อิฐทนไฟเกิดการสึกหรอเร็ว
10. ตรวจสอบอุณหภูมิไอเสีย	อุณหภูมิไอเสียควรจะต่ำที่สุดเท่าที่จะทำได้ เพื่อลดการสูญเสียความร้อนออกทางปล่อง	• ลดความดันภายในเตาลง • ลดอัตราการให้ความร้อน • ลดปริมาณอากาศส่วนเกินในการเผาไหม้ • ลดอุณหภูมิภายในเตา • จัดวางผลิตภัณฑ์ให้เหมาะสมและเต็มพิกัด • ลดปริมาณอากาศที่ส่งเข้าเตา

รายการตรวจ	เกณฑ์พิจารณา	แนวทางปฏิบัติที่ดี
11. ตรวจสอบความดันภายในเตา	ความดันภายในเตาควรเท่ากับความดันบรรยากาศหรือสูงกว่าไม่เกิน 1 mm H ₂ O ถ้าความดันในเตาสูงเกินไปจะทำให้ความร้อนสูญเสียออกจากช่องเปิดต่างๆมากขึ้น และถ้าความดันต่ำเกินไปจะทำให้อากาศเย็นเข้าไปในเตาทำให้สิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและควบคุมอุณหภูมิภายในเตาไม่ได้	• ทำแผนการตรวจสอบความดันทุกชั่วโมง • ติดตั้งระบบควบคุมความดันอัตโนมัติ
12. ตรวจสอบตำแหน่งการติดตั้งหัวเผา	หัวเผาจะต้องอยู่ในตำแหน่งที่สามารถกระจายความร้อนให้กับชิ้นงานให้ทั่วถึงทุกจุด เพื่อลดเวลาการให้ความร้อนและลดของเสียที่อาจเกิดจากชิ้นงานรับความร้อนที่สูงเกินไป	• จัดวางตำแหน่งและจำนวนหัวเผาให้เหมาะสม •
13. ตรวจสอบปริมาณการป้อนชิ้นงาน	ควรป้อนชิ้นงานให้เต็มเตา เพราะประสิทธิภาพของเตาจะสูงที่สุด	• จัดทำมาตรฐานการจัดวางและป้อนชิ้นงาน • ติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมการป้อนชิ้นงาน
14. ตรวจสอบปริมาณการป้อนชิ้นงาน	ควรป้อนชิ้นงานให้เต็มเตา เพราะประสิทธิภาพของเตาจะสูงที่สุด	• จัดทำมาตรฐานการจัดวางและป้อนชิ้นงาน • ติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมการป้อนชิ้นงาน
15. ตรวจสอบมีการปล่อยให้เตาเย็นก่อนใช้งานหรือไม่	ไม่ควรปล่อยให้เตาเย็นก่อนใส่ชิ้นงานครั้งต่อไป เพราะจะสูญเสียความร้อนในการเริ่มต้นทำงานของเตา	• วางแผนการผลิตให้ต่อเนื่อง • ปิดช่องเปิดต่างๆทางด้านผนังและปล่องขณะที่รอชิ้นงาน • เปลี่ยนจากการเผาจากเป็นครั้ง (Batch) เป็นแบบต่อเนื่อง
16. ตรวจสอบมีการหยุดเตาเนื่องจากชำรุดของอุปกรณ์หรือไม่	เตาเผาแบบต่อเนื่องไม่ควรมีการหยุดเผาขณะที่มีการใช้งานเพราะจะทำให้เกิดของเสียมากขึ้นและสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง	• จัดทำแผนการซ่อมบำรุงให้เหมาะสม

รายการตรวจ	เกณฑ์พิจารณา	แนวทางปฏิบัติที่ดี
17. ตรวจสอบอุปกรณ์ควบคุมความเร็วและอุณหภูมิ	อุปกรณ์ควบคุมความเร็วและอุณหภูมิควรมีความเที่ยงตรง	จัดทำแผนการสอบเทียบเป็นประจำ
18. ตรวจสอบการจัดเรียงชิ้นงานภายในเตา	จัดเรียงชิ้นงานภายในเตาให้เกิดการกระจายความร้อนให้ทั่วถึงทุกจุดและให้ได้ปริมาณเต็มความสามารถของเตาเผา	- จัดทำข้อกำหนดมาตรฐานการจัดเรียงชิ้นงาน - ใช้อุปกรณ์จัดเรียงชิ้นงานอัตโนมัติ
19. ตรวจสอบขนาดช่องเปิดและรูรั่วของผนังเตา	ช่องเปิดของเตาควรมีขนาดเล็กที่สุดและผนังเตาไม่ควรมีรูรั่วเพื่อลดการสูญเสียความร้อน	- ลดขนาดช่องเปิด - อุดรูรั่วของผนังเตาทั้งหมด
20. ตรวจสอบการปิดเตาขณะเลิกงาน	ขณะเลิกงานควรปิดช่องเปิดของเตาทั้งหมดทั้งที่ผนังและปล่องเพื่อลดการสูญเสียความร้อน	- จัดทำแบบตรวจสอบการ ใช้งาน - ติดตั้งอุปกรณ์ปิดช่องเปิดที่ผนังและปล่อง
21. บันทึกปริมาณเชื้อเพลิงและปริมาณผลผลิต	ควรบันทึกปริมาณเชื้อเพลิงและปริมาณการผลิตเพื่อหาสัดส่วนการใช้เชื้อเพลิงต่อผลผลิต เพื่อเป็นข้อมูลเปรียบเทียบการใช้งาน โดยถ้าสัดส่วนการใช้เชื้อเพลิงสูงขึ้นจะต้องหาสาเหตุและแก้ไขเพื่อควบคุมต้นทุนในการใช้เตา	- จัดทำแบบบันทึกและวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการทำงานของเตา - ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดปริมาณเชื้อเพลิงและปริมาณการผลิต
22. ตรวจสอบใช้หัวเผาที่มีประสิทธิภาพสูงหรือไม่	ควรเปลี่ยนหัวเผาเป็นชนิดที่มีประสิทธิภาพสูงเพื่อเกิดการเผาไหม้ที่มีประสิทธิภาพสูงสุด	ใช้หัวเผาแบบ Regenerative Burner
23. ตรวจสอบมีการนำไอเสียมาอุ่นอากาศและเชื้อเพลิงก่อนเข้าเผาไหม้หรือไม่	นำไอเสียมาทำการอุ่นอากาศและเชื้อเพลิงก่อนเข้าเผาไหม้จะทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงขึ้นและประสิทธิภาพเตาเผาสูงขึ้น เพราะเป็นการนำความร้อนที่สูญเสียกลับมาใช้	ติดตั้งอุปกรณ์อุ่นอากาศ Recuperator หรือ Regenerator
24. ตรวจสอบระยะเวลาในการเผาไหม้และการเพิ่มอุณหภูมิในการเผา	ระยะเวลาในการเผาควรสั้นที่สุดและรูปแบบการเพิ่มอุณหภูมิควรเหมาะสมกับระยะเวลา	ทดสอบสมดุลเตาอย่างสม่ำเสมอในทุกแบบหรือประเภทผลิตภัณฑ์ของการผลิตเพื่อให้ต้นทุนต่อหน่วยผลผลิตต่ำลง

รายการตรวจ	เกณฑ์พิจารณา	แนวทางปฏิบัติที่ดี
25. ตรวจสอบการนำไอเสียไปอุ่นชิ้นงานก่อนเข้าเตาหรือไม่	ควรนำไอเสียไปอุ่นชิ้นงานเพื่อลดปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเผา	- เพิ่มความยาวของเตาเพื่อนำไอเสียไปอุ่นชิ้นงาน - ไอเสียสะอาดนำไปใช้โดยตรงได้ - ไอเสียสกปรกนำไปผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน
26. ตรวจสอบการออกแบบเตาเผา	ควรออกแบบเตาเผาให้เกิดการสูญเสียความร้อนน้อยที่สุด	- รูปทรงผนังภายในมีการสะท้อนความร้อนได้ดีโดยมีความโค้งมน - มีขนาดความยาวและความกว้างเหมาะสม - ตำแหน่งหัวเผาเหมาะสม - ผนังมีความหนาแน่นแต่มีความเป็นฉนวนสูง - มีอุปกรณ์ควบคุมการเผาไหม้อัตโนมัติ - มีอุปกรณ์ควบคุมความดันอัตโนมัติ - มีช่องเปิดต่าง ๆ น้อย - มีการทำงานอย่างต่อเนื่อง - มีการสูญเสียความร้อนออกทางปล่องน้อย - มีการระบายความร้อนต่ำ
27. ตรวจสอบปริมาณการใช้ก๊าซหรือน้ำระบายความร้อนเตา	ควรระบายความร้อนออกจากเตาให้น้อยที่สุด	- ลดปริมาณอากาศหรือน้ำระบายความร้อนให้เหมาะสม - ปรับปรุงอุปกรณ์ในระบบระบายความร้อนให้มีประสิทธิภาพสูงสุด
28. ตรวจสอบชนิดเชื้อเพลิงที่ใช้	เลือกใช้เชื้อเพลิงที่มีต้นทุนต่ำ	เปลี่ยนชนิดเชื้อเพลิง

3.6 แบบตรวจสอบศักยภาพการอนุรักษ์พลังงาน

แบบตรวจสอบศักยภาพการอนุรักษ์พลังงานนี้มีประโยชน์ในการค้นหาแนวทางในการอนุรักษ์พลังงานก่อนที่จะดำเนินการตรวจวิเคราะห์เชิงลึก เพื่อหาผลการอนุรักษ์พลังงานต่อไป

รายการศักยภาพการอนุรักษ์พลังงาน	ผลการตรวจสอบศักยภาพ		
	ดำเนินการแล้ว	พร้อมดำเนินการ	ไม่พร้อมดำเนินการ
1. การลดปริมาณอากาศส่วนเกิน (Excess Air) ที่ใช้ในการเผาไหม้			เพราะ...
2. การลดอุณหภูมิใช้งานให้เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์			เพราะ...
3. การอุ่นอากาศก่อนเข้าเผาไหม้			เพราะ...
4. การอุ่นเชื้อเพลิงก่อนเข้าเผาไหม้			เพราะ...
5. การปรับปรุงฉนวนหุ้มผนังเตาภายนอก			เพราะ...
6. การหุ้มฉนวนเซรามิกซ์ที่ผนังภายในเตา			เพราะ...
7. การลดครู่รั่วที่ผนังเตา			เพราะ...
8. การลดช่องเปิดทางเข้าหรือทางออกให้น้อยที่สุด			เพราะ...
9. การลดอัตราการระบายความร้อนของเตา			เพราะ...
10. การควบคุมความดันภายในเตาให้สูงกว่าความดันบรรยากาศเล็กน้อย			เพราะ...
11. การลดการสูญเสียความร้อนจากไอเสีย			เพราะ...
12. การนำไอเสียไปใช้ประโยชน์			เพราะ...
13. การใช้เตาเผาที่ภาระใกล้เคียงปกติ			เพราะ...
14. การเลือกใช้เตาเผาชุดที่ประสิทธิภาพสูงเป็นหลัก			เพราะ...
15. การลดเวลาการเปิดเตาก่อนเริ่มใช้งาน			เพราะ...
16. การปรับปรุงรูปแบบการเพิ่มอุณหภูมิเตาให้เหมาะสม			เพราะ...
17. การใช้เตาเผาอย่างต่อเนื่องโดยไม่ปล่อยให้อุณหภูมิลดลง			เพราะ...
18. การลดความชื้นของเชื้อเพลิงแข็งก่อนเข้าเผาไหม้			เพราะ...
19. การจัดวางผลิตภัณฑ์ภายในเตาให้สามารถรับความร้อนได้ทั่วถึงทุกจุด			เพราะ...
20. การเปลี่ยนชนิดหัวเผาเป็น Recuperative Burner			เพราะ...
21. การเปลี่ยนชนิดหัวเผาเป็น Regenerative Burner			เพราะ...
22. การใช้ระบบควบคุมการเผาไหม้อัตโนมัติ			เพราะ...

รายการศักยภาพการอนุรักษ์พลังงาน	ผลการตรวจสอบศักยภาพ		
	ดำเนินการแล้ว	พร้อมดำเนินการ	ไม่พร้อมดำเนินการ
23. การอุ่นวัตถุดิบก่อนเข้าเตาโดยใช้ไอเสีย			เพราะ...
24. การลดของเสียที่เกิดจากการเผาไหม้			เพราะ...
25. การลดของเสียจากการเตรียมวัตถุดิบ			เพราะ...
26. การเปลี่ยนอิฐตามระยะเวลาที่เหมาะสม			เพราะ...
27. การเปลี่ยนชนิดเชื้อเพลิง			เพราะ...
28. การเปลี่ยนชนิดเตาเผา			เพราะ...
29. การทำความสะอาดและอุดรูรั่วของ Recuperator			เพราะ...
30. การเพิ่มความยาวของเตาเผา			เพราะ...
31. การใช้ Imvertor ควบคุมปริมาณอากาศเข้าเตาแทนการใช้ Damper			เพราะ...
32. การใช้อุปกรณ์ควบคุมการเผาไหม้อัตโนมัติ			เพราะ...
33. การปรับทิศทางของหัวเผาให้เกิดการกระจายความร้อนที่ดี			เพราะ...
34. การปรับปรุงทรงของเตาเผาให้เกิดการสะท้อนความร้อนได้ดี			เพราะ...

3.7 โปรแกรมการวิเคราะห์มาตรการอนุรักษ์พลังงาน

เพื่อลดความยุ่งยากซับซ้อนในการวิเคราะห์ผลการอนุรักษ์พลังงาน จึงทำเป็นโปรแกรม Microsoft Excel โดยผู้ใช้งานข้อมูลเบื้องต้น และข้อมูลตรวจวัดกรอกลงในช่องว่าง โปรแกรมจะคำนวณผลการอนุรักษ์พลังงานที่ถูกต้องได้ทันที

มาตรการที่ 1 การลดการสูญเสียความร้อนจากช่องเปิดหรือรูรั่วของเตา	
1. หลักการและเหตุผล	
โรงงานติดตั้งเตาเผาใช้เชื้อเพลิงน้ำมันเตา C ขนาดพิกัด 1 MJ/h จำนวน 1 ชุด เพื่อใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิให้ชิ้นงาน โดยอุณหภูมิใช้งาน 925 °C จากการตรวจสอบสภาพภายนอกของเตาเผาพบว่า มีช่องเปิดที่ผนังเตาใหญ่เกินไป ส่งผลให้เกิดการสูญเสียความร้อน จึงมีแนวคิดที่จะลดขนาดช่องเปิด เพื่อลดการสูญเสียความร้อน	
 รูปปรูรั่วที่ผนังเตา/ช่องเปิดก่อนปรับปรุง	 รูปปรูรั่วที่ผนังเตา/ช่องเปิดหลังปรับปรุง
2. สมการที่ใช้ในการวิเคราะห์	
2.1 สมการที่ใช้ในการวิเคราะห์ทางเทคนิค	
2.1.1 ความเร็วของอากาศเข้าหรือก๊าซร้อนที่ออกจากช่องเปิดของเตา (m/sec) $V_L = -0.0263 \times (\text{ความดันภายในเตา (mmH}_2\text{O)})^2 + 0.9402 \times \text{ความดันภายในเตา (mmH}_2\text{O)} \times 1.0638$ 2.1.2 อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่เข้าหรือก๊าซร้อนที่ออก (kg/sec) $m_L = \text{ความหนาแน่นของอากาศที่อุณหภูมิเฉลี่ย (kg/m}^3) \times \text{พื้นที่หน้าตัดของช่องเปิด (m}^2) \times \text{ความเร็วของอากาศเข้าหรือก๊าซร้อนออก (m/sec)}$ 2.1.3 อัตราการสูญเสียความร้อนจากช่องเปิดของเตา (kJ/y) $Q_L = \text{อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (kg/sec)} \times \text{ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศที่อุณหภูมิเฉลี่ย (kJ/kg}^\circ\text{C)} \times (\text{อุณหภูมิก๊าซร้อนภายในเตา (}^\circ\text{C)} - \text{อุณหภูมิอากาศแวดล้อม (}^\circ\text{C)}) \times 3,600 \text{ ชั่วโมงการใช้งาน (h/y)} \times \text{ตัวประกอบการทำงาน}$ 2.1.4 อัตราการสูญเสียเชื้อเพลิง $F_L = (\text{อัตราการสูญเสียความร้อน (kJ/y)} / 1,000) / \text{ค่าความร้อนทางต่ำของเชื้อเพลิง}$ 2.1.5 ค่าเชื้อเพลิงที่ลดลงจากการลดช่องเปิด (฿/y) $S_C = \text{อัตราการสูญเสียเชื้อเพลิง} \times \text{ราคาเชื้อเพลิงต่อหน่วย} \times (\text{ร้อยละของช่องเปิดลดลง} / 1,000)$	

2.2 การวิเคราะห์การลงทุน

2.2.1 ระยะเวลาคืนทุน (y)

$$PB = \text{ค่าใช้จ่ายในการอุดหนุน} (\text{฿}) / \text{ค่าเชื้อเพลิงที่ลดลง} (\text{฿/y})$$

