

บทที่ 4

การอนุรักษ์พลังงานโดย การนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่ (Energy Conservation by Waste Heat Recovery)



ความสำคัญของเนื้อหาวิชา

การใช้พลังงานในภาคอุตสาหกรรมที่มีกระบวนการผลิตที่ใช้อุณหภูมิสูง ความร้อนส่วนหนึ่งจะถูกปล่อยออกมาจากกระบวนการโดยไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ ในอดีตความร้อนส่วนนี้ถูกทิ้งไปสู่สิ่งแวดล้อมโดยเปล่าประโยชน์ ทั้งนี้ ที่ความร้อนดังกล่าวมีศักยภาพที่จะนำมาใช้ประโยชน์ได้หากมีเครื่องมือในการแปลงพลังงานที่จะทิ้งให้กลับมีประโยชน์ขึ้นมา อุปกรณ์ดังกล่าวอาจจะเป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดใดชนิดหนึ่ง หรือหม้อไอน้ำความร้อนทิ้ง และหากสามารถนำความร้อนส่วนนี้กลับไปใช้ในกระบวนการได้ ก็ย่อมสามารถลดพลังงานป้อนเข้าให้น้อยลงได้ นั่นหมายความว่าระบบจะมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น และสถานประกอบการก็จะลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานลงได้ นอกจากนี้ยังช่วยลดผลกระทบจากสภาพอากาศที่เปลี่ยนแปลง และเพื่อให้สถานประกอบการก้าวสู่ ความเป็นกลางทางคาร์บอน (Carbon Neutrality) และการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ (Net zero emissions)

วัตถุประสงค์

1. เพื่อเข้าใจลักษณะและแหล่งความร้อนทิ้ง
2. เพื่อประเมินปริมาณและคุณภาพของความร้อนทิ้ง
3. ศึกษาถึงโอกาสในการนำความร้อนทิ้งไปใช้ให้เกิดประโยชน์
4. รู้ชนิดของเทคโนโลยีการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่
5. สามารถเลือกเทคโนโลยีการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่
6. สามารถพิจารณาโครงการการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่

4.1 บทนำ

ความร้อนทิ้งมี 2 ลักษณะ คือ **ของเหลวร้อน** (เช่น น้ำร้อน น้ำมันร้อน) และ**ก๊าซร้อน** (เช่น อากาศร้อน ก๊าซไอเสียร้อน) การนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้อีก ในขั้นแรกต้องประเมินตัวแปรดังต่อไปนี้ อัตราการไหลของความร้อนทิ้ง-อุณหภูมิ และองค์ประกอบของความร้อนทิ้ง เมื่อสามารถหาค่าตัวแปรเหล่านี้ได้แล้ว ก็สามารถหาปริมาณความร้อนที่สามารถใช้ประโยชน์ได้ ซึ่งจะต้องกำหนดวิธีการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่ และต้องทำให้สอดคล้องกับการใช้งาน โดยพิจารณาศักยภาพในการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่ การใช้ความร้อนทิ้งอย่างคุ้มค่า ทางเลือกของการใช้ความร้อนทิ้ง เทคโนโลยีที่ใช้ในการนำความร้อนทิ้งในรูปก๊าซไอเสียร้อนกลับมาใช้ใหม่ เช่น การอุ่นอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ การผลิตไอน้ำ การผลิตกระแสไฟฟ้า โดยตัวอย่างของเทคโนโลยีการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่ที่ได้รับการยอมรับ ได้แก่ รีคูเพอเรเตอร์ เครื่องสะสมความร้อน เป็นต้น

4.2 แหล่งความร้อนทิ้งในอุตสาหกรรม

ในกระบวนการอุตสาหกรรมบางประเภทมีการใช้พลังงานความร้อน และจะมีพลังงานความร้อนส่วนหนึ่งถูกทิ้งออกมาจากกระบวนการ หากมีการนำความร้อนส่วนนี้กลับมาใช้ประโยชน์ได้ก็จะ ลดการใช้พลังงานความร้อนของสถานประกอบการได้ โดยความร้อนที่ปล่อยทิ้งจากกระบวนการอุตสาหกรรมมีหลายรูปแบบ ดังนี้

ความร้อนทิ้งมี 2 ลักษณะ ได้แก่
1. ของเหลวร้อน เช่น • น้ำร้อน (อาจมีสารปนเปื้อน) • น้ำมันร้อน • ของเหลวร้อนอื่น ๆ
2. ก๊าซร้อน เช่น • ก๊าซร้อนจากเตาเผาและเตาอบ • อากาศร้อนจากกระบวนการระบายความร้อน • ก๊าซร้อนจากแหล่งอื่น ๆ

ระดับอุณหภูมิของแหล่งความร้อนทิ้งอาจแบ่งออกได้เป็น 3 ระดับ คือ
1. อุณหภูมิสูง หมายถึง อุณหภูมิ > 650°C ดังแสดงในตารางที่ 4.2-1
2. อุณหภูมิปานกลาง หมายถึง อุณหภูมิระหว่าง 230-650°C ดังแสดงในตารางที่ 4.2-2
3. อุณหภูมิต่ำ หมายถึง อุณหภูมิ < 230°C ดังแสดงในตารางที่ 4.2-3

ตารางที่ 4.2-1 ตัวอย่างแหล่งความร้อนทิ้งอุณหภูมิสูง

แหล่งความร้อนทิ้ง	อุณหภูมิ (°C)
Nickel Refining Furnace	1,371-1,649
Aluminum Refining Furnace	649-760
Zinc Refining Furnace	760-1,093
Copper Refining Furnace	760-816
Steel Heating Furnace	927-1,038
Glass Melting Furnace	982-1,538
Solid Waste Incinerators	649-982

ตารางที่ 4.2-2 ตัวอย่างแหล่งความร้อนทิ้งอุณหภูมิปานกลาง

แหล่งความร้อนทิ้ง	อุณหภูมิ (°C)
Steam Boiler Exhausts	232-482
Gas Turbine Exhausts	371-538
Reciprocating Engine Exhausts	316-593
Heat Treating Furnace	427-649
Drying and Baking Ovens	232-593

ตารางที่ 4.2-3 ตัวอย่างแหล่งความร้อนทิ้งอุณหภูมิต่ำ

แหล่งความร้อนทิ้ง	อุณหภูมิ (°C)
Process Steam Condensate	54-88
Cooling Water from:	
Furnace Doors	32-54
Bearings	32-88
Welding Machines	32-88
Injection Molding Machines	32-88
Air Compressor	27-49
Internal Combustion Engine	66-121
Condenser of Air Conditioner and Refrigerator	32-43

4.3 การประเมินปริมาณและคุณภาพของความร้อนทิ้ง

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงแนวทางการประเมินปริมาณและคุณภาพความร้อนทิ้งในรูปของก๊าซร้อนเป็นหลัก ส่วนความร้อนทิ้งในรูปของของเหลวร้อนสามารถพิจารณาได้โดยใช้แนวทางเดียวกัน

การสูญเสียความร้อนไปกับก๊าซไอเสียร้อนเป็นสิ่งที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ในกระบวนการผลิตที่ใช้ความร้อนสูง ประสิทธิภาพของการใช้พลังงานในกระบวนการผลิตอาจเพิ่มขึ้นได้ โดยการนำความร้อนทิ้งจากกระแสก๊าซไอเสียกลับมาใช้อีก ในขั้นแรกต้องประเมินตัวแปร ดังต่อไปนี้

- อัตราการไหลของกระแสก๊าซไอเสีย
- อุณหภูมิของก๊าซไอเสีย
- องค์ประกอบของก๊าซไอเสีย

เมื่อสามารถหาค่าตัวแปรเหล่านี้ได้แล้ว การกำหนดวิธีการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่ก็สามารถทำให้สอดคล้องกับการใช้งานได้

โดยทั่วไป การวัดอุณหภูมิและอัตราการไหลสามารถทำได้ภายในหน่วยงานของตนเองโดยใช้เครื่องมือที่มีราคาถูก ซึ่งตัวแปรทั้งสองตัวที่ทำการวัดนี้ทำให้รู้ค่าระดับพลังงานที่มีอยู่ในกระแสก๊าซร้อนโดยประมาณในเบื้องต้น โดยในขั้นแรกนี้ การตรวจวัดยังไม่จำเป็นต้องมีความแม่นยำมาก (ค่าความคลาดเคลื่อน $\pm 10\%$ เป็นค่าที่เพียงพอสำหรับการประเมินเบื้องต้น) แต่หากต้องการความแม่นยำมากขึ้น สามารถเพิ่มรายละเอียดของการตรวจวัดองค์ประกอบของก๊าซ และประมาณความถี่ในการปล่อยความร้อนทิ้งจากแหล่งจ่ายความร้อนที่ได้รับจากการตรวจวัดในขั้นแรก และหากจำเป็นก็สามารถว่าจ้างบุคคลภายนอกมาทำการตรวจวัดโดยละเอียดเพิ่มเติมได้

4.3.1 การตรวจวัดอัตราการไหลของความร้อนทิ้ง (Measurement of Flow Rate)

อัตราการไหลของก๊าซสามารถวัดในเชิงปริมาณได้ โดยการวัดแรงดันที่ลดลงผ่านหน้าตัดของท่อ (Pipe หรือ Ductwork) โดยใช้วิธีการอย่างใดอย่างหนึ่งดังต่อไปนี้

- **ท่อพิทอท (Pitot Tube)** – วัดค่าแรงดันสถิตและแรงดันพลวัต (Static and Dynamic Pressure) ซึ่งเป็นผลมาจากความเร็วของก๊าซในท่อ สิ่งกีดขวางในท่อจำเป็นต้องคำนึงถึงผลจากผนังภายในท่อด้วยเพราะมีผลกระทบต่อการไหลของก๊าซ
- **ออร์ฟิซ (Orifice)** – ตรวจวัดแรงดันสูญเสียขณะที่ไหลผ่านแผ่นออร์ฟิซ (Orifice Plate) ซึ่งติดตั้งอยู่ภายในท่อ
- **เวนจูรี (Venturi)** – ตรวจวัดแรงดันสูญเสียขณะที่ไหลผ่านเวนจูรีซึ่งติดตั้งอยู่ที่ท่อ
- **แอนนิโมมิเตอร์ (Anemometer)** – วัดความเร็วของไหลในท่อ

การพิจารณาคัดเลือกเทคนิคการตรวจวัดที่เหมาะสมจะต้องคำนึงถึงลักษณะของรูปทรงทางเรขาคณิตและการจัดวางท่อ การตรวจวัดการไหลของก๊าซควรตรวจวัดให้ใกล้กับแหล่งจ่ายความร้อนมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ เพื่อหลีกเลี่ยงความไม่เที่ยงตรงซึ่งอาจเกิดขึ้นได้จากอากาศรั่วไหลหรือการรับอากาศเย็นเข้ามา การตรวจวัดในบริเวณที่มีการไหลสม่ำเสมอเป็นสิ่งสำคัญเช่นกัน เช่น การตรวจวัดในจุดที่เป็นท่อตรงและอยู่ห่างจากข้องอหรืออุปกรณ์ต่างๆ ที่ติดตั้งอยู่บนท่อ

4.3.2 การตรวจวัดอุณหภูมิ (Measurement of Temperature)

การตรวจวัดค่าอุณหภูมิของก๊าซไอเสียโดยทั่วไปมักใช้เครื่องวัดอุณหภูมิแบบเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ที่ใช้หลักการแรงเคลื่อนไฟฟ้าเชิงความร้อน หรือเครื่องวัดอุณหภูมิแบบไพโรมิเตอร์ (Pyrometer) ที่ใช้หลักการแผ่รังสีความร้อนของวัตถุ

1. เครื่องวัดอุณหภูมิแบบเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple)

เครื่องวัดอุณหภูมิแบบเทอร์โมคัปเปิล เป็นอุปกรณ์ที่มีราคาไม่แพง สะดวกในการใช้งาน และสามารถตรวจวัดได้หลายจุดภายในเตาหลอมหรือเตาอบในเวลาเดียวกัน อย่างไรก็ตาม มีข้อควรระวังในการใช้ คือ อุปกรณ์นี้อาจไม่ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี (Chemical Attack) การอุดตัน (Fouling) หรือความล้าที่เกิดจากความร้อน (Thermal Fatigue) นอกจากนี้ ก๊าซที่ไหลอย่างรวดเร็วผ่านเครื่องวัดอุณหภูมิแบบเทอร์โมคัปเปิล ทำให้เกิดผลกระทบด้านการพาความร้อนบางส่วนทิ้งไป ซึ่งมีผลทำให้ค่าอุณหภูมิที่อ่านได้ลดลง รวมทั้งการแผ่รังสีความร้อนจากผนังเตายังมีผลกระทบต่อการตรวจวัดอีกด้วย

2. เครื่องวัดอุณหภูมิแบบไพโรมิเตอร์ (Pyrometer)

เครื่องวัดอุณหภูมิที่ให้ผลแม่นยำมากที่สุดในปัจจุบัน คือ เครื่องวัดอุณหภูมิแบบไพโรมิเตอร์ชนิดดูด (Suction Pyrometer) เครื่องมือนี้จะดูดก๊าซที่ไหลออกจากปล่องเข้าสู่หลอดแก้วควอตซ์ปลายเปิด (Open-ended Quartz Tube) ความเร็วของก๊าซจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งอุณหภูมิซึ่งวัดโดยเทอร์โมคัปเปิลที่ฝังอยู่ภายในเครื่องมือค่าคงที่ เครื่องมือตรวจวัดชนิดนี้สามารถรับมือกับผลกระทบเรื่องการพาความร้อนของเทอร์โมคัปเปิล และผลกระทบจากการแผ่รังสีของผนังเตา อย่างไรก็ตาม เครื่องมือตรวจวัดชนิดนี้อาจเกิดการอุดตันและการกัดกร่อนได้เร็ว (รายละเอียดการใช้งานเครื่องวัดอุณหภูมิแบบไพโรมิเตอร์ สามารถศึกษาได้จากคู่มือ The Efficient Use of Energy เรียบเรียงโดย IGC Dden)

4.3.3 การหาปริมาณความร้อนที่สามารถใช้ประโยชน์ได้ (Quantifying Available Heat)

สำหรับกระบวนการผลิตความร้อนอย่างต่อเนื่อง สามารถคำนวณหาอัตราการถ่ายเทของพลังงานในก๊าซได้โดยใช้สมการต่อไปนี้

$$Q = V \times A \times \rho \times C \times \Delta T \quad (4.1)$$

โดย	Q	=	อัตราการถ่ายเทของพลังงานในก๊าซ, kW
	V	=	ความเร็วการไหลของก๊าซ, m/s
	A	=	พื้นที่หน้าตัดของปล่องปล่อยก๊าซไอเสีย ณ จุดที่วัด, m ²
	ρ	=	ความหนาแน่นของก๊าซหรือก๊าซผสม, kg/m ³
	C	=	ความร้อนจำเพาะของก๊าซหรือก๊าซผสมที่คำนวณได้, kJ/(kg.°K)
	ΔT	=	ความแตกต่างของอุณหภูมิของก๊าซที่ปล่อยออกและอุณหภูมิบรรยากาศ, °C

สำหรับก๊าซสะอาดสามารถใช้ค่า Q ควบคู่ไปกับประสิทธิภาพของอุปกรณ์ที่ใช้ในการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่ นั่นคือ ความร้อนที่ใช้ประโยชน์ได้ที่ทางออกหารด้วยความร้อนที่ใส่เข้าไปในอุปกรณ์ (Useful Heat Out / Heat Into Device) เพื่อให้ได้ค่าอัตราการไหลของพลังงานที่มีประโยชน์เพื่อนำมาใช้แทนเชื้อเพลิงปฐมภูมิ

ข้อมูลนี้สามารถใช้เป็นประโยชน์ในการประมาณการเบื้องต้นทางเศรษฐศาสตร์ของระบบการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่

4.4 โอกาสในการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่

เมื่อสามารถหาปริมาณและคุณภาพของความร้อนทิ้งที่มีอยู่ และระบุปัญหาที่อาจเกิดขึ้นได้แล้ว ขั้นตอนต่อไป คือ การพิจารณาศักยภาพในการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่

(หมายเหตุ: ข้อควรคำนึงในการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่ คือ ไม่ควรทำถ้ายังไม่ทราบว่า จะนำมาใช้งานที่ไหนจึงจะได้รับผลสำเร็จ)

4.4.1 การใช้ความร้อนทิ้งอย่างคุ้มค่า (Cost-effective Use of Waste Heat)

การนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่ที่พบโดยทั่วไป มักใช้วิธีการที่ไม่คุ้มค่าใช้จ่ายมากนัก ตัวอย่างที่เห็นได้บ่อยครั้งที่สุด คือ การนำความร้อนทิ้งมาให้ความร้อนกับพื้นที่ (Space Heating) ซึ่งอาจมีการใช้งานได้เฉพาะช่วงฤดูหนาวเพียงไม่กี่เดือนในหนึ่งปี ส่วนในเดือนที่เหลือ ความร้อนต้องนำไปทิ้งโดยเปล่าประโยชน์ ยิ่งไปกว่านั้น ถ้าแหล่งจ่ายความร้อนทิ้งมีคุณภาพดี แต่มีการนำความร้อนไปให้ความร้อนกับพื้นที่เพียงบางส่วนเท่านั้น ก็จะเป็นการใช้ความร้อนที่ไม่คุ้มค่า ซึ่งจากที่กล่าวมา จะเห็นได้ว่า การใช้ความร้อนทิ้งยังคงถูกจำกัดการใช้งานอยู่ที่อุณหภูมิระดับต่ำเท่านั้น

การใช้ความร้อนทิ้งที่คุ้มค่าใช้จ่ายมากที่สุด คือ การปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานของกระบวนการผลิตความร้อน โดยการนำความร้อนทิ้งในกระบวนการผลิตกลับมาใช้ใหม่โดยทันทีซึ่งสามารถจะช่วย

- ลดการใช้เชื้อเพลิงให้น้อยลง
- ขจัดขั้นตอนการส่งผ่านความร้อน
- การจัดหาและการใช้พลังงานมีความสมดุลกัน

(หมายเหตุ: จะได้ประสิทธิภาพการผลิตสูงที่สุดถ้าสามารถใช้ความร้อนทิ้งในขณะที่อุณหภูมิยังสูงอยู่ ทั้งนี้จะทำให้ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงลดลงอย่างมาก)

อัตราการถ่ายเทความร้อนจะมีค่าสูงที่สุด ณ อุณหภูมิระดับสูง เพราะจะทำให้เกิดการนำความร้อนดีขึ้นและการแผ่รังสีความร้อนจะมากขึ้น (สัดส่วนเท่ากับอุณหภูมิกำลังสี่) ดังนั้น การใช้งานที่อุณหภูมิระดับสูงจะลดได้ทั้งพื้นที่ผิวสัมผัสของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และค่าใช้จ่ายการที่จะใช้อากาศผสมเพื่อลดอุณหภูมิของก๊าซก่อนเข้าสู่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน การลดอุณหภูมิก๊าซดังกล่าวควรได้รับการตรวจสอบอย่างถี่ถ้วนก่อนการปฏิบัติ เพราะทำให้ลดประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนลงทั้งนี้เพราะว่าอุณหภูมิลดต่ำลงและต้องการอัตราการไหลเพิ่มขึ้น

สำหรับกระบวนการผลิตบางประเภท ไม่สามารถที่จะนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่ได้อย่างคุ้มค่า เนื่องจากขาดความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์ หรือไม่มีเทคโนโลยีการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่ที่เป็นไปได้

4.4.2 ทางเลือกของการใช้ความร้อนทิ้ง (Available Options of Using Waste Heat)

ความร้อนทิ้งที่นำกลับมาใช้ใหม่มีความเป็นไปได้ที่จะนำกลับมาใช้ในกรณีต่างๆ ดังนี้

แนวทางการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่
1. อุ่นอากาศสำหรับการเผาไหม้ ทั้งภายในหัวเผา หรือใช้ที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบรีคูเพอเรเตอร์ (Recuperator) หรือเครื่องสะสมความร้อน (Regenerator)
2. การอุ่นแท่งเหล็ก (Stock) ก่อนบรรจุเข้าเตาหลอม
3. การอุ่นเตาหลอมโดยใช้ความร้อนทิ้งจากเตาหลอมอื่น (Furnace Regenerator)
4. การอบแห้ง เช่น ในการผลิตอิฐ
5. การให้ความร้อนกับพื้นที่หรือการผลิตน้ำร้อน
6. ผลิตไอน้ำสำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้า
7. ผลิตไอน้ำที่ความดันต่ำเพื่อใช้งานในกระบวนการผลิต
8. อุ่นน้ำมันเชื้อเพลิง เช่น น้ำมันเตา

ตัวอย่างของการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่ในกรณีต่างๆ

4.4.2.1 การอุ่นอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ (Pre-heating Combustion Air)

การอุ่นอากาศสำหรับการเผาไหม้เป็นวิธีการใช้ความร้อนทิ้งที่เป็นที่นิยมมากที่สุดวิธีหนึ่ง การอุ่นอากาศแบบนี้เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพมากและให้ผลตอบแทนในการลงทุนสูง ผลประโยชน์ที่ได้รับ คือ

- มีการแลกเปลี่ยนความร้อนจากแหล่งจ่ายความร้อนทิ้งกับแหล่งรับความร้อนทิ้ง
- ลดการใช้เชื้อเพลิงที่จุดใช้งาน
- การใช้ความร้อนทิ้งได้มากที่สุด
- การใช้ความร้อนทิ้งโดยไม่ต้องทำให้เจือจางลง (เพื่อให้มั่นใจว่าได้ประสิทธิภาพสูงสุด)

อุปกรณ์สำหรับอุ่นอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้สามารถแบ่งได้เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบรีคูเพอเรเตอร์ (Recuperator) และเครื่องสะสมความร้อน (Regenerator) สำหรับรีคูเพอเรเตอร์เป็นอุปกรณ์การนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่ซึ่งทำงานโดยใช้วิธีการให้ก๊าซร้อน และอากาศเย็นไหลสวนทางกันโดยผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ขณะที่รีเจนเนอเรเตอร์เป็นอุปกรณ์สะสมความร้อนแบบวัฏจักร (Cyclic Heat Storage Device) การเลือกใช้งานขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของอุปกรณ์และจุดที่จะติดตั้งใช้งาน เช่น การใช้ในเตาหลอมนั้นมีข้อเสนอแนะว่า ภายใต้สภาวะที่วิกฤตของรูปแบบการใช้อุณหภูมิ (Temperature Profiles) ภายในเตาหลอมหรือเตาเผา ควรพิจารณาทำแบบจำลอง (Modeling) ทางกายภาพ และทางคณิตศาสตร์ของรูปทรงทางเรขาคณิตของเตาเผาและหัวเผาก่อน เพื่อจะทำให้เกิดความเหมาะสมมากที่สุด