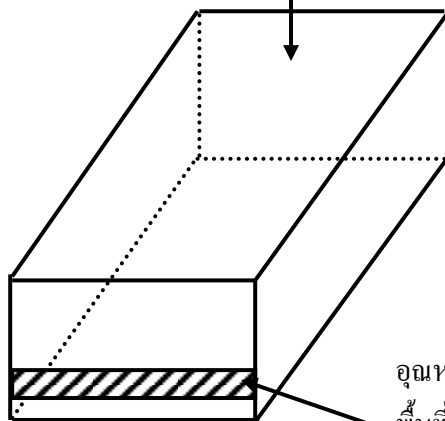
3. การวิเคราะห์ข้อมูล

ใช้โปรแกรม Excel ในการวิเคราะห์ข้อมูลโดยป้อนข้อมูลเบื้องต้นและข้อมูลตรวจวัดใส่ในช่องสี่ฟ้า

ความดันภายในเตา =

mmH₂O

อุณหภูมิก๊าซร้อนภายในเตา = °C



อุณหภูมิอากาศแวดล้อม = °C

พื้นที่หน้าตัดช่องเปิด = m²

รายการ	สัญลักษณ์	หน่วย	ข้อมูล	แหล่งที่มา ของข้อมูล
1. ข้อมูลเบื้องต้น				
1.1 ชั่วโมงการใช้งานตลอดทั้งปี	h	h/y	4,800.00	
1.2 ค่าความร้อนทางต่ำของเชื้อเพลิง (เชื้อเพลิงเหลว MJ/L ,เชื้อเพลิงแข็ง MJ/kg , เชื้อเพลิงก๊าซ MJ/m ³)	LHV	MJ/L	38.18	
1.3 ราคาเชื้อเพลิงเฉลี่ยต่อหน่วย (เชื้อเพลิงเหลว ฿/L ,เชื้อเพลิงแข็ง ฿/kg , เชื้อเพลิงก๊าซ ฿/m ³)	F _C	฿/L	14.50	
1.4 ตัวประกอบการใช้งาน	OF		60.00	

รายการ	สัญลักษณ์	หน่วย	ข้อมูล	แหล่งที่มา ของข้อมูล
1.5 ความหนาแน่นของอากาศที่อุณหภูมิเฉลี่ย (480°C)	r	kg/m ³	0.47	
1.6 ความร้อนจำเพาะของอากาศที่อุณหภูมิเฉลี่ย (480°C)	C _p	kJ/kg °C	1.03	
1.7 ร้อยละของช่องเปิดที่ลดลง	Rd	%	80	
1.8 ค่าใช้จ่ายในการปรับปรุง	C _i	฿	1,000.00	
2. ข้อมูลตรวจวัด				
2.1 ความดันภายในเตาเผา	H	mmH ₂ O	1.00	
2.2 พื้นที่หน้าตัดช่องเปิด	A	m ²	0.04	
2.3 อุณหภูมิก๊าซร้อนภายในเตาเผา	T _i	°C	925.00	
2.4 อุณหภูมิอากาศแวดล้อม	T _o	°C	35.00	
3. การวิเคราะห์ทางเทคนิค				
3.1 ความเร็วของอากาศที่เข้าหรือก๊าซร้อนที่ออกจากช่องเปิดของเตาเผา $V_L = -0.0263 \times H^2 + 0.9402 \times H + 1.0638$	V _L	m/sec	1.98	
3.2 อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่เข้าหรือก๊าซร้อนที่ออก $\dot{m}_L = r \times A \times V_L$	$\dot{m}_L$	kg/sec	0.04	
3.3 อัตราการสูญเสียความร้อนจากช่องเปิดของเตาเผา $Q_L = \dot{m}_L \times C_p \times (T_i - T_o) \times 3,600 \times h \times OF$	Q _L	kJ/y	378,697,420.80	
3.4 อัตราการสูญเสียเชื้อเพลิง (เชื้อเพลิงเหลว L/y ,เชื้อเพลิงแข็ง kg/y , เชื้อเพลิงก๊าซ m ³ /y) $F_L = (Q_L / 1,000) / LHV$	F _L		9,918.74	

รายการ	สัญลักษณ์	หน่วย	ข้อมูล	แหล่งที่มา ของข้อมูล
3.5 ค่าเชื้อเพลิงสูญเสีย $F_{CL} = F_L \times F_C$	F_{CL}	B/y	143,821.73	
3.6 พลังงานความร้อนลดลง $F_S = F_L \times (Rd/100)$	FS	L/y	7,934.99	
3.7 ค่าเชื้อเพลิงที่ลดลงจากการลดช่องเปิด $S_C = F_{CL} \times (Rd/100)$	SC	B/y	115,057.38	
4. การวิเคราะห์การลงทุน				
4.1 ระยะเวลาคืนทุน $PB = C_I / S_C$	PB	y	0.01	
5. สรุปผลที่ได้จากการวิเคราะห์				
5.1 ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ลดลง	FS	L/y	7,934.99	
5.2 ค่าเชื้อเพลิงลดลง	SC	B/y	115,057.38	
5.3 ระยะเวลาคืนทุน	PB	y	0.01	

มาตรการที่ 2 การลดการสูญเสียความร้อนโดยการหุ้มฉนวนผนังเตา

1. หลักการและเหตุผล

โรงงานติดตั้งเตาเผาใช้เชื้อเพลิงน้ำมันเตา C จำนวน 1 ชุด เพื่อใช้ในการให้ความร้อนกับชิ้นงาน อลูมิเนียมที่ใช้ งาน 1,000°C การสูญเสียความร้อนออกจากผนังเตา เป็นการสูญเสียความร้อนที่มากเป็นอันดับสองรองจาก การสูญเสียทางปล่อง ซึ่งเตาส่วนใหญ่เมื่อใช้งานไประยะหนึ่งอิฐทนไฟและฉนวน จะเกิดการเสื่อมสภาพ นอกจากนั้นเตาบางชุดอาจหุ้มฉนวนในความหนาที่ไม่เหมาะสมจึงเกิดการสูญเสียความร้อนมาก จึงมีแนวคิดที่ จะทำการหุ้มฉนวนผนังเตาเพื่อลดการสูญเสียความร้อนซึ่งปัจจุบันอุณหภูมิผิวผนังเฉลี่ยประมาณ 105°C ซึ่ง หลังจากหุ้มฉนวนแล้วอุณหภูมิควรจะประมาณ 60°C



บริเวณผนัง
เตาที่จะทำ
การปรับปรุง



รูปผิวผนังก่อนหุ้มฉนวน

รูปผิวผนังหลังหุ้มฉนวน

2. สมการที่ใช้ในการวิเคราะห์

2.1 สมการที่ใช้ในการวิเคราะห์ทางเทคนิค

2.1.1 ค่าการถ่ายเทความร้อนของอากาศ ($W/m^2\text{ }^{\circ}C$)

$$h_c = 1.42 \times [(\text{อุณหภูมิพื้นผิวภายนอก } (^{\circ}C) - \text{อุณหภูมิอากาศแวดล้อม } (^{\circ}C)) / \text{ความสูงของผนังที่ ต้องการหุ้ม(m)}]^{0.25}$$

2.1.2 อัตราการสูญเสียความร้อนของผนังก่อนหุ้มฉนวน (W/m)

$$Q_{UNIN} = 1.42 \times [(\text{อุณหภูมิพื้นผิวผนังก่อนหุ้มฉนวน } (^{\circ}C) - \text{อุณหภูมิอากาศแวดล้อม } (^{\circ}C)) / \text{ความสูงของ ผนังที่ต้องการหุ้ม(m)}]^{0.25} \times (\text{อุณหภูมิพื้นผิวผนัง } (^{\circ}C) - \text{อุณหภูมิอากาศแวดล้อม } (^{\circ}C)) \times \text{พื้นที่ผิวผนังที่ ต้องการหุ้ม (m}^2) + 5.6697 \times 10^{-8} \times [(\text{อุณหภูมิผิวผนัง } (^{\circ}C) + 273)^4 - (\text{อุณหภูมิอากาศแวดล้อม } (^{\circ}C) + 273)^4] \times \text{ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของพื้นผิว} \times \text{พื้นที่ผิวที่ต้องการหุ้มฉนวน (m}^2)$$

2.1.3 อัตราการสูญเสียความร้อนหลังการหุ้มฉนวน (W/m)

$$Q_{INS} = (\text{อุณหภูมิพื้นผิวผนังก่อนหุ้มฉนวน } (^{\circ}C) - \text{อุณหภูมิอากาศแวดล้อม } (^{\circ}C)) / [(\text{ความหนาของ ฉนวนที่ใช้ (m)} / (\text{พื้นที่ผิวผนังที่ต้องการหุ้ม (m}^2) \times \text{ค่าการนำความร้อนของฉนวนที่ใช้ (W/m}^2\text{ }^{\circ}C)) + (1 / (\text{พื้นที่ผิวผนัง (m}^2) \times \text{ค่าการถ่ายเทความร้อนของอากาศหลังหุ้มฉนวน (W/m}^2\text{ }^{\circ}C))]$$

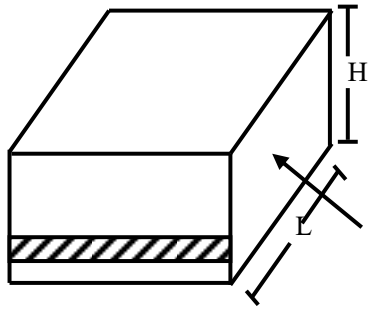
2.2 การวิเคราะห์การลงทุน

2.2.1 ระยะเวลาการคืนทุน (y)

$PB = \text{เงินลงทุนที่ใช้ในการหุ้มฉนวน (฿)} / \text{ค่าเชื้อเพลิงที่ลดลง (฿/y)}$

3. การวิเคราะห์ข้อมูล

ใช้โปรแกรม Excel ในการวิเคราะห์ข้อมูลโดยป้อนข้อมูลเบื้องต้นและข้อมูลตรวจวัดได้ในช่องสี่ฟ้า



ความสูงของผนัง m

อุณหภูมิผิวผนังก่อนหุ้ม °C

อุณหภูมิผิวผนังหลังหุ้ม °C

ความยาวของผนัง m

อุณหภูมิอากาศแวดล้อม °C

รายการ	สัญลักษณ์	หน่วย	ข้อมูล	แหล่งที่มา ของข้อมูล
1. ข้อมูลเบื้องต้น				
1.1 ชั่วโมงการใช้งานตลอดทั้งปี	h	h/y	5,000	
1.2 ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง (เชื้อเพลิงเหลว MJ/L, เชื้อเพลิงแข็ง MJ/kg, เชื้อเพลิงก๊าซ MJ/m ³)	LHV	MJ/L	39.77	
1.3 ราคาเชื้อเพลิงเฉลี่ยต่อหน่วย (เชื้อเพลิงเหลว ฿/L, เชื้อเพลิงแข็ง ฿/kg, เชื้อเพลิงก๊าซ ฿/m ³)	Fc	฿/L	14.00	
1.4 ตัวประกอบการใช้งาน	OF	%	80.00	
1.5 ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของพื้นผิว (ใช้ค่า 0.9)	ε		0.90	
1.6 ค่าการนำความร้อนของฉนวนที่ใช้	k _i	W/m ² °C	0.038	
1.7 ความหนาของฉนวนที่ใช้	t _i	m	0.025	
1.8 อุณหภูมิผิวนานหลังจากหุ้มที่ต้องการ	T _{WIN}	°C	60.00	
1.9 ประสิทธิภาพการเผาไหม้	η _C	%	80.00	
1.10 ราคาคำนวนความร้อน	C _{IN}	฿	4,000.00	
2. ข้อมูลตรวจวัด				
2.1 ความสูงของผนังที่ต้องการหุ้ม	H	m	1.20	
2.2 ความยาวของผนังที่ต้องการหุ้ม	Le	m	1.00	
2.3 อุณหภูมิผิวนอกผนังก่อนหุ้มฉนวน	T _w	°C	105.00	
2.4 อุณหภูมิอากาศแวดล้อม	T _a	°C	35.00	
3. การวิเคราะห์ทางเทคนิค				
3.1 พื้นที่ผิวผนังที่ต้องการหุ้มฉนวน $A = L \times H$	A	m ²	1.20	
3.2 ค่าการถ่ายเทความร้อนของอากาศก่อนหุ้มฉนวน $h_{CO} = 1.42 \times [(T_w - T_a)/H]^{0.25}$	h _{CO}	W/m ² °C	3.92	
3.3 อัตราการสูญเสียความร้อนของผนังก่อนหุ้มฉนวน $Q_{UNIN} = 1.42 \times [(T_w - T_a)/H]^{0.25} \times (T_w - T_a) \times A + 5.6697 \times 10^{-8} \times [(T_w + 273)^4 - (T_a + 273)^4] \times \epsilon \times A$	Q _{UNIN}	W	1,028.72	

รายการ	สัญลักษณ์	หน่วย	ข้อมูล	แหล่งที่มาของข้อมูล
3.4 ปริมาณความร้อนที่สูญเสียก่อนหุ้มฉนวน $Q_{LO} = (Q_{UNIN} / 1,000,000) \times 3600 \times h \times OF$	Q_{LO}	MJ/y	14,813.57	
3.5 ค่าการถ่ายเทความร้อนของอากาศหลังหุ้มฉนวน $h_{CN} = 1.42 \times [(T_{WIN} - T_a)/H]^{0.25}$	h_{CN}	W/m ² °C	3.03	
3.6 อัตราการสูญเสียหลังการหุ้มฉนวน $Q_{INS} = (T_w - T_a) / [(t_i / (A \times k_i)) + (1 / (A \times h_{CN}))]$	Q_{INS}	W	85.03	
3.7 อุณหภูมิผิวฉนวนหลังจากหุ้ม $T_{WINA} = T_w - (Q_{INS} \times (t_i / (A \times k_i)))$ * หาก T_{WINA} และ T_{WIN} ไม่เท่ากันให้กำหนด T_{WIN} ใหม่	T_{WINA}	°C	58.38	
3.8 ปริมาณความร้อนที่สูญเสียหลังจากหุ้มฉนวน $Q_{LN} = (Q_{INS} / 1000000) \times 3600 \times h \times OF$	Q_{LN}	MJ/y	1,224.43	
3.9 ปริมาณความร้อนสูญเสียลดลง $Q_S = Q_{LO} - Q_{LN}$	Q_S	MJ/y	13,589.14	
3.10 ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงลดลง $F_S = Q_S / (LHV \times (\eta_C / 100))$ (เชื้อเพลิงเหลว L/y ,เชื้อเพลิงแข็ง kg/y ,เชื้อเพลิงก๊าซ m ³ /y)	F_S	L/y	427.12	
3.11 ค่าเชื้อเพลิงลดลง $C_S = F_S \times F_C$	C_S	฿/y	5,979.68	
4 การวิเคราะห์การลงทุน				
4.1 ระยะเวลาการคืนทุน $PB = C_{IN} / C_S$	PB	y	0.67	
5. สรุปผลที่ได้จากการวิเคราะห์				
5.1 ปริมาณเชื้อเพลิงลดลง	FS	/y	427.12	
5.2 ค่าเชื้อเพลิงลดลง	CS	฿/y	5,979.68	
5.3 ระยะเวลาคืนทุน	PB	y	0.67	

3.8 กรณีศึกษา

กรณีศึกษาถือเป็นต้นแบบของมาตรการอนุรักษ์พลังงานที่ประสบผลสำเร็จในการอนุรักษ์พลังงานที่โรงงานสามารถนำไปประยุกต์ใช้ให้เกิดผลการอนุรักษ์พลังงานที่เป็นรูปธรรมต่อไป

กรณีศึกษาที่ 1: การลดขนาดช่องเปิดเตาเผาปลายกันโคลง	
1. ความเป็นมาและลักษณะการใช้งาน	
โรงงานผลิตชิ้นส่วนยานยนต์มีการใช้เตาเผาปลายกันโคลงเพื่อขึ้นรูปหุ่นแหวน โดยใช้อุณหภูมิภายในเตา 900 °C ใช้งาน 12 ชั่วโมง/วัน 300 วัน/ปี ใช้น้ำมันเตา C เป็นเชื้อเพลิงเตาดังกล่าวมีการสูญเสียพลังงานความร้อนทางช่องเปิดทางเข้ามาก	
2. ปัญหาของอุปกรณ์/ระบบก่อนปรับปรุง	
ทางเข้าปากเตาบริเวณที่ใส่ชิ้นงาน มีขนาดกว้างมากเกินไป (ขนาด 100 x 3500 mm) ขณะที่ชิ้นงานที่ต้องเผามีขนาด 7 x 70 mm รวมทั้งอิฐทนไฟและฉนวนเสื่อมสภาพทำให้มีความร้อนสูญเสียจากเตาสู่อากาศแวดล้อม	
3. แนวคิดและขั้นตอนการดำเนินงาน	
ทำการลดขนาดช่องเปิดจากขนาด 100 x 3,500 มิลลิเมตร เป็นขนาด 30 x 3,500 มิลลิเมตร และพร้อมทั้งเปลี่ยนอิฐทนไฟและฉนวนกันความร้อนใหม่	
4. สภาพก่อนปรับปรุง	
เตาเผามีช่องเปิดขนาด 100 x 3500 มิลลิเมตร คิดเป็นพื้นที่ 0.35 ตารางเมตร ความเร็วของอากาศที่เข้าเตาประมาณ 1 เมตรต่อวินาทีที่มีการใช้งานร้อยละ 70 ในเวลาหนึ่งปี	
	
รูปที่ 3.8-1 แสดงช่องเปิดเตาเผาปลายกันโคลงก่อนปรับปรุง	
5. สภาพหลังปรับปรุง	
ดำเนินการปรับปรุงโดยการลดขนาดช่องเปิดเป็น 30 x 3,500 mm คิดเป็นพื้นที่ 0.11 ตารางเมตร (ลดขนาดลง 70%) และทำการซ่อมอิฐทนไฟที่ชำรุดใหม่ ปรับปรุงปลอกปิดหัวเตา ติดตั้งใยแก้วกันความร้อนบริเวณปากเตา	



รูปที่ 3.8-2 แสดงช่องเปิดเตาเผาปลายกันโคลงหลังปรับปรุง

6. การวิเคราะห์ทางเทคนิค

พื้นที่เตาก่อนปรับปรุง	=	0.35	ตารางเมตร
พื้นที่เตาหลังปรับปรุง	=	0.11	ตารางเมตร
ความเร็วของอากาศที่เข้าเตา	=	1	m/s
อัตราการไหลของอากาศเข้าเตาที่ลดลง			
Q	=	AV	
	=	$(0.35 - 0.11) \times 1 \text{ m}^3/\text{s}$	
	=	0.24	m^3/s
	=	864	m^3/hr

ตารางที่ 3.8-1 อัตราการสูญเสียความร้อนผ่านช่องเปิดต่อลูกบาศก์เมตร ($\text{kJ}/\text{h}/\text{m}^3$)

อุณหภูมิก๊าซร้อนภายในเตา หรือผ่านช่องเปิด ($^{\circ}\text{C}$)	600	700	800	900	1,000	1,100	1,200	1,300	1,400
อัตราการสูญเสียความร้อน ($\text{kJ}/\text{h}/\text{m}^3$)	350.5	384.0	413.7	447.2	466.7	490.3	512.7	532.2	549.2
อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง น้ำมันเตาเกรดซี ($\text{L}/\text{h}/\text{m}^3$)	0.0092	0.0102	0.0108	0.0117	0.0122	0.0128	0.0134	0.0139	0.0144
ถ่านหินบิทูมินัส ($\text{kg}/\text{h}/\text{m}^3$)	0.0133	0.0146	0.0157	0.0170	0.0177	0.0186	0.0194	0.0202	0.0208
ก๊าซธรรมชาติ ($\text{Nm}^3/\text{h}/\text{m}^3$)	0.0096	0.0105	0.0113	0.0122	0.0127	0.0134	0.0140	0.0145	0.0150

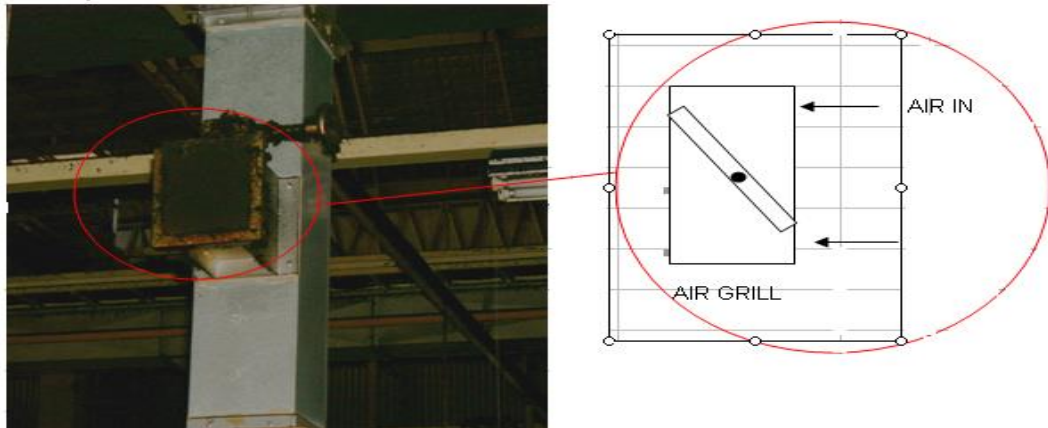
หมายเหตุ : พื้นที่หน้าตัดที่อากาศเย็นเข้าหรือก๊าซร้อนออกที่ 1 m^2 , อุณหภูมิอากาศแวดล้อม 35°C

จากตารางที่อุณหภูมิภายในเตา 900°C

จะได้อัตราสูญเสียความร้อน	=	447.2	$\text{kJ}/\text{h}/\text{m}^3$
อัตราการสูญเสียความร้อนต่อชั่วโมง	=	$(864 \text{ m}^3) \times (447.2 \text{ kJ}/\text{h}/\text{m}^3)$	
	=	386,381	kJ/hr

อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง	=	(386,381kJ/hr) / (41,300 kJ/L)
	=	9.36 L/hr
เมื่อปรับปรุงเตาจะประหยัดเชื้อเพลิงได้	=	น้ำมันเตา (L/hr) x ชม.ทำงาน x วันทำงานต่อปี x เปอร์เซ็นต์การเดินเตา
	=	9.36 x 12 x 300 x 0.7
	=	23,587 ลิตร/ปี
	=	23,587 x 11.7 บาท/ปี
	=	275,968 บาท/ปี
7.การวิเคราะห์ผลตอบแทนการลงทุน		
ค่าใช้จ่ายในการปรับปรุง	=	300,000 บาท
ระยะเวลาคืนทุน	=	300,000/275,968
	=	1.09 ปี

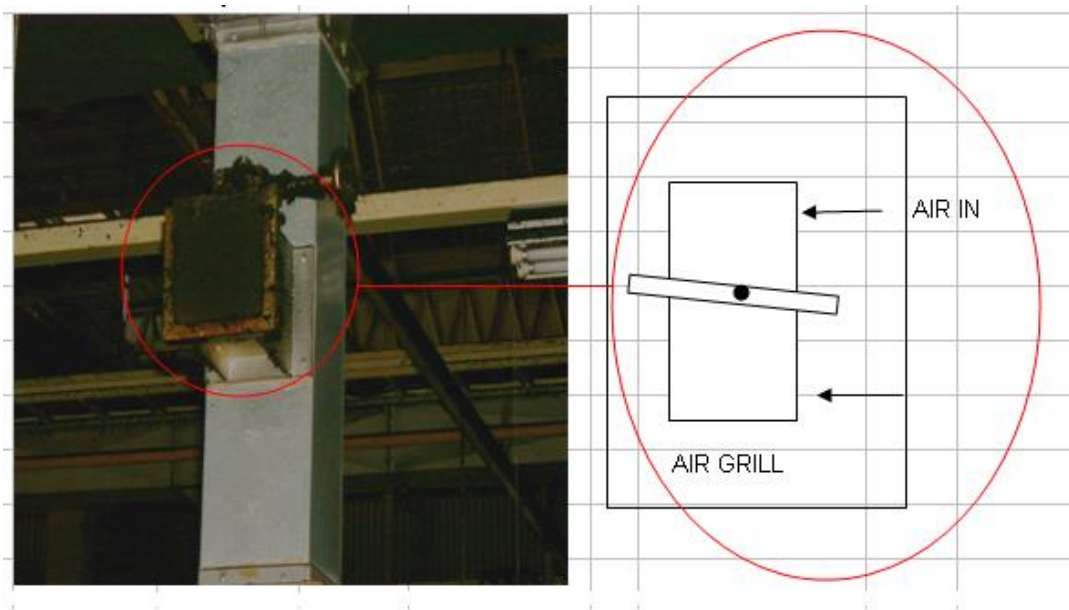
กรณีศึกษาที่ 2: การปรับปรุง Blower ดูดอากาศของ Gas Burner ให้เผาไหม้ได้ดีขึ้น	
1. ความเป็นมาและลักษณะการใช้งาน	
สถานประกอบการใช้ก๊าซ LPG เผาไหม้ให้ได้อุณหภูมิในการอบย่างที่ 330 °C โดยอากาศที่เข้าเผาไหม้มีการควบคุมโดยใช้แฉลมเปอร์ ซึ่งเปิดไว้ที่ร้อยละ 80 ส่งผลให้ต้องใช้เชื้อเพลิงมาก จากการสำรวจภายในโรงงานผลิตชิ้นส่วนรถยนต์แห่งหนึ่ง พบว่ามีการใช้ลมความร้อนจากแก๊สในกระบวนการอบย่าง ซึ่งลักษณะการเผาไหม้มีการดูดอากาศจากด้านนอกเข้ามาใช้ในการเผาไหม้ผ่านทางช่องแฉลมเปอร์แต่สภาพปัจจุบันพบว่าการเปิดช่องแฉลมเปอร์ไว้ค่อนข้างมาก ทำให้สิ้นเปลืองแก๊สในการเผาไหม้เพราะความร้อนโดนดูดออกไปทางช่องไอเสียหมด	
2. ปัญหาของอุปกรณ์/ระบบก่อนปรับปรุง	
ปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้มากเกินไปส่งผลให้เกิดการสูญเสียทางปล่องไอเสียมากและประสิทธิภาพในการอบลดต่ำลง	
3. แนวคิดและขั้นตอนการดำเนินงาน	
ทำการปรับลดปริมาณอากาศลงโดยการปรับแฉลมเปอร์และทำการบันทึกปริมาณการใช้เชื้อเพลิง และอุณหภูมิในเตาอบย่าง	
4. สภาพก่อนปรับปรุง	
เปิดแฉลมเปอร์ที่ 10 % มีการใช้เชื้อเพลิง 115.79 กิโลกรัม/วัน และอุณหภูมิในการอบย่าง 330-335 °C	



รูปที่ 3.8-3 แสดงแดมเปอร์ช่องดูดอากาศที่ 10 %

5. สภาพหลังปรับปรุง

หลังจากทำการปรับช่องแดมเปอร์ไว้ที่ 80 % มีการใช้เชื้อเพลิง 79.09 กิโลกรัม/วัน และอุณหภูมิในการอบยาง 275-300 °C โดยไม่ส่งผลเสียต่อคุณภาพของผลผลิต



รูปที่ 3.8-4 แสดงการปรับแดมเปอร์ช่องดูดอากาศที่ 80 %

6. การวิเคราะห์ทางเทคนิค

จำนวนวันทำงาน =	300	วัน/ปี
ผลประหยัดเชื้อเพลิง	= การใช้เชื้อเพลิงก่อนปรับปรุง – การใช้เชื้อเพลิงหลังปรับปรุง	
	= (115.79 – 79.09) x 300	
	= 11,010	กิโลกรัม/ปี
ราคาเชื้อเพลิง	= 13.53	บาท/กิโลกรัม
ผลประหยัด	= 11,010 x 13.53	
	= 148,965.30	บาท/ปี

7.การวิเคราะห์ผลตอบแทนการลงทุน			
เงินลงทุน	=	ดำเนินการเอง	บาท
ประหยัดค่าเชื้อเพลิง	=	148,965.30	บาท/ปี

กรณีศึกษาที่ 3: การปรับปรุงประสิทธิภาพการเผาไหม้ในการเผาเซรามิก

1. ความเป็นมาและลักษณะการใช้งาน

สถานประกอบการใช้ก๊าซ LPG เผาไหม้ให้ความร้อนในเตาเผาเซรามิกที่อุณหภูมิ 1,250°C โดยใช้ก๊าซ LPG ประมาณ 407,438 กิโลกรัมต่อปี คิดเป็นมูลค่าประมาณ 6,069,130 บาทต่อปี มีการผลิต 24 ชั่วโมงต่อวัน จำนวน 340 วันต่อปี เตาเผามีการสูญเสียพลังงานความร้อนทางปล่องไอเสียสูงส่งผลให้สิ้นเปลืองเชื้อเพลิงมาก

2. ปัญหาของอุปกรณ์/ระบบก่อนปรับปรุง

การปรับสัดส่วนการใช้อากาศและเชื้อเพลิง (Air-Fuel Ratio) ที่ไม่เหมาะสมส่งผลให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ต่ำ และปริมาณอากาศที่มากเกินไปจนจะพาความร้อนออกจากเตาเผาทางปล่องไอเสียเพิ่มขึ้น โดยทั่วไปการเผาไหม้เชื้อเพลิงแก๊ส ต้องใช้ออกซิเจนส่วนเกินต่ำกว่า 2% โดยมีปริมาณคาร์บอนมอนนอกไซด์ไม่เกิน 200 ppm

3. แนวคิดและขั้นตอนการดำเนินงาน

ทำการตรวจวัดปริมาณออกซิเจนส่วนเกิน ปริมาณคาร์บอนมอนนอกไซด์และประสิทธิภาพการเผาไหม้ ในตำแหน่งที่ไอเสียออกจากห้องเผาไหม้ในขณะที่ภาระสูงสุดแล้วทำการปรับลดปริมาณอากาศเข้าเผาไหม้ให้เหมาะสม



รูปที่ 3.8-5 แสดงเครื่องมือวัดการเผาไหม้และการใช้งาน

4. สภาพก่อนปรับปรุง

จากการตรวจวัดไอเสียพบว่าปริมาณออกซิเจน 4.1 % อุณหภูมิไอเสีย 462 °C และประสิทธิภาพการเผาไหม้ 70.0 % ซึ่งปริมาณออกซิเจนส่วนเกินสูงเกินเกณฑ์สำหรับเชื้อเพลิงก๊าซ



รูปที่ 3.8-6 แสดงเตาเผาเซรามิก 1,250 °C

5. สภาพหลังปรับปรุง

หลังจากปรับลดปริมาณอากาศเข้าเผาไหม้ลง โดยมีปริมาณออกซิเจน 3.0 % อุณหภูมิไอเสีย 462 °C และประสิทธิภาพการเผาไหม้ 72.0 % ซึ่งประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงขึ้นกว่าเดิม 2 % ส่งผลให้สามารถลดการใช้เชื้อเพลิงได้

ตารางที่ 3.8-2 ข้อมูลตรวจวัดของเตาเผาเซรามิก ก่อนและหลังปรับปรุง

ผลการวิเคราะห์ประเมิน		ก่อนการปรับปรุง	หลังการปรับปรุง
Flue gas temperature	C	462	462
O ₂ content	%	4.1	3.0
Excess air	%	23	15
ความร้อนสูญเสีย	%	30	28
ประสิทธิภาพการเผาไหม้	%	70	72

6. การวิเคราะห์ทางเทคนิค

$$\begin{aligned}
 \text{ร้อยละของก๊าซ LPG ที่ใช้} &= ((\text{ประสิทธิภาพหลังปรับปรุง} - \text{ประสิทธิภาพ} \\
 &\quad \text{หลังปรับปรุง}) / \text{ประสิทธิภาพหลังปรับปรุง}) \times 100 \% \\
 &= ((72.0 - 70.0) / 72.0) \times 100 \\
 &= 2.78 \%
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{คิดเป็นปริมาณก๊าซ LPG ที่ใช้ลดลง} &= 407,438 \times 0.0278 \\
 &= 11,327 \text{ kg/ปี}
 \end{aligned}$$

คิดเป็นเงิน	=	11,327 x 14.90
	=	168,722 บาท/ปี
7.การวิเคราะห์ผลตอบแทนการลงทุน		
ค่าตรวจวิเคราะห์	=	50,000 บาท
ค่าใช้จ่ายก๊าซ LPG ที่ประหยัดได้	=	168,722 บาท/ปี
ระยะเวลาคืนทุน	=	0.30 ปี

กรณีศึกษาที่ 4 : การทำฝาครอบเตาหลอม

1. ความเป็นมาและลักษณะการใช้งาน

สถานประกอบการผลิตอลูมิเนียม ในส่วนของโรงหลอมอลูมิเนียมจะมีการใช้เตาหลอมในการหลอมอลูมิเนียม 342 วันต่อปี โดยใช้เชื้อเพลิงแก๊ส LPG เป็นเชื้อเพลิง



รูป 3.8-7 เตาหลอมที่ใช้ในการหลอมอลูมิเนียมภายในโรงงาน

2. ปัญหาของอุปกรณ์/ระบบก่อนปรับปรุง

จากการสำรวจของทีมอนุรักษ์พลังงานพบว่าการหลอมอลูมิเนียมในช่วงแรกจะมีการใส่อลูมิเนียมที่เป็นวัตถุดิบลงในบ่อหลอม เมื่ออลูมิเนียมได้รับความร้อนก็จะกลายเป็นของเหลว จากการสำรวจพบว่า เตาอลูมิเนียม C-Furness, และ เตาอลูมิเนียม M-Furness เมื่อมีการหลอมตัวของน้ำอลูมิเนียมแล้ว ไม่มีการปิดบ่อทำให้ความร้อนส่วนนี้จะสูญเสียไปโดยการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อม จะทำให้ทางโรงงานสูญเสียเชื้อเพลิงที่เป็นแหล่งกำเนิดความร้อนไปโดยเปล่าประโยชน์ ซึ่งจากการตรวจวัดพบว่าอุณหภูมิของอลูมิเนียมเหลว มีอุณหภูมิ 760 °C ขนาดปากบ่อของ C-Furness มีขนาดเท่ากับ 5.5 m² และ ขนาดปากบ่อของ M-Furness มีขนาดเท่ากับ 7.56 m²



รูปที่ 3.8-8 น้ำอลูมิเนียมหลังจากหลอมเหลวแล้ว

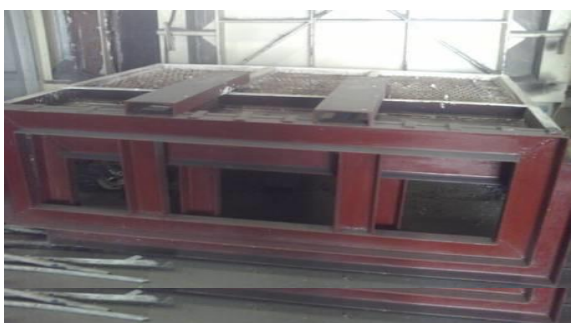
จากรูปจะเห็นได้ว่าปากบ่อของเตาหลอมอลูมิเนียมหลังจากอลูมิเนียมหลอมเหลวแล้วไม่มีการปิดจะทำให้ความร้อนส่วนหนึ่งสูญเสียไปโดยเปล่าประโยชน์