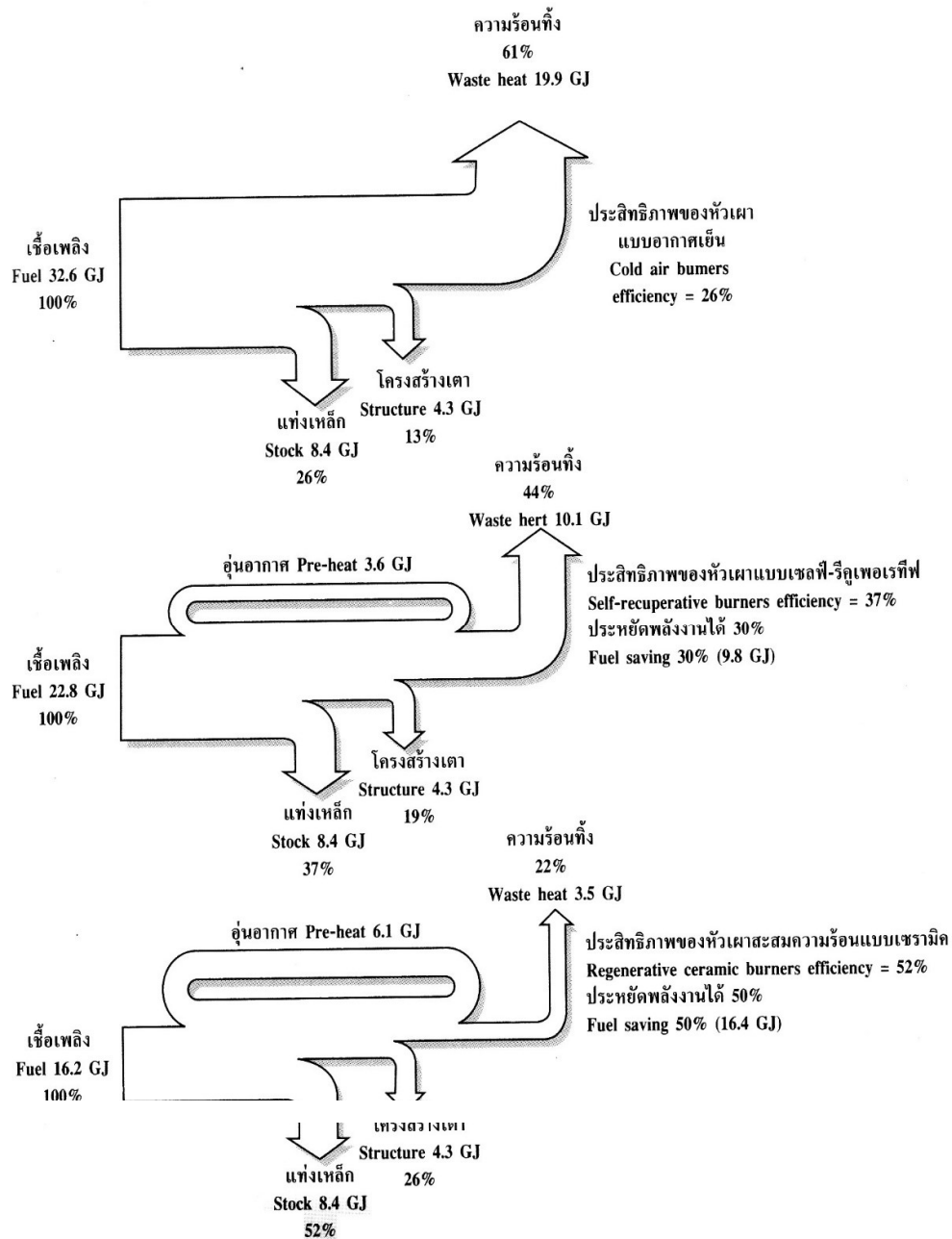
ตอนที่ 3 บทที่ 4 การอนุรักษ์พลังงานโดยการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่

ตัวอย่างที่ 4.1 แท่งเหล็ก (Steel Billet) จำนวน 10 ตัน ถูกให้ความร้อนในเตาหลอมที่อุณหภูมิ $1,250^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 8 ชั่วโมง สมมติว่าเตาหลอมทำงาน 15 ชั่วโมงต่อวัน และ 45 สัปดาห์ในหนึ่งปี จะได้รูปที่ 4.4-1 ซึ่งเป็นผลการวิเคราะห์การไหลของพลังงาน (Energy Flow) สำหรับหัวเผา 3 แบบ คือ แบบอากาศเย็น แบบรีคูเพอเรทีฟ (Recuperative) และแบบสะสมความร้อน (Regenerative) ค่าการใช้พลังงานจำเพาะสำหรับหัวเผทั้ง 3 คือ

หัวเผาแบบอากาศเย็น	32.6	กิกะจูลส์/ตัน (GJ / Ton)
หัวเผาแบบรีคูเพอเรทีฟ	22.8	กิกะจูลส์/ตัน (GJ / Ton)
หัวเผาแบบสะสมความร้อน	16.2	กิกะจูลส์/ตัน (GJ / Ton)

ระบบหัวเผาแบบสะสมความร้อน และแบบรีคูเพอเรทีฟ สามารถประหยัดเชื้อเพลิงได้มากกว่าระบบหัวเผาแบบอากาศเย็นถึง 50% และ 30% ตามลำดับ

การใช้หัวเผาแบบสะสมความร้อนกับเตาหลอมให้ความร้อนซ้ำ (Reheating Furnace) จะลดค่าการใช้พลังงานจำเพาะของเตาหลอมลงไปได้อีก ยิ่งไปกว่านั้น หากลดการสูญเสียความร้อนผ่านทางโครงสร้างของเตาหลอมโดยการปรับปรุงฉนวน จะสามารถลดการใช้พลังงานจำเพาะได้อีกประมาณ 10-15%



รูปที่ 4.4-1 การไหลของพลังงานรอบเตาหลอมที่ให้ความร้อนซ้ำโดยใช้หัวเผาทั้ง 3 แบบ

4.4.2.2 การอุ่นและการทำให้แห้ง (Charge Pre-heating and Drying)

ในการอุ่นวัตถุดิบ (บางครั้งหมายถึงการจ่ายความร้อนให้แก่รีคูเพอเรเตอร์หรือ Charge Recuperator) ก๊าซจากเตาหลอมหรือเตาเผาจะถูกส่งตรงไปยังแท่งเหล็กที่ป้อนเข้าเตา (Incoming Stock) โดยผ่านท่อหรือการขยายขนาดของเตาหลอม ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการอุ่นขึ้นอยู่กับลักษณะของรูปทรงของเตาหลอม เตาอบ หรือเตาเผา

ค่าใช้จ่ายในการลงทุนเริ่มต้นในการขยายเตาหลอมหรือการหุ้มฉนวนท่อลมอาจจะสูง แต่ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาที่ตามมาจะมีค่าต่ำ ซึ่งในเชิงเศรษฐศาสตร์แล้วจุดที่มีประสิทธิภาพสูงสุด คือ จุดที่มีการใช้พลังงาน

ในการอุ่นวัตถุดิบเท่ากับการอุ่นอากาศสำหรับการเผาไหม้ โดยที่การอุ่นวัตถุดิบมีข้อได้เปรียบในเรื่องค่าใช้จ่าย การบำรุงรักษาที่ต่ำ แต่การอุ่นอากาศสำหรับการเผาไหม้มีค่าใช้จ่ายในการลงทุนที่ต่ำกว่า

เตาหลอมส่วนมากมักจะมีการออกแบบโดยติดตั้งระบบการจ่ายความร้อนให้รีคูเพอเรเตอร์ เช่น เตาหลอมเหล็ก แบบใช้ลมเป่า (Blast Furnaces) และเตาเผาเครื่องปั้นดินเผาแบบอุโมงค์ (Tunnel Kiln) ในกรณีนี้ก๊าซพลอยทิ้งจากรีคูเพอเรเตอร์มีอุณหภูมิค่อนข้างต่ำ (น้อยกว่า 400°C) ในภาคอุตสาหกรรมบางประเภท เช่น การหล่ออลูมิเนียม และทองแดง การอุ่นวัตถุดิบมีข้อได้เปรียบในด้านการจัดอันดับรายการจากการระเบิดที่เกิดจากบ่อน้ำที่ขังอยู่ ประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อนจะเปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะรูปร่างของวัตถุดิบ การนำความร้อน อัตราการไหล และอุณหภูมิ เตาหลอมที่ใช้เทคนิคดังกล่าวนี้จะประหยัดเชื้อเพลิงอยู่ในช่วงประมาณ 10-30%

4.4.2.3 การผลิตไอน้ำ (Steam Generation)

ในอุตสาหกรรมเคมี ทองแดง เหล็ก และเหล็กกล้า มีการใช้ไอน้ำอย่างคุ้มค่ามานานแล้ว โดยนำความร้อนทิ้งมาใช้กับหม้อไอน้ำเพื่อผลิตไอน้ำมาใช้งานในกระบวนการผลิต ซึ่งวิธีการดังกล่าวจะให้ความคุ้มค่าในทางเศรษฐศาสตร์ การบำรุงรักษาและการควบคุมอย่างสม่ำเสมอเป็นสิ่งที่จำเป็นเพราะจะทำให้ระยะเวลาการคืนทุนประมาณ 2 ถึง 3 ปี

โดยทั่วไป หม้อไอน้ำที่ใช้ความร้อนทิ้งมีประสิทธิภาพในการใช้พลังงานสูงถึง 80% ทั้งนี้เป็นเพราะมีการดูดซึมพลังงานในระหว่างการเปลี่ยนสถานะ (Phase Change) การใช้หม้อไอน้ำแบบนี้ควรพิจารณาถึงความสะดวกในการติดตั้งอุปกรณ์และค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา โดยทั่วไปการพิจารณาใช้หม้อไอน้ำแบบความร้อนทิ้งจะต้องทำตั้งแต่ในขั้นของการออกแบบโรงงาน

ก่อนที่จะพิจารณาเลือกใช้หม้อไอน้ำที่ใช้ความร้อนทิ้ง ควรคำนึงถึงคำถามต่างๆ ต่อไปนี้

- มีความร้อนทิ้งอย่างต่อเนื่องหรือไม่
- มีความต้องการใช้ไอน้ำอย่างต่อเนื่องในกระบวนการผลิตที่อยู่ใกล้กันหรือไม่
- มีระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำในเบื้องต้นที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานแล้วหรือไม่
- มีพื้นที่สำหรับหม้อไอน้ำขนาดใหญ่ที่อยู่ใกล้กับแหล่งจ่ายความร้อนทิ้งแล้วหรือไม่
- มีความสามารถในการบำรุงรักษาระบบให้ทำงานอยู่ในสภาวะที่ดีที่สุดหรือไม่

โดยทั่วไป การพิจารณาจัดซื้อหม้อไอน้ำที่ใช้ความร้อนทิ้งจะขึ้นอยู่กับความต้องการไอน้ำในกระบวนการผลิต หรือในบางกรณีก็พิจารณาถึงความต้องการให้ความร้อนสำหรับป้อนให้ระบบทำความเย็นแบบดูดซึม

4.4.2.4 การผลิตกระแสไฟฟ้า (Power Generation)

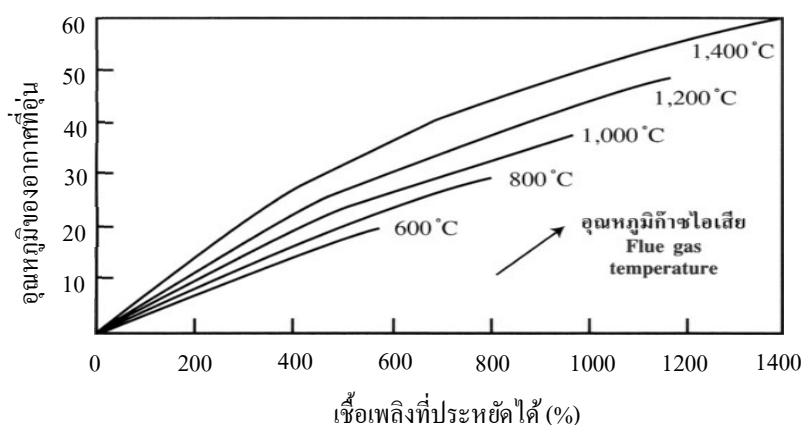
การผลิตกระแสไฟฟ้าจากความร้อนทิ้งได้นำมาใช้อย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรมเคมี และปิโตรเคมีจนกลายเป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการผลิตสารเคมี ในอุตสาหกรรมประเภทนี้ กระบวนการผลิตมักไม่คุ้มค่าในทางเศรษฐศาสตร์หากปราศจากอุปกรณ์การนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่ ตัวอย่างการใช้งานสามารถพบได้ในกระบวนการแยกเอทิลีน (Ethylene Cracking) การผลิตแอมโมเนีย (Ammonia Production) และการกลั่นปิโตรเคมี (Petrochemical Refining) ซึ่งมีความต้องการทั้งกระแสไฟฟ้าและไอน้ำแรงดันต่ำ การผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้ความร้อนทิ้งควรจะต้องมี

- แหล่งจ่ายความร้อนทั้งอย่างต่อเนื่อง
- การบำบัดน้ำในเบื้องต้น
- การบำรุงรักษาเป็นประจำ
- หม้อไอน้ำแรงดันสูงและกังหันไอน้ำแบบควบแน่น (Condensing Steam Turbine)

ความต้องการข้อสุดท้ายนี้มีผลทำให้ค่าใช้จ่ายในการลงทุนสูง ระยะเวลาการคืนทุนโดยทั่วไปประมาณ 3 ถึง 6 ปี-ปัจจุบันยังไม่มีตัวอย่างสำหรับกรณีการปรับปรุงระบบผลิตกระแสไฟฟ้าที่ใช้ก๊าซทิ้งอุณหภูมิสูง ข้อยกเว้นสำหรับกรณีนี้คือ การใช้ไอเสียจากหม้อไอน้ำความร้อนทิ้ง (Waste Heat Boiler) สำหรับขับเคลื่อนกังหันก๊าซ (Gas Turbine) เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าและความร้อนร่วม (Combined Heat and Power, CHP)

4.5 เทคโนโลยีการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่ (Available Heat Recovery Technology)

วิธีการต่างๆ ในการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่จากก๊าซทิ้งได้มีการพัฒนาเป็นระยะเวลากว่า 30 ปี มีเทคโนโลยีหลายแบบที่ได้รับการยอมรับกันอย่างแพร่หลาย และมีการนำไปประยุกต์ใช้งานในโรงงานที่ทันสมัยในปัจจุบัน ในช่วงระยะเวลาไม่กี่ปีที่ผ่านมา ได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่ ที่คาดว่าจะมีประสิทธิภาพสูงและมีผลตอบแทนที่คุ้มค่า นอกจากนี้ ผู้ผลิตอุปกรณ์การเผาไหม้ก็ให้ความสนใจในเทคโนโลยีการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่ เพื่อเป็นการแก้ปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม โดยเลือกวิธีที่สามารถแก้ปัญหาเกี่ยวกับประสิทธิภาพการนำความร้อนอุณหภูมิสูงจากก๊าซทิ้งกลับมาใช้ใหม่



รูปที่ 4.5-1 การประหยัดเชื้อเพลิงที่ได้จากการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้อุ่นอากาศป้อน

อุปกรณ์ที่ทันสมัยที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพความร้อนทิ้งที่มีอุณหภูมิสูง เช่น เตาหลอมหรือเตาเผา มักติดตั้งอุปกรณ์นำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่ โดยเตารุ่นใหม่ที่ได้มาตรฐานจะมีการติดตั้งมาพร้อมกับเครื่องอยู่แล้ว อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีส่วนใหญ่ที่มีอยู่ในปัจจุบันได้มีการปรับปรุงให้สามารถใช้งานได้กับอุปกรณ์เดิมที่มีอยู่แล้ว ในที่นี้จะกล่าวถึงเทคโนโลยีที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการประยุกต์ใช้งานที่แตกต่างกัน และจะเน้นในเรื่องของการประหยัดที่คาดว่าจะได้รับ ตัวอย่างเช่นในรูปที่ 4.5-1 แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของการประหยัดเชื้อเพลิงจากการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ในการอุ่นอากาศสำหรับการเผาไหม้

4.5.1 เทคโนโลยีที่เป็นที่ยอมรับ (Established Technology)

ในปัจจุบัน อุปกรณ์ที่ใช้ในการนำความร้อนทิ้งที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 400°C กลับมาใช้ใหม่นั้น ได้นำเอาหลักการหลายอย่างของการแลกเปลี่ยนความร้อนมาใช้ ซึ่งในส่วนต่อไปจะได้กล่าวถึงเทคโนโลยีที่มีใช้กันอยู่ในปัจจุบัน โดยนำเสนอในรูปแบบของตารางสรุปเนื้อหาของแต่ละเทคโนโลยี ประกอบด้วยศักยภาพในการใช้งาน ช่วงอุณหภูมิที่นำมาใช้งาน ประสิทธิภาพโดยทั่วไป และข้อดีข้อเสียของแต่ละเทคโนโลยี

(หมายเหตุ: วิธีการเลือกใช้เทคโนโลยีการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่ชนิดที่เหมาะสมที่สุดขึ้นอยู่กับประเภทของการใช้งานนั้นๆ ผู้ใช้งานควรจะติดต่อผู้ผลิตอุปกรณ์หรือบริษัทที่ปรึกษาก่อนที่จะตัดสินใจ)

4.5.1.1 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger)

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทำหน้าที่ถ่ายเทความร้อนจากของไหลชนิดหนึ่งไปยังอีกชนิดหนึ่ง ส่วนใหญ่จะใช้เมื่อต้องการลดความร้อนของผลิตภัณฑ์ให้เย็นลง ในทางตรงกันข้าม สามารถใช้ในการเพิ่มความร้อนให้กับวัตถุดิบที่ป้อนเข้าสู่กระบวนการผลิต (เช่น ความร้อนจากเชื้อเพลิงถ่ายเทให้กับน้ำในท่อของหม้อไอน้ำ) ได้เช่นกัน นอกจากนี้ ยังสามารถถ่ายเทความร้อนจากกระบวนการผลิตหนึ่งไปยังอีกกระบวนการหนึ่งได้ด้วย

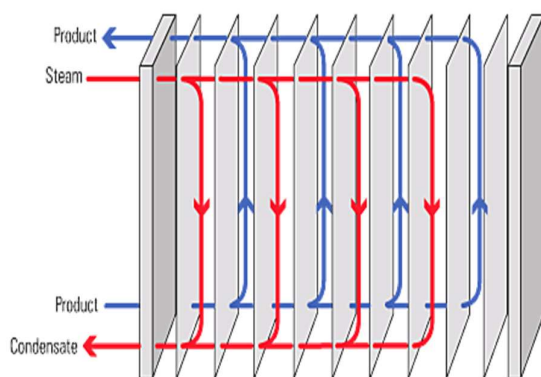
ก) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น (Plate Exchanger)

ภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น อากาศเย็นและก๊าซร้อนทั้งจะมีการไหลสวนทางกัน (Counterflow) ระหว่างแผ่นที่เรียงติดกัน ดังนั้นการถ่ายเทความร้อนจะเกิดขึ้นระหว่างกระแสน้ำร้อนกับกระแสน้ำเย็น (ดูรูปที่ 4.5-2) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดนี้อาจมีข้อจำกัดในการใช้งานในช่วงอุณหภูมิสูง เนื่องจากมีการเกิดปฏิกิริยาการรวมตัวกับก๊าซออกซิเจน (Oxidation) ที่ระดับอุณหภูมิสูงกว่า 800°C ยกเว้นว่าจะใช้โลหะผสมชนิดพิเศษ (Special Alloys) คุณสมบัติของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นได้รวบรวมสรุปไว้ในตารางที่ 4.5-1

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ทำด้วยเซรามิกได้มีการพัฒนาให้สามารถทนต่อความร้อนสูง (900-1,100°C) อย่างไรก็ตาม พบว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดนี้มีปัญหาเกี่ยวกับการรั่วไหลได้ง่ายและไม่ค่อยจะเป็นที่ยอมรับกันแพร่หลายในท้องตลาด

ตารางที่ 4.5-1 คุณสมบัติของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น

การใช้งาน	- ใช้ทำความร้อนให้กับพื้นที่ - ใช้อุ่นอากาศให้กับการเผาไหม้
ช่วงอุณหภูมิที่ใช้งาน	- ใช้กับความร้อนทั้งอุณหภูมิน้อยกว่า 200°C
ประสิทธิภาพโดยรวม	- ประมาณ 40-60%
ข้อดี	- สร้างไว้เป็นชุดสำเร็จรูป - ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนสูง - มีหลายขนาดให้เลือก
ข้อด้อย	- อาจมีการรั่วไหล - เกิดความสกปรกหรืออุดตันได้ง่าย - ต้องการการบำรุงรักษามาก



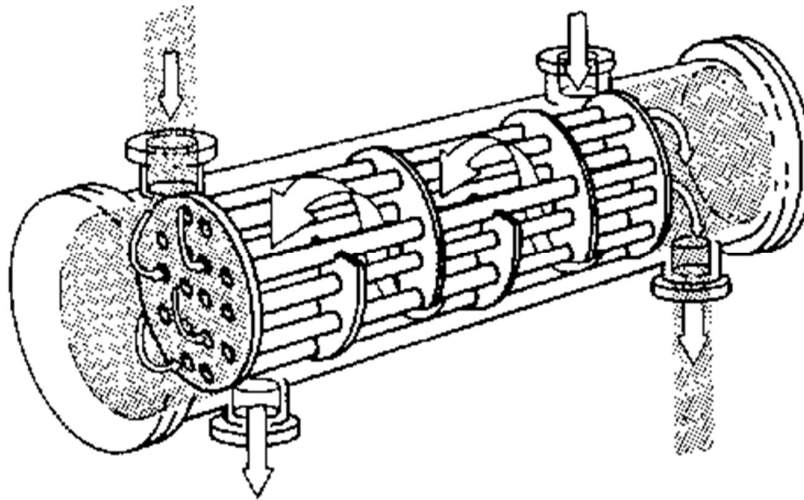
รูปที่ 4.5-2 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น

ข) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ (Shell-and-Tube Heat Exchanger)

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ ประกอบด้วยชุดท่อขนาดเล็กมัดรวมกัน แล้วบรรจุไว้ภายในเปลือกท่อหรือท่อขนาดใหญ่อีกหนึ่งเครื่อง เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อมีการใช้งานอย่างแพร่หลายในกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของเหลวกับของเหลว แต่ก็มีการใช้งานในกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซกับก๊าซ โดยก๊าซด้านหนึ่งจะมีแรงดันสูงส่วนอีกด้านหนึ่งมีแรงดันต่ำกว่า เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อนี้มีข้อได้เปรียบกว่าอุปกรณ์การพาความร้อน (Convection) ชนิดใช้ท่อแบบอื่น เพราะสามารถถอดชุดท่อเพื่อทำความสะอาดได้สะดวก ทำให้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้มีความเหมาะสมในการใช้งานกับก๊าซที่สกปรกได้มากกว่า เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้ โดยทั่วไปจะถูกออกแบบและสร้างตามความต้องการของลูกค้าเพื่อให้เหมาะกับการใช้งาน ดังนั้น เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดนี้จึงค่อนข้างจะมีราคาแพงกว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดอื่น คุณสมบัติของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือก และท่อ สรุปไว้ในตารางที่ 4.5-2

ตารางที่ 4.5-2 คุณสมบัติของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ

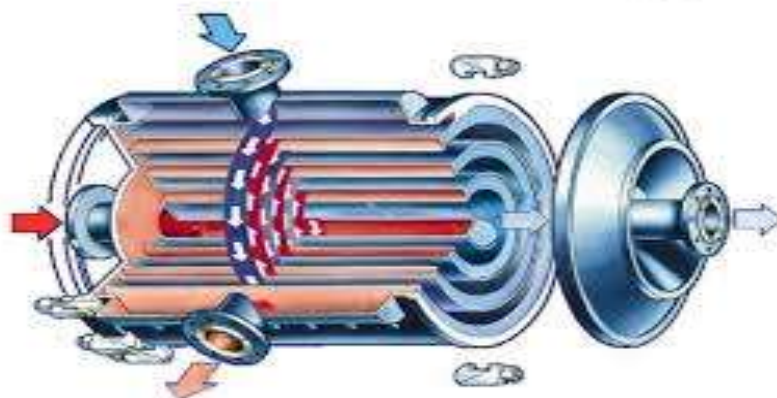
การใช้งาน	- ก๊าซกับก๊าซ และ ของเหลวกับของเหลว เช่น การทำความร้อนให้กับ ของไหล
ช่วงอุณหภูมิที่ใช้งาน	- ใช้กับก๊าซที่อุณหภูมิสูงสุดถึง 550°C
ประสิทธิภาพโดยรวม	- ประมาณ 70-80%
ข้อดี	- สามารถใช้ได้กับก๊าซแรงดันสูง (230 – 250 bar) - ง่ายต่อการทำความสะอาด
ข้อด้อย	- ราคาแพง - ขนาดค่อนข้างใหญ่ - ต้องออกแบบตามวัตถุประสงค์ของการใช้งานแต่ละงาน - ประสิทธิภาพแลกเปลี่ยนความร้อนต่ำกว่า Plate HE



รูปที่ 4.5-3 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ

ค) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบกันหอย (Spiral Heat Exchanger)

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้สร้างขึ้นจากแผ่นราบ 2 แผ่น มาทำการดัดขนาบกันให้เหมือนลายกันหอยโข่งดังรูป ซึ่งมีทั้งแบบไหลสวนทาง (Counter Flow) กับไหลตั้งฉาก (Cross Flow)



รูปที่ 4.5-4 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบกันหอย

ตารางที่ 4.5-3 คุณสมบัติของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบกันหอย

การใช้งาน	- ใช้การทำความร้อนให้กับ ของไหล
ช่วงอุณหภูมิที่ใช้งาน	- 100-300°C
ประสิทธิภาพโดยรวม	- ประมาณ 70-80%
ข้อดี	- สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูง - ความดันสูญเสียต่ำ - การไหลภายในสม่ำเสมอ
ข้อด้อย	- ทำความสะอาดและซ่อมแซมได้ยาก - ไม่เหมาะกับของไหลที่กัดกร่อน - ไม่เหมาะกับของไหลที่มีความดันสูง

4.5.1.2 รีคูเพอเรเตอร์ (Recuperator)

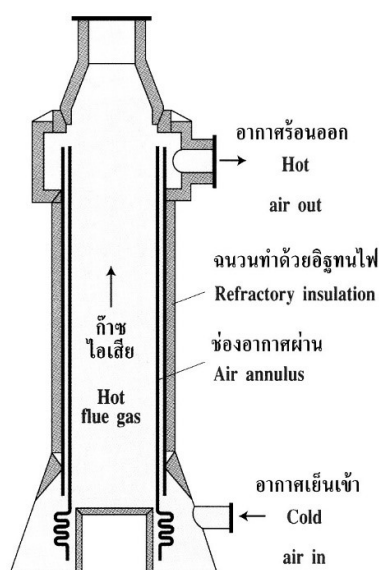
รีคูเพอเรเตอร์เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดหนึ่งที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อนจากก๊าซไอเสียร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ กับอากาศเย็นเพื่อนำไปใช้สำหรับการเผาไหม้ ดังนั้น ความร้อนจึงถูกส่งกลับเข้าไปในเตาหลอม และทำให้เตาหลอมมีประสิทธิภาพสูงขึ้น นอกจากนี้ อุณหภูมิของเปลวไฟก็จะเพิ่มขึ้นด้วย

ก) ท่อแผ่รังสีกับรีคูเพอเรเตอร์ (Radiation Tubes with Recuperator)

อากาศเย็นและก๊าซร้อนทั้งไหลสวนทางกันตามแนวท่อซึ่งมีจุดศูนย์กลางร่วมกัน การถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นจากการแผ่รังสีจากผิวท่อ (ดูรูปที่ 4.5-4) ท่อแผ่รังสีที่เหมาะสมที่สุดกับเตาหลอมขนาดใหญ่ที่มีอัตราการไหลของก๊าซสูง (5-10 ลูกบาศก์เมตร/วินาที) ซึ่งจะไม่ทำให้เกิดการปนเปื้อนจากก๊าซเหมือนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดอื่น โดยรีคูเพอเรเตอร์มักติดตั้งที่จุดปล่อยก๊าซไอเสีย คุณสมบัติของรีคูเพอเรเตอร์แบบถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีสรุปไว้ในตารางที่ 4.5-4

ตารางที่ 4.5-4 คุณสมบัติของรีคูเพอเรเตอร์แบบถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสี

การใช้งาน	- ใช้อุ่นอากาศสำหรับการเผาไหม้ - นิยมใช้ในอุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้าที่มีเตาหลอมให้ความร้อนซ้ำ (Reheating Furnace) ขนาดใหญ่ และบ่อชุบ (Soaking Pit)
ช่วงอุณหภูมิที่ใช้งาน	- ใช้กับก๊าซที่มีอุณหภูมิสูงสุดถึง 1,400°C
ประสิทธิภาพโดยรวม	- ประมาณ 10-20%
ข้อดี	- สามารถใช้งานในสภาพที่มีอุณหภูมิสูงและก๊าซมีสารปนเปื้อนมาก - มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน - มีค่าใช้จ่ายต่ำ
ข้อด้อย	- มีประสิทธิภาพต่ำ



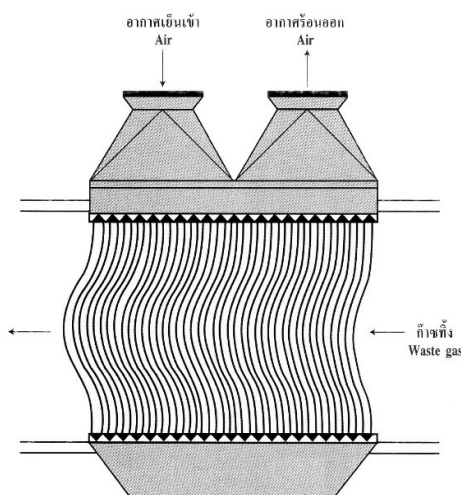
รูปที่ 4.5-5 รีคูเพอเรเตอร์แบบท่อสองชั้น (Double Shell Type Recuperator)

ข) ท่อพาความร้อนกับรีคูเพอเรเตอร์ (Convection Tubes with Recuperator)

สำหรับท่อพาความร้อนกับรีคูเพอเรเตอร์ อากาศเย็นสำหรับการเผาไหม้ไหลอยู่ภายในท่อที่ยึดติดกับแผ่นซีล ในขณะที่ก๊าซร้อนทิ้งไหลผ่านภายนอกท่อ (รูปที่ 4.5-5) การไหลของก๊าซทิ้งอย่างปั่นป่วน (Turbulent) ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนโดยการพา (Convection) วัสดุที่ใช้ทำท่อมีทั้งโลหะและเซรามิก เซรามิกสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงกว่าแต่มีปัญหาเรื่องการร้าวซึมมากกว่ารีคูเพอเรเตอร์ชนิดท่อเซรามิกไม่ค่อยนิยมใช้อย่างแพร่หลายด้วยเหตุนี้ นอกจากนี้ยังเนื่องมาจากวัสดุมีราคาแพงอีกด้วย คุณสมบัติของรีคูเพอเรเตอร์แบบถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน สรุปไว้ในตารางที่ 4.5-5

ตารางที่ 4.5-5 คุณสมบัติของรีคูเพอเรเตอร์แบบถ่ายเทความร้อนโดยการพา

การใช้งาน	- ใช้อุ่นอากาศสำหรับการเผาไหม้
ช่วงอุณหภูมิที่ใช้งาน	- ใช้กับก๊าซทิ้งที่มีอุณหภูมิสูงสุดถึง 1,200°C
ประสิทธิภาพโดยรวม	- ประมาณ 30-50%
ข้อดี	- สามารถทนทานต่ออุณหภูมิสูง - สามารถทนทานต่อก๊าซปนเปื้อนบางชนิด
ข้อด้อย	- มีราคาแพง - มีปัญหาการรั่วซึมบริเวณซีลของท่อและผนัง



รูปที่ 4.5-6 รีคูเพอเรเตอร์แบบการพาความร้อนด้วยท่อ (Tubular Convection Recuperator)

ค) หัวเผาแบบรีคูเพอเรทีฟและหัวเผาแบบเซลฟ์-รีคูเพอเรทีฟ (Recuperative Burner System and Self-recuperative Burner)

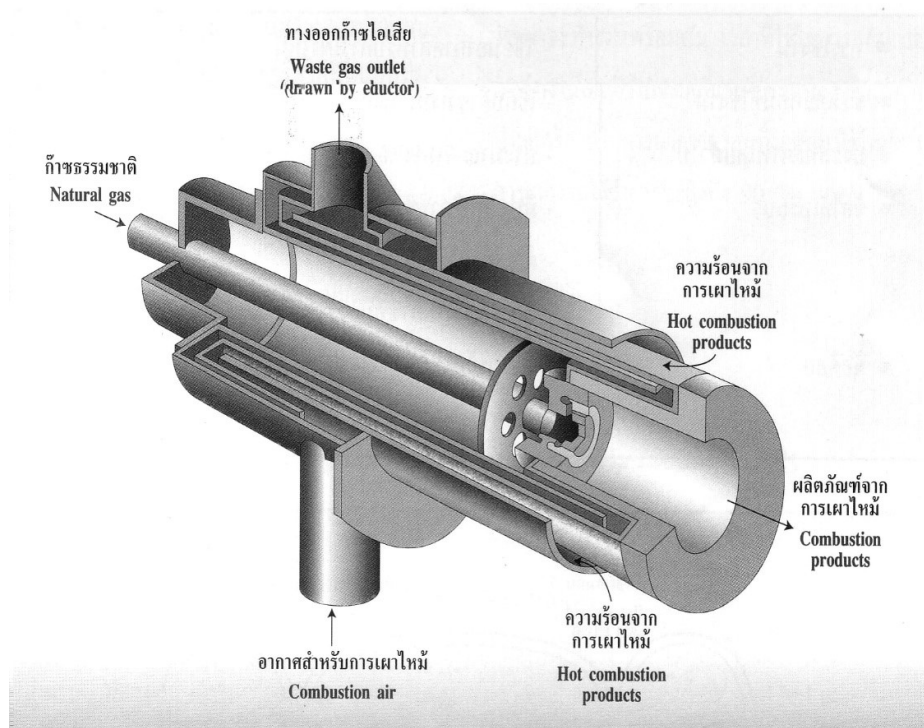
เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นและท่อแผ่รังสี (Plate and Radiation Tube Heat Exchanger) เมื่อนำมาใช้ร่วมกับหัวเผาความร้อนสูง ทำให้เกิดเป็นหัวเผาแบบรีคูเพอเรทีฟ หลักการทำงานของระบบนี้ คือ ก๊าซทิ้งจะถูกส่งผ่านรีคูเพอเรเตอร์ที่ติดตั้งแยกต่างหาก ซึ่งโดยปกติจะต่อเข้ากับปล่องของเตาหลอมเพื่อที่จะใช้อุ่นอากาศสำหรับการเผาไหม้

การพัฒนาที่ตามมาทำให้เกิดหัวเผาแบบเซลฟ์-รีคูเพอเรทีฟ ซึ่งมีลักษณะเป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อแผ่รังสี โดยจะสร้างขึ้นมามีติดกับตัวของหัวเผา (รูปที่ 4.5-6) ก๊าซทิ้งจะไหลผ่านหัวเผาโดยใช้อุปกรณ์ดึงก๊าซไอเสีย (Flue Gas Eductor) และให้ความร้อนกับอากาศเย็นที่ใช้ในการเผาไหม้ที่ไหลสวนทางผ่านช่วงรอบนอกของท่อที่เข้ามา

หัวเผาแบบเซลฟ์-รีคูเพอเรทีฟ มีข้อดีตรงที่มีขนาดกะทัดรัดและมีประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่า เนื่องจากมีการสูญเสียความร้อนจากก๊าซทิ้งน้อยมาก และไม่จำเป็นต้องเสียค่าใช้จ่ายที่แพงในการหุ้มฉนวนท่อส่งลม

ตอนที่ 3 บทที่ 4 การอนุรักษ์พลังงานโดยการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่

หัวเผาแบบเซลฟ์-รีคูเพอเรทีฟมีความสะดวกในการปรับปรุงให้เข้ากับอุปกรณ์เดิมที่ติดตั้งอยู่แล้ว โดยหัวเผาดังกล่าวเหมาะสมทั้งโรงงานขนาดเล็กและใหญ่ที่มีก๊าซปนเปื้อนต่ำและก๊าซที่มีอุณหภูมิระดับสูง (มากกว่า 800°C) หัวเผาแบบเซลฟ์-รีคูเพอเรทีฟมีประโยชน์เป็นอย่างยิ่งในการใช้งานที่ต้องการอุณหภูมิสม่ำเสมอ โดยใช้กับเตาหลอมที่มีปริมาตรขนาดเล็ก เช่น เตาเผาเครื่องปั้นดินเผา หัวเผาแบบเซลฟ์-รีคูเพอเรทีฟอาจนำมาใช้เสริมกับหัวเผาแบบเซรามิกชนิดรีเจนเนอเรทีฟ (Regenerative Ceramic Burner) สำหรับการใช้งานขนาดใหญ่เพื่อจะทำให้การกระจายความร้อนสม่ำเสมอมากขึ้น คุณสมบัติของหัวเผาระบบรีคูเพอเรทีฟและเซลฟ์-รีคูเพอเรทีฟสรุปไว้ในตารางที่ 4.5-6



รูปที่ 4.5-7 หัวเผาแบบเซลฟ์-รีคูเพอเรทีฟ (Self-recuperative Burner)

ตารางที่ 4.5-6 คุณสมบัติของหัวเผาระบบรีคูเพอเรทีฟและเซลฟ์-รีคูเพอเรทีฟ

การใช้งาน	- ใช้อุ่นอากาศสำหรับการเผาไหม้
ช่วงอุณหภูมิที่ใช้งาน	- ใช้กับก๊าซที่มีอุณหภูมิสูงที่สุดถึง 1,500°C
ประสิทธิภาพโดยรวม	- ประมาณ 20-40%
ข้อดี	- มีขนาดกะทัดรัด (หัวเผาแบบเซลฟ์-รีคูเพอเรทีฟ) สะดวกต่อการติดตั้ง
ข้อด้อย	- ต้องใช้กับก๊าซที่สะอาด

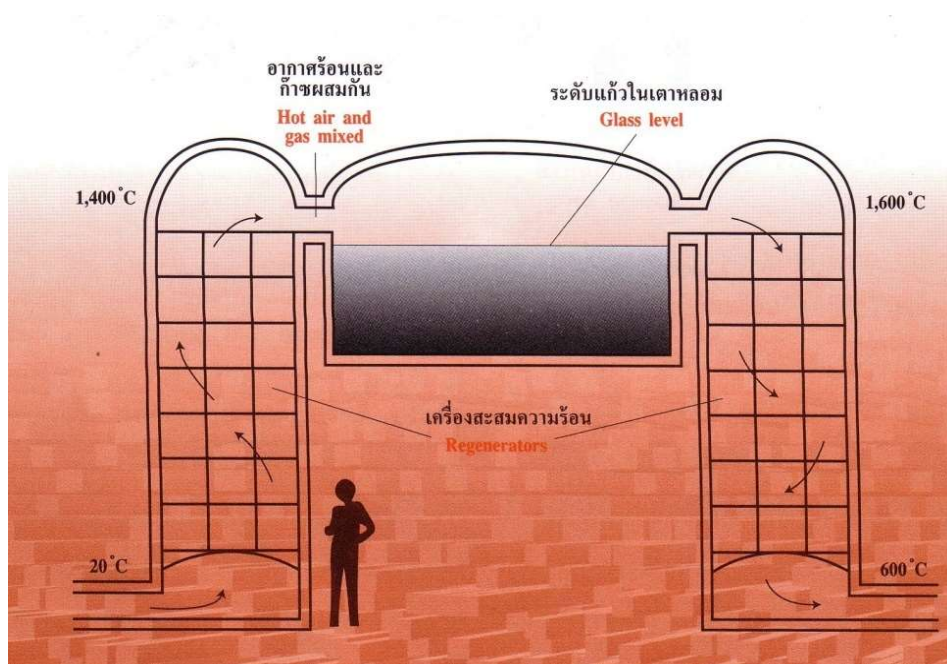
4.5.1.3 เครื่องสะสมความร้อน (Regenerator)

เครื่องสะสมความร้อนทำงานโดยใช้หลักการของวัฏจักรการเก็บความร้อนระยะสั้น โดยทั่วไประบบสะสมความร้อนจะประกอบด้วย แท่งเซรามิกสำหรับเก็บความร้อนหนึ่งคู่ ต่อเข้ากับหัวเผาหนึ่งคู่หรือหัวเผาเดียว ในกรณีของเครื่องสะสมความร้อนแบบหมุน (Rotary Regenerator) ก๊าซร้อนทิ้งจากหัวเผา

ที่กำลังติดไฟอยู่จะไหลผ่านแท่งเซรามิกแท่งใดแท่งหนึ่งของเครื่องสะสมความร้อน เมื่อวัฏจักรย้อนกลับ อากาศเย็นที่ไหลเข้ามาใหม่จะถูกทำให้ร้อนขึ้นโดยไหลผ่านไปยังแท่งที่ร้อนของเครื่องสะสมความร้อนซึ่งก่อนหน้านี้ได้สะสมความร้อนจากก๊าซร้อนทิ้งไว้แล้ว เวลาที่ใช้ในการสลับเปลี่ยน (Cycle Times) จะมีค่าอยู่ระหว่าง 30 วินาทีถึง 30 นาที ขึ้นอยู่กับชนิดของเครื่องสะสมความร้อนและการใช้งาน

ก) เครื่องสะสมความร้อนแบบอยู่กับที่ (Static Regenerator)

เครื่องสะสมความร้อนแบบอยู่กับที่ที่เป็นแบบทั่วไปที่ใช้มาเป็นเวลานานหลายปีแล้วในอุตสาหกรรมแก้ว เหล็ก และเหล็กกล้า ตัวเครื่องจะทำด้วยอิฐทนไฟ ขนาดของเครื่องสะสมความร้อนแต่ละเครื่องจะมีขนาดใหญ่ประมาณเท่ากับขนาดของบ้านสองชั้น (รูปที่ 4.5-7) เครื่องสะสมความร้อนแบบอยู่กับที่ที่มีความแข็งแรงทนต่อการกัดกร่อน และสามารถนำไปใช้งานกับก๊าซปนเปื้อนได้ คุณสมบัติของเครื่องสะสมความร้อนแบบอยู่กับที่สรุปไว้ในตารางที่ 4.5-7



รูปที่ 4.5-8 เครื่องสะสมความร้อนซึ่งทำด้วยอิฐทนไฟขนาดใหญ่ใช้กับเตาหลอมแก้ว

ตารางที่ 4.5-7 คุณสมบัติของเครื่องสะสมความร้อนแบบอยู่กับที่

การใช้งาน	- ใช้อุ่นอากาศสำหรับการเผาไหม้
ช่วงอุณหภูมิที่ใช้งาน	- ใช้กับก๊าซทิ้งที่มีอุณหภูมิสูงสุดถึง 1,500°C
ประสิทธิภาพโดยรวม	- ประมาณ 70-90%
ข้อดี	- มีประสิทธิภาพสูง - ต้องการการบำรุงรักษาต่ำ - สามารถใช้กับก๊าซที่มีสารปนเปื้อนได้
ข้อด้อย	- มีขนาดใหญ่ - มีราคาแพง

ข) เครื่องสะสมความร้อนแบบหมุน (Rotary Regenerator)

เครื่องสะสมความร้อนแบบหมุน ประกอบด้วยวัสดุรูปทรงกระบอกที่ทำด้วยอิฐทนไฟ (Refractory Matrix Drum) ซึ่งอาจมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางถึง 10 เมตร และลึกถึง 2 เมตร ลักษณะการทำงาน คือ ตัวเครื่องจะเก็บความร้อนเมื่อหมุนผ่านก๊าซร้อนที่ปล่อยออกมา และความร้อนนี้จะถูกถ่ายเทเมื่อเครื่องหมุนผ่านอากาศเย็น อุปกรณ์ชนิดนี้สามารถนำไปใช้กับงานที่มีอัตราการไหลสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม เครื่องชนิดนี้ก็มีข้อด้อยในเรื่องการรั่วซึมและการปนเปื้อน คุณสมบัติของเครื่องสะสมความร้อนแบบหมุนสรุปไว้ในตารางที่ 4.5-8

ตารางที่ 4.5-8 คุณสมบัติของเครื่องสะสมความร้อนแบบหมุน

การใช้งาน	- ใช้อุ่นอากาศสำหรับการเผาไหม้ - การให้ความร้อนกับพื้นที่
ช่วงอุณหภูมิที่ใช้งาน	- ใช้กับก๊าซทิ้งที่มีอุณหภูมิสูงสุดถึง 1,700°C
ประสิทธิภาพโดยรวม	- ประมาณ 70-90%
ข้อดี	- มีขนาดกะทัดรัด - สามารถใช้ได้กับก๊าซที่มีปริมาณมาก - ทำงานได้อย่างต่อเนื่อง
ข้อด้อย	- มีความดันตกสูง (High Pressure Drop) - ยากต่อการรั่วซึม - ไม่เหมาะสำหรับก๊าซที่มีฝุ่นละอองเจือปน เพราะอาจเกิดการปนเปื้อนข้ามถึงกันได้ - มีราคาแพง

ค) เครื่องสะสมความร้อนชนิดทำด้วยเซรามิกแบบกะทัดรัด (Compact Ceramic Regenerators)

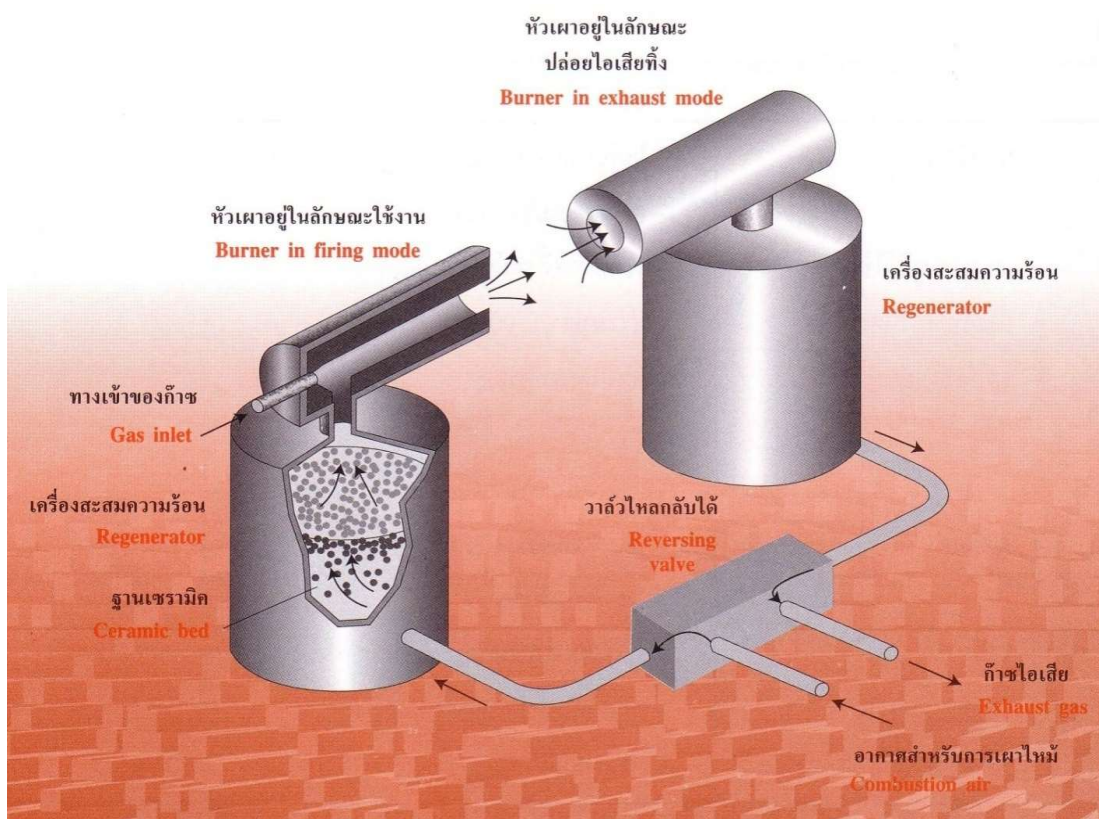
ปัจจุบันเครื่องสะสมความร้อนชนิดนี้เป็นเทคโนโลยีที่ได้รับการยอมรับแล้วและประสบความสำเร็จในการนำไปใช้ในกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ รวมถึงการหลอมแก้ว การหลอมโลหะ การบ่มโลหะ (Annealing) และการปรับปรุงคุณภาพเหล็กโดยใช้การอบคลายเครียดด้วยความร้อน (Heat Treatment of Steel) การหลอมอลูมิเนียมซ้ำ (Aluminium Remelting) เครื่องสะสมความร้อนชนิดนี้

ประกอบด้วยวัสดุรูปทรงกระบอก (Drum) ซึ่งมีขนาดประมาณถังขยะตามบ้าน (Domestic Dust Bin) และมีหัวเผาอุณหภูมิสูงติดไว้ต่างหากหรือติดไว้ที่อุปกรณ์นี้ ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับสถานที่ติดตั้ง (รูปที่ 4.5-8) เครื่องสะสมความร้อนและหัวเผาจะทำงานพร้อมกัน เวลาที่ใช้ในการสลับเปลี่ยนการทำงานโดยทั่วไปจะอยู่ที่ประมาณ 60-120 วินาที ประสิทธิภาพในการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่ตามที่มีการรายงานไว้อาจสูงถึง 90%