3. แนวคิดและขั้นตอนการดำเนินงาน

ทำการปรับปรุงโดยทำฝาครอบปากบ่อของเตาหลอมอลูมิเนียมโดยมอบหมายให้แผนกซ่อมบำรุงเป็นผู้รับผิดชอบ



รูปที่ 3.8-9 ขณะทำการปรับปรุงปากเตาหลอม



รูปที่ 3.8-10 ฝาครอบปากเตาหลอมที่ทำเสร็จแล้ว



รูปที่ 3.8-11 หลังจากทำการปิดฝาครอบเตาหลอมแล้ว

4. สภาพหลังปรับปรุง

หลังปรับปรุงพบว่าโรงงานอุณหภูมิมิบริเวณปากเตาหลอมลดลง ซึ่งขณะนี้ทางโรงงานกำลังเก็บข้อมูลผล
ประหยัดแก๊ส LPG จากการทำการอยู่โดยวัดจากมิเตอร์แก๊สภายในโรงงาน



รูปที่ 3.8-12 มิเตอร์แก๊สที่ทางโรงงานใช้ในการเก็บข้อมูล

กรณีศึกษาที่ 5 : การลดเวลาการเปิด-ปิด ระบบประตูดเตาเผา

1. ความเป็นมาและลักษณะการใช้งาน

สถานประกอบการผลิต ผลิตภัณฑ์จากเหล็ก ประเภทเหล็กแผ่น ในส่วนผลิตของทางโรงงานจะทำการผลิต 24 ชั่วโมง
ต่อวัน 298 วันต่อปี ในส่วนของระบบเตาเผาเหล็ก มีขั้นตอนการนำ SLAB ออกจากเตาเผา โดยมีขั้นตอนการเปิด-ปิด
ประตูดเตาเผาเหล็กแบบอัตโนมัติ ซึ่งระยะเวลาในการปิดประตูขึ้นอยู่กับตำแหน่งตัว SENSOR การสูญเสียพลังงาน
ความร้อนจะแปรผันตามระยะเวลาการ เปิด-ปิด ประตูเตาเผา โดยเตาเผา 1 ชุด มีประตูเตาเผาจำนวน 2 ประตู



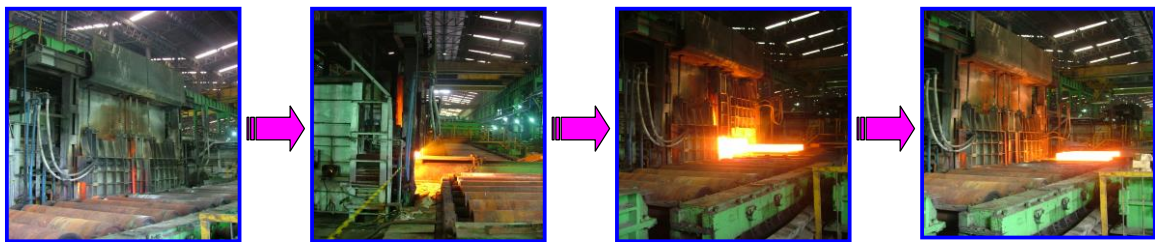
รูปที่ 3.8-13 เตาเผาเหล็กของทางโรงงาน

2. ปัญหาของอุปกรณ์/ระบบก่อนปรับปรุง

จากการสำรวจของทีมอนุรักษ์พลังงานพบว่าจำนวนของ SENSOR ในการเปิดปิดประตูมีจำนวนน้อย ทำให้การทำงานในการเปิดปิดประตูเตาเผาล่าช้า ซึ่งจะทำให้ความร้อนส่วนหนึ่งสามารถออกจากเตาเผาไปสู่สิ่งแวดล้อมได้ทำให้ทางโรงงานสูญเสียพลังงานความร้อนไปโดยเปล่าประโยชน์

3. แนวคิดและขั้นตอนการดำเนินงาน

ทำการปรับปรุงโดย ปรับลดเวลาในการเปิด-ปิด ประตูเตาเผา โดยทำการติดตั้งเพิ่มตำแหน่งตัว SENSOR ซึ่งจะทำให้ระยะการทำงานของตัว SENSOR เร็วขึ้น จึงส่งผลทำให้เวลาในการปิดประตูเร็วขึ้น ซึ่งมีผลทำให้การสูญเสียพลังงานความร้อนของเตาเผาจะลดลงด้วย



แสดงขั้นตอนการเปิด - ปิด ประตูเตาเผา

รูปที่ 3.8-14 แสดงขั้นตอนการเปิด-ปิด ประตูของเตาเผาหลัก

4. สภาพหลังปรับปรุง

หลังปรับปรุงพบว่าสามารถลดเวลาในการปิดประตูของเตาเผาได้ โดยคิดเป็นพลังงานความร้อนที่สามารถลดลงได้ 400,848 MJ/y

5. การวิเคราะห์ทางเทคนิค

โรงงานใช้น้ำมันเตา C เป็นเชื้อเพลิงค่าความร้อนเท่ากับ 39.77 MJ/ลิตร

ราคาน้ำมันเตาเฉลี่ยลิตรละ 19.63 บาทต่อลิตร

เวลาในการเปิดประตูเตาก่อนปรับปรุง 58 วินาที

เวลาในการเปิดประตูเตาหลังปรับปรุง 50 วินาที

อุณหภูมิภายในเตาเผา 1,250 เซลเซียส

ใน 1 ชั่วโมงจะทำการเปิด-ปิด ประตูจำนวน 15 Cycles

การคำนวณสูญเสียความร้อนเนื่องจากการแผ่รังสี จากการเปิดปิดเตา

ปริมาณการแผ่รังสีของ Black Body = $4.88((273.15+t)/100)^4$ kcal/m²hr อุณหภูมิหน่วยเป็น C

จากกราฟสัมประสิทธิ์สำหรับเปรียบเทียบ (รูป 2-7 หน้า 47 หนังสือ "คู่มือการประหยัดพลังงานในโรงงานอุตสาหกรรม" ลักษณะของช่องเปิดของเตาเผาเป็น ปากเปิดที่แคบและยาว

ความกว้างของช่องเปิด (D)	0.75 เมตร	
ความหนาของผนัง (X)	0.25 เมตร	
อัตราส่วน D/X =	3	
จากกราฟสัมประสิทธิ์สำหรับเปรียบเทียบ ได้ค่าสัมประสิทธิ์เปรียบเทียบ =	0.85	
อุณหภูมิในเตาเผา =	1250	C
ความยาวของช่องเปิด	2.4	เมตร
เวลาในการเปิดประตูเตาก่อนปรับปรุง	58	วินาที
เวลาในการเปิดประตูเตาหลังปรับปรุง	50	วินาที
ปริมาณความร้อนสูญเสีย =	223,259	kcal/m ² hr
ปริมาณความร้อนสูญเสียผ่านช่องประตู =	401,867	kcal/hr
ปริมาณความร้อนสูญเสียผ่านช่องประตู =	111.63	kcal/sec
ลดเวลาเปิดเตา	8	วินาทีต่อ Cycle
	893.04	kcal/Cycle
1 kcal = 0.004184 MJ	3.74	MJ/Cycle
เตาเผา 1เตามี 2 ประตู		
1 ชม เปิด - ปิด	15	Cycle
1 วัน Operate	24	ชม
1 ปี Operate	298	วัน
ความร้อนที่ลดการสูญเสียได้	400,848	MJ/ปี
ความร้อนที่ลดการสูญเสียได้	66,808	MJ/เดือน
Heating Value น้ำมันเตา	39.77	MJ/liter
น้ำมันเตาที่ประหยัดได้	0.09	liter/Cycle
น้ำมันเตาที่ประหยัดได้	10,079.16	liter/ปี
น้ำมันเตาที่ประหยัดได้	1,679.86	liter/เดือน
ราคาน้ำมันเตา	19.63	Baht/liter
ประหยัดได้	1.84	Baht/Cycle
ประหยัดได้	197,854	บาท/ปี

จากการคำนวณพบว่าโรงงานสามารถลดการสูญเสียพลังงานความร้อนได้ = 400,848 MJ/ปี

คิดเป็นน้ำมันเตาที่สามารถประหยัดได้	=	400,848/39.77	ลิตร/ปี
	=	10,079.16	ลิตร/ปี
คิดเป็นค่าเชื้อเพลิงที่ประหยัด	=	10,079.16x 19.63	บาท/ปี
	=	197,850.77	บาท/ปี
6.การวิเคราะห์ผลตอบแทนการลงทุน			
เงินลงทุน	=	50,000	บาท
ผลการประหยัด	=	197,850.77	บาท/ปี
ระยะเวลาคืนทุน	=	50,000/197,850.77	ปี
	=	0.252	ปี

กรณีศึกษาที่ 6: การลดระยะความสูงของช่องเปิดที่ฝาเตาหลอมเพื่อลดการสูญเสียความร้อน	
1. ความเป็นมาและลักษณะการใช้งาน	
ทางโรงงานใช้เตาไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำในการหลอมเหล็ก โดยที่เตาแต่ละชุดจะมีฝาปิดเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนจากการแผ่รังสีความร้อน (ทั้งเตาหลอมและเตา Hold)	
2. ปัญหาของอุปกรณ์/ระบบก่อนปรับปรุง	
ฝาเตาที่ปิดอยู่เดิมมีระยะความสูงจากปากเตามากเกินไป เนื่องมาจากการติดตั้งที่ไม่เหมาะสมและผลกระทบจากการใช้งานในแต่ละวัน ทำให้มีพื้นที่การสูญเสียความร้อนมากกว่าปกติ	
	
รูปที่ 3.8-15 สภาพการใช้งานฝาเตาหลอม (ก่อนปรับปรุง)	
3. แนวคิดและขั้นตอนการดำเนินงาน	
- ดำเนินการปรับลดระยะความสูงของฝาเตาจากความสูงเดิมประมาณ 10-20 cm. ลงมาเหลือ 3-4 cm. พร้อมกับปรับ Alignment ใหม่ให้ฝาเตาอยู่ในแนวขนานกับปากเตาและปิดพื้นที่ปากเตาให้ได้มากที่สุด - วัดค่าอุณหภูมิที่บริเวณปากเตา และขนาดของพื้นที่สูญเสียความร้อนที่ลดลงได้ - คำนวณผลการประหยัดพลังงานไฟฟ้าเทียบเท่าจากปริมาณความร้อนสูญเสียที่ลดลงได้	

4. สภาพหลังปรับปรุง

ภายหลังการดำเนินการแล้วเสร็จ ทางทีมงานด้านพลังงานพบว่าสามารถลดอุณหภูมิใช้งานของเตาหลอมขนาด 3,500 kW จำนวน 2 ชุด (Line M5) ลงได้จาก 1,560°C เหลือ 1,540°C โดยไม่มีผลกระทบต่อคุณภาพการหล่อเหล็กแต่อย่างใด



รูปที่ 3.8-16 สภาพการใช้งานเตาหลอม (หลังปรับปรุง)

5. การวิเคราะห์ทางเทคนิค

Furnace No.	ตัวแปร	หน่วย	No.1	No.2	Hold	No.1	Hold
Line Name			M5	M5	M5	M10	M10
ขนาดพื้นที่สูญเสียความร้อนที่ลดลง	A	ตร.ม.	0.207	0.207	0.173	0.207	0.207
อุณหภูมิผิวถ่ายเทความร้อน (หน้าปากเตา)	Ts	°C	1,240	1,170	1,280	1,150	1,290
อุณหภูมิอ้างอิง	Tr	°C	35	35	35	35	35
ค่า Emissivity	e	-	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
ปริมาณความร้อนสูญเสียจากการแผ่รังสี	Q	kW	18.43	15.24	17.10	14.41	20.99
Operating Hour	H	ชั่วโมง/ปี	5,600	5,600	5,600	5,600	5,600
%Safety Factor	%SF	%	70	70	70	70	70
พลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้	E	kWh/ปี	72,246	59,741	67,032	56,487	82,281
		ktoe/ปี	0.0062	0.0051	0.0057	0.0048	0.0070

Furnace No.	ตัวแปร	หน่วย	No.1	No.2	B	C	Hold
Line Name			M11	M11	M9	M9	M9
ขนาดพื้นที่สูญเสียความร้อนที่ลดลง	A	ตร.ม.	0.242	0.242	0.726	0.207	0.761
อุณหภูมิผิวถ่ายเทความร้อน (หน้าปากเตา)	Ts	°C	1,260	1,245	1,160	1,200	1,320
อุณหภูมิอ้างอิง	Tr	°C	35	35	35	35	35
ค่า Emissivity	e	-	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
ปริมาณความร้อนสูญเสียจากการแผ่รังสี	Q	kW	22.71	21.83	51.99	16.55	83.27
Operating Hour	H	ชั่วโมง/ปี	5,600	5,600	5,600	5,600	5,600
%Safety Factor	%SF	%	70	70	70	70	70
พลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้	E	kWh/ปี	89,023	85,574	203,801	64,876	326,418
		ktoe/ปี	0.0076	0.0073	0.0174	0.0055	0.0278

หมายเหตุ : สูตรการคำนวณ $Q = 5.67 \times 10^{-8} \times e \times A \times ((Ts + 273.15)^4 - (Tr + 273.15)^4) / 1,000$

$$E = Q \times H \times \%SF$$

พลังงานไฟฟ้ารวมที่ประหยัดได้ = 1,107,479 kWh/ปี

คิดเทียบเป็นน้ำมันดิบได้ = 0.0944 ktoe/ปี

คิดเป็นค่าใช้จ่ายที่ประหยัดได้ = 1,107,479 kWh/ปี x 2.71 บาท/kWh

= 3,001,268 บาท/ปี

กรณีศึกษาที่ 7 : ฝอยร้วของผนังเตาเผาปลายกันโคลง

1. ความเป็นมาและลักษณะการใช้งาน

โรงงานผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ มีการใช้เชื้อเพลิงก๊าซ LPG ในกระบวนการผลิต จากการสำรวจพบว่าบริเวณผนังเตาเผาปลายกันโคลงมี ความร้อนสูญเสียจากเตาตู้ตั้งแวดล้อม มีพื้นที่รอยร้วขนาด 15 cm x 30 cm

2. ปัญหาของอุปกรณ์/ระบบก่อนปรับปรุง

รอยร้วจากผนังเตาจะทำให้มีการสูญเสียความร้อนจากเตาออกสู่อากาศภายนอก ทำให้สิ้นเปลืองเชื้อเพลิง



3. แนวคิดและขั้นตอนการดำเนินงาน

ซ่อมแซมรอยร้วของช่องเปิดเตาจะช่วยลดการสูญเสียความร้อนจากเตาออกสู่อากาศแวดล้อมได้

4. สภาพหลังปรับปรุง

ทำการติดตั้งฉนวนปิดช่องเปิดเตา ราคา 54,891 บาท



5. การวิเคราะห์ทางเทคนิค

รายการ	หน่วย	ตัวย่อ	ปริมาณ
ข้อมูล			
ปริมาณการใช้เชื้อเพลิง	kg/hr	F	27
ราคาเชื้อเพลิงต่อหน่วย	฿/kg	฿f	14.42
ความหนาแน่นอากาศที่อุณหภูมิเฉลี่ย	kg/m ³	r	0.847
พื้นที่หน้าตัดของช่องเปิด	m ²	A	0.09
ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศที่อุณหภูมิเฉลี่ย	kJ/kg.C	Cp	1.084
อุณหภูมิของอากาศในเตา	C	T ₁	900
อุณหภูมิของอากาศสิ่งแวดล้อม	C	T ₂	40
ค่าความร้อนเชื้อเพลิง	MJ/kg	LHV	50.22
ชั่วโมงการทำงาน	hr	h	16
วันทำงาน	day	d	25
% การปฏิบัติงาน	%	%	0.60
การคำนวณ			
Spec เตา = F . LHV . 1000	kJ/hr	spec	1,355,940
ค่าความเร็วอากาศเข้า / ออก เตา	m/s	V	2
ปริมาตรการไหล	m ³	Q ₁	0.18
Q table	kJ/hr/m ³	Q _t	447.20
Q estimate	kJ/hr	Q _e	80.50
อัตราการไหลของอากาศร้อนที่เข้า / ออก เตา	kg/s	m	0.15
$m = r.A.V$			
อัตราการสูญเสียความร้อน	kJ/s	Q	289,800
$Q = Q_e . 3600$			
สูญเสียเชื้อเพลิงลดลง	kg/month	F ₁	1,384.95
$F_1 = Q . h . d / (LHV . 1000)$			
สูญเสียเชื้อเพลิงลดลง	kg/year	FI _T	16,619.4
จำนวนเงินที่ประหยัดได้	฿/year	฿I _T	239,651

ตารางที่ 1 อัตราการสูญเสียความร้อนผ่านช่องเปิดต่อตารางเมตร (MJ/h/m²)

ความดันภายในเตา (mm H ₂ O)	อุณหภูมิก๊าซร้อนภายในเตา (°C)								
	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400
1.0	2,498.1	2,737.3	2,949.1	3,152.0	3,326.3	3,494.5	3,654.4	3,793.3	3,914.6
2.0	3,583.2	3,926.3	4,230.0	4,521.0	4,771.1	5,012.3	5,241.7	5,440.9	5,614.9
3.0	4,605.1	5,046.1	5,436.4	5,810.5	6,131.9	6,441.9	6,736.7	6,992.7	7,216.3
4.0	5,551.4	6,082.9	6,553.5	7,004.4	7,391.8	7,765.6	8,120.9	8,429.6	8,699.1
5.0	6,447.2	7,064.5	7,611.0	8,134.6	8,584.6	9,018.7	9,431.3	9,789.8	10,102.9
6.0	7,267.3	7,963.1	8,579.1	9,169.4	9,676.6	10,165.9	10,631.0	11,035.1	11,387.9
7.0	8,024.3	8,792.6	9,472.8	10,124.5	10,684.5	11,224.8	11,738.4	12,184.6	12,574.2
8.0	8,705.6	9,539.2	10,277.1	10,984.1	11,591.7	12,177.9	12,735.0	13,219.1	13,641.8
9.0	9,336.4	10,230.4	11,021.8	11,780.1	12,431.7	13,060.3	13,657.9	14,177.0	14,630.4
10.0	9,891.5	10,838.7	11,677.2	12,480.5	13,170.9	13,836.9	14,470.0	15,020.0	15,500.3
11.0	10,371.0	11,364.1	12,243.1	13,085.5	13,809.3	14,507.6	15,171.3	15,748.0	16,251.6
12.0	10,800.0	11,834.1	12,749.6	13,626.7	14,380.5	15,107.6	15,798.8	16,399.4	16,923.8

หมายเหตุ : พื้นที่หน้าตัดที่อากาศเย็นเข้าหรือก๊าซร้อนออกที่ 1 m², อุณหภูมิอากาศแวดล้อม 35 °C
 , ใช้คุณสมบัติอากาศที่อุณหภูมิเฉลี่ย

ตารางที่ 2 อัตราการสูญเสียความร้อนผ่านช่องเปิดต่อก๊าซปริมาตร (kJ/h/m³)

อุณหภูมิก๊าซร้อนภายในเตา หรือผ่านช่องเปิด (°C)	600	700	800	900	1,000	1,100	1,200	1,300	1,400
อัตราการสูญเสียความร้อน (kJ/h/m ³)	350.5	384.0	413.7	447.2	466.7	490.3	512.7	532.2	549.2
อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง น้ำมันเตาเกรดซี (L/h/m ³)	0.0092	0.0102	0.0108	0.0117	0.0122	0.0128	0.0134	0.0139	0.0144
กำหนัสน้ำมัน (kg/h/m ³)	0.0133	0.0146	0.0157	0.0170	0.0177	0.0186	0.0194	0.0202	0.0208
ก๊าซธรรมชาติ (Nm ³ /h/m ³)	0.0096	0.0105	0.0113	0.0122	0.0127	0.0134	0.0140	0.0145	0.0150

หมายเหตุ : พื้นที่หน้าตัดที่อากาศเย็นเข้าหรือก๊าซร้อนออกที่ 1 m², อุณหภูมิอากาศแวดล้อม 35 °C
 , ใช้คุณสมบัติอากาศที่อุณหภูมิเฉลี่ย

6.การวิเคราะห์ผลตอบแทนการลงทุน

เงินลงทุน	54,891	บาท
เชื้อเพลิงที่ประหยัดได้	16,619	kg/ปี
ผลการประหยัด	239,651	บาท/ปี
ระยะเวลากินทุน	0.23	ปี

3.9 เทคโนโลยีการอนุรักษ์พลังงาน

เทคโนโลยีการอนุรักษ์พลังงานถือเป็นการเทคนิคการปรับปรุงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานของโรงงานให้สูงขึ้นและทันสมัย

3.9.1 เทคโนโลยีหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ(Regenerative Burner)

1. หลักการทำงานของเทคโนโลยี ⁽¹⁾⁽⁹⁾

หัวเผาเริเจนเนอเรทีฟ คือ อะไร

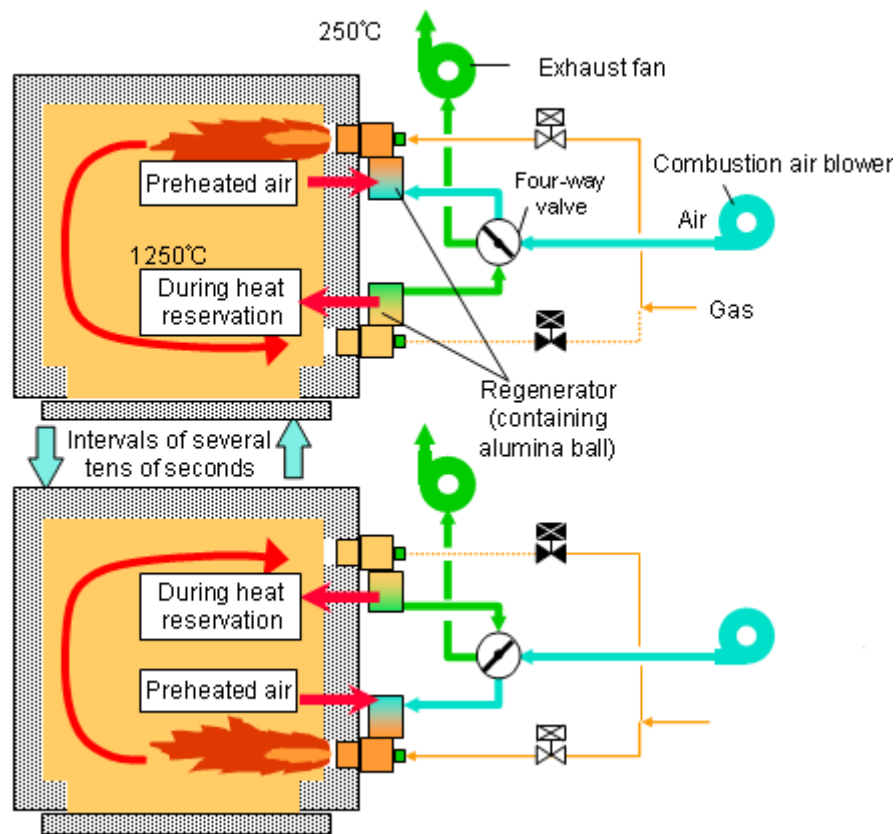
หัวเผาเริเจนเนอเรทีฟ คือ หัวเผาที่ออกแบบมาเพื่อให้มีการนำเอาความร้อนทิ้งกลับมาใช้ให้ได้มากที่สุด ซึ่งก๊าซไอเสียจะนำมาเก็บสะสมความร้อนที่ห้องสะสมความร้อน การสะสมความร้อนสามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพเนื่องจากห้องกักเก็บก๊าซไอเสียถูกออกแบบให้ใช้วัสดุที่สะสมความร้อนได้สูงมาก อากาศเย็นที่จะใช้ในการเผาไหม้จะแลกเปลี่ยนความร้อนจากห้องกักเก็บ ไอเสียทำให้อากาศที่จะใช้เผาไหม้มีอุณหภูมิสูงได้ใกล้เคียงกับอุณหภูมิใช้งาน ทำให้สามารถประหยัดเชื้อเพลิงได้มากและประสิทธิภาพการเผาไหม้ดีขึ้น



รูปที่ 3.9-1 แสดงรูปของหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ

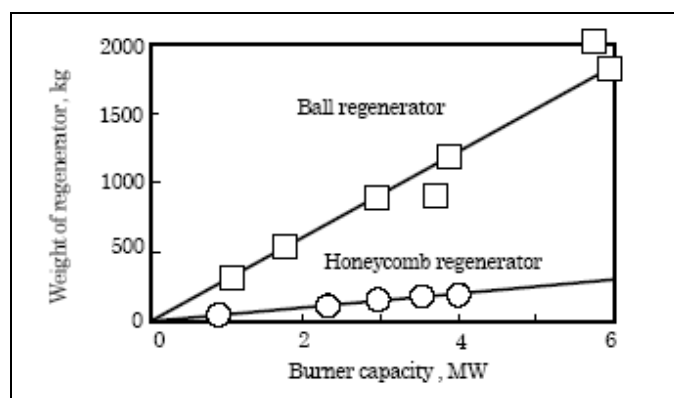
การแลกเปลี่ยนความร้อนในหัวเผาเริเจนเนอเรทีฟ

หลักการสำคัญที่ทำให้หัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟประหยัดเชื้อเพลิงได้ นั่นคือการเพิ่มอุณหภูมิให้กับอากาศเย็นที่จะใช้เผาไหม้ ซึ่งชุดหัวเผาเริเจนเนอเรทีฟประกอบด้วยหัวเผาและรีเจนเนอเรเตอร์ อย่างละ 2 ชุด และวาล์วสลับทิศทางอีก 1 ชุด หลักการทำงานคือ หัวเผาชุดที่ 1 ทำงาน อากาศจากภายนอกถูกป้อนเข้าที่รีเจนเนอเรเตอร์ชุดที่ 1 ในขณะเดียวกันก๊าซไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้จะผ่านออกไปทางหัวเผาชุดที่ 2 และไปเก็บสะสมความร้อนที่รีเจนเนอเรเตอร์ชุดที่ 2 เมื่อวาล์วสลับทิศทางไหลของอากาศที่ป้อนเข้า อากาศก็จะถูกอุ่นโดยความร้อนที่สะสมในรีเจนเนอเรเตอร์ก่อนที่จะถึงหัวเผาทำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น การเผาไหม้ที่หัวเผาชุดที่ 2 ก็จะประหยัดเชื้อเพลิงได้ การสลับทิศทางของวาล์วจะสลับทุกๆ 10-60 วินาที ขึ้นกับการออกแบบ ดังนั้นหัวเผาชุดที่ 1 และ 2 จะได้รับการอุ่นอากาศก่อนการเผาไหม้ตลอดเวลา สำหรับก๊าซร้อนที่ถูกใช้ให้ความร้อนไปแล้วจะถูกดึงออกโดยพัดลมดูดอากาศสำหรับการเผาไหม้ ดังแสดงในรูปที่ 3.9-2



รูปที่ 3.9-2 แสดงหลักการทำงานของหัวเผารีเจนเนอเรทีฟ⁽¹⁾

สำหรับรีเจนเนอเรเตอร์สามารถแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะคือ เป็นแบบรังผึ้ง (Honeycomb) และแบบก้อนกลม (Ball) ที่ทำจากอลูมินาความบริสุทธิ์สูง รีเจนเนอเรเตอร์ทั้ง 2 ลักษณะมีคุณสมบัติเกี่ยวกับน้ำหนักเมื่อเทียบกับความจุความร้อนของหัวเผา ดังแสดงในรูป 3.9-3



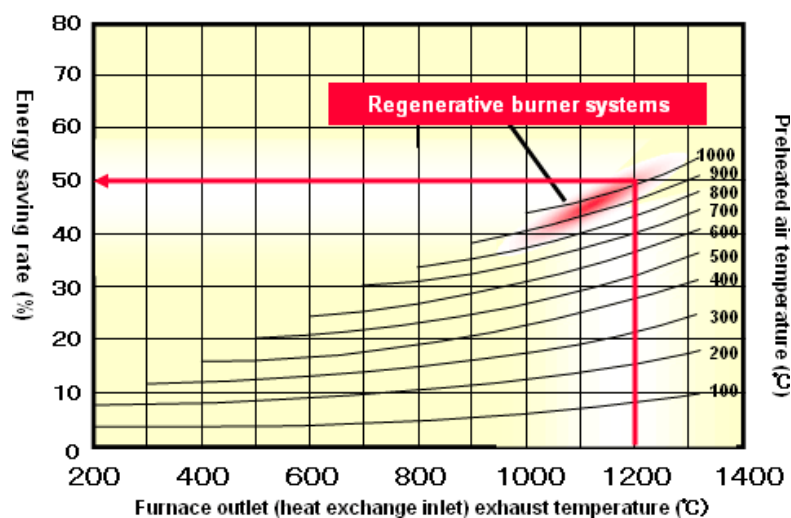
รูปที่ 3.9-3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของรีเจนเนอเรเตอร์เทียบกับค่าความร้อนของหัวเผา⁽⁴⁾

2. การใช้ทดแทนเทคโนโลยีเดิม

เตาอุตสาหกรรมทั่วไป หัวเผาที่ใช้เป็นแบบหัวเผาอากาศเย็น ซึ่งอุณหภูมิอากาศที่ป้อนเข้าห้องเผาใหม่มีอุณหภูมิใกล้เคียงกับบรรยากาศ (ประมาณ 30-35 °C) ซึ่งหากสามารถเพิ่มอุณหภูมิอากาศที่ใช้เผาใหม่ได้จะทำให้ลดการใช้เชื้อเพลิงลงได้ การติดตั้งหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟจะต้องมีการปรับปรุงเตาค่อนข้างมาก หรืออาจจะต้องสร้างเตาใหม่เพื่อให้เป็นเตาสำหรับการใช้หัวเผาเริเจนเนอเรทีฟ

3. ศักยภาพการประหยัดพลังงาน

จากข้อมูลกรณีศึกษาการติดตั้งในต่างประเทศ⁽¹⁾ การให้ความร้อนในเตาอุตสาหกรรมโดยการติดตั้งหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟสามารถลดการใช้พลังงานได้ประมาณ 40%-50% เมื่อเทียบกับการให้ความร้อนในเตาเผาที่ใช้หัวเผาแบบอากาศเย็นทั่วไป ดังแสดงในรูปที่ 3.9-4

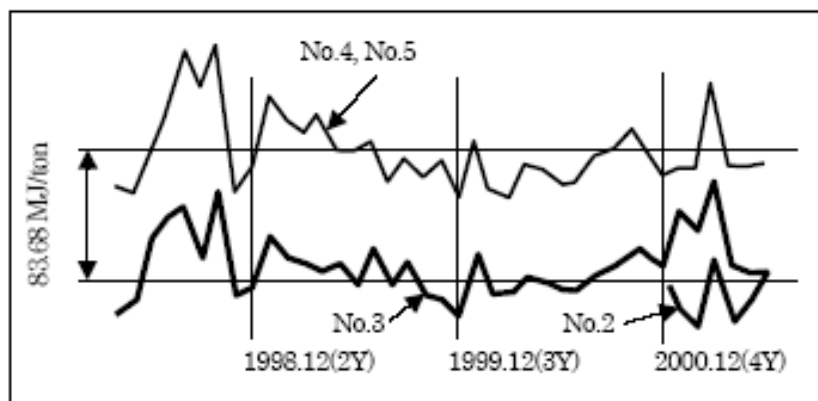


รูป 3.9-4 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศที่เพิ่มขึ้นและเปอร์เซ็นต์การประหยัดเชื้อเพลิง⁽¹⁾

จากรูป 3.9-4 จะพบว่าเมื่อเราสามารถเพิ่มอุณหภูมิอากาศที่จะใช้ในการเผาใหม่ได้ จะทำให้การสูญเสียพลังงานในการทำให้อากาศมีอุณหภูมิสูงขึ้นนั้นลดลงได้ ระยะเวลาในการเผาไหม้ก็สามารถลดลงได้ ในกรณีของเตาเผาที่ทำงานแบบเป็นงวด (Batch) จะช่วยลดระยะเวลาการทำงานของเตาได้ ซึ่งจะสามารถเพิ่มผลผลิตในกระบวนการผลิตได้อีกด้วย ในทำนองเดียวกันกรณีของเตาเผาที่ทำงานแบบต่อเนื่อง (Continuous) จะสามารถประหยัดเชื้อเพลิงในการให้ความร้อนกับผลิตภัณฑ์

จากข้อมูลกรณีศึกษาของ Flanagan, J.M.⁽²⁾ เรื่องกระบวนการให้ความร้อนในอุตสาหกรรมโลหะพบว่า การให้ความร้อนในเตาอุตสาหกรรมโดยการติดตั้งหัวเผาแบบรีเจนเนอเรเตอร์สามารถลดการใช้พลังงานได้ถึง 50% (Regenerator แบบ Ceramic Bed) เมื่อเทียบกับการให้ความร้อนในเตาเผาที่ใช้หัวเผาแบบอากาศเย็นทั่วไป ซึ่งสามารถนำความร้อนจากก๊าซเสียมาใช้ได้ถึง 85% และทำให้อุณหภูมิอากาศที่จะเผาไหม้สูงได้มาก (น้อยกว่าอุณหภูมิเตาประมาณ 150 °C)

จากข้อมูลกรณีศึกษาของ Shinichiro Fukushima, Yutaka Suzukawa, Toshikazu Akiyama, Akiko Fujibayashi, Takeshi Tada ⁽³⁾ การติดตั้งหัวเผาแบบรีเจนเนอเรเตอร์สามารถลดการใช้พลังงานได้ประมาณ 30% เมื่อเทียบกับการให้ความร้อนในเตาเผาที่ใช้หัวเผาแบบอากาศเย็นทั่วไปและสามารถลด NOx ได้ประมาณ 50% ผลการเก็บข้อมูลเรื่องการประหยัดพลังงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.9-5



รูป 3.9-5 กราฟแสดงผลการใช้พลังงานของเตาเผาทั่วไปหมายเลข 4 และ 5 เปรียบเทียบกับเตารีเจนเนอเรทีฟ หมายเลข 2 และ 3 ⁽³⁾

4. สภาพที่เหมาะสมกับการใช้เทคโนโลยี

เทคโนโลยีการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้อุ่นอากาศในการเผาไหม้โดยการติดตั้งหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟสามารถจัดการกับก๊าซร้อนทิ้งที่มีอุณหภูมิสูงประมาณ 1400 °C โดยจะทำให้อุณหภูมิของอากาศที่จะใช้เผาไหม้สูงได้ประมาณ 1,000 – 1,200 °C และไม่มีข้อจำกัดในเรื่องของชนิดเชื้อเพลิง