เครื่องสะสมความร้อนชนิดนี้ง่ายต่อการเกิดการอุดตัน (Fouling) ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับการใช้งาน แต่ก็ง่ายต่อการทำความสะอาด ในกระบวนการผลิตที่สะอาด เช่น การปรับปรุงคุณภาพเหล็กโดยใช้ความร้อน อาจจำเป็นต้องทำความสะอาดฐานทุกปี ในกระบวนการผลิตที่สกปรกกว่า เช่น การหลอมอลูมิเนียม อาจจำเป็นต้องทำความสะอาดบ่อยๆ เช่น ทุกสามสัปดาห์ คุณสมบัติของเครื่องสะสมความร้อนชนิดนี้ได้สรุปไว้ในตารางที่ 4.5-9

ตารางที่ 4.5-9 คุณสมบัติของเครื่องสะสมความร้อนชนิดทำด้วยเซรามิกแบบกะทัดรัด

การใช้งาน	- ใช้อุ่นอากาศสำหรับการเผาไหม้
ช่วงอุณหภูมิที่ใช้งาน	- ใช้กับก๊าซทิ้งที่มีอุณหภูมิสูงสุดถึง 1,500°C
ประสิทธิภาพโดยรวม	- ประมาณ 70-90%
ข้อดี	- มีขนาดกะทัดรัด - สามารถใช้งานได้กับก๊าซที่ปนเปื้อนบางชนิด - ง่ายต่อการทำความสะอาด
ข้อด้อย	- อาจเกิดการอุดตันได้ขึ้นอยู่กับการใช้งาน



รูปที่ 4.5-9 แผนผังแสดงหลักการทำงานของหัวเผาแบบสะสมความร้อน

ง) หัวเผาอุณหภูมิอากาศโดยใช้ไฟฟั่น (Impulse-fired Regenerative Burner)

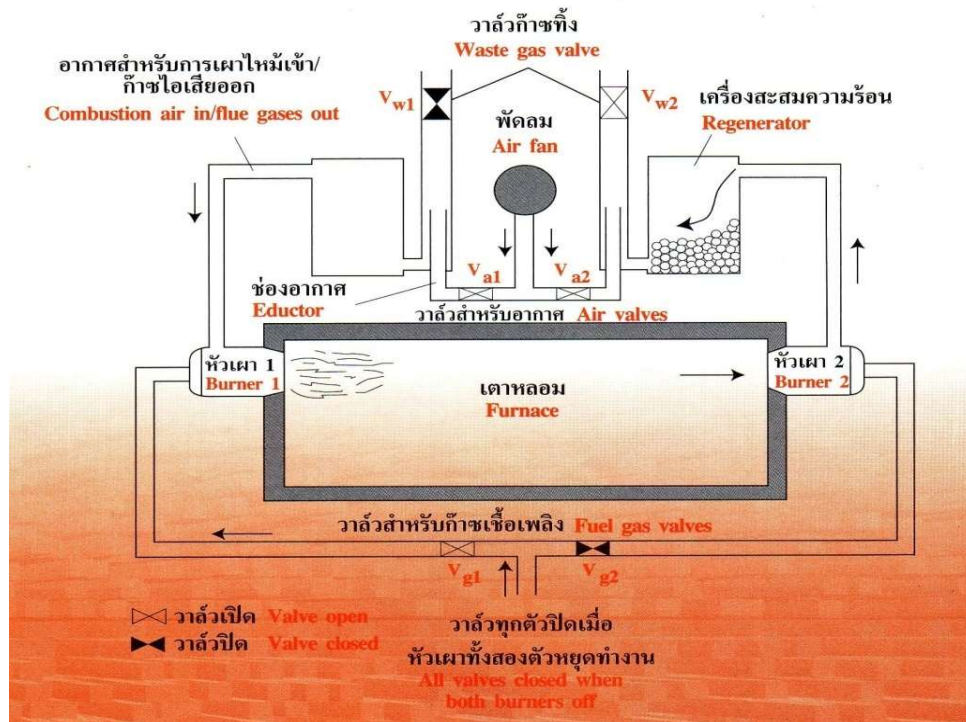
หัวเผาอุณหภูมิอากาศโดยใช้ไฟฟั่น (รูปที่ 4.5-8) เป็นหัวเผาแบบสะสมความร้อน (Regenerative Burner) อีกชนิดหนึ่ง โดยจะทำงานเฉพาะเมื่อตอนมีความร้อนสูงสุด หรือเมื่อไม่มีความร้อนเลยเท่านั้น วิธีนี้จะช่วยให้ปรับการไหล ปรับอัตราส่วนระหว่างอากาศ/เชื้อเพลิง ตลอดจนอัตราส่วนระหว่างอากาศ/ก๊าซทิ้งได้สะดวกขึ้น วิธีดังกล่าวนี้จะทำงานก็ต่อเมื่อหัวเผาทำงานเต็มที่แล้วเท่านั้น โดยระบบจะไม่ใช้พัดลมสำหรับก๊าซทิ้ง และไม่ใช้วาล์วไหลกลับ (Reversing Valves) สำหรับท่ออากาศ/ก๊าซทิ้งที่เครื่องสะสมความร้อนแต่ละตัว ทั้งนี้เพราะก๊าซที่ใช้แล้วจะถูกดึงออกโดยพัดลมดูดอากาศสำหรับการเผาไหม้

หัวเผาแต่ละหัวเผาจะสลับกันทำงานประมาณ 15 วินาที ระหว่างการสลับกัน หัวเผาและวาล์วปล่อยก๊าซทิ้งจะปิดเพื่อไม่ให้อากาศไหลเข้าเตาหรือไหลออกจากเตาได้ การเปลี่ยนแปลงของปริมาณเชื้อเพลิง/อากาศที่ป้อนเข้าหัวเผาจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ระยะเวลาการปิด/เปิดการทำงานจะสลับเปลี่ยนไปตามความต้องการความร้อน ซึ่งจะกำหนดโดยการควบคุมของเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ในเตาหลอม

การอุณหภูมิอากาศและประสิทธิภาพของหัวเผาอุณหภูมิอากาศโดยใช้ไฟฟั่นจะอยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกับหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟที่ใช้กันอยู่ทั่วไป อย่างไรก็ตาม หัวเผานี้มีข้อได้เปรียบ คือ มีระบบการไหลแบบง่าย และมีการลงทุนที่ต่ำกว่า

ตารางที่ 4.5-10 คุณสมบัติของหัวเผาอุณหภูมิอากาศโดยใช้ไฟฟั่น

การใช้งาน	- ใช้อุณหภูมิอากาศสำหรับการเผาไหม้
ช่วงอุณหภูมิที่ใช้	- ใช้กับก๊าซทิ้งที่มีอุณหภูมิสูงสุดถึง 1,500°C
ประสิทธิภาพโดยรวม	- ประมาณ 70-90%
ข้อดี	- ไม่จำกัดอุณหภูมิ - ประหยัดได้ประมาณ 50% เมื่อเทียบกับแบบหัวเผาทั่วไป - สามารถใช้งานได้กับก๊าซที่ปนเปื้อนบางชนิด - ง่ายต่อการทำความสะอาด
ข้อด้อย	- ใช้พื้นที่มากในการติดตั้งเพราะมีอุปกรณ์หลายส่วน

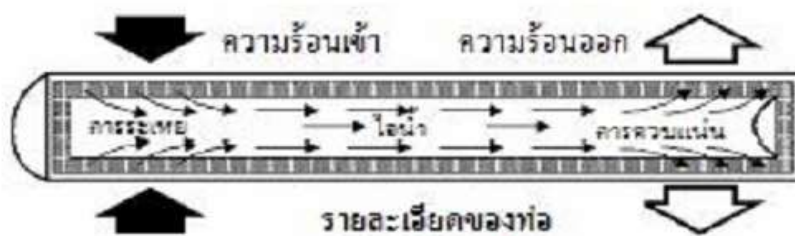


รูปที่ 4.5-10 แผนผังแสดงระบบการไหลของก๊าซในหัวเผาลู่อากาศโดยใช้ไฟฟ้

จ) ท่อความร้อน (Heat Pipe)

ท่อความร้อนสามารถถ่ายเทความร้อนได้มากกว่าทองแดงถึง 100 เท่า นับว่าเป็นตัวนำความร้อนที่ดีที่สุดตั้งแต่รู้จักมา กล่าวอีกอย่างหนึ่งได้ว่า ท่อความร้อนเป็นระบบถ่ายเทความร้อนโดยที่ไม่มีส่วนไหนเคลื่อนที่เลยและแทบจะไม่ต้องมีการบำรุงรักษาเลย

ท่อความร้อนประกอบไปด้วย 3 ส่วน คือส่วนที่เป็นชุดที่ปิดผนึก แล้วส่วนโครงสร้างท่อขนาดเล็กหรือวีก และส่วนที่เป็นของเหลวที่ใช้ปฏิบัติงาน โดยส่วนท่อกวีนั้นจะถูกผลิตมาให้อยู่ที่พื้นผิวด้านในของท่อและปิดผนึกให้เป็นสุญญากาศ พลังงานความร้อนที่ให้แก่พื้นผิวภายนอกของท่อความร้อน จะอยู่ในภาวะสมดุลกับไอระเหยของมันเอง เมื่อท่อถูกปิดผนึกภายใต้ภาวะสุญญากาศ พลังงานความร้อนที่ให้แก่พื้นผิวภายนอกของท่อความร้อนนี้ จะทำให้ของเหลวที่ใช้ทำงานระเหยไปในทันที ดังนั้นไอระเหยที่ก่อตัวขึ้นจึงดูดกลืนความร้อนแฝงของการระเหยกลายเป็นไอ และส่วนนี้ของท่อความร้อนจึงกลายเป็นส่วนของการระเหย จากนั้นไอระเหยนี้ก็จะเข้าไปสู่อีกด้านหนึ่งของท่อซึ่งพลังงานความร้อนถูกกำจัดออกไปแล้ว ทำให้ไอระเหยนี้ถูกควบแน่นกลายเป็นของเหลวอีกครั้ง ซึ่งก็จะให้ความร้อนแฝงของการควบแน่น ส่วนนี้ของท่อความร้อนจึงเป็นส่วนของการควบแน่น จากนั้นของเหลวควบแน่นจึงไหลกลับไปเป็นส่วนของการระเหยกลายเป็นไอ



รูปที่ 4.5-11 แสดงระบบการไหลภายในท่อความร้อน

ท่อความร้อนถูกนำมาใช้ในภาคอุตสาหกรรม ได้แก่

- กระบวนการให้ความร้อนแก่พื้นที่โดย เครื่องถ่ายเทความร้อนแบบท่อความร้อน จะถ่ายเทพลังงานความร้อนจาก ก๊าซไอเสียของกระบวนการเพื่อใช้สำหรับสร้างความร้อน อากาศอุ่นจะถูกผสมด้วยตามต้องการ ดังนั้นจึงเป็นการลดความต้องการที่จะใช้อุปกรณ์สำหรับทำความร้อนเพิ่มเติม หรือไม่จำเป็นต้องใช้เลย
- กระบวนการกู้คืนความร้อนเหลือทิ้งกลับมาใช้ใหม่ โดยจะนำความร้อนมาจากไอเสียของกระบวนการ แล้วถ่ายเทความร้อนนั้นให้แก่อากาศที่ไหลเข้ามา ซึ่งอากาศนั้นก็จะอุ่นขึ้น และสามารถถูกนำไปใช้ในกระบวนการเดียวกัน หรือกระบวนการอื่นก็ได้ ซึ่งจะเป็นการลดปริมาณการใช้พลังงานในกระบวนการ
- การใช้งาน กับระบบ HVAC
- การหล่อเย็น ท่อความร้อนจะช่วยทำให้อากาศสำรองในช่วงฤดูร้อนให้เย็นลง ดังนั้นจึงช่วยลดการใช้สารทำความเย็นได้เป็นจำนวนมาก จึงเป็นข้อดีเพิ่มเติมหลังจากที่ได้ช่วยประหยัดจากระบบหล่อเย็น แล้วพลังงานความร้อนจะถูกนำกลับมาใช้ใหม่จากก๊าซไอเสียเย็นและถ่ายเทไปให้ก๊าซสำรองร้อนที่ถูกนำมาใช้
- การทำความร้อน กระบวนการข้างต้นจะถูกทำโดยวิธีการย้อนกลับในฤดูหนาว เพื่อจะอุ่นอากาศที่ใช้
- การอุ่นอากาศสำหรับการเผาไหม้ของหม้อไอน้ำ
- การนำความร้อนเหลือทิ้งจากเตาเผากลับมาใช้ใหม่
- การอุ่นอากาศสำหรับเครื่องอบอากาศร้อน
- การนำความร้อนจากเครื่องดูดซับกลืนเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่
- การนำความร้อนเหลือทิ้งจากเตาเผามาใช้เป็นแหล่งความร้อนสำหรับเตาอบอื่นๆ
- การนำความเย็นให้แก่ห้องที่ไม่มีอากาศภายนอกเข้ามา
- การอุ่นน้ำป้อนหม้อไอน้ำ โดยการใช้ความร้อนจากก๊าซไอเสียที่ปล่อยในแผงท่อทำความร้อน
- เตาอบสำหรับการอบแห้ง การบ่ม และการผิง
- การนำไอน้ำเหลือทิ้งกลับมาใช้ใหม่
- เตาเผาอิฐ
- การนำความร้อน การระบายอากาศและระบบปรับอากาศ

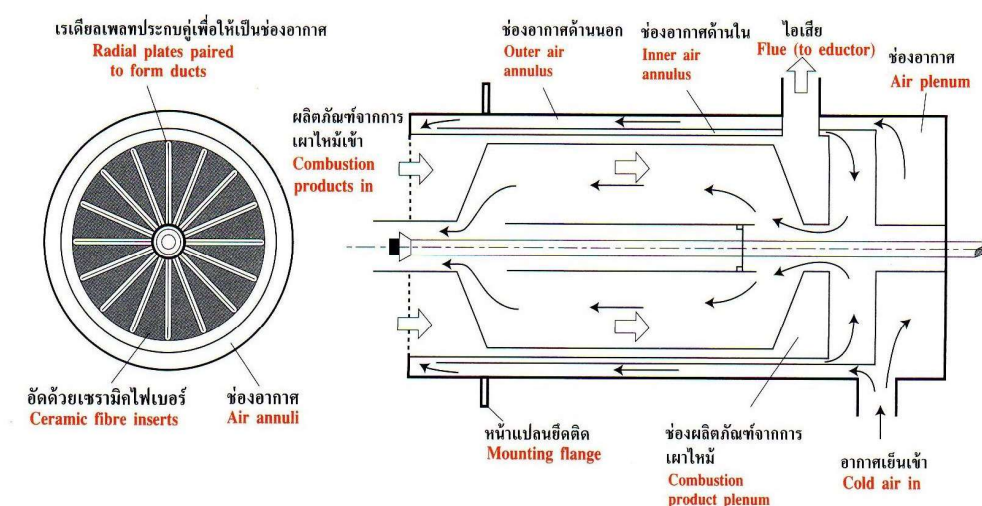
4.5.2 พัฒนาการใหม่ (New Developments)

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา กิจกรรมการพัฒนาส่วนใหญ่มุ่งเน้นไปที่การปรับปรุง โดยเฉพาะเทคโนโลยีของหัวเผาแบบเซล์ฟ-รีคูเพอเรทีฟ (Self-recuperative) และหัวเผาแบบสะสมความร้อน (Regenerative) ผลของการพัฒนาทั้งสองระบบนี้ได้นำมาใช้ในภาคอุตสาหกรรมแล้ว ซึ่งจะกล่าวเน้นในหัวข้อนี้

4.5.2.1 หัวเผารีคูเพอเรทีฟแบบเรเดียลเพลท (Radial Plate Recuperative Burner)

หัวเผาชนิดนี้ได้รับการพัฒนาเพื่อใช้กับการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่สำหรับกระบวนการผลิตที่มีความร้อนทิ้งต่ำกว่า $1,000^{\circ}\text{C}$ แต่ก็มีระบบรีคูเพอเรทีฟขนาดกะทัดรัดที่ผ่านการทดสอบแล้วสำหรับใช้กับกระบวนการผลิตที่ให้ก๊าซทิ้งที่สะอาดที่มีอุณหภูมิระดับสูงกว่านี้ แต่กระบวนการผลิตที่มีอุณหภูมิระดับต่ำก็ยังจำเป็นต้องใช้รีคูเพอเรเตอร์ที่มีประสิทธิภาพการทำงานสูงเพื่อให้มีระยะเวลาคืนทุนที่ยอมรับได้

การทำงานของหัวเผาชนิดนี้มีหลักการคล้ายคลึงกับรีคูเพอเรเตอร์แบบทั่วไป โดยใช้การผสมผสานกันของพื้นที่ถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มขึ้น และการออกแบบที่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer Coefficient) สูงขึ้น มีผลทำให้ประสิทธิภาพสูงขึ้น (รูปที่ 4.5-10) การออกแบบมีลักษณะคล้ายกับรีคูเพอเรเตอร์แบบทั่วไป ที่มีท่อวงแหวนแคบๆ สำหรับให้อากาศจากก๊าซทิ้งและอากาศดีไหลผ่านการไหลของอากาศจะไหลแยกออกจากกันโดยผ่านท่อแบนๆ จำนวนหนึ่งซึ่งทำจากแผ่นโลหะ 2 แผ่นติดตั้งในแนวรัศมีภายในรีคูเพอเรเตอร์ จึงได้ชื่อวารีคูเพอเรเตอร์แบบเรเดียลเพลท การถ่ายเทความร้อนจะเกิดขึ้นระหว่างแผ่น ทางผ่านของก๊าซทิ้งมีลักษณะเป็นช่องแคบเล็กๆ ช่องแคบเกิดจากการสอดวัสดุที่ทำจากเซรามิกมีรูปตัดคล้ายลิ้ม (Wedge-sectioned Ceramic) สอดอยู่ระหว่างแผ่น ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Convection Heat Transfer Coefficient) จะเกิดขึ้นสูงสุดโดยการใช้การไหลที่มีความเร็วสูงบนพื้นที่ถ่ายเทความร้อนวิกฤตและลดแรงดันตกที่จุดต่างๆ ในรีคูเพอเรเตอร์ให้น้อยที่สุด



รูปที่ 4.5-12 รูปตัดของหัวเผารีคูเพอเรทีฟแบบเรเดียลเพลท

ตอนที่ 3 บทที่ 4 การอนุรักษ์พลังงานโดยการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่

หัวเผาชนิดนี้มีทั้งแบบเป็นชุดเดียว (Stand-alone Unit) และแบบรวมกับหัวฉีดของหัวเผาความร้อนสูงซึ่งประกอบเป็นหัวเผาแบบเซลล์-รีคูเพอเรทีฟ หัวเผาที่มีอยู่จะมีขนาดอยู่ในช่วงตั้งแต่ 0.65-1.62 GJ/h (180-450 kW) ซึ่งใช้งานกับกระบวนการผลิตที่มีก๊าซทิ้งที่สะอาดและมีอุณหภูมิอยู่ในช่วงระหว่าง 700-1,100°C โดยสามารถใช้กับการปรับปรุงคุณภาพของเหล็กโดยใช้ความร้อน การผลิตอิฐ เครื่องปั้นดินเผา อิฐทนไฟ และเบ้าหลอมโลหะ

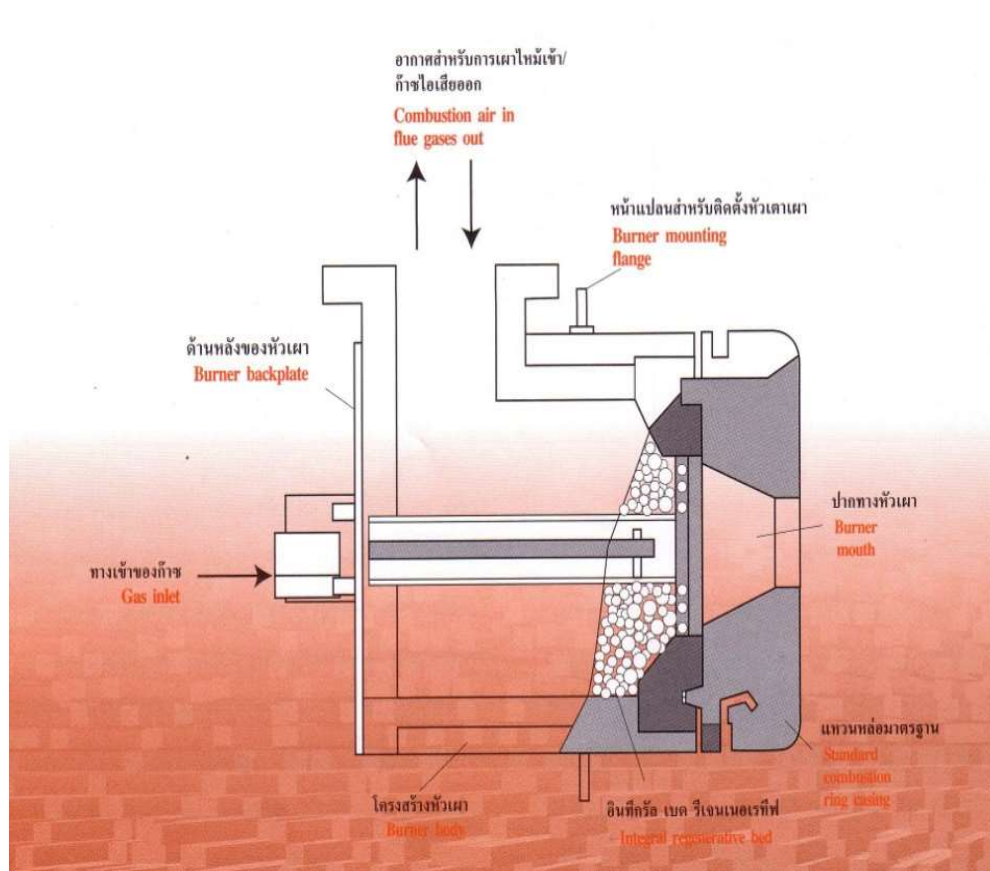
จากคุณลักษณะที่กะทัดรัดของหัวเผาชนิดนี้ จึงเหมาะที่จะเป็นทางเลือกที่ดีสำหรับการใช้งานเพื่อปรับปรุงระบบเดิม (Retrofit Application) คุณสมบัติของหัวเผารีคูเพอเรทีฟแบบเรเดียลเฟลทได้สรุปไว้ในตารางที่ 4.5-11

ตารางที่ 4.5-11 คุณสมบัติของหัวเผารีคูเพอเรทีฟแบบเรเดียลเฟลท

การใช้งาน	- ใช้อุ่นอากาศสำหรับการเผาไหม้ - มีทั้งแบบที่ติดอยู่กับหัวเผาหรือแบบแยกส่วนต่างหาก
ช่วงอุณหภูมิที่ใช้งาน	- ใช้กับก๊าซทิ้งที่มีอุณหภูมิสูงที่สุดถึง 700-1,100°C
ประสิทธิภาพโดยรวม	- ประมาณ 60%
ข้อได้เปรียบ	- มีประสิทธิภาพสูงสามารถนำไปใช้งานได้กับกระบวนการผลิตที่มีอุณหภูมิต่ำ - สามารถนำไปใช้ปรับปรุงระบบเดิม
ข้อด้อย	- ไม่สามารถใช้กับก๊าซที่มีสารปนเปื้อน

4.5.2.2 หัวเผาสะสมความร้อนแบบอินทีกรัลเบด (Integral Bed Regenerative Burner)

หัวเผาชนิดนี้ได้รับการพัฒนาขึ้นมาใหม่ โดยประกอบด้วยฐานซึ่งมีเซรามิกรูปทรงกลมหลายลูก (Bed of Ceramic Spheres) บรรจุอยู่ภายในตัวหัวเผา (รูปที่ 4.5-11) หัวเผาจะติดตั้งเป็นคู่ ในขณะที่หัวเผาหนึ่งทำงาน ก๊าซทิ้งจะไหลผ่านไปยังฐานของหัวเผ่อีกหัวหนึ่งที่ไม่ทำงาน ในทางกลับกัน อากาศเย็นที่เข้ามาจะถูกอุ่นโดยผ่านฐานที่เก็บความร้อนและกระบวนการจะทำงานเป็นวัฏจักรต่อเนื่อง ระยะเวลาทำงานในหนึ่งวัฏจักรจะเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง 30-180 วินาที



รูปที่ 4.5-13 รูปตัดของหัวเผาสะสมความร้อนแบบอินทิกรัลเบด (Integral Bed Regenerative Burner)