รูปที่ 3.9-6 แสดงการติดตั้งหัวเผารีเจนเนอเรทีฟกับเตาเผา ⁽⁴⁾

รูปที่ 3.9-7 ขยายรูปหัวเผาเริเจนเนอเรทีฟที่ติดกับเตาเผา⁽⁴⁾

5. กลุ่มเป้าหมายการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี⁽⁸⁾

กลุ่มของโรงงานอุตสาหกรรมและอาคารที่สามารถประยุกต์ใช้เทคโนโลยีนี้ ได้แก่

- โรงงานผลิตโลหะ เช่น การรีดเหล็กเส้น
- โรงงานผลิตเซรามิก
- โรงงานผลิตแก้ว

6. ราคาของเทคโนโลยี

ขึ้นกับขนาดของอุปกรณ์รวมทั้งค่าการติดตั้งที่จะต้องมีการปรับปรุงเตา

7. ระยะเวลาคืนทุนของเทคโนโลยี

จากข้อมูลจากกรณีศึกษาในต่างประเทศ⁽⁶⁾ เทคโนโลยีการใช้หัวเผาแบบเริเจนเนอเรทีฟสามารถให้ผลประหยัดซึ่งมีระยะเวลาคืนทุนประมาณ 2 ปี

8. ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

การนำความร้อนจากก๊าซเสียทิ้งมาใช้ในการอุ่นอากาศเผาไหม้ช่วยให้ประสิทธิภาพการใช้เชื้อเพลิงในเตาเผาดีขึ้น ส่งผลให้การเผาไหม้เชื้อเพลิงลดน้อยลง จึงถือว่าเป็นอีกแนวทางในการลดปัญหาภาวะโลกร้อนได้

9. ความแพร่หลายและศักยภาพการขยายผลในประเทศไทย

จากการตรวจสอบกับผู้จำหน่ายและฐานข้อมูลโรงงานอาคารควบคุมของ พ.พ. ประมาณการว่ามีการนำเทคโนโลยีการลดความชื้นด้วยฮีทไปป์ไปประยุกต์ใช้แล้วกับสถานประกอบการประมาณไม่เกิน 1% ของจำนวนสถานประกอบการที่สามารถประยุกต์ใช้เทคโนโลยีนี้ได้ (ประมาณ 2 แห่งจาก 182 แห่ง)

โดยเมื่อพิจารณาจากกลุ่มเป้าหมายการใช้เทคโนโลยีนี้ ในกลุ่มอุตสาหกรรมและอาคารที่มีศักยภาพแล้วพบว่าเทคโนโลยีนี้สามารถขยายผลในสถานประกอบการที่มีการใช้พลังงานรวมกันประมาณ 395 ktoe ตามข้อมูลการใช้พลังงานของประเทศไทยในปี 2549⁽⁷⁾ และจากการประมาณการในกรณีที่ 20% ของสถานประกอบการที่มีศักยภาพเหล่านี้นำเทคโนโลยีไปประยุกต์ใช้จะทำให้เกิดผลประหยัดพลังงานให้กับประเทศได้ปีละประมาณ 790 ล้านบาท

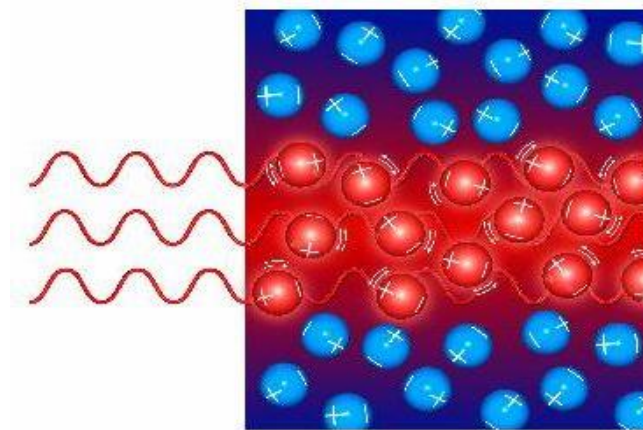
10. ตัวอย่างกรณีศึกษา ⁽⁵⁾	
กรณีศึกษา:	โรงงาน Hitachi Kinzoku (Yasugi)
ประเภทโรงงาน:	ผลิตเหล็กกล้า/เหล็กกล้าพิเศษ
การใช้เทคโนโลยี:	เปลี่ยนจากเตาเดิมที่เป็นเตาให้ความร้อนหลอมโลหะมาเป็นเตาที่ใช้หัวเผาโรเจนเนอเรทีฟ ซึ่งมีอุณหภูมิทำงานที่ 1,350 °C
เงินลงทุน:	-
ผลประหยัดพลังงาน:	52,963 GJ คิดเป็น 50.9%
ค่าพลังงานที่ประหยัดได้:	-
ค่าใช้จ่ายอื่นที่ประหยัดได้:	-
ระยะเวลาคืนทุน:	-
กรณีศึกษา:	โรงงาน Tokai Rika Denki Seisakusho
ประเภทโรงงาน:	ผลิตเหล็กกล้าสแตนเลส
การใช้เทคโนโลยี:	เปลี่ยนจากเตาเดิมที่เป็นเตาให้ความร้อนแบบ Twin chamber มาเป็นเตาที่ใช้หัวเผาโรเจนเนอเรทีฟ ซึ่งติดตั้ง Chamber ละ 1 คู่ รวม 1 คู่ เตาที่มีอุณหภูมิทำงานที่ 1,030 °C
เงินลงทุน:	-
ผลประหยัดพลังงาน:	24,655GJ คิดเป็น 51.9%
ค่าพลังงานที่ประหยัดได้:	-
ค่าใช้จ่ายอื่นที่ประหยัดได้:	-
ระยะเวลาคืนทุน:	-
11. แหล่งข้อมูลอ้างอิง	
(1) Regenerative Burner System, Research & Development, Osaka Gas Co., Ltd. (2) Flanagan, J.M., 1993. Process Heating in the Metals Industry, CADDET Analyses Series No.11, Caddet, Sittard, The Netherlands. (3) Shinichiro Fukushima, Yutaka Suzukawa, Toshikazu Akiyama, Akiko Fujibayashi, Takeshi Tada, 2002. Eco-friendly Regenerative Burner Heating System, NKK Technical Review No.87 (4) Regenerative Burner Kiln, Takasago Industry Co., Ltd. (5) Energy Conservation of Heating Furnace Seminar (Bangkok), January 2001, NEDO, DEDE, ECCJ, ECCT. (6) Full Time Regenerative Burner System (FFR), CADDET 2002, UK (7) รายงานพลังงานของประเทศไทยปี 2549, กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (8) กระบวนการและเทคนิคการลดค่าใช้จ่ายพลังงานสำหรับอาคารและโรงงานอุตสาหกรรม, ศูนย์อนุรักษ์พลังงานแห่งประเทศไทย (9) การจัดการพลังงานความร้อน, เอกสารการฝึกอบรมหลักสูตรผู้รับผิดชอบด้านพลังงาน (ผขพ), กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2550	

3.9.2 เทคโนโลยีการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริก (Dielectric Heating)

1. หลักการทำงานของเทคโนโลยี ⁽¹⁾⁽²⁾⁽⁶⁾

การให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกทำงานอย่างไร

การให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริก (Dielectric Heating) ทำงานโดยอาศัยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ย่านคลื่นวิทยุหรือไมโครเวฟกำลังสูงส่งผ่านเข้าไปในเนื้อวัสดุ สนามของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะทำให้โมเลกุลของวัสดุที่มีโครงสร้างแบบมีขั้ว (Dipolar Molecules) ซึ่งมีขั้วไฟฟ้าที่เป็นขั้วบวกและขั้วลบพยายามเรียงตัวตามทิศทางของสนามคลื่นที่ส่งผ่านเข้ามาทำให้เกิดการเสียดสีกันของโมเลกุล เกิดเป็นความร้อนกระจายทั่วภายในเนื้อวัสดุหรือการถ่ายเทพลังงานจากคลื่นไปยังวัสดุนั่นเอง ดังแสดงในรูปที่ 3.9-8



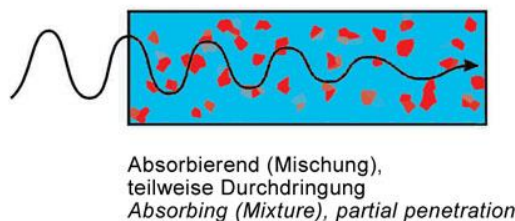
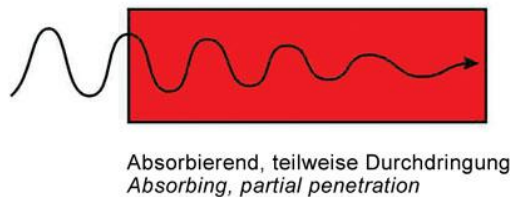
รูปที่ 3.9-8 แสดงการเกิดความร้อนในเนื้อวัสดุจากการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริก

วัสดุที่สามารถใช้การให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกได้จะต้องเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติที่ตอบสนองต่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า กล่าวคือ จะต้องเป็นวัสดุที่มีโครงสร้างโมเลกุลแบบมีขั้วหรือประกอบไปด้วยน้ำซึ่งมีโมเลกุลแบบมีขั้วเช่นกันเป็นองค์ประกอบ วัสดุที่มีโครงสร้างโมเลกุลแบบไม่มีขั้ว เช่น อากาศ เทฟลอน หรือแก้ว จะไม่สามารถดูดซับพลังงานจากคลื่นได้ โดยคลื่นจะผ่านทะลุเข้าไปในเนื้อวัสดุโดยไม่เกิดความร้อนหรือการเปลี่ยนแปลงใดๆ ส่วนวัสดุที่เป็นโลหะจะมีคุณสมบัติสะท้อนคลื่นจึงไม่สามารถเกิดความร้อนได้ เหมาะสำหรับการทำโครงสร้างเตาและตัวสะท้อนคลื่นดูรูปที่ 3.9-9 ประกอบ

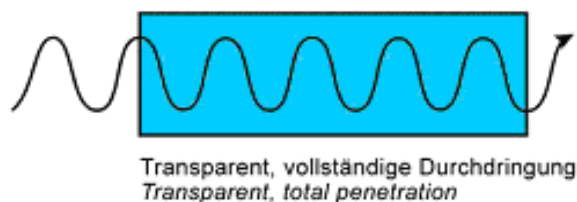
การให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกเป็นวิธีการให้ความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูง เนื่องจากการถ่ายเทพลังงานเป็นความร้อนเกิดภายในเนื้อวัสดุโดยตรง ซึ่งแตกต่างจากการให้ความร้อนแบบเดิมซึ่งใช้เชื้อเพลิงหรือขดลวดไฟฟ้า ซึ่งการถ่ายเทความร้อนจะอาศัยการพาของอากาศร้อนหรือการแผ่รังสีจากแหล่งความร้อนเป็นหลักซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นจะถ่ายเทไปที่ผิววัสดุก่อน จากนั้นจึงจะค่อยเกิดการนำความร้อนจากผิวนอกของวัสดุเข้าไปสู่ภายใน

ส่วนประกอบการทำงาน

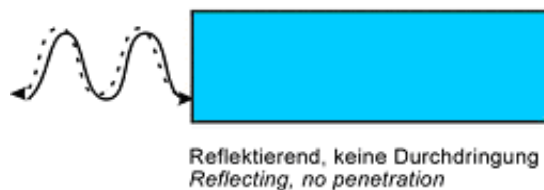
เตาให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกจะมีส่วนประกอบการทำงานหลัก คือ แหล่งกำเนิดคลื่นซึ่งใช้พลังงานไฟฟ้าส่วนกระจายคลื่นไปยังวัสดุ และส่วนโครงสร้างเตา โดยจะแบ่งเตาออกได้เป็น 2 ประเภท ตามย่านความถี่ของคลื่นที่ใช้งาน คือ เตาให้ความร้อนด้วยคลื่นวิทยุ (Radio Frequency Heating) และเตาให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Microwave Heating)



วัสดุที่มีโครงสร้างโมเลกุลแบบมีขั้วหรือวัสดุที่มีความชื้น จะดูดซับพลังงานของคลื่นและเกิดความร้อน



วัสดุที่มีโครงสร้างโมเลกุลแบบไม่มีขั้ว คลื่นจะทะลุผ่านโดยไม่เกิดความร้อน



วัสดุโลหะมีคุณสมบัติสะท้อนคลื่น

รูปที่ 3.9-9 แสดงการตอบสนองของวัสดุแต่ละประเภทต่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ⁽¹⁾

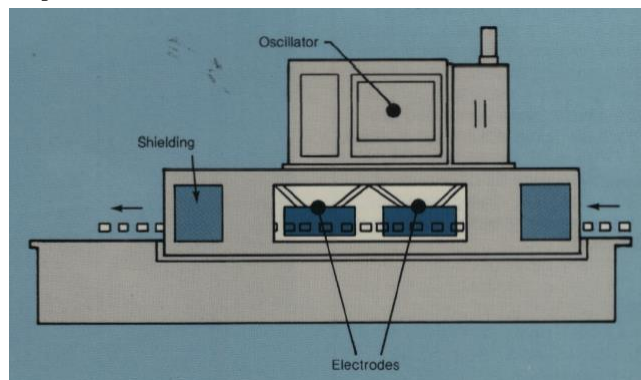
เตาให้ความร้อนด้วยคลื่นวิทยุ (Radio Frequency Heating)

เตาให้ความร้อนด้วยคลื่นวิทยุทำงานโดยใช้ตัวกำเนิดคลื่นซึ่งทำด้วยวงจรหลอดแก้วสุญญากาศหรือสารกึ่งตัวนำ สร้างคลื่นวิทยุกำลังสูงส่งผ่านมายังอิเล็กโทรด โดยอิเล็กโทรดจะเป็นตัวปล่อยสนามคลื่นวิทยุตามรูปแบบที่กำหนดไปยังวัสดุที่ต้องการให้ความร้อน

ขนาดของกำลังคลื่นวิทยุที่ใช้สำหรับการให้ความร้อนในอุตสาหกรรมจะอยู่ในระดับตั้งแต่ 500 วัตต์ไปจนถึงหลายร้อยกิโลวัตต์ในย่านความถี่ 13.56, 27.12 และ 40.68 MHz ซึ่งจะสามารถผ่านเข้าไปในเนื้อวัสดุได้แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุและความถี่คลื่น โดยคลื่นที่มีความถี่ต่ำกว่าจะสามารถผ่านเข้าไปในเนื้อวัสดุได้ลึกกว่า เหมาะสำหรับการให้ความร้อนกับวัสดุที่มีขนาดใหญ่ ส่วนคลื่นความถี่สูงจะสามารถผ่านเข้าไปในเนื้อวัสดุได้ตื้นกว่า เหมาะสำหรับการให้ความร้อนกับวัสดุที่มีขนาดเล็ก



รูปที่ 3.9-10 แสดงตัวอย่างเตาให้ความร้อนด้วยคลื่นวิทยุ



รูปที่ 3.9-11 แสดงลักษณะ โครงสร้างและส่วนประกอบของเตาให้ความร้อนด้วยคลื่นวิทยุ ⁽⁶⁾

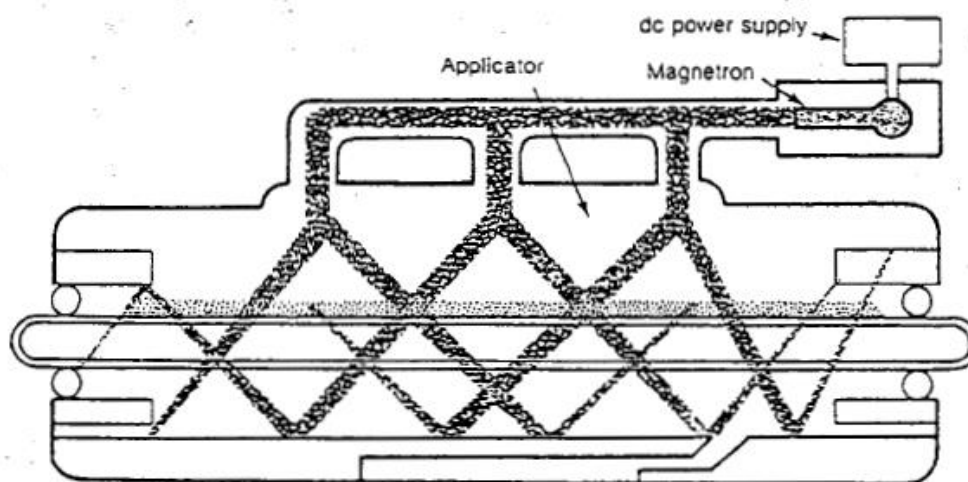
เตาให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Microwave Heating)

เตาให้ความร้อนโดยคลื่นไมโครเวฟทำงานโดยใช้แมกนีตรอนสร้างคลื่นไมโครเวฟกำลังสูงส่งผ่านท่อนำคลื่นซึ่งทำด้วยช่องโลหะ (Wave Guide) ไปยังวัสดุที่ต้องการให้ความร้อน

ขนาดของกำลังคลื่นวิทยุที่ใช้สำหรับการให้ความร้อนในอุตสาหกรรมจะอยู่ในระดับตั้งแต่ 200 วัตต์ไปจนถึง 60 กิโลวัตต์ ในย่านความถี่ 915 MHz, 2.45 GHz และ 5.8 GHz โดยจะทำงานในลักษณะเดียวกับคลื่นวิทยุ แต่ด้วยความถี่ที่สูงกว่าทำให้ลดระดับแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการสร้างคลื่นเมื่อเทียบกับคลื่นวิทยุที่มีกำลังคลื่นเท่ากัน คลื่นไมโครเวฟจะเหมาะสมกับการให้ความร้อนแก่วัสดุขนาดเล็กกว่าคลื่นวิทยุ เนื่องจากคลื่นจะสามารถผ่านเข้าไปในเนื้อวัสดุในระดับที่ตื้นกว่า



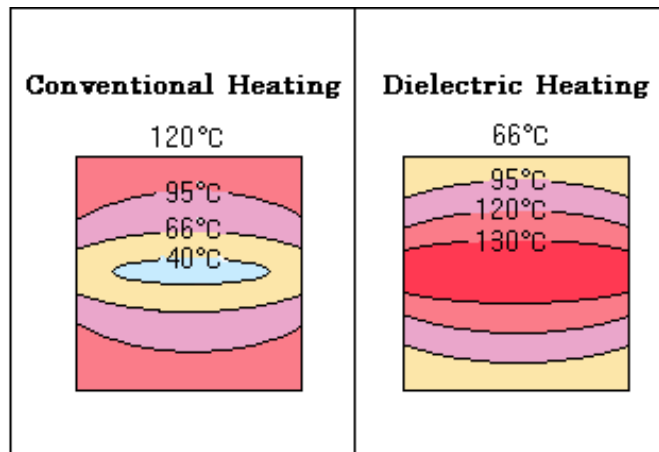
รูปที่ 3.9-12 แสดงตัวอย่างเตาให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ



รูปที่ 3.9-13 แสดงลักษณะ โครงสร้างและส่วนประกอบของเตาให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ ⁽⁸⁾

2. การใช้ทดแทนเทคโนโลยีเดิม

การให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกสามารถทดแทนการใช้ขดลวดไฟฟ้า คอยล์ร้อนจากไอน้ำ หรือการใช้หัวเผาเชื้อเพลิง เพื่อสร้างความร้อนหรืออากาศร้อนสำหรับการให้ความร้อนแก่วัสดุ โดยการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกจะเป็นการให้ความร้อนซึ่งเกิดขึ้นโดยตรงภายในวัสดุ (Inside Out) ซึ่งแตกต่างจากการให้ความร้อนแบบเดิมซึ่งจะเกิดความร้อนจากบริเวณผิววัสดุก่อนแล้วจึงค่อยเกิดการนำความร้อนสู่ภายใน (Outside In) ทำให้การกระจายความร้อนเป็นไปอย่างสม่ำเสมอทั่วถึงภายในเนื้อวัสดุพร้อมๆกัน ส่งผลให้ลดระยะเวลาและเพิ่มประสิทธิภาพในการให้ความร้อน

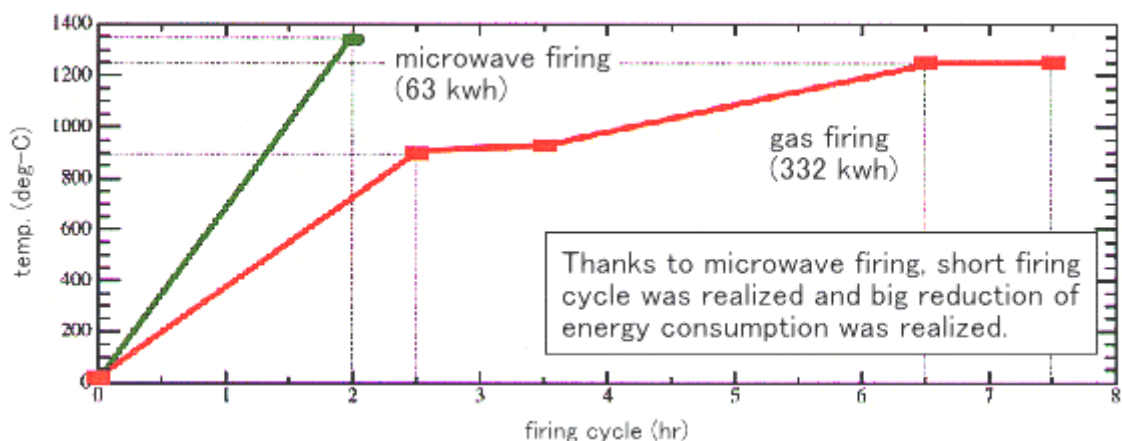


รูปที่ 3.9-14 แสดงเปรียบเทียบการเกิดความร้อนในวัสดุระหว่างการให้ความร้อนแบบเดิมกับการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริก

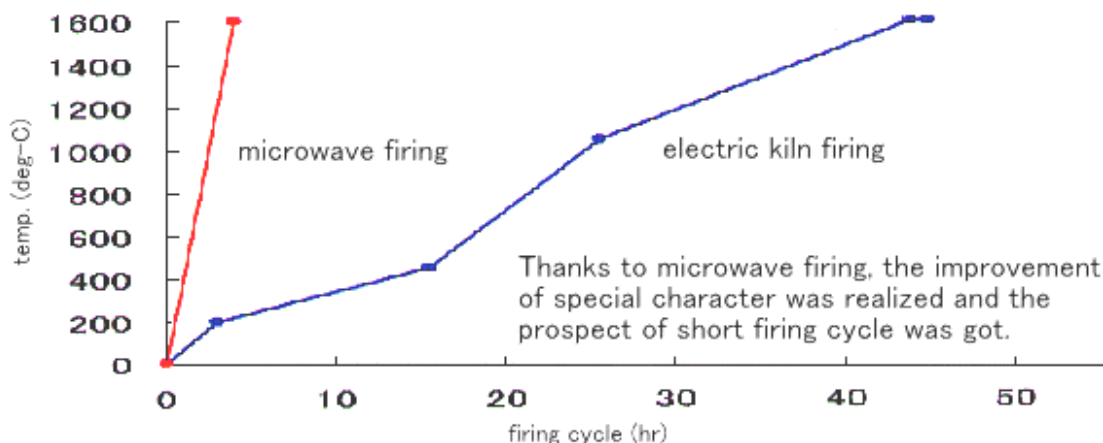
3. ศักยภาพการประหยัดพลังงาน

การให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกเป็นเทคโนโลยีการให้ความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูง โดยมีประสิทธิภาพรวมในการถ่ายเทพลังงานประมาณ 50% - 70% เทียบกับประสิทธิภาพรวมของการถ่ายเทพลังงานโดยอาศัยการอาศัยการให้ความร้อนแบบเดิมซึ่งอาศัยการพาและการแผ่รังสีความร้อนซึ่งอยู่ประมาณ 10% - 30% จากข้อมูลการประยุกต์ใช้ในต่างประเทศ⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾ การให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกสามารถลดปริมาณการใช้พลังงานได้ไม่น้อยกว่า 50% เมื่อเทียบกับการให้ความร้อนด้วยการพาอากาศร้อนจากขดลวดไฟฟ้า คอยล์ร้อนไอน้ำ หรือหัวเผาเชื้อเพลิง

จากข้อมูลผลการเปรียบเทียบการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกด้วยคลื่นไมโครเวฟกับการให้ความร้อนด้วยก๊าซธรรมชาติในการให้ความร้อนแก่เซรามิก⁽⁴⁾ ได้แสดงผลระยะเวลาการเผาการใช้พลังงานที่ลดลงไว้ดังนี้



(ก)



(ข)

รูป 3.9-15 แสดงเปรียบเทียบการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ
กับการให้ความร้อนด้วยก๊าซธรรมชาติในการให้ความร้อนแก่เซรามิก⁽⁴⁾

4. สภาพที่เหมาะสมกับการใช้เทคโนโลยี

เทคโนโลยีการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกเหมาะสำหรับการให้ความร้อนและการอบไล่ความชื้นแก่วัสดุที่มีโครงสร้างโมเลกุลแบบมีขั้วหรือมีน้ำเป็นองค์ประกอบ เช่น อาหาร ยาง ไม้ กระดาษ เซรามิก ซึ่งต้องการการกระจายความร้อนอย่างทั่วถึงสม่ำเสมอภายในเนื้อวัสดุและการควบคุมอุณหภูมิการให้ความร้อนอย่างแม่นยำเพื่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้การให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกยังเหมาะสมอย่างยิ่งกับการให้ความร้อนแก่วัสดุซึ่งเป็นฉนวนความร้อน เนื่องจากการให้ความร้อนแบบทั่วไปจะใช้เวลาานกว่าที่ความร้อนจะถ่ายเทเข้าสู่ภายในวัสดุ

เนื่องจากคุณสมบัติของความถี่ที่แตกต่างกัน การให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกด้วยคลื่นวิทยุจะเหมาะกับการให้ความร้อนแก่วัสดุที่มีลักษณะรูปทรงพื้นฐานที่ไม่ซับซ้อน เช่น แท่งสี่เหลี่ยม ทรงกระบอกโดยสามารถให้ความร้อนกับวัสดุได้ตั้งแต่ขนาดเล็กจนถึงขนาดใหญ่หลายเมตรส่วนการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกด้วยคลื่นไมโครเวฟจะเหมาะกับการให้ความร้อนแก่วัสดุที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ดี แต่ด้วยความถี่ที่สูงกว่าทำให้คลื่นไมโครเวฟสามารถผ่านเข้าไปในเนื้อวัสดุในระดับที่ตื้นกว่าคลื่นวิทยุจึงเหมาะกับวัสดุที่มีขนาดเล็กกว่าคลื่นวิทยุ

5. กลุ่มเป้าหมายการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี ⁽¹⁾⁽²⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾

การให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกสามารถออกแบบติดตั้งได้ทั้งในลักษณะการให้ความร้อนแบบ Batch และการให้ความร้อนแบบลำเลียงต่อเนื่อง โดยตัวอย่างกลุ่มของโรงงานอุตสาหกรรมที่สามารถประยุกต์ใช้เทคโนโลยีนี้ได้แก่

- อุตสาหกรรมอาหาร ในกระบวนการให้ความร้อนในการผลิตหรืออบแห้งวัตถุดิบหรือผลิตภัณฑ์อาหาร
- อุตสาหกรรมสิ่งทอ ในกระบวนการให้ความร้อน หรืออบแห้งเส้นด้ายหรือเส้นใย
- อุตสาหกรรมยางในกระบวนการอบให้ความร้อนแผ่นยางธรรมชาติ
- อุตสาหกรรมเซรามิก ในกระบวนการอบแห้งผลิตภัณฑ์เซรามิกเครื่องปั้นดินเผา
- อุตสาหกรรมพลาสติก ในกระบวนการอบแห้ง การเชื่อม และละลายพลาสติก

• อุตสาหกรรมกระดาษ ในกระบวนการอบแห้งสารเคลือบผิวนกระดาษ • อุตสาหกรรมไม้และเครื่องเรือน ในกระบวนการอบแห้งไม้ และกระบวนการอบกาวอัดไม้ • ฯลฯ
6.ราคาของเทคโนโลยี ⁽³⁾⁽⁶⁾⁽⁸⁾
ราคาของการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกจะขึ้นอยู่กับขนาดและประเภทของการติดตั้งใช้งาน โดยค่าใช้จ่ายของการติดตั้งเตาให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกคลื่นวิทยุรวมทั้งอุปกรณ์แหล่งจ่ายไฟ ระบบลำเลียง ระบบควบคุมและอุปกรณ์ทั้งหมดจะอยู่ในช่วงประมาณ 33,000 – 130,000 บาทต่อกิโลวัตต์ ของกำลังคลื่น (\$1,000 - \$4,000 per kW) ส่วนเตาให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกด้วยคลื่นไมโครเวฟจะอยู่ในช่วงราคาประมาณ 66,000 - 165,000 บาทต่อกิโลวัตต์ (\$2,000 - \$5,000 per kW) อย่างไรก็ตามจะสังเกตได้ว่าราคาของเตาให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกโดยเฉพาะเตาไมโครเวฟอุตสาหกรรมจะมีราคาที่สูงกว่าเตาไมโครเวฟที่ใช้ในครัวเรือนมาก เนื่องจากตัวกำเนิดคลื่นได้แก่ แมกนีตรอนของเตาไมโครเวฟอุตสาหกรรมจะทำงานกับระบบแหล่งจ่ายไฟแรงดันสูง เพื่อให้สามารถสร้างคลื่นออกมาได้อย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลานาน และสามารถปรับระดับของกำลังคลื่นได้อย่างแม่นยำ ⁽⁹⁾
7. ระยะเวลาคืนทุนของเทคโนโลยี
จากข้อมูลการติดตั้งใช้เทคโนโลยีการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกในต่างประเทศ ⁽³⁾ แม้ว่าเทคโนโลยีการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกจะมีราคาลงทุนเริ่มต้นค่อนข้างสูง แต่ด้วยประสิทธิภาพการใช้พลังงานและประสิทธิภาพการผลิตที่เพิ่มขึ้น ทำให้เทคโนโลยีนี้สามารถให้ระยะเวลาคืนทุนได้ภายในประมาณ 2 – 3 ปี
8. ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม
เทคโนโลยีการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นแหล่งพลังงานในการให้ความร้อน จึงไม่มีการปล่อยก๊าซไอเสียซึ่งเป็นผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ส่วนการรั่วไหลของคลื่นจากเตาให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริก ปัจจุบันมีมาตรฐานการตรวจสอบความปลอดภัยของอุปกรณ์และเตาให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่สูง เช่น มาตรฐาน IEC 60519-6:2002 ซึ่งกำหนดว่าการรั่วไหลของคลื่นจากโครงสร้างจะต้องอยู่ในระดับไม่เกิน 5 mW/cm² ที่ระยะ 5 ซม. จากตัวเตา ดังนั้นการเลือกใช้เตาให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกจึงจำเป็นที่จะต้องผ่านการรับรองตามมาตรฐานความปลอดภัย รวมทั้งจะต้องมีการทดสอบการรั่วไหลของคลื่นหลังการติดตั้งและทดสอบการทำงาน ณ พื้นที่ติดตั้งและตรวจสอบเป็นระยะตามรอบการบำรุงรักษาเตา
9. ความแพร่หลายและศักยภาพการขยายผลในประเทศไทย
จากการตรวจสอบกับผู้อำนวยการและฐานข้อมูลโรงงานอาคารควบคุมของ พพ. มีการนำเทคโนโลยีการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกไปประยุกต์ใช้แล้วกับสถานประกอบการเพียง 1 แห่งหรือคิดเป็นประมาณ 0.1% ของจำนวนสถานประกอบการที่สามารถประยุกต์ใช้เทคโนโลยีนี้ได้ (1 แห่งจาก 738 แห่ง) โดยเมื่อพิจารณากลุ่มเป้าหมายการใช้เทคโนโลยีในกลุ่มอุตสาหกรรมและอาคารที่มีศักยภาพแล้วพบว่าเทคโนโลยีนี้สามารถขยายผลในสถานประกอบการที่มีการใช้พลังงานรวมกันประมาณ 1,863 ktoe ตามข้อมูลการใช้พลังงานของประเทศในปี 2549 ⁽¹²⁾ และจากการประมาณการในกรณีที่ 20% ของสถานประกอบการที่มีศักยภาพเหล่านี้นำเทคโนโลยีไปประยุกต์ใช้จะทำให้เกิดผลประหยัดพลังงานให้กับประเทศได้ปีละประมาณ 2,981 ล้านบาท

10. ตัวอย่างกรณีศึกษา	
กรณีศึกษา:	โรงงานผลิตกัณฑ์ไม้ ประเทศสหรัฐอเมริกา ⁽³⁾
ประเภทโรงงาน:	ผลิตกัณฑ์ไม้
การใช้เทคโนโลยี:	ติดตั้งเตาอบแห้งด้วยคลื่นวิทยุ ในกระบวนการผลิตไม้แผ่นบางสำหรับงานตกแต่ง (Veneer) เพื่อทดแทนการใช้ไอน้ำในการอบแห้ง
การลงทุน:	เตาอบแห้งด้วยคลื่นวิทยุ (RF Redryer) ขนาด 300 kW
ผลประโยชน์ที่ได้:	ลดการใช้พลังงาน และลดปริมาณไม้ที่ไม่ได้คุณภาพ และเพิ่มผลผลิตของกระบวนการอบแห้งได้ประมาณ 15% - 20%
ระยะเวลาคืนทุน:	1.5 ปี
กรณีศึกษา:	AlföldiMalomipari, Hungary ⁽⁵⁾
ประเภทโรงงาน:	ผลิตข้าวแบบหุงสุกเร็ว
การใช้เทคโนโลยี:	ติดตั้งเตาให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟแบบสายพานลำเลียงต่อเนื่อง ทดแทนการให้ความร้อนด้วยไอน้ำ
การลงทุน:	เตาให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟแบบสายพานลำเลียงต่อเนื่องขนาด 20 kW ความถี่คลื่น 2.45 GHz (จำนวนแมกนีตรอน 26 x 800 W.) กำลังผลิต 300 kg/h
ผลประหยัดพลังงาน:	พลังงานรวมทั้งไฟฟ้าและความร้อนคิดเป็นประมาณ 4,925kWh/t rice (ก่อนติดตั้งใช้พลังงาน 5,070 kWh/t rice หลังติดตั้งใช้พลังงาน 145 kWh/t rice)
11. แหล่งข้อมูลอ้างอิง	
(1) Microwave Heating, Linn High Therm GmbH. (2) Horst Linn, Malte Möller, Microwave Heating, Thermprocess Symposium 2003. (3) S.J. Hillenbrand, Overview of Fourteen Applied Technologies, 1997 Hazardous Materials and Waste Management Conference, Jan. 27-30, 1997. (4) Research and Development of Microwave Firing Technology, Takasago-Industry Co., Ltd., Japan. (5) New Energy-Saving Process for Fast Cooking Rice Production, Linn High Therm GmbH, Food Marketing & Technology, June 2005. (6) Techcommentary 'Radio Frequency Heating of Plastics', published by the EPRI Center for Materials Fabrication, Vol.4 No.2, 1984. (7) Techapplication 'Microwave Curing of Rubber', published by the EPRI Center for Materials Fabrication, Vol.2 No.1, 1988. (8) Techcommentary 'Industrial Microwave Heating Applications', published by the EPRI Center for Materials Fabrication, Vol.4 No.3, revised 1993. (9) Y. Pianroj, P. Kerdthongmee, M. Nisoa, P. Kerdthongmee, J. Galakarn, Development of a Microwave System for Highly-Efficient Drying of Fish, Walailak Journal of Science & Technology, 2006.	