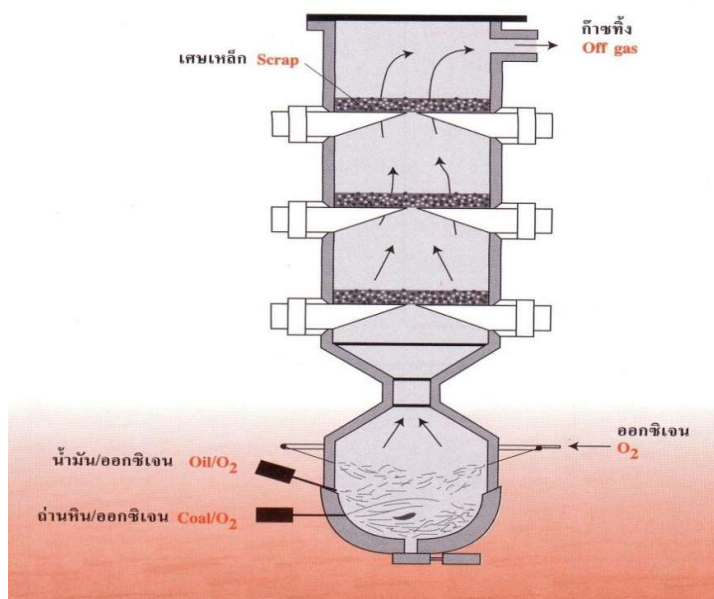
หัวเผานี้มีขนาดกะทัดรัดมากเมื่อเปรียบเทียบกับหัวเผาสะสมความร้อนแบบทั่วไป เนื่องจากมีฐานเซรามิก อยู่ในตัวของชุดหัวเผา สิ่งนี้คือข้อได้เปรียบของหัวเผานี้ เนื่องจากหัวเผานี้เหมาะสำหรับการติดตั้งในเตาหลอมขนาดเล็กซึ่งปัจจุบันไม่สามารถใช้เทคโนโลยีสะสมความร้อนแบบอื่นที่เหมาะสมในการทำงานในพื้นที่จำกัดได้ หัวเผานี้มีขนาดตั้งแต่ 0.2 GJ/h (0.65 kW) จนถึง 18.6 GJ/h (5,160 kW) คุณสมบัติของหัวเผาสะสมความร้อนแบบอินทิกรัลเบดได้สรุปไว้ในตารางที่ 4.5-12

ตารางที่ 4.5-12 คุณสมบัติของหัวเผาสะสมความร้อนแบบอินทริกัลเบด

การใช้งาน	- ใช้อุ่นอากาศสำหรับการเผาไหม้
ช่วงอุณหภูมิที่ใช้งาน	- ใช้กับก๊าซทิ้งที่มีอุณหภูมิสูงสุดถึง 1,500°C
ประสิทธิภาพโดยรวม	- ประมาณ 70-80%
ข้อได้เปรียบ	- มีขนาดกะทัดรัด - มีขนาดพิกัดต่ำทำให้สามารถใช้งานกับเตาหลอมขนาดเล็กได้ - ง่ายต่อการนำไปปรับปรุงระบบเดิม
ข้อด้อย	- มีโอกาสอุดตัน (Fouling) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการใช้งาน

4.5.2.3 เตาหลอมที่ใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด (Energy Optimising Furnace, EOF)

ประมาณ 20% ของพลังงานที่ป้อนเข้าเตาหลอมเหล็กที่ใช้การอาร์คของกระแสไฟฟ้า (Electric Arc Furnace) ความร้อนจะสูญเสียไปกับก๊าซร้อน โดยความร้อนที่สูญเสียนี้มีปริมาณเพียงพอที่จะให้ความร้อนกับเศษเหล็กเพื่อให้อุณหภูมิสูงขึ้นถึง 600°C โดยประมาณ ดังนั้น จึงได้มีการพัฒนาเพื่อนำความร้อนทิ้งเหล่านี้กลับมาใช้ใหม่ในเตาหลอม



รูปที่ 4.5-14 แผนผังการทำงานของเตาหลอมประสิทธิภาพสูง (Energy Optimising Furnace, EOF)

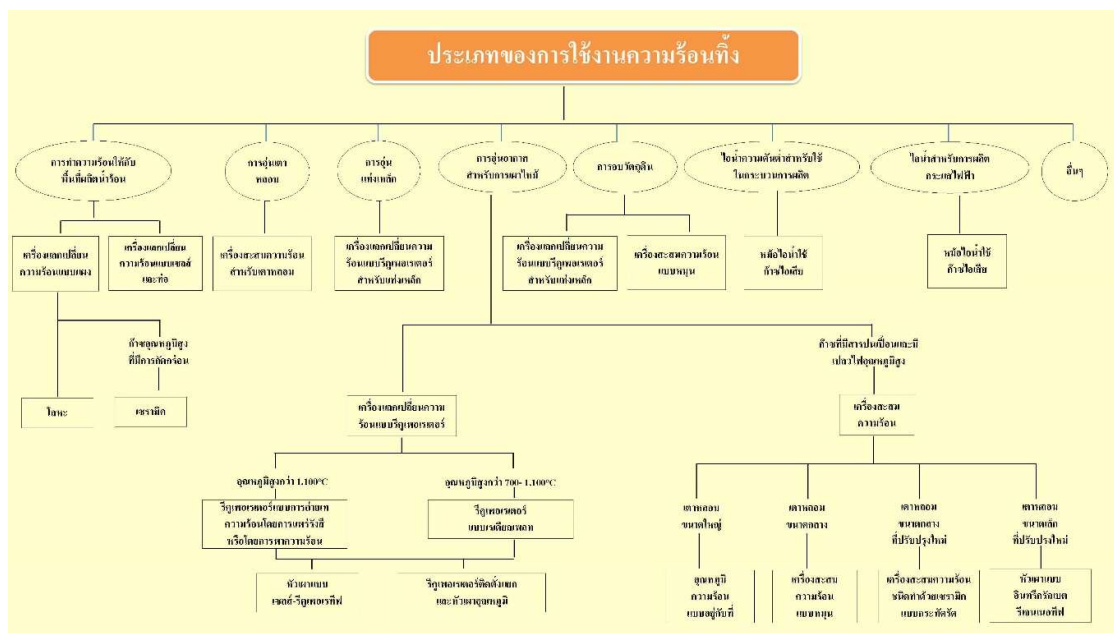
การพัฒนาเช่นนี้เป็นการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดในเตาหลอมโดยการใช้ก๊าซไอเสียเพื่ออุ่นเศษเหล็ก ตัวอย่างที่พบเช่น ในประเทศบราซิลและอินเดีย แต่เตาหลอมประสิทธิภาพสูงที่ใช้ถ่านหินหรือน้ำมันเป็นเชื้อเพลิงแทนการใช้วิธีการอาร์คของกระแสไฟฟ้าสามารถอุ่นเศษเหล็กให้อุณหภูมิสูงขึ้นถึง 850°C หลักการทำงานโดยทั่วไปของเตาหลอมประสิทธิภาพสูงแสดงอยู่ในรูปที่ 4.5-12 ค่าใช้จ่ายในการใช้งานคาดว่าจะต่ำกว่ามากเมื่อเปรียบเทียบกับเตาหลอมเหล็กแบบใช้การอาร์คของกระแสไฟฟ้าที่มีขนาดเดียวกัน

4.6 การเลือกเทคโนโลยีการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่เพื่อไปสู่ความเป็นกลางทางคาร์บอน (Carbon Neutrality) และการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ (Net zero emissions)

เทคโนโลยีการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่เป็นเทคนิคการปรับปรุงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน จะส่งผลให้สามารถลดก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากการใช้พลังงานได้ (เรื่องที่เกี่ยวข้องกับสภาพภูมิอากาศที่เปลี่ยนแปลง ความเป็นกลางทางคาร์บอน (Carbon Neutrality) และการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ (Net zero emissions) ดูในหัวข้อ 2.13

ในหัวข้อที่ 4.4 ได้กล่าวถึงศักยภาพของการประยุกต์ใช้งานจากการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่ การตัดสินใจเลือกระบบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้งานขึ้นอยู่กับความพอดีด้านปริมาณ คุณภาพ และอุณหภูมิของก๊าซไอเสีย (ดูหัวข้อที่ 4.3) ที่จะใช้ในระบบการผลิตหรือความต้องการความร้อนของโรงงาน เมื่อได้มีการพิจารณาการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่แล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการเลือกเทคโนโลยีที่เหมาะสมในการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่ (ดูหัวข้อที่ 4.5)

รูปที่ 4.6-1 แสดงขั้นตอนการตัดสินใจโดยพิจารณาจากศักยภาพของผู้ใช้งานความร้อนทิ้งโดยเน้นถึงอุปกรณ์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้งานแต่ละอย่างโดยเฉพาะ แผนภาพนี้ไม่ได้มีจุดมุ่งหมายที่จะแสดงรายละเอียดของการใช้งานหรือรายการอุปกรณ์อย่างละเอียด และไม่ได้ยึดติดกับระบบใดระบบหนึ่งโดยเฉพาะ (ผู้ใช้งานได้มีการพิจารณาการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่ บางรายสามารถค้นคว้าวิธีการใหม่ๆ ได้) แผนภาพนี้เป็นเพียงการสรุปวิธีการเลือกเทคโนโลยีการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่ที่เหมาะสมกับการใช้งานเฉพาะด้าน ผู้ที่มีศักยภาพในการใช้อุปกรณ์การนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่ควรปรึกษากับผู้เชี่ยวชาญ บริษัทที่ปรึกษาด้านพลังงาน หรือผู้จำหน่ายอุปกรณ์เฉพาะด้านเพื่อขอคำแนะนำเพิ่มเติม



รูปที่ 4.6-1 หลักการตัดสินใจในการเลือกเทคโนโลยีการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้

4.6.1 การติดตั้งเครื่องอุ่นอากาศด้วยก๊าซไอเสีย

1. หลักการทำงานของเทคโนโลยี

นำไอเสียจากหม้อไอน้ำ หรือเตาเผามาแลกเปลี่ยนความร้อนให้กับอากาศก่อนเข้าเผาไหม้ ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการเผาไหม้สูงขึ้นและลดการใช้เชื้อเพลิง

2. สมการที่ใช้วิเคราะห์ข้อมูล

อุณหภูมิแตกต่างลอกลิม	ΔT_{LM}	=	$(\Delta T_1 - \Delta T_2) / \ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)$	°C
ปริมาณความร้อนที่นำกลับมาได้	Q	=	$U A \Delta T_{LM} h$	Wh/ปี
คิดเป็นปริมาณเชื้อเพลิง	F	=	$3.6 U A \Delta T_{LM} h / (1,000 \text{ LHV})$	หน่วย/ปี
ผลประโยชน์	S	=	$3.6 U A \Delta T_{LM} h / (1,000 \text{ LHV } C_F)$	บาท/ปี
เงินลงทุน	I	=	C_A / A	บาท
ระยะเวลาคืนทุน	PB	=	$I / S = 1,000 C_A / 3.6 U \Delta T_{LM} h_o$	ปี

เมื่อ อุณหภูมิก๊าซไอเสีย T °C

ราคาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน C_A บาท/ตรม.

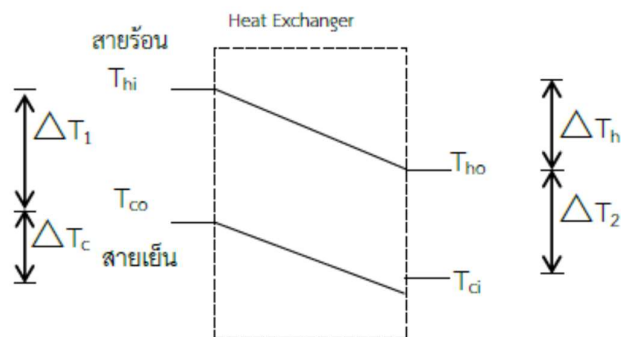
พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน A ตรม.

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน U W/m²/°C

ชั่วโมงการทำงานต่อปี h ชม./ปี

ค่าความร้อนเชื้อเพลิง LHV MJ/ปี

ราคาเชื้อเพลิง C_F บาท/หน่วย



3. การวิเคราะห์ข้อมูล

สมมติฐานที่ใช้

ก๊าซไอเสียหลังจากนำความร้อนมาอุ่นอากาศแล้วอุณหภูมิ

- ถ้าเป็นเชื้อเพลิงที่มีซัลเฟอร์ 150°C
- ถ้าเป็นเชื้อเพลิงที่มีซัลเฟอร์ต่ำ 100°C

อากาศเข้าระบายความร้อน 30°C

ค่าประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อน u เท่ากับ 20 W/m²/°C

ค่าสัมประสิทธิ์ผลการแลกเปลี่ยนความร้อน (effectiveness) ไม่เกิน 0.5

ชั่วโมงการทำงาน 7,200 ชั่วโมง/ปี

อัตราการใช้พลังงานก๊าซไอเสียต่อด้านอากาศ (m_R/m_{air}) 1.1

ประเภทเชื้อเพลิง	ค่าความร้อน (MJ/หน่วย)	ราคา (บาท)	ราคา/MJ
เชื้อเพลิงน้ำมัน	39.77 MJ/ลิตร	20.68 บาท/ลิตร	0.52
ก๊าซธรรมชาติ	1,055 MT/Mbtu	316.5 บาท/Mbtu	0.30
ถ่านหิน	15 MT/kg	1.65 บาท/kg	0.11

4. ผลการวิเคราะห์

โดยการคำนวณค่าอุณหภูมิโลกมีนจากอุณหภูมิเข้าออกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจากสมมติฐานข้างต้น และในกรณีที่ค่าประสิทธิภาพสูงกว่า 0.5 ใช้ค่า 0.5 และเนื่องจากราคาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนขึ้นกับวัสดุที่ใช้ และการออกแบบจึงไม่สามารถกำหนดได้ตายตัวในที่นี้ได้แปรค่าราคาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต่อตารางเมตร จาก 20,000 ถึง 50,000 บาทต่อตารางเมตร ผลการวิเคราะห์แสดงได้ดังตารางต่อไปนี้

เชื้อเพลิงน้ำมัน									
อุณหภูมิก๊าซ ไอเสีย (°C)	ΔT_{LM}	$C_A = 20,000$ (บาท/ตรม.)		$C_A = 30,000$ (บาท/ตรม.)		$C_A = 40,000$ (บาท/ตรม.)		$C_A = 50,000$ (บาท/ตรม.)	
		PB (ปี)	IRR (%)	PB (ปี)	IRR (%)	PB (ปี)	IRR (%)	PB (ปี)	IRR (%)
160	119.50	0.62	175.80%	0.93	113.66%	1.24	83.63%	1.55	64.46%
180	118.49	0.63	174.75%	0.94	112.07%	1.25	82.93%	1.57	64.01%
200	117.48	0.63	173.67%	0.95	110.45%	1.26	82.20%	1.58	63.55%
250	114.93	0.65	170.86%	0.97	106.24%	1.29	80.31%	1.61	62.34%
300	141.05	0.53	194.79%	0.79	142.14%	1.05	96.40%	1.32	78.70%
350	167.17	0.44	-	0.67	166.82%	0.89	122.39%	1.11	92.53%
400	193.29	0.38	-	0.58	200.00%	0.77	200.00%	0.96	200.00%
450	219.41	0.34	-	0.51	200.00%	0.68	200.00%	0.85	200.00%
500	245.53	0.30	-	0.45	-	0.60	200.00%	0.76	200.00%
550	271.65	0.27	-	0.41	-	0.55	200.00%	0.68	200.00%
600	297.77	0.25	-	0.37	-	0.50	-	0.62	200.00%
650	323.89	0.23	-	0.34	-	0.46	-	0.57	200.00%
700	350.01	0.21	-	0.32	-	0.42	-	0.53	200.00%
800	402.25	0.18	-	0.28	-	0.37	-	0.46	-

เชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ									
อุณหภูมิก๊าซ ไอเสีย (°C)	ΔT_{LM}	$C_A = 20,000$ (บาท/ตรม.)		$C_A = 30,000$ (บาท/ตรม.)		$C_A = 40,000$ (บาท/ตรม.)		$C_A = 50,000$ (บาท/ตรม.)	
		PB (ปี)	IRR (%)	PB (ปี)	IRR (%)	PB (ปี)	IRR (%)	PB (ปี)	IRR (%)
160	67.91	1.89	52.73%	2.84	33.46%	3.79	23.22%	4.73	16.62%
180	78.36	1.64	61.40%	2.46	39.27%	3.28	28.03%	4.10	20.70%
200	88.81	1.45	69.75%	2.17	45.42%	2.90	32.64%	3.62	24.64%
250	114.93	1.12	91.90%	1.68	60.12%	2.24	44.02%	2.80	34.09%
300	141.05	0.91	117.57%	1.37	75.16%	1.82	55.14%	2.28	43.14%
350	167.17	0.77	146.09%	1.15	89.54%	1.54	64.93%	1.92	51.71%
400	193.29	0.67	200.00%	1.00	200.00%	1.33	99.90%	1.66	66.25%
450	219.41	0.59	200.00%	0.88	200.00%	1.17	99.90%	1.47	99.90%
500	245.53	0.52	200.00%	0.79	200.00%	1.05	99.90%	1.31	99.90%
550	271.65	0.47	-	0.71	200.00%	0.95	200.00%	1.18	99.90%
600	297.77	0.43	-	0.65	200.00%	0.86	200.00%	1.08	99.90%
650	323.89	0.40	-	0.60	200.00%	0.79	200.00%	0.99	200.00%
700	350.01	0.37	-	0.55	200.00%	0.73	200.00%	0.92	200.00%
800	402.25	0.32	-	0.48	-	0.64	200.00%	0.80	200.00%

เชื้อเพลิงถ่านหิน									
อุณหภูมิก๊าซ ไอเสีย (°C)	ΔT_{LM}	$C_A = 20,000$ (บาท/ตรม.)		$C_A = 30,000$ (บาท/ตรม.)		$C_A = 40,000$ (บาท/ตรม.)		$C_A = 50,000$ (บาท/ตรม.)	
		PB (ปี)	IRR (%)	PB (ปี)	IRR (%)	PB (ปี)	IRR (%)	PB (ปี)	IRR (%)
160	119.50	2.93	32.07%	4.40	18.63%	5.87	11.11%	7.34	6.08%
180	118.49	2.96	31.70%	4.44	18.38%	5.92	10.90%	7.40	5.90%
200	117.48	2.99	31.33%	4.48	18.11%	5.97	10.68%	7.46	5.71%
250	114.93	3.05	30.55%	4.58	17.52%	6.10	10.18%	7.63	5.26%
300	141.05	2.49	38.74%	3.73	23.70%	4.97	15.25%	6.22	9.76%
350	167.17	2.10	46.99%	3.15	29.51%	4.20	20.06%	5.25	13.90%
400	193.29	1.81	66.25%	2.72	38.45%	3.63	25.66%	4.54	17.96%
450	219.41	1.60	66.25%	2.40	49.08%	3.20	31.11%	4.00	25.66%
500	245.53	1.43	99.90%	2.14	49.08%	2.86	38.45%	3.57	25.66%
550	271.65	1.29	99.90%	1.94	66.25%	2.58	38.45%	3.23	31.11%
600	297.77	1.18	99.90%	1.77	66.25%	2.36	49.08%	2.94	38.45%
650	323.89	1.08	99.90%	1.62	66.25%	2.17	49.08%	2.71	38.45%
700	350.01	1.00	99.90%	1.50	66.25%	2.00	49.08%	2.51	38.45%
800	402.25	0.87	200.00%	1.31	99.90%	1.74	66.25%	2.18	49.08%

หมายเหตุ การใช้ตารางข้างต้น

- 1) หากสามารถคำนวณค่า ΔT_{LM} ของการแลกเปลี่ยนความร้อนตามสมการให้ใช้ค่านั้นเปิดตารางดูค่าความคุ้มค่าแต่หากไม่มีข้อมูลให้ใช้อุณหภูมิก๊าซไอเสียเปิดตารางดูค่าความคุ้มค่า
- 2) หากตัวแปรที่ใช้งานต่างจากสมมติฐานข้างต้นอย่างมีนัยสำคัญ เช่น ชั่วโมงการใช้งาน ราคาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และค่า U ให้ปรับแก้ผลการวิเคราะห์ ระยะเวลาคืนทุนด้วยสัดส่วนของตัวแปรนั้นเทียบกับค่าที่ใช้ในสมมติฐาน ถ้าตัวแปรดังกล่าวเป็นตัวตั้งในสมการหาค่า PB ให้คูณผลลัพธ์ด้วยค่าสัดส่วน และหากเป็นตัวหารก็ให้หารผลลัพธ์ด้วยค่าสัดส่วน

5. กลุ่มเป้าหมายการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี

กลุ่มของโรงงานอุตสาหกรรมและอาคารที่สามารถประยุกต์ใช้เทคโนโลยีนี้ได้แก่

- โรงงานผลิตอาหารและเครื่องดื่ม
- โรงงานเคมี
- โรงงานสิ่งทอ
- โรงงานผลิตชิ้นส่วนโลหะ
- โรงงานอบแห้งไม้แปรรูป
- อาคารโรงแรม
- อาคารโรงพยาบาล
- ฯลฯ

4.6.2 การติดตั้งเครื่องอุ่นน้ำป้อนหม้อไอน้ำ (ECONOMIZER)**1. หลักการทำงานของเทคโนโลยี**

นำความร้อนที่ปล่อยทิ้งจากไอเสียมาอุ่นน้ำป้อนเข้าหม้อไอน้ำส่งผลให้หม้อไอน้ำใช้เชื้อเพลิงลดลง

2. สมการที่ใช้วิเคราะห์

สมการที่ใช้เช่นเดียวกับการอุ่นอากาศ

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน} = 1,000 C_A / (3.6 U \Delta T_{LM} \text{ ho})$$

3. การวิเคราะห์ข้อมูล**สมมติฐาน**

ไอเสียหลังจากการอุ่นน้ำ ถ้าเป็นเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ หรือ ซัลเฟอร์ต่ำ 100°C ถ้าเป็นเชื้อเพลิงอื่น 150°C

อุณหภูมิน้ำเข้าความร้อน 30 °C

ชั่วโมงการทำงาน 7,200 ชั่วโมง/ปี

อายุโครงการ 10 ปี

ค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน (effectiveness) 0.6

ผลคูณอัตราการไหลและค่าความจุความร้อนผิวน้ำป้อนต่อผิวก๊าซไอเสีย ประมาณเท่ากับ 3

ราคาค่าความร้อนประเภทเชื้อเพลิง	ค่าความร้อน (MJ/หน่วย)	ราคา (บาท)	ราคา/MJ
เชื้อเพลิงน้ำมัน	39.77 MJ/ลิตร	20.68 บาท/ลิตร	0.52
ก๊าซธรรมชาติ	1,055 MT/Mbtu	316.5 บาท/Mbtu	0.30
ถ่านหิน	15 MT/kg	1.65 บาท/kg	0.11

ค่า U ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบอากาศกับน้ำ ปกติมีค่า 15 ถึง 70 W/m²°C ในที่นี้เลือก 40 W/m²°C

4. ผลการวิเคราะห์

ความคุ้มค่าของการติดตั้งอุปกรณ์นำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ จะขึ้นกับเชื้อเพลิงที่ใช้ อุณหภูมิก๊าซไอเสีย และราคาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต่อตารางเมตร ในที่นี้ได้แปรค่าราคาเครื่องแลกเปลี่ยน ความร้อนตั้งแต่ 20,000-50,000 บาทต่อตารางเมตร ผลการวิเคราะห์แสดงได้ดังตารางต่อไปนี้

เชื้อเพลิงน้ำมัน									
อุณหภูมิก๊าซไอเสีย (°C)	ΔT_{LM}	$C_A = 20,000$ (บาท/ตรม.)		$C_A = 30,000$ (บาท/ตรม.)		$C_A = 40,000$ (บาท/ตรม.)		$C_A = 50,000$ (บาท/ตรม.)	
		PB (ปี)	IRR (%)	PB (ปี)	IRR (%)	PB (ปี)	IRR (%)	PB (ปี)	IRR (%)
160	123.30	0.30	-	0.45	-	0.60	179.64%	0.75	149.52%
180	129.74	0.29	-	0.43	-	0.57	185.61%	0.71	157.00%
200	135.99	0.27	-	0.41	-	0.55	190.87%	0.68	163.56%
250	150.89	0.25	-	0.37	-	0.49	-	0.61	177.05%
300	176.19	0.21	-	0.32	-	0.42	-	0.53	194.72%
350	208.81	0.18	-	0.27	-	0.36	-	0.44	-
400	241.44	0.15	-	0.23	-	0.31	-	0.38	-
450	274.07	0.14	-	0.20	-	0.27	-	0.34	-
500	306.69	0.12	-	0.18	-	0.24	-	0.30	-
550	339.32	0.11	-	0.16	-	0.22	-	0.27	-
600	371.95	0.10	-	0.15	-	0.20	-	0.25	-
650	404.57	0.09	-	0.14	-	0.18	-	0.23	-
700	437.20	0.08	-	0.13	-	0.17	-	0.21	-
800	502.45	0.07	-	0.11	-	0.15	-	0.18	-

เชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ									
อุณหภูมิก๊าซไอเสีย (°C)	ΔT_{LM}	$C_A = 20,000$ (บาท/ตรม.)		$C_A = 30,000$ (บาท/ตรม.)		$C_A = 40,000$ (บาท/ตรม.)		$C_A = 50,000$ (บาท/ตรม.)	
		PB (ปี)	IRR (%)	PB (ปี)	IRR (%)	PB (ปี)	IRR (%)	PB (ปี)	IRR (%)
160	88.50	0.73	154.64%	1.09	93.85%	1.45	69.41%	1.82	55.38%
180	97.88	0.66	168.58%	0.99	102.83%	1.31	78.78%	1.64	61.36%
200	97.88	0.66	168.58%	0.99	102.83%	1.31	78.78%	1.64	61.36%
250	143.56	0.45	-	0.67	165.59%	0.90	120.76%	1.12	91.84%
300	176.19	0.36	-	0.55	190.50%	0.73	153.97%	0.91	117.44%
350	208.81	0.31	-	0.46	-	0.62	176.80%	0.77	145.98%
400	241.44	0.27	-	0.40	-	0.53	200.00%	0.67	200.00%
450	274.07	0.23	-	0.35	-	0.47	-	0.59	200.00%
500	306.69	0.21	-	0.31	-	0.42	-	0.52	200.00%
550	339.32	0.19	-	0.28	-	0.38	-	0.47	-
600	371.95	0.17	-	0.26	-	0.35	-	0.43	-

เชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ									
อุณหภูมิก๊าซ ไอเสีย (°C)	ΔT_{LM}	$C_A = 20,000$ (บาท/ตรม.)		$C_A = 30,000$ (บาท/ตรม.)		$C_A = 40,000$ (บาท/ตรม.)		$C_A = 50,000$ (บาท/ตรม.)	
		PB (ปี)	IRR (%)	PB (ปี)	IRR (%)	PB (ปี)	IRR (%)	PB (ปี)	IRR (%)
650	404.57	0.16	-	0.24	-	0.32	-	0.40	-
700	437.20	0.15	-	0.22	-	0.29	-	0.37	-
800	502.45	0.13	-	0.19	-	0.26	-	0.32	-

เชื้อเพลิงถ่านหิน									
อุณหภูมิก๊าซ ไอเสีย (°C)	ΔT_{LM}	$C_A = 20,000$ (บาท/ตรม.)		$C_A = 30,000$ (บาท/ตรม.)		$C_A = 40,000$ (บาท/ตรม.)		$C_A = 50,000$ (บาท/ตรม.)	
		PB (ปี)	IRR (%)	PB (ปี)	IRR (%)	PB (ปี)	IRR (%)	PB (ปี)	IRR (%)
160	123.30	1.42	71.49%	2.13	46.24%	2.84	33.40%	3.56	25.19%
180	129.74	1.35	76.24%	2.03	48.49%	2.70	35.47%	3.38	26.98%
200	135.99	1.29	80.41%	1.93	51.33%	2.58	37.29%	3.22	28.67%
250	150.89	1.16	88.98%	1.74	57.89%	2.32	42.18%	2.91	32.50%
300	176.19	1.00	100.83%	1.49	66.72%	1.99	49.40%	2.49	38.70%
350	208.81	0.84	131.97%	1.26	82.42%	1.68	60.08%	2.10	46.96%
400	241.44	0.73	200.00%	1.09	99.90%	1.45	99.90%	1.82	66.25%
450	274.07	0.64	200.00%	0.96	200.00%	1.28	99.90%	1.60	66.25%
500	306.69	0.57	200.00%	0.86	200.00%	1.14	99.90%	1.43	99.90%
550	339.32	0.52	200.00%	0.78	200.00%	1.03	99.90%	1.29	99.90%
600	371.95	0.47	-	0.71	200.00%	0.94	200.00%	1.18	99.90%
650	404.57	0.43	-	0.65	200.00%	0.87	200.00%	1.08	99.90%
700	437.20	0.40	-	0.60	200.00%	0.80	200.00%	1.00	99.90%
800	502.45	0.35	-	0.52	200.00%	0.70	200.00%	0.87	200.00%

หมายเหตุ

การใช้ตารางข้างต้น

- 1) หากสามารถคำนวณค่า ΔT_{LM} ของการแลกเปลี่ยนความร้อนตามสมการให้ใช้นั้นเปิดตารางดูค่าความคุ้มค่า แต่หากไม่มีข้อมูล ให้ใช้อุณหภูมิก๊าซไอเสีย เปิดตารางดูค่าความคุ้มค่า
- 2) หากตัวแปรที่ใช้งานต่างจากสมมติฐานข้างต้นอย่างมีนัยสำคัญ เช่น ชั่วโมงการใช้งาน ราคาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน U ให้ปรับแก้ผลการวิเคราะห์ ระยะเวลาคืนทุนด้วยสัดส่วนของตัวแปรนั้นเทียบกับค่าที่ใช้ในสมมติฐาน ถ้าตัวแปรดังกล่าวเป็นตัวตั้งในสมการ PB ให้คูณผลลัพธ์ด้วยค่าสัดส่วน และหากเป็นตัวหารก็ให้หารผลลัพธ์ด้วยค่าสัดส่วน

5. กลุ่มเป้าหมายการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี

กลุ่มของโรงงานอุตสาหกรรมและอาคารที่สามารถประยุกต์ใช้เทคโนโลยีนี้ได้แก่

- โรงงานผลิตอาหารและเครื่องดื่ม
- โรงงานเคมี
- โรงงานสิ่งทอ
- โรงงานผลิตชิ้นส่วนโลหะ
- โรงงานอบแห้งไม้แปรรูป
- อาคารโรงแรม
- อาคารโรงพยาบาล
- ฯลฯ

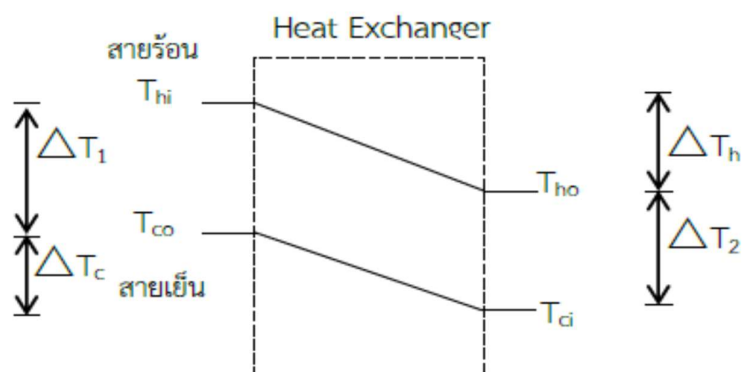
4.6.3 การติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจากน้ำร้อนกับน้ำ

1. หลักการทำงานของเทคโนโลยี

นำความร้อนที่ปล่อยทิ้งจากน้ำร้อนคอนเดนเสทหรือน้ำร้อนปล่อยทิ้งไปแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำที่จะนำไปใช้ประโยชน์ ส่งผลให้ลดการใช้พลังงานในการทำให้น้ำร้อนได้

2. สมการที่ใช้วิเคราะห์

$$\begin{aligned} \text{อุณหภูมิแตกต่างลอกลิมิน} \quad \Delta T_{LM} &= (\Delta T_1 - \Delta T_2) / \ln(\Delta T_1 / \Delta T_2) && ^\circ\text{C} \\ \text{ระยะเวลาคืนทุน} \quad PB &= 1,000 C_A / 3.6 U \Delta T_{LM} \text{ ho} && \text{ปี} \end{aligned}$$



ถ้าให้อัตราการไหลและค่าความจุความร้อนของทั้งสองกระแสน้ำอัตราส่วน $r = m_h C_{ph} / m_c C_{pc}$ และค่าประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ϵ อุณหภูมิความร้อนแตกต่างของแหล่งความร้อน T_{hi} และอุณหภูมิตัวรับ T_{ci} เป็น ΔT จะได้ว่า

กรณีที่ $r > 1$	กรณีที่ $r < 1$
$\epsilon = \frac{\Delta T_c}{\Delta T}$	$\epsilon = \frac{\Delta T_h}{\Delta T}$
$\Delta T_c = \epsilon \Delta T$	$\Delta T_h = \epsilon \Delta T$
$\Delta T_h = \epsilon r \Delta T$	$\Delta T_c = \epsilon r \Delta T$
$\Delta T_1 = (1 - \epsilon) \Delta T$	$\Delta T_1 = (1 - \epsilon r) \Delta T$
$\Delta T_2 = (2 - \epsilon r) \Delta T$	$\Delta T_2 = (2 - \epsilon) \Delta T$

กรณีที่ $r > 1$	กรณีที่ $r < 1$
$\Delta T_{LW} = \frac{(r-1)\varepsilon\Delta T}{\ln\left(\frac{1-\varepsilon}{1-\varepsilon r}\right)}$	$\Delta T_{LW} = \frac{(1-r)\varepsilon\Delta T}{\ln\left(\frac{1-\varepsilon r}{1-\varepsilon}\right)}$

จะเห็นว่าหากทราบค่า ε อุณหภูมิแตกต่างของ ns แลกเปลี่ยนความร้อน ΔT และอัตราส่วน r ก็จะสามารถหาความสัมพันธ์ของ ΔT และ ΔT_{LM} เพื่อนำไปคำนวณความคุ้มค่าในการลงทุนได้

3. การวิเคราะห์ข้อมูล

สมมุติฐาน

เพื่อให้เห็นภาพของความคุ้มค่าในการปรับปรุงกำหนดค่าตัวแปรต่างๆ ดังนี้

ค่าประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (ε) 0.7

อัตราการไหลของกระแสร้อนต่อกระแสเย็น (r) 1.2

อุณหภูมิตัวกลางสายเย็นที่รับความร้อน 30 °C

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน 2,000 W/m²°C

ชั่วโมงการทำงาน 7,200 ชั่วโมง/ปี

ราคาค่าความร้อน ประเภทเชื้อเพลิง	ค่าความร้อน (MJ/หน่วย)	ราคา (บาท)	ราคา/MJ
เชื้อเพลิงน้ำมัน	39.77 MJ/ลิตร	20.68 บาท/ลิตร	0.52
ก๊าซธรรมชาติ	1,055 MT/Mbtu	316.5 บาท/Mbtu	0.30
ถ่านหิน	15 MT/lg	1.65 บาท/kg	0.11

4. ผลการวิเคราะห์

เมื่อแปรราคาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 20,000 – 50,000 บาท/ตารางเมตร มีความคุ้มค่าของการดำเนินการมาตรการแบ่งเป็น สองกรณี คือเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเพลต และแบบ (เปลือกและท่อ) ดังนี้
มาตรการติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนน้ำ-น้ำ แบบเพลต

เชื้อเพลิงน้ำมัน									
อุณหภูมิ น้ำร้อนทิ้ง (°C)	ΔT_{LM}	$C_A = 20,000$ (บาท/ตรม.)		$C_A = 30,000$ (บาท/ตรม.)		$C_A = 40,000$ (บาท/ตรม.)		$C_A = 50,000$ (บาท/ตรม.)	
		PB (ปี)	IRR (%)	PB (ปี)	IRR (%)	PB (ปี)	IRR (%)	PB (ปี)	IRR (%)
40	3.31	0.22	>100%	0.34	>100%	0.45	>100%	0.56	187.84%
50	6.62	0.11	>100%	0.17	>100%	0.22	>100%	0.28	>100%
60	9.92	0.07	>100%	0.11	>100%	0.15	>100%	0.19	>100%
70	13.23	0.06	>100%	0.08	>100%	0.11	>100%	0.14	>100%
80	16.54	0.04	>100%	0.07	>100%	0.09	>100%	0.11	>100%
90	19.85	0.04	>100%	0.06	>100%	0.07	>100%	0.09	>100%
100	23.16	0.03	>100%	0.05	>100%	0.06	>100%	0.08	>100%
110	26.46	0.03	>100%	0.04	>100%	0.06	>100%	0.07	>100%
120	29.77	0.02	>100%	0.04	>100%	0.05	>100%	0.06	>100%
130	33.08	0.02	>100%	0.03	>100%	0.04	>100%	0.06	>100%
140	36.39	0.02	>100%	0.03	>100%	0.04	>100%	0.05	>100%
150	39.70	0.02	>100%	0.03	>100%	0.04	>100%	0.05	>100%

เชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ									
อุณหภูมิ น้ำร้อนทิ้ง (°C)	ΔT_{LM}	$C_A = 20,000$ (บาท/ตรม.)		$C_A = 30,000$ (บาท/ตรม.)		$C_A = 40,000$ (บาท/ตรม.)		$C_A = 50,000$ (บาท/ตรม.)	
		PB (ปี)	IRR (%)	PB (ปี)	IRR (%)	PB (ปี)	IRR (%)	PB (ปี)	IRR (%)
40	3.31	0.39	>100%	0.58	183.35%	0.78	144.44%	0.97	105.53%
50	6.62	0.19	>100%	0.29	>100%	0.39	>100%	0.49	>100%
60	9.92	0.13	>100%	0.19	>100%	0.26	>100%	0.32	>100%
70	13.23	0.10	>100%	0.15	>100%	0.19	>100%	0.24	>100%
80	16.54	0.08	>100%	0.12	>100%	0.16	>100%	0.19	>100%
90	19.85	0.06	>100%	0.10	>100%	0.13	>100%	0.16	>100%
100	23.16	0.06	>100%	0.08	>100%	0.11	>100%	0.14	>100%
110	26.46	0.05	>100%	0.07	>100%	0.10	>100%	0.12	>100%
120	29.77	0.04	>100%	0.06	>100%	0.09	>100%	0.11	>100%
130	33.08	0.04	>100%	0.06	>100%	0.08	>100%	0.10	>100%
140	36.39	0.04	>100%	0.05	>100%	0.07	>100%	0.09	>100%
150	39.70	0.03	>100%	0.05	>100%	0.06	>100%	0.08	>100%

เชื้อเพลิงถ่านหิน									
อุณหภูมิ น้ำร้อนทิ้ง (°C)	ΔT_{LM}	$C_A = 20,000$ (บาท/ตรม.)		$C_A = 30,000$ (บาท/ตรม.)		$C_A = 40,000$ (บาท/ตรม.)		$C_A = 50,000$ (บาท/ตรม.)	
		PB (ปี)	IRR (%)	PB (ปี)	IRR (%)	PB (ปี)	IRR (%)	PB (ปี)	IRR (%)
40	3.31	1.06	95.85%	1.59	63.15%	2.12	46.52%	2.65	36.24%
50	6.62	0.53	193.97%	0.80	140.90%	1.06	95.85%	1.33	78.01%
60	9.92	0.35	>100%	0.53	193.97%	0.71	158.59%	0.88	123.22%
70	13.23	0.27	>100%	0.40	>100%	0.53	193.97%	0.66	167.43%
80	16.54	0.21	>100%	0.32	>100%	0.42	>100%	0.53	193.97%
90	19.85	0.18	>100%	0.27	>100%	0.35	>100%	0.44	>100%
100	23.16	0.15	>100%	0.23	>100%	0.30	>100%	0.38	>100%
110	26.46	0.13	>100%	0.20	>100%	0.27	>100%	0.33	>100%
120	29.77	0.12	>100%	0.18	>100%	0.24	>100%	0.29	>100%
130	33.08	0.11	>100%	0.16	>100%	0.21	>100%	0.27	>100%
140	36.39	0.10	>100%	0.14	>100%	0.19	>100%	0.24	>100%
150	39.70	0.09	>100%	0.13	>100%	0.18	>100%	0.22	>100%

มาตรการติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนน้ำ-น้ำ แบบ Shell & Tube

เชื้อเพลิงน้ำมัน									
อุณหภูมิก๊าซ ไอเสีย (°C)	ΔT_{LM}	$C_A = 20,000$ (บาท/ตรม.)		$C_A = 30,000$ (บาท/ตรม.)		$C_A = 40,000$ (บาท/ตรม.)		$C_A = 50,000$ (บาท/ตรม.)	
		PB (ปี)	IRR (%)	PB (ปี)	IRR (%)	PB (ปี)	IRR (%)	PB (ปี)	IRR (%)
40	3.31	0.45	>100%	0.67	165.39%	0.90	120.49%	1.12	91.73%
50	6.62	0.22	>100%	0.34	>100%	0.45	>100%	0.56	187.84%
60	9.92	0.15	>100%	0.22	>100%	0.30	>100%	0.37	>100%
70	13.23	0.11	>100%	0.17	>100%	0.22	>100%	0.28	>100%
80	16.54	0.09	>100%	0.13	>100%	0.18	>100%	0.22	>100%
90	19.85	0.07	>100%	0.11	>100%	0.15	>100%	0.19	>100%
100	23.16	0.06	>100%	0.10	>100%	0.13	>100%	0.16	>100%
110	26.46	0.06	>100%	0.08	>100%	0.11	>100%	0.14	>100%
120	29.77	0.05	>100%	0.07	>100%	0.10	>100%	0.12	>100%
130	33.08	0.04	>100%	0.07	>100%	0.09	>100%	0.11	>100%
140	36.39	0.04	>100%	0.06	>100%	0.08	>100%	0.10	>100%
150	39.70	0.04	>100%	0.06	>100%	0.07	>100%	0.09	>100%

เชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ									
อุณหภูมิก๊าซ ไอเสีย (°C)	ΔT_{LM}	$C_A = 20,000$ (บาท/ตรม.)		$C_A = 30,000$ (บาท/ตรม.)		$C_A = 40,000$ (บาท/ตรม.)		$C_A = 50,000$ (บาท/ตรม.)	
		PB (ปี)	IRR (%)	PB (ปี)	IRR (%)	PB (ปี)	IRR (%)	PB (ปี)	IRR (%)
40	3.31	0.78	144.44%	1.17	88.71%	1.56	64.36%	1.94	51.01%
50	6.62	0.39	>100%	0.58	183.35%	0.78	144.44%	0.97	105.53%
60	9.92	0.26	>100%	0.39	>100%	0.52	196.32%	0.65	170.38%
70	13.23	0.19	>100%	0.29	>100%	0.39	>100%	0.49	>100%
80	16.54	0.16	>100%	0.23	>100%	0.31	>100%	0.39	>100%
90	19.85	0.13	>100%	0.19	>100%	0.26	>100%	0.32	>100%
100	23.16	0.11	>100%	0.17	>100%	0.22	>100%	0.28	>100%
110	26.46	0.10	>100%	0.15	>100%	0.19	>100%	0.24	>100%
120	29.77	0.09	>100%	0.13	>100%	0.17	>100%	0.22	>100%
130	33.08	0.08	>100%	0.12	>100%	0.16	>100%	0.19	>100%
140	36.39	0.07	>100%	0.11	>100%	0.14	>100%	0.18	>100%
150	39.70	0.06	>100%	0.10	>100%	0.13	>100%	0.16	>100%

เชื้อเพลิงถ่านหิน									
อุณหภูมิก๊าซ ไอเสีย (°C)	ΔT_{LM}	$C_A = 20,000$ (บาท/ตรม.)		$C_A = 30,000$ (บาท/ตรม.)		$C_A = 40,000$ (บาท/ตรม.)		$C_A = 50,000$ (บาท/ตรม.)	
		PB (ปี)	IRR (%)	PB (ปี)	IRR (%)	PB (ปี)	IRR (%)	PB (ปี)	IRR (%)
40	3.31	2.12	46.52%	3.18	29.14%	4.24	19.75%	5.30	13.63%
50	6.62	1.06	95.85%	1.59	63.15%	2.12	46.52%	2.65	36.24%
60	9.92	0.71	158.59%	1.06	95.85%	1.41	72.06%	1.77	57.08%
70	13.23	0.53	193.97%	0.80	140.90%	1.06	95.85%	1.33	78.01%
80	16.54	0.42	>100%	0.64	172.74%	0.85	130.29%	1.06	95.85%
90	19.85	0.35	>100%	0.53	193.97%	0.71	158.59%	0.88	123.22%
100	23.16	0.30	>100%	0.45	>100%	0.61	200.00%	0.76	200.00%
110	26.46	0.27	>100%	0.40	>100%	0.53	200.00%	0.66	200.00%
120	29.77	0.24	>100%	0.35	>100%	0.47	>100%	0.59	200.00%
130	33.08	0.21	>100%	0.32	>100%	0.42	>100%	0.53	200.00%
140	36.39	0.19	>100%	0.29	>100%	0.39	>100%	0.48	>100%
150	39.70	0.18	>100%	0.27	>100%	0.35	>100%	0.44	>100%

หมายเหตุ

การใช้ตารางข้างต้น

- 1) หากสามารถคำนวณค่า ΔT_{LM} ของการแลกเปลี่ยนความร้อนตามสมการ ให้ใช้ค่านั้นเปิดตารางดูค่าความคุ้มค่า แต่ถ้าหากไม่มีข้อมูล ให้ใช้อุณหภูมิน้ำร้อน เปิดตารางดูค่าความคุ้มค่า
- 2) หากตัวแปรที่ใช้งานต่างจากสมมติฐานข้างต้นอย่างมีนัยสำคัญ เช่น ชั่วโมงการใช้งาน ราคาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน U ให้ปรับแก้ผลการวิเคราะห์ ระยะเวลาคืนทุนด้วยสัดส่วนของตัวแปรนั้นเทียบกับค่าที่ใช้ในสมมติฐาน ถ้าตัวแปรดังกล่าวเป็นตัวตั้งในสมการ PB ให้คูณผลลัพธ์ด้วยค่าสัดส่วน และหากเป็นตัวหารก็ให้หารผลลัพธ์ด้วยค่าสัดส่วน

5. กลุ่มเป้าหมายการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี

กลุ่มของโรงงานอุตสาหกรรมและอาคารที่สามารถประยุกต์ใช้เทคโนโลยีนี้ได้แก่

- โรงงานผลิตอาหารและเครื่องดื่ม
- โรงงานเคมี
- โรงงานสิ่งทอ
- โรงงานผลิตชิ้นส่วนโลหะ
- โรงงานอบแห้งไม้แปรรูป
- อาคารโรงแรม
- อาคารโรงพยาบาล

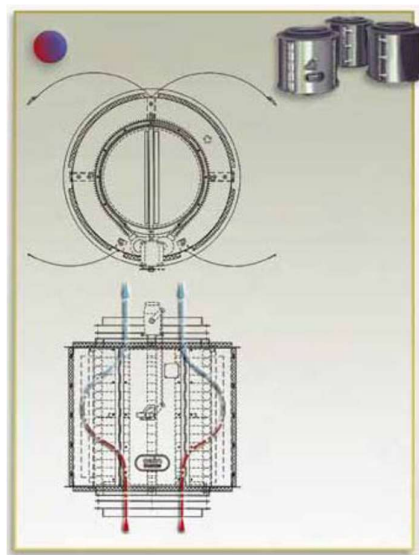
ฯลฯ

4.6.4 เครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบ Tube & Fin

1. หลักการทำงานของเทคโนโลยี

หลักการทำงานของ Economizer แบบ Tube & Fin จะประกอบด้วยท่อตัดและเพิ่มครีบอกเพื่อเพิ่มพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนจากปล่องไอเสียสู่น้ำป้อนที่จะวิ่งผ่าน Economizer เพื่อรับความร้อนจากไอเสียก่อนเข้าหม้อน้ำ ไอเสียเมื่อวิ่งผ่านครีบอกจะถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำป้อนโดยที่น้ำป้อนวิ่งอยู่ภายในท่อ Economizer แบบ Tube & Fin นี้จะมีอยู่ 2 แบบ คือ แบบท่อกกลม (Cylindrical Economizer) และแบบท่อสี่เหลี่ยม (Rectangular Economizer)