- (10) ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช, ณัฐวุฒิ สุวรรณภูมิ, สมศักดิ์ วงษ์ประดับไชย, สุชนม์ ปิยโชติ, ดวงเดือน อาจงค์, การวิเคราะห์กระบวนการให้ความร้อนในวัสดุไดอิเล็กตริก โดยใช้เตาไมโครเวฟชนิดสายพานลำเลียงแบบต่อเนื่อง (Analysis of Heating Process in Dielectric Materials Using A Continuous Microwave Belt Furnace), การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 1, 11-13 พฤษภาคม 2548
- (11) ยุทธพงศ์ เพียรโรจน์, พันธุ์ศักดิ์ เกิดทองมี, หมุดตอเล็บ หินสอ, การพัฒนาระบบการให้ความร้อนเพื่อการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Developing the Heating System for Drying with Microwave), การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 1, 11-13 พฤษภาคม 2548
- (12) รายงานพลังงานของประเทศไทยปี 2549, กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน

สรุปเนื้อหาวิชา

1. เตาอุตสาหกรรมแบ่งตามระดับอุณหภูมิการทำงานของแต่ละเตา ดังนี้		
	ประเภทเตา (แยกตามลักษณะการใช้งาน)	อุณหภูมิภายในเตา (°C)
	เตาอบเหล็ก	600-1,100
	เตาหลอมแก้ว	1,000-1,300
	เตาเผาเซรามิกส์	700-1,100
	เตาเผาซีเมนต์	650-700
	เตาเผากำจัดของเสีย	650-1,000
2. ประเภทของเตาอุตสาหกรรม แบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ เตาหลอมไฟฟ้า และ เตาหลอมเชื้อเพลิง		
2.1 เตาหลอมไฟฟ้า แบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ		
1) เตาเหนี่ยวนำ (Induction Furnace) ซึ่งใช้หลักการจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแก่ขดลวดเพื่อกำเนิดสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสขึ้นที่โลหะ ความต้านทานของโลหะที่มีต่อกระแสเหนี่ยวนำเป็นแหล่งกำเนิดความร้อนที่ใช้ในการหลอมโลหะ ซึ่งยังแยกออกเป็นสองแบบคือ แบบไม่มีแกน (Coreless Type) และ แบบช่อง (Channel Type) และแบบไม่มีแกนยังแบ่งได้อีกเป็นแบบความถี่สูง (มากกว่า 500 Hz) และความถี่ต่ำ (50-60Hz) 2) เตาอาร์คไฟฟ้า (Electric-Arc Furnace) โดยใช้หลักการอาร์คที่ขั้วอิเล็กโตรดเพื่อหลอมโลหะ ซึ่งยังแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ แบบอาร์คทางอ้อม (Indirect) และ ทางตรง(Direct) การสูญเสียพลังงานในเตาหลอมไฟฟ้า - การสูญเสียจากระบบทางไฟฟ้า เช่น จากหม้อแปลง ระบบการจ่ายไฟ จากคอยล์และขดลวดอิเล็กโตรด - การสูญเสียจากผนังเตา - การสูญเสียจาก จี้โลหะ (slag) - การสูญเสียจากการแผ่รังสี		
2.2 เตาหลอมเชื้อเพลิง หลักการก็คือใช้ความร้อนจากการสันดาปเพื่อหลอมโลหะ แบ่งออกได้ 3 แบบ คือ		
1) เตาเข้า เป็นเตาที่เก่าแก่ และมีโครงสร้างง่ายที่สุด ตัวเตาทำจากกราไฟต์หรือซิลิกอนคาร์ไบน์ และมีเปลือกทำด้วยเหล็กกล้ามีหน้าที่เก็บกักความร้อนจากการสันดาปเพื่อถ่ายเทไปยังเป่าให้มากที่สุด และเตาชนิดนี้สามารถใช้เชื้อเพลิงได้ทั้ง ก๊าซ ของเหลว และของแข็ง 2) เตาคิวโปลา ส่วนมากจะใช้หลอมเหล็กหล่อ และใช้เชื้อเพลิงแข็งเป็นหลัก (ถ่านโค้ก) ลักษณะของเตามีรูปร่างเป็นทรงกระบอกแนวตั้ง ก้นเตาจะมีแอ่ง (Well) สำหรับพักน้ำโลหะก่อนจะถูกถ่ายออกจากเตา 3) เตาสะท้อนความร้อน ใช้หลอมโลหะนอกกลุ่มเหล็กครั้งละปริมาณมากๆ และใช้หัวเผา(Burner) ฉีดเชื้อเพลิงเข้ามาสันดาปในห้อง ความร้อนจากการสันดาปจะถ่ายเทเข้าสู่โลหะ โดยวิธีการแผ่รังสีทั้งจากเปลวไฟโดยตรง และจากเพดานเตาที่ถูกขับความร้อนไว้ ซึ่งตรงฐานเตาจะมีช่องสำหรับรับน้ำโลหะที่หลอมละลายแล้ว		

การสูญเสียพลังงานความร้อนจากเตาหลอมเชื้อเพลิง

- การสูญเสียจากการสันดาปของเชื้อเพลิง
- การสูญเสียจากการถ่ายเทความร้อนจากช่องเปิดเตา
- การสูญเสียจากผนังเตา
- การสูญเสียจากทางปล่องไอเสีย
- การสูญเสียจากมอเตอร์

3. การประเมินประสิทธิภาพของเตาอุตสาหกรรม

การประเมินประสิทธิภาพของเตาอุตสาหกรรม ต้องทำการสมดุลพลังงานโดยต้องทราบปริมาณพลังงานที่เข้าและออกจากเตาและสูญเสียไปในส่วนใดๆ บ้าง ดังตาราง

ตารางที่ 3.3-3 ตารางสมดุลพลังงานสำหรับเตาอุตสาหกรรม

พลังงานเข้า	พลังงานออก	สัดส่วนโดยประมาณ (%)
เชื้อเพลิง + อากาศ (100%)	พลังงานที่ชิ้นงานได้รับ	20-40
	พลังงานที่สูญเสียไปกับก๊าซไอเสีย	51-54
	พลังงานสูญเสียผ่านพื้นผิว	3
	พลังงานสูญเสียทางช่องเปิด	9
	พลังงานสูญเสียจากน้ำระบายความร้อนและอื่นๆ	8-15

จากตารางที่ 3.3-3 จะเห็นได้ว่าแนวทางการประหยัดพลังงานของเตาอุตสาหกรรม ก็คือ การทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์ที่สุดการถ่ายเทความร้อนไปสู่ชิ้นงานให้มากที่สุด และการลดการสูญเสียพลังงานในรูปแบบต่างๆ ให้เหลือน้อยที่สุด

4. แนวทางและมาตรการลดการสูญเสียพลังงานในรูปแบบต่างๆ

- การปรับปรุงประสิทธิภาพการเผาไหม้ ได้แก่ การปรับอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงให้เหมาะสม เลือกใช้หัวเผาให้เหมาะสม มีแผนบำรุงดูแลรักษาหัวเผาและห้องสันดาป หรือการใช้หัวเผาประสิทธิภาพสูง
- การลดการสูญเสียทางปล่อง ได้แก่ ปรับปริมาณอากาศเข้าห้องสันดาปให้เหมาะสม , ควบคุมความดันภายในเตาให้เหมาะสม (สูงกว่าความดันบรรยากาศประมาณ 1 mm H₂O) , หรือปรับอุณหภูมิเตาให้เหมาะสมกับงาน
- การลดการสูญเสียความร้อนที่ผนังเตา ได้แก่ เลือกใช้ฉนวนความหนาที่เหมาะสม , หมั่นตรวจสอบสภาพของฉนวนอยู่เสมอ , หรือการป้องกันความเสื่อมฉนวนด้วยการหุ้มฉนวนกันความร้อน
- การลดการสูญเสียช่องเปิดเตา ได้แก่ เวลาเปิดเตาควรเปิดให้มีช่องน้อยที่สุดและสะดวกต่อการทำงาน , หรือ ควบคุมความดันภายในเตาให้เหมาะสม (สูงกว่าความดันบรรยากาศเล็กน้อย)
- การลดการสูญเสียพลังงานจากการระบายความร้อน ได้แก่ การปรับอัตราการไหลของของไหลที่นำมาระบายความร้อนกับเตาให้เหมาะสม เช่นการหีวาล้วนน้ำระบาย , การลดขนาดเครื่องสูบล้างให้เหมาะสม , การลดรอบ , การเพิ่มประสิทธิภาพของหอระบายความร้อน

5. พลังงานจากเชื้อเพลิงป้อน

พลังงานความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงในเตาอุตสาหกรรมขึ้นกับปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้และค่าความร้อนของเชื้อเพลิงซึ่งเชื้อเพลิงแต่ละชนิดจะมีค่าความร้อนที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 3.5

$$Q_C = \dot{m}_F \cdot LHV \quad (3.1)$$

เมื่อ Q_C = ปริมาณความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้, MJ/h
 $\dot{m}_F$ = อัตราการใช้เชื้อเพลิง, L/h หรือ kg/h
 LHV = ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง, MJ/L หรือ MJ/kg หรือ Nm³/kg

ตัวอย่างที่ 1 ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงของเตาหลอมโลหะ

เตาอบโลหะของโรงงานแห่งหนึ่งใช้น้ำมันเตาซีในปริมาณ 1,000,000 ลิตรต่อเดือนปริมาณความต้องการใช้พลังงานของเตาอบต่อเดือนมีค่าเท่าไร

วิธีคำนวณ

จากตารางที่ 3.3-4 ค่าความร้อนของน้ำมันเตาซีเท่ากับ 39.77 MJ/L ดังนั้น ปริมาณพลังงานความร้อนที่ป้อนให้เตาอบโลหะ = 1,000,000 L x 39.77 MJ/L คิดเป็นพลังงาน = 39,770,000 MJ/ Month

6. อัตราส่วนอากาศ (Air Ratio)

คือ ปริมาณอากาศป้อนจริงว่ามีสัดส่วนเป็นอย่างไร เมื่อเทียบกับปริมาณอากาศป้อนที่ต้องการตามทฤษฎี เช่น ถ้าเราควบคุมให้ปริมาณอากาศป้อนจริงเกินจากทฤษฎี 20% หมายความว่า อัตราส่วนอากาศเท่ากับ 120/100 = 1.2 เป็นต้นเราสามารถคำนวณค่าอัตราส่วนอากาศได้จากสมการที่ (3.2) เมื่อทราบปริมาณ O₂ เป็นร้อยละในก๊าซไอเสีย

$$m = \frac{21}{21 - O_2} \quad (3.2)$$

เมื่อ m = อัตราส่วนอากาศ
 O_2 = ร้อยละของก๊าซออกซิเจนในก๊าซไอเสีย (%)

7. การสูญเสียความร้อนทางปล่องไอเสีย

ความร้อนจากการสันดาปเชื้อเพลิงจะถูกใช้ให้ความร้อน (Heating) หรือหลอมละลาย (Melting) ชิ้นงาน โดยความร้อนส่วนหนึ่งจะสูญเสียออกทางปล่องไอเสียซึ่งถือเป็นสัดส่วนที่มากที่สุด

ความร้อนที่สูญเสียไปกับก๊าซไอเสียขึ้นกับชนิดของเชื้อเพลิงและประสิทธิภาพการเผาไหม้ เราสามารถประเมินการสูญเสียความร้อนในก๊าซไอเสียอย่างคร่าวๆ โดยใช้สมการตามที่แสดงในตารางที่ 3.3-5 และตารางที่ 3.3-6 โดยข้อมูลตรวจวัดที่ต้องการ ได้แก่

- ชนิดและปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้
- ปริมาณ O₂ ในก๊าซไอเสีย (วัดที่ตำแหน่งไอเสียออกจากห้องเผาไหม้)
- อุณหภูมิไอเสีย (วัดที่ตำแหน่งไอเสียออกจากห้องเผาไหม้)

8. การสูญเสียความร้อนทางผนังเตา
การสูญเสียที่ผิวเตาเกิดจากการพาความร้อน โดยอากาศแวดล้อมและการแผ่รังสีความร้อนเนื่องจากผิวเตาที่มีอุณหภูมิสูงกว่าสิ่งแวดล้อม
9. การสูญเสียความร้อนจากช่องเปิดหรือรูรั่วของเตา
พลังงานความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงส่วนหนึ่งจะสูญเสียออกไปทางช่องเปิดหรือรูรั่วต่างๆ ของผนังเตาโดยถ้าความดันในเตาดำกว่าความดันบรรยากาศจะเกิดการสูญเสียมาก เพราะจะดูดอากาศเย็นเข้าเตามากขึ้น
10. การสูญเสียความร้อนจากน้ำระบายความร้อน
เตาอุตสาหกรรมบางชนิดจะต้องใช้น้ำระบายความร้อนให้กับชิ้นส่วนหรือโครงสร้างเพื่อรักษาคุณสมบัติของวัสดุ ดังนั้นถ้าระบายความร้อนมากจะส่งผลให้เกิดการสูญเสียความร้อนมากยิ่งขึ้น
11. แนวทางและมาตรการลดการสูญเสียพลังงานในรูปแบบต่างๆ
• การปรับปรุงประสิทธิภาพการเผาไหม้ ได้แก่ การปรับอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงให้เหมาะสม , เลือกใช้หัวเผาให้เหมาะสม , มีแผนบำรุงดูแลรักษาหัวเผาและห้องสันดาป หรือ การใช้หัวเผาประสิทธิภาพสูง • การลดการสูญเสียทางปล่อง ได้แก่ ปรับปริมาณอากาศเข้าห้องสันดาปให้เหมาะสม , ควบคุมความดันภายในเตาให้เหมาะสม (สูงกว่าความดันบรรยากาศประมาณ 1 mm H₂O) , หรือปรับอุณหภูมิเตาให้เหมาะสมกับงาน • การลดการสูญเสียความร้อนที่ผนังเตา ได้แก่ เลือกใช้ฉนวนความหนาที่เหมาะสม , หมั่นตรวจสอบสภาพของฉนวนอยู่เสมอ , หรือการป้องกันความเสื่อมฉนวนด้วยการหุ้มแจ็กเก็ตทับภายนอก • การลดการสูญเสียช่องเปิดเตา ได้แก่ เวลาเปิดเตาควรเปิดให้มีช่องน้อยที่สุดและสะดวกต่อการทำงาน , หรือ ควบคุมความดันภายในเตาให้เหมาะสม (สูงกว่าความดันบรรยากาศเล็กน้อย) • การลดการสูญเสียพลังงานจากการระบายความร้อน ได้แก่ การปรับอัตราการใช้ของไหลที่นำมาระบายความร้อนกับเตาให้เหมาะสม เช่นการหีวาล้วนน้ำระบาย , การลดขนาดเครื่องสูบลมให้เหมาะสม , การลดรอบ , การเพิ่มประสิทธิภาพของหอระบายความร้อน

เอกสารอ้างอิง
[1] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, (2547), ตำราฝึกอบรมหลักสูตรผู้รับผิดชอบด้านพลังงาน (ผขพ.) สามัญ
[2] สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), (2543), เทคนิคการประหยัดพลังงานความร้อนในอุตสาหกรรม
[3] คู่มือการอนุรักษ์พลังงานในโรงงานอุตสาหกรรมประเภทหล่อหลอมโลหะกรรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม
[4] ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, (2551), http://mte.kmutt.ac.th/mte_learning/Energy_Conservation_in_Industrial_Plant/index.html
[5] สุภชัย ปัญญาวิวัฒน์ และจตุพรสถากุลเจริญ,การลดต้นทุนการผลิตด้านพลังงาน,สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย- ญี่ปุ่น),กรุงเทพฯ,2549
[6] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, (2554), ตำราฝึกอบรมหลักสูตรการตรวจวิเคราะห์การอนุรักษ์พลังงานในโรงงานอุตสาหกรรมและอาคารธุรกิจ
[7] http://www.alibaba.com (พฤศจิกายน 2551)
[8] http://www.kkeindia.com (พฤศจิกายน 2551)
[9] http://www.greenwoodfurnace.com (พฤศจิกายน 2551)
[10] http://www.made-in-china.com (พฤศจิกายน 2551)
[11] http://www.foundry.saint-gobain.com (พฤศจิกายน 2551)
[12] http://www.ajaxtoocco.ca (พฤศจิกายน 2551)
[13] www.hernironworks.com (พฤศจิกายน 2551)
[14] www.ridgequest.co.uk (พฤศจิกายน 2551)
[15] egweb.mines.edu (พฤศจิกายน 2551)
[16] www.majoreng.com.au (พฤศจิกายน 2551)