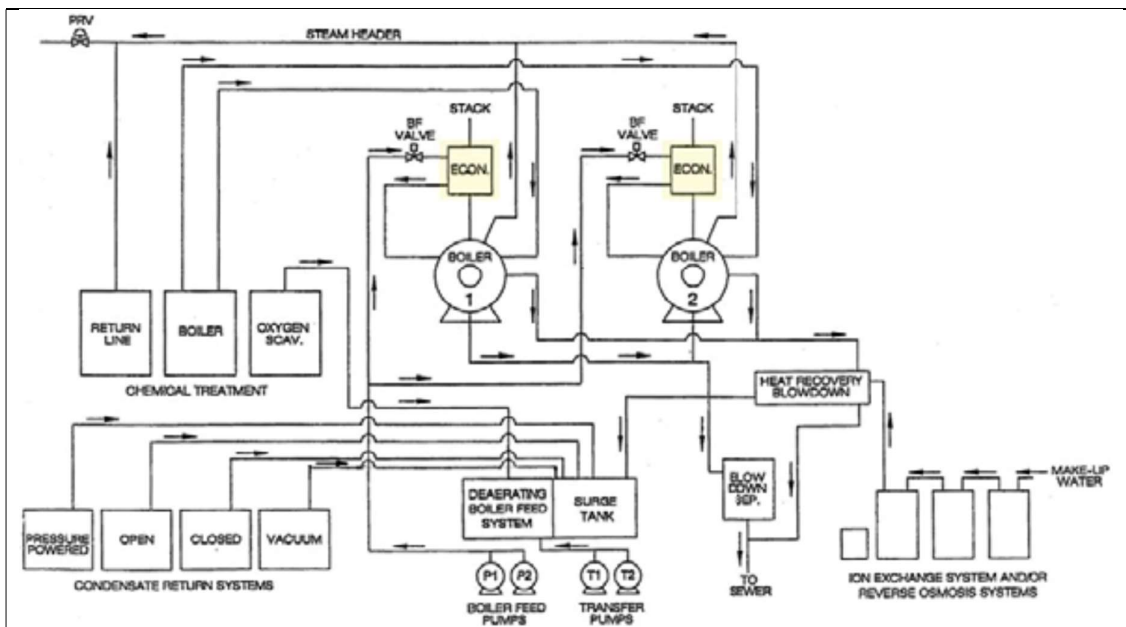
แบบท่อกกลม หมายถึง ลักษณะของการวางท่อน้ำจะวางวนรอบเป็นวงกลมล้อมรอบปล่องไอเสีย ทำให้มีขนาดเล็กและน้ำหนักเบาแบบท่อสี่เหลี่ยม หมายถึง ลักษณะของการวางท่อน้ำจะวางวนรอบปล่องไอเสียเป็นแบบสี่เหลี่ยม ทำให้มีพื้นที่ในการถ่ายเทความร้อนมากกว่าแบบท่อกกลม แต่ก็มีข้อเสีย คือ จะมีน้ำหนักมากกว่า



รูปที่ 2.13-25 Economizer แบบท่อกกลม (Cylindrical Economizer)

2. การใช้ทดแทนเทคโนโลยีเดิม

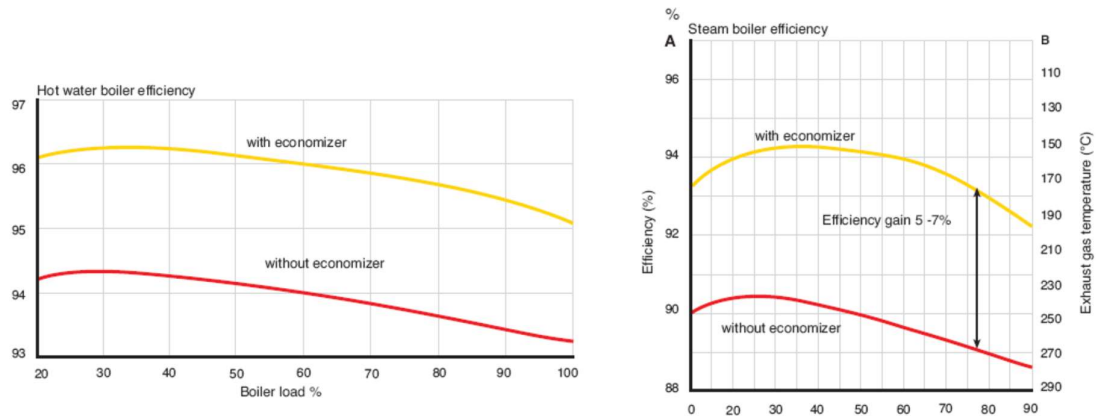
การติดตั้ง Economizer แบบ Tube & Fin จะต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเติม คือ จะต้องติดตั้งปั๊ม เดินท่อน้ำ และดัดแปลงปล่องเพื่อติดตั้งตัว Economizer



รูปที่ 2.13-26 การประยุกต์ใช้ Economizer แบบ Tube & Fin

3. ศักยภาพการประหยัดพลังงาน

การติดตั้ง Economizer จะทำให้ประสิทธิภาพรวมของระบบเพิ่มขึ้นประมาณ 5-7% ขึ้นอยู่กับชนิดเชื้อเพลิงที่ใช้ ขนาดหม้อน้ำ และสภาพการใช้งานของเครื่อง เทคโนโลยีนี้มีระยะเวลาในการคืนทุนสั้นประมาณ 6 เดือนถึง 3 ปี

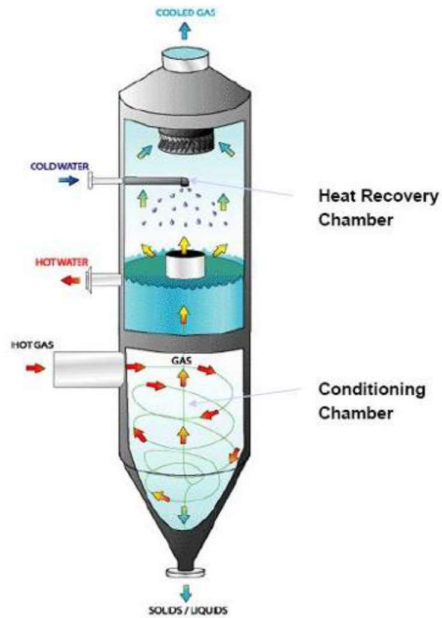


รูปที่ 2.13-27 ประสิทธิภาพของหม้อน้ำเมื่อทำการติดตั้ง Economizer

4.6.5 เครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบสัมผัสตรง

1. หลักการทำงานของเทคโนโลยี

หลักการทำงานของ Economizer แบบสัมผัสตรงนั้นเป็นการนำเอาแก๊สที่ได้จากการเผาไหม้เข้าไปผ่านกระบวนการแยกของแข็ง (Cyclone) ให้ออกจากแก๊สภายในถังแรงดัน หลังจากผ่านกระบวนการนี้แล้วจะเหลือแต่แก๊ส และจะนำแก๊สนี้ไปแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำโดยตรง หลังจากสิ้นสุดกระบวนการจะได้อากาศที่เย็นและน้ำที่ร้อน ซึ่งอากาศที่เย็นจะถูกปล่อยทิ้งออกไป ส่วนน้ำที่ร้อนจะถูกส่งไปยังหม้อต้มน้ำ

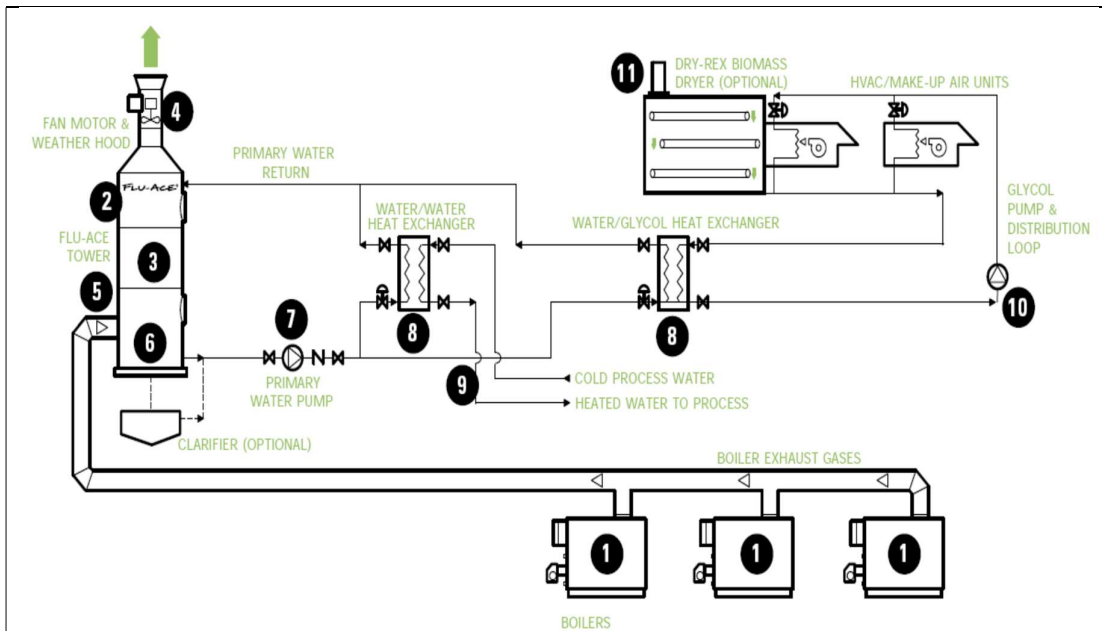


รูปที่ 2.13-28 เครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบสัมผัสตรง

2. การใช้ทดแทนเทคโนโลยีเดิม

อุปกรณ์และการปรับปรุง

- Pressure Vessel
- Pump
- Blower



รูปที่ 2.13-29 การใช้งาน Economizer แบบสัมผัสตรง

3. ศักยภาพการประหยัดพลังงาน

ประโยชน์ ข้อดี และข้อเสียของเทคโนโลยี

ข้อดี

- ประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนสูงมาก และความดันสูญเสียทางด้านไอเสียต่ำ
- ลดมลภาวะของอากาศ เช่น แก๊สเรือนกระจก
- มีการคืนทุนเร็ว 1-3 ปี

ข้อเสีย

- น้ำที่ส่งไปยังหม้อน้ำมีคุณภาพด้อยลง
- มีการกัดกร่อนโลหะ

การใช้เทคโนโลยี Economizer แบบสัมผัสตรงสามารถทำให้ประหยัดพลังงานได้ 15-35% การคืนทุน 1-3 ปี

4.7 การพิจารณาโครงการการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่

รายการตรวจสอบนี้เตรียมชุดคำถามไว้สำหรับให้ผู้ใช้งานที่มีศักยภาพตอบ เมื่อมีการพิจารณาโครงการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่ ความสำเร็จของโครงการขึ้นอยู่กับการศึกษาประเด็นที่สำคัญเหล่านี้ก่อนที่จะมีการลงทุนใดๆ

คำถาม	คำตอบ
1. ท่านทราบปริมาณและคุณภาพของความร้อนทิ้งที่เกิดขึ้นหรือไม่	
2. ท่านทราบค่าความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซไอเสียหรือไม่	
3. ท่านได้มีการบำรุงรักษาเบื้องต้น (Good Housekeeping) และได้ใช้มาตรการที่มีค่าใช้จ่ายต่ำ ในการลดการสูญเสียความร้อนให้ต่ำที่สุดแล้วหรือยัง	
4. ท่านมีทางเลือกที่คุ้มค่าใช้จ่าย (Cost-effective) กว่าวิธีที่ปฏิบัติอยู่ในปัจจุบันเพื่อลดการสูญเสียความร้อนทิ้งแล้วหรือยัง	

คำถาม	คำตอบ
5. ผู้ร่วมงานในบริษัทของท่านได้คำนึงถึงการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่หรือไม่	
6. ท่านสามารถหาประสบการณ์ในทางปฏิบัติที่ใช้งานได้จริงได้หรือไม่	
7. มีการใช้ความร้อนทิ้งที่คุ้มค่าใช้จ่ายหรือไม่	
8. หัวข้อต่อไปนี้จะได้รับการพิจารณาแล้วหรือยัง • ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานและการบำรุงรักษา • แหล่งของอุปกรณ์การนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่ • ความเป็นไปได้ของลักษณะการทำงานแบบไม่สม่ำเสมอ • ปัญหาทางเทคนิคเกี่ยวกับการอุดตัน (Fouling) โดยฝุ่นละออง การกัดกร่อนซึ่งเกิดจากการควบแน่นของกรด และอื่นๆ • แนวโน้มที่จะปล่อยมลภาวะเพิ่มขึ้น เช่น การปล่อยก๊าซในกลุ่มไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) • ผลกระทบต่อการผลิตและคุณภาพของผลิตภัณฑ์	
9. โครงการที่นำเสนอมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์หรือไม่	
10. การประยุกต์ใช้งานที่เสนอได้นำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่อย่างมีประสิทธิภาพแล้วหรือยัง	
11. โครงการที่เสนอได้ปฏิบัติตามข้อบังคับของกฎหมายสิ่งแวดล้อมที่ใช้ในปัจจุบันและที่กำลังจะประกาศใช้หรือไม่	
12. ข้อมูลที่ต้องการทั้งหมดมีเพียงพอที่จะขอเงินสนับสนุนสำหรับทำโครงการที่เสนอไว้หรือไม่	

4.8 โปรแกรมการวิเคราะห์มาตรการอนุรักษ์พลังงาน

เพื่อลดความยุ่งยากซับซ้อนในการวิเคราะห์ผลการอนุรักษ์พลังงาน จึงทำเป็นโปรแกรม Microsoft Excel โดยผู้ใช้งานข้อมูลเบื้องต้น และข้อมูลตรวจวัดกรอกลงในช่องว่าง โปรแกรมจะคำนวณผลการอนุรักษ์พลังงานที่ถูกต้องได้ทันที

มาตรการที่ 1 การนำไอเสียจากปล่องไอเสียไปใช้ประโยชน์
1. หลักการและเหตุผล โรงงานติดตั้งหม้อไอน้ำแบบท่อไฟ ใช้เชื้อเพลิง ขนาดพิกัด ตัน จำนวน ชุด ปัจจุบันอุณหภูมิไอเสียเข้าปล่องโดยเฉลี่ยประมาณ.....°C ส่งผลให้เกิดการสูญเสียความร้อนทางปล่องมากจึงมีแนวคิดในการนำความร้อนจากไอเสียไปใช้ในการ.....โดยคาดว่าอุณหภูมิไอเสียหลังจากผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแล้วจะมีอุณหภูมิประมาณ..... °C (ถ้าเชื้อเพลิงมีองค์ประกอบของกำมะถันอุณหภูมิไอเสียหลังจากนำไปใช้แล้วไม่ควรต่ำกว่า 180 °C)
2. สมการที่ใช้ในการวิเคราะห์
2.1 สมการที่ใช้ในการวิเคราะห์ทางเทคนิค
2.1.1 พลังงานความร้อนที่สูญเสียทางปล่อง - เชื้อเพลิงแข็ง (kcal/y)

$$Q_{ES} = \text{อัตราการใช้เชื้อเพลิงแข็งเฉลี่ย (kg/h)} \times \text{ปริมาณก๊าซไอเสียจริง (Nm}^3\text{/kg)} \times \text{ค่าความจุความร้อนของก๊าซไอเสีย (kcal/Nm}^3 \text{ } ^\circ\text{C)} \times (\text{อุณหภูมิไอเสียออกจากห้องเผาไหม้ (} ^\circ\text{C)} - \text{อุณหภูมิอากาศเข้าห้องเผาไหม้ (} ^\circ\text{C)}) \times \text{ชั่วโมงการใช้งานตลอดทั้งปี (h/y)} \times \text{ตัวประกอบการทำงาน} \times \text{ประสิทธิภาพการเผาไหม้ (\%)} / 100$$

- เชื้อเพลิงเหลว (kcal/y)

$$Q_{EL} = \text{อัตราการใช้เชื้อเพลิงเหลวเฉลี่ย (L/h)} \times \text{ความหนาแน่นของเชื้อเพลิง (kg/L)} \times \text{ค่าความจุความร้อนของก๊าซไอเสีย (kcal/Nm}^3 \text{ } ^\circ\text{C)} \times (\text{อุณหภูมิไอเสียออกจากห้องเผาไหม้ (} ^\circ\text{C)} - \text{อุณหภูมิอากาศเข้าห้องเผาไหม้ (} ^\circ\text{C)}) \times \text{ชั่วโมงการใช้งานตลอดทั้งปี (h/y)} \times \text{ตัวประกอบการทำงาน} \times \text{ประสิทธิภาพการเผาไหม้ (\%)} / 100$$

- เชื้อเพลิงก๊าซ (kcal/y)

$$Q_{EG} = \text{อัตราการใช้เชื้อเพลิงก๊าซเฉลี่ย (m}^3\text{/h)} \times \text{ความหนาแน่นของเชื้อเพลิง (kg/m}^3\text{)} \times \text{ค่าความจุความร้อนของก๊าซไอเสีย (kcal/Nm}^3 \text{ } ^\circ\text{C)} \times (\text{อุณหภูมิไอเสียออกจากห้องเผาไหม้ (} ^\circ\text{C)} - \text{อุณหภูมิอากาศเข้าห้องเผาไหม้ (} ^\circ\text{C)}) \times \text{ชั่วโมงการใช้งานตลอดทั้งปี (h/y)} \times \text{ตัวประกอบการทำงาน} \times \text{ประสิทธิภาพการเผาไหม้ (\%)} / 100$$

2.1.2 พลังงานความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์

- เชื้อเพลิงแข็ง (kg/y)

$$F_{SS} = \text{พลังงานความร้อนที่สูญเสียออกทางปล่องลดลง (kcal/y)} \times (\text{ประสิทธิภาพอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน / 100}) / (\text{ค่าความร้อนทางต่ำของเชื้อเพลิง (kcal/kg)} \times \text{ประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง / 100})$$

- เชื้อเพลิงเหลว (L/y)

$$F_{SL} = \text{พลังงานความร้อนที่สูญเสียออกทางปล่องลดลง (kcal/y)} \times (\text{ประสิทธิภาพอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน / 100}) / (\text{ค่าความร้อนทางต่ำของเชื้อเพลิง (kcal/kg)} \times \text{ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงเหลว (kg/L)} \times \text{ประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง / 100})$$

- เชื้อเพลิงก๊าซ (m³/y)

$$F_{SG} = \text{พลังงานความร้อนที่สูญเสียออกทางปล่องลดลง (kcal/y)} \times (\text{ประสิทธิภาพอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน / 100}) / (\text{ค่าความร้อนทางต่ำของเชื้อเพลิง (kcal/kg)} \times \text{ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงก๊าซ (kg/m}^3\text{)} \times \text{ประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง / 100})$$

2.2 การวิเคราะห์การลงทุน
2.2.1 ระยะเวลาคืนทุน (y) $PB = \frac{\text{เงินลงทุนติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (บาท)} / \text{ค่าพลังงานความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์ได้ (บาท/ปี)}}{}$
3. การวิเคราะห์ข้อมูล ใช้โปรแกรม Excel ในการวิเคราะห์ข้อมูลโดยป้อนข้อมูลเบื้องต้นและข้อมูลตรวจวัดใส่ในช่องสี่ฟ้า

รายการ	สัญลักษณ์	หน่วย	ข้อมูล	แหล่งที่มา ของข้อมูล
1. ข้อมูลเบื้องต้น				
1.1 ชั่วโมงการใช้งานตลอดทั้งปี	h	h/y		
1.2 ค่าความร้อนทางต่ำของเชื้อเพลิง				
- เชื้อเพลิงแข็ง	LHV _S	kcal/kg		
- เชื้อเพลิงเหลว	LHV _L	kcal/kg		
- เชื้อเพลิงก๊าซ	LHV _G	kcal/kg		
1.3 ราคาเชื้อเพลิงเฉลี่ยต่อหน่วย				
- เชื้อเพลิงแข็ง	C _S	฿/kg		
- เชื้อเพลิงเหลว	C _L	฿/L		
- เชื้อเพลิงก๊าซ	C _G	฿/m ³		
1.4 ความหนาแน่นของเชื้อเพลิง				
- เชื้อเพลิงเหลว	D _L	kg/L		
- เชื้อเพลิงก๊าซ	D _G	kg/m ³		
1.5 ตัวประกอบการทำงาน	OF			
1.6 ค่าความจุความร้อนของก๊าซไอเสีย (ที่ 200 °C = 0.33 , ที่ 400 °C = 0.34)	C _{Pg}	kcal/Nm ³ °C		
1.7 ประสิทธิภาพการเผาไหม้	η _C	%		
1.8 ประสิทธิภาพหม้อไอน้ำ	η _B	%		
1.9 อัตราการใช้เชื้อเพลิงเฉลี่ย				
- เชื้อเพลิงแข็ง	m _{FS}	kg/h		
- เชื้อเพลิงเหลว	m _{FL}	L/h		
- เชื้อเพลิงก๊าซ	m _{FG}	m ³ /h		
1.10 ประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน	η _{HX}	%		
1.11 เงินลงทุนติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน	C _I	฿		

2. ข้อมูลตรวจวัด			
2.1 อุณหภูมิไอเสียออกจากห้องเผาไหม้เดิม	T_{gO}	$^{\circ}\text{C}$	
2.2 อุณหภูมิอากาศเข้าห้องเผาไหม้เดิม	T_{aO}	$^{\circ}\text{C}$	
2.3 อุณหภูมิไอเสียออกจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนหลัง	T_{gN}	$^{\circ}\text{C}$	
2.4 ปริมาณออกซิเจนออกจากห้องเผาไหม้เดิม	O_{2O}	%	
3. การวิเคราะห์ทางเทคนิค			
<u>การสูญเสียความร้อนทางปล่องเดิม</u>			
3.1 อัตราส่วนอากาศเดิม $M = 21/(21 - O_{2O})$	M	-	0.00
3.2 ปริมาณอากาศทางทฤษฎีเดิม - เชื้อเพลิงแข็ง $A_{OS} = (1.01 \times LHV_S / 1,000) + 0.5$	A_{OS}	Nm^3/kg	0.00
- เชื้อเพลิงเหลว $A_{OL} = 0.85 \times LHV_L / 1,000$	A_{OL}	Nm^3/kg	0.00
- เชื้อเพลิงก๊าซ $A_{OG} = (1.09 \times LHV_G / 1,000) - 0.25$	A_{OG}	Nm^3/kg	0.00
3.3 ปริมาณอากาศใช้จริงเดิม - เชื้อเพลิงแข็ง $A_S = A_{OS} \times M$	A_S	Nm^3/kg	0.00
- เชื้อเพลิงเหลว $A_L = A_{OL} \times M$	A_L	Nm^3/kg	0.00
- เชื้อเพลิงก๊าซ $A_G = A_{OG} \times M$	A_G	Nm^3/kg	0.00

3.4 ปริมาณก๊าซเสียทางทฤษฎีเดิม - เชื้อเพลิงแข็ง $\theta_{OS} = (0.89 \times LHV_S / 1,000) + 1.65$ - เชื้อเพลิงเหลว $\theta_{OL} = 1.11 \times LHV_L / 1,000$ - เชื้อเพลิงก๊าซ $\theta_{OG} = (1.14 \times LHV_G / 1,000) + 0.25$ 3.5 ปริมาณก๊าซเสียจริงเดิม - เชื้อเพลิงแข็ง $\theta_S = \theta_{OS} + (M-1) \times A_{OS}$ - เชื้อเพลิงเหลว $\theta_L = \theta_{OL} + (M-1) \times A_{OL}$ - เชื้อเพลิงก๊าซ $\theta_G = \theta_{OG} + (M-1) \times A_{OG}$ 3.6 พลังงานความร้อนที่สูญเสียเดิม - เชื้อเพลิงแข็ง $Q_{ES} = m_{IS} \times \theta_S \times C_{Pg} \times (T_{go} - T_{ao})$ $\times h \times OF \times hC / 100$ - เชื้อเพลิงเหลว $Q_{EL} = m_{IL} \times D_L \times \theta_L \times C_{Pg} \times (T_{go} - T_{ao})$ $\times h \times OF \times hC / 100$ - เชื้อเพลิงก๊าซ $Q_{EG} = mfG \times DG \times qG \times CPg \times (T_{go} - T_{ao})$ $\times h \times OF \times \eta_C / 100$ 3.7 การสูญเสียความร้อนทางปล่องไอเสียใหม่ เมื่อนำความร้อนจากไอเสียไปใช้ - เชื้อเพลิงแข็ง $Q_{ESN} = m_{IS} \times \theta_S \times C_{Pg} \times (T_{gN} - T_{ao})$	θ_{OS}	Nm^3/kg	0.00		
	θ_{OL}	Nm^3/kg	0.00		
	θ_{OG}	Nm^3/kg	0.00		
	θ_S	Nm^3/kg	0.00		
	θ_L	Nm^3/kg	0.00		
	θ_G	Nm^3/kg	0.00		
	Q_{ES}	kcal/y	0.00		
	Q_{EL}	kcal/y	0.00		
	Q_{EG}	kcal/y	0.00		
	Q_{ESN}	kcal/y	0.00		

$x_h \times OF \times h_C / 100$ - เชื้อเพลิงเหลว $Q_{ELN} = m_f L \times D_L \times q_L \times CP_g \times (T_{gN} - T_{ao})$	Q_{ELN}	kcal/y	0.00	
$x_h \times OF \times \eta_C / 100$ - เชื้อเพลิงก๊าซ $Q_{EGN} = m_f G \times D_G \times q_G \times CP_g \times (T_{gN} - T_{ao})$	Q_{EGN}	kcal/y	0.00	
$x_h \times OF \times \eta_C / 100$ 3.8 พลังงานความร้อนสูญเสียออกทางปล่อง - เชื้อเพลิงแข็ง $Q_{SS} = (Q_{ES} - Q_{ESN})$ - เชื้อเพลิงเหลว $Q_{SL} = (Q_{EL} - Q_{ELN})$ - เชื้อเพลิงก๊าซ $Q_{SG} = (Q_{EG} - Q_{EGN})$	Q_{SS}	kcal/y	0.00	
	Q_{SL}	kcal/y	0.00	
	Q_{SG}	kcal/y	0.00	
3.9 พลังงานความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์ได้ - เชื้อเพลิงแข็ง $F_{SS} = Q_{SS} \times (\eta_{HX} / 100) / (LHV_S \times \eta_C / 100)$ - เชื้อเพลิงเหลว $F_{SL} = Q_{SL} \times (\eta_{HX} / 100) / (LHV_L \times D_L \times \eta_C / 100)$ - เชื้อเพลิงก๊าซ $F_{SG} = Q_{SG} \times (\eta_{HX} / 100) / (LHV_G \times D_G \times \eta_C / 100)$	F_{SS}	kg/y	0.00	
	F_{SL}	L/y	0.00	
	F_{SG}	m ³ /y	0.00	

3.10 ค่าใช้จ่ายเชื้อเพลิงที่ลดลง					
- เชื้อเพลิงแข็ง	$S_S = F_{SS} \times C_S$	S_S	B/y	0.00	
- เชื้อเพลิงเหลว	$S_L = F_{SL} \times C_L$	S_L	B/y	0.00	
- เชื้อเพลิงก๊าซ	$S_G = F_{SG} \times C_G$	S_G	B/y	0.00	
4. การวิเคราะห์การลงทุน					
4.1 ระยะเวลาคืนทุน (y)					
- เชื้อเพลิงแข็ง	$PB_S = C_I / S_S$	PB_S	y	0.00	
- เชื้อเพลิงเหลว	$PB_L = C_I / S_L$	PB_L	y	0.00	
- เชื้อเพลิงก๊าซ	$PB_G = C_I / S_G$	PB_G	y	0.00	
5. สรุปผลที่ได้จากการวิเคราะห์					
5.1 พลังงานความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์ได้		F_S	/y	0.00	
5.2 ค่าใช้จ่ายเชื้อเพลิงลดลง		S	B/y	0.00	
5.3 ระยะเวลาคืนทุน		PB	y	0.00	

4.9 กรณีศึกษา

กรณีศึกษาถือเป็นต้นแบบของมาตรการอนุรักษ์พลังงานที่ประสบผลสำเร็จในการอนุรักษ์พลังงานที่โรงงานสามารถนำไปประยุกต์ใช้ให้เกิดผลการอนุรักษ์พลังงานที่เป็นรูปธรรมต่อไป

กรณีศึกษาที่ 1: การนำความร้อนทิ้งจากเตาหลอมมาอุ่นอากาศก่อนการเผาไหม้โดยรีคูเพอเรเตอร์แบบท่อ 2 ชั้น			
1. ความเป็นมาและลักษณะการใช้งาน			
บริษัท พีพีจี-สยามซิลิกา จำกัด เป็นอุตสาหกรรม ผลิตผงซิลิกา มีการใช้เตาหลอมทรายทำด้วยอิฐทนไฟ อุณหภูมิภายในประมาณ 1,400°C กำลังการผลิตประมาณ 4 ตัน/ชม./เตา โดยใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง ประมาณ 13.0 ล้านบีทียู/ชม. หรือประมาณ 13.7 GJ/ชม. ไอเสีย (Flue Gas) ที่ออกจากเตามีอุณหภูมิ ประมาณ 1,100°C ซึ่งนำกลับไปใช้ในการอุ่นอากาศก่อนเข้าเผาไหม้โดยใช้ รีคูเพอเรเตอร์ที่ทำด้วยอิฐทนไฟ			
2. ปัญหาของอุปกรณ์/ระบบก่อนปรับปรุง			
ไอเสียที่ออกจากเตาหลอมจะไหลผ่านรีคูเพอเรเตอร์ที่ทำด้วยอิฐทนไฟ แต่เนื่องจากการแตกของอิฐภายใน จึงทำให้เกิดการผสมของไอเสียกับอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ ส่งผลให้อุณหภูมิอากาศและประสิทธิภาพ การเผาไหม้ลดลง			
3. แนวคิดและขั้นตอนการดำเนินงาน			
เปลี่ยนรีคูเพอเรเตอร์ใหม่เป็นแบบท่อ 2 ชั้น ทำด้วยเหล็กไร้สนิม โดยการออกแบบให้มีพื้นที่แลกเปลี่ยน ความร้อนเหมาะสมกับปริมาณและอุณหภูมิไอเสียเพื่อให้ได้อุณหภูมิอากาศที่สูงที่สุดรวมทั้งให้สามารถ ทำความสะอาดได้สะดวก			
4. สภาพก่อนปรับปรุง			
รีคูเพอเรเตอร์ที่ทำด้วยอิฐทนไฟมีอายุการใช้งานนานทำให้เกิดการชำรุดส่งผลให้เตาใช้พลังงานความร้อน มากขึ้น			
5. สภาพหลังปรับปรุง			
ติดตั้งรีคูเพอเรเตอร์แบบท่อสองชั้น สูงประมาณ 10 เมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลางรวมประมาณ 1.2 เมตร ทำด้วยเหล็กไร้สนิม ผลิตในประเทศสหรัฐอเมริกา โดยบริษัท Thermal Transfer ในการทำงานนั้นไอเสีย จากเตาหลอมเข้าสู่ท่อชั้นในของรีคูเพอเรเตอร์ และจะถ่ายเทความร้อนให้กับอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ซึ่ง ไหลผ่านระหว่างท่อชั้นในกับท่อชั้นนอก โดยจะเพิ่มอุณหภูมิอากาศจากประมาณ 35°C มาเป็น 550°C หลังจากถ่ายเทความร้อนให้อากาศแล้ว ไอเสียยังมีอุณหภูมิสูงอยู่ คือ ประมาณ 500°C ดังนั้น บริษัทฯ จึง ได้ติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อทำน้ำร้อนซึ่งมีลักษณะเป็นท่อ 2 ชั้นเหมือนกัน โดยไอเสียจะไหล ผ่านท่อชั้นใน ส่วนน้ำจะไหลผ่านระหว่างท่อชั้นในกับท่อชั้นนอก สามารถทำน้ำร้อนได้ประมาณ 6,000 ลิตร/ชม. ที่อุณหภูมิประมาณ 70 -80°C น้ำร้อนที่ได้นี้นำไปใช้ทำความสะอาดเครื่องจักรในกระบวนการ ผลิต ประสิทธิภาพรวมของรีคูเพอเรเตอร์อยู่ที่ประมาณ 50-55% สามารถประหยัดพลังงานได้ประมาณ 25% และคาดว่าจะมีอายุการใช้งานประมาณ 12 ปี			
6.การวิเคราะห์ผลตอบแทนการลงทุน			
เงินลงทุน	=	10,000,000	บาท
ผลประโยชน์ที่ได้	=	3,000,000	บาทต่อปี
ระยะเวลาคืนทุน	=	10,000,000/ 3,000,000	
	=	3.3	ปี

7. การใช้และบำรุงรักษา
ทำความสะอาดปล่องปีละครั้งโดยใช้ช่างเทคนิคของโรงงานเป็นผู้ดำเนินการ
8. ข้อเสนอแนะในการนำไปใช้งานกับงานอื่น
รีคูเพอเรเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้งานได้ดี ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาต่ำ มีประสิทธิภาพดี ใช้ได้ทั่วไปกับเตาที่มีไอเสียทิ้งหรือไอเสียที่มีฝุ่นสกปรกปนเปื้อนที่มีอุณหภูมิค่อนข้างสูง โดยจะทำหน้าที่นำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่เพื่อใช้อุ่นอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ และถ้าความร้อนทิ้งหลังจากการอุ่นอากาศแล้วยังมีอุณหภูมิสูงอยู่ยังสามารถนำไปทำน้ำร้อนเพื่อใช้ในกระบวนการผลิตได้อีกด้วย

กรณีศึกษาที่ 2: การนำความร้อนทิ้งจากเตาหลอมมาอุ่นอากาศก่อนการเผาไหม้โดยใช้เครื่องสะสมความร้อน
1. ความเป็นมาและลักษณะการใช้งาน
บริษัทอุตสาหกรรมเครื่องแก้วไทย จำกัด (มหาชน) เป็นอุตสาหกรรมผลิตบรรจุภัณฑ์แก้ว (Glass Container) มีการใช้เตาหลอมทราย/เศษแก้วทำด้วยอิฐทนไฟจำนวน 3 เตา คือ เตาที่ใช้รีคูเพอเรเตอร์ 1 เตา กับเตาที่ใช้รีเจเนอเรเตอร์ 2 เตา โดยทั้ง 3 เตาใช้น้ำมันเตาเกรด C เป็นเชื้อเพลิงหลักร่วมกับการใช้ไฟฟ้า ปริมาณการใช้น้ำมันเตาเกรด C ประมาณ 60,000 ลิตร/วัน โดยเตาหลอมทราย/เศษแก้วที่ใช้รีคูเพอเรเตอร์มีอุณหภูมิภายในประมาณ 1,500°C กำลังการผลิตของเตาที่ใช้รีเจเนอเรเตอร์ตัวที่ 1 ประมาณ 200 ตันแก้ว/วัน และเตาตัวที่ 2 ประมาณ 400 ตันแก้ว/วัน
2. ปัญหาของอุปกรณ์/ระบบก่อนปรับปรุง
เตาหลอมชุดที่ใช้รีคูเพอเรเตอร์มีประสิทธิภาพต่ำกว่าชุดที่ใช้รีเจเนอเรเตอร์ และมีอายุการใช้งานมานาน ส่งผลให้มีการใช้พลังงานสิ้นเปลืองมาก
3. แนวคิดและขั้นตอนการดำเนินงาน
เปลี่ยนไปใช้รีเจเนอเรเตอร์เหมือนกับสองเตาที่ใช้อยู่ โดยรีเจเนอเรเตอร์ทำด้วยอิฐทนไฟ ทำหน้าที่สะสมความร้อนจากไอเสีย มี 2 ชุดต่อหนึ่งเตา และสลับกันทำงาน ภายในมีช่องคล้ายรังผึ้งเพื่อให้ไอเสียไหลผ่านได้ โดยมีขนาดกว้าง 2.9 เมตร ยาว 13.5 เมตร และสูง 6.7 เมตร ผลิตในประเทศสหรัฐอเมริกา ยี่ห้อ National Refractories
4. สภาพก่อนปรับปรุง
เตาที่ใช้รีคูเพอเรเตอร์จำนวน 1 เตา มีประสิทธิภาพต่ำและมีอายุการใช้งานมานาน จึงทำการเปลี่ยนใหม่
5. สภาพหลังปรับปรุง
เปลี่ยนไปใช้รีเจเนอเรเตอร์ โดย เตาหลอมมีอุณหภูมิประมาณ 1,500°C ไอเสียจากเตาก่อนเข้ารีเจเนอเรเตอร์มีอุณหภูมิประมาณ 1,350°C โดยไอเสียจะถ่ายเทความร้อนให้กับอิฐทนไฟเพื่อเก็บสะสมความร้อนไว้ เมื่อถ่ายเทความร้อนให้อิฐแล้วอุณหภูมิไอเสียจะลดลงเหลือ 500°C และถูกปล่อยทิ้งที่อุณหภูมิ 200-300°C โดยมีแผ่นปรับลมปิดเปิด (Damper) เป็นตัวปล่อยไอเสียออกสู่บรรยากาศ อากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ถูกเป่าเข้ารีเจเนอเรเตอร์ และอากาศก็จะรับความร้อนจากอิฐทนไฟ อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นจาก 30-35°C เป็น 1,200-1,300°C และเข้าเตาหลอม รีเจเนอเรเตอร์มี 2 ตัวซึ่งจะสลับกันทำงานประมาณ 30 นาที โดยอาศัยโบลเวอร์ที่มีแผ่นปรับลมเป็นตัวปิดเปิด เพื่อสลับทิศทางการไหลของอากาศที่เข้าสู่รีเจเนอเรเตอร์ ทั้ง 2 ตัว ประสิทธิภาพของรีเจเนอเรเตอร์อยู่ที่ประมาณ 70-75% สามารถประหยัดพลังงานได้ประมาณ 30% และคาดว่าจะมีอายุการใช้งานประมาณ 10 ปี

6.การวิเคราะห์ผลตอบแทนการลงทุน			
เงินลงทุน (เตาขนาด 200 ตัน)	=	20,000,000	บาท
ผลประโยชน์ที่ได้	=	12,250,000	บาทต่อปี
ระยะเวลาคืนทุน	=	20,000,000/12,250,000	
	=	1.63	ปี
7. การใช้และบำรุงรักษา			
ไม่มีมีการดูแลรักษา นอกจากเกิดปัญหาการอุดตันในช่องรังผึ้ง อันเนื่องมาจากเขม่าจากการเผาไหม้ การใช้และบำรุงรักษาไม่จำเป็นต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญการพิเศษเป็นผู้ดูแล			
8. ข้อเสนอแนะในการนำไปใช้งานกับงานอื่น			
การใช้รีเจนเนอเรเตอร์ในกรณีศึกษานี้ อาจไม่เหมาะสมกับกรณีที่มีพื้นที่จำกัดหรือเป็นอุตสาหกรรมที่มีขนาดเล็ก ดังนั้น จึงควรศึกษาความเหมาะสมและความคุ้มค่าในการลงทุนก่อนที่จะนำไปใช้งาน นอกจากนี้ หากนำรีเจนเนอเรเตอร์ไปใช้งานกับเตาที่มีไอเสียอุณหภูมิค่อนข้างสูง หลังจากการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่เพื่ออุ่นอากาศแล้ว ความร้อนที่ยังเหลืออยู่ในไอเสียอาจจะนำมาใช้ประโยชน์อย่างอื่นได้อีก เช่น ใช้ทำน้ำร้อนเพื่อใช้ในกระบวนการผลิต			

กรณีศึกษาที่ 3: การนำก๊าซติดไฟได้ (Waste Gas) จากกระบวนการผลิตมาผลิตไอน้ำโดยใช้หม้อไอน้ำที่ใช้ความร้อนทิ้ง (Waste Heat Boiler)	
1. ความเป็นมาและลักษณะการใช้งาน	
บริษัทไทยคาร์บอนแบล็ค จำกัด (มหาชน)เป็นอุตสาหกรรมผลิตผงเขม่าดำ (Carbon Black) เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมผลิตยางรถยนต์และอื่นๆ มีกำลังผลิตเขม่าดำประมาณ 420 ตัน/วัน (24 ชั่วโมง) และใช้น้ำมันคอนเวอร์ชันออยล์ประมาณ 750 ตัน/วัน วัตถุดิบหลักคือ น้ำมันคอนเวอร์ชันออยล์ (Conversion Oil) มีความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) ประมาณ 1.09-1.10 มีสารประกอบคาร์บอนประมาณ 90% น้ำมันนี้จะถูกเผาในเตาและเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิประมาณ 1,600-1,850°C ผลจากการทำปฏิกิริยาจะทำให้เกิดเขม่าดำและก๊าซติดไฟได้ (Waste Gas)	
2. ปัญหาของอุปกรณ์/ระบบก่อนปรับปรุง	
ก๊าซติดไฟได้ (Waste Gas) ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาในกระบวนการผลิตไม่ได้นำไปใช้ให้เกิดประโยชน์	
3. แนวคิดและขั้นตอนการดำเนินงาน	
นำก๊าซติดไฟได้จากกระบวนการผลิตมาเป็นเชื้อเพลิงเพื่อใช้ผลิตไอน้ำ แล้วนำไอน้ำความดันสูงไปขับกังหันไอน้ำ (Steam Turbine) เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า และนำไอน้ำความดันต่ำไปใช้ในกระบวนการผลิต	
4. สภาพก่อนปรับปรุง	
ก๊าซติดไฟได้จากชุดกรอง (Bag Filter) เป็นเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำ ติดไฟยาก จึงต้องออกแบบห้องเผาไหม้ในขนาดที่เหมาะสม ซึ่งก๊าซติดไฟประกอบด้วยก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) เป็นส่วนใหญ่ ก๊าซไฮโดรเจน (H) ไนโตรเจน (N) และก๊าซอื่นๆ อัตราการไหลของก๊าซติดไฟได้ประมาณ 150,000 m ³ /h ค่าความร้อนของก๊าซมีค่าประมาณ 634 kCal/m ³ หรือ 2,654 kJ/m ³	
5. สภาพหลังปรับปรุง	
หม้อไอน้ำที่ใช้ความร้อนทิ้งทำด้วยอิฐทนไฟ เป็นแบบท่อน้ำ (Water Tube) เนื่องจากก๊าซติดไฟได้เป็นก๊าซที่มีค่าความร้อนต่ำ หม้อไอน้ำจึงมีห้องเผาไหม้ที่ใหญ่และแยกต่างหาก หม้อไอน้ำที่ใช้ความร้อนทิ้งมีขนาดประมาณ 15.7 x 37.8 x 18.4 เมตร ผลิตจากประเทศเยอรมนี ยี่ห้อ Reupcrater ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าว	

ติดตั้งมาพร้อมกับระบบ ส่วนชุดกรองหลัก (Main Bag Filter) มีขนาดประมาณ 8 x 24 x 20 เมตร ผลิตจากประเทศฝรั่งเศส ยี่ห้อ Filter Media

ก๊าซติดไฟได้จากกระบวนการผลิต ประกอบด้วยก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) เป็นส่วนใหญ่ ก๊าซไฮโดรเจน (H) ไนโตรเจน (N) และก๊าซอื่นๆ อัตราการไหลของก๊าซติดไฟได้ประมาณ 150,000 m³/h ค่าความร้อนของก๊าซมีค่าประมาณ 634 kCal/m³ หรือ 2,654 kJ/m³ นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไอน้ำ โดยใช้หม้อไอน้ำที่ใช้ความร้อนทิ้งซึ่งสามารถผลิตไอน้ำรวมได้ประมาณ 130 ตัน/ชม. ที่ความดัน 42 บาร์ อุณหภูมิ 400°C เพื่อใช้ขับเคลื่อนไอน้ำและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ได้กำลังไฟฟ้ารวมประมาณ 17.5 MW กระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้นี้ นำมาใช้ในกระบวนการผลิตของโรงงาน และส่วนหนึ่งจะจ่ายให้กับบริษัทในเครือซึ่งอยู่ใกล้เคียงกัน ส่วนไอน้ำที่ออกจากกังหันมีอัตราการไหลประมาณ 110 ตัน/ชม. ที่ความดันประมาณ 3.5 บาร์ นำมาใช้ในกระบวนการผลิตและส่งต่อไปยังบริษัทในเครือเช่นเดียวกัน ประสิทธิภาพของระบบอยู่ที่ประมาณ 55-60% สามารถประหยัดพลังงานได้ประมาณ 25-30% และคาดว่าจะมีอายุการใช้งานประมาณ 20 ปี

6. การวิเคราะห์ผลตอบแทนการลงทุน

เงินลงทุน	=	300	ล้านบาท
ผลประโยชน์ที่ได้	=	300	ล้านบาท/ปี
ระยะเวลาคืนทุน	=	300/300	
	=	1.0	ปี

7. การใช้และบำรุงรักษา

โรงงานมีระบบควบคุมคุณภาพน้ำที่ดี น้ำไม่มีซิลิกาเจือปนจึงไม่เกิดตะกอน และไม่จำเป็นต้องทำความสะอาดท่อทุกปี มีการซ่อมบำรุงใหญ่ทุก 1.5-2 ปี ปัญหาทั่วไปเป็นเรื่องท่อบวมจากความร้อนและและอิฐทนไฟชำรุด

8. ข้อเสนอแนะในการนำไปใช้งานกับงานอื่น

ก๊าซติดไฟได้และความร้อนทิ้งที่มีอุณหภูมิค่อนข้างสูงและมีปริมาณพอสมควร สามารถนำไปอุ่นน้ำก่อนเข้าหม้อไอน้ำ หรืออุ่นอากาศสำหรับใช้ในการเผาไหม้ได้ ทำให้สามารถประหยัดพลังงานได้ส่วนหนึ่งในอุตสาหกรรมบางชนิด ก๊าซติดไฟได้ที่เกิดจากปฏิกิริยาในกระบวนการผลิตถูกนำไปเผาทิ้ง ทำให้สูญเสียพลังงานไปโดยเปล่าประโยชน์ ควรพิจารณานำมาใช้ประโยชน์ดังกรณีตัวอย่างนี้

กรณีศึกษาที่ 4: การใช้ประโยชน์จากความร้อนทิ้งของเครื่องยนต์ใช้ก๊าซ (Gas Engine)

1. ความเป็นมาและลักษณะการใช้งาน

บริษัทฝ้าจิบ จำกัด (มหาชน) เป็นอุตสาหกรรมผลิตฝาปิดสำหรับบรรจุภัณฑ์ที่ทำด้วยแก้ว พลาสติก และโลหะ เช่น ขวดและกระป๋องอลูมิเนียม เป็นต้น ผู้บริหารตัดสินใจลงทุนผลิตกระแสไฟฟ้าใช้เอง เนื่องจากในบริเวณดังกล่าวเกิดไฟฟ้าดับบ่อย มีผลกระทบทำให้การผลิตเสียหายและเกิดการสูญเสียบ่อยครั้ง และเพื่อลดผลกระทบจากปัญหาด้านราคาของพลังงานที่มีแนวโน้มสูงขึ้น และในขณะนั้นได้ใช้ก๊าซธรรมชาติในกระบวนการผลิตอยู่แล้ว โดยต่อท่อก๊าซมาจากท่อหลักของ ปตท. ซึ่งอยู่ไม่ไกลนัก

2. ปัญหาของอุปกรณ์/ระบบก่อนปรับปรุง

ผลผลิตเกิดความเสียหายจากไฟฟ้าดับและต้นทุนราคาค่าไฟฟ้าสูงและขาดเสถียรภาพ

3. แนวคิดและขั้นตอนการดำเนินงาน

ทำการผลิตไฟฟ้าใช้เองจากเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติที่โรงงานใช้อยู่แล้วโดยใช้เครื่องยนต์ก๊าซ (Gas Engine) และนำความร้อนที่ปล่อยทิ้งจากไอเสียกลับมาใช้ในการผลิตไอน้ำและทำน้ำเย็นระบบดูดซึม		
4. สภาพก่อนปรับปรุง		
ซื้อไฟฟ้าจากการไฟฟ้าเพื่อใช้ในการกระบวนการผลิตทั้งหมด		
5. สภาพหลังปรับปรุง		
ทำการติดตั้งระบบผลิตกระแสไฟฟ้าและการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่ประกอบด้วย ● เครื่องยนต์ก๊าซ (Gas Engine) และเครื่องปั่นไฟ (Generator) 3 เครื่อง พิกัดกำลังผลิต (Rated Capacity) เครื่องละประมาณ 2 MW มีระดับแรงดันไฟฟ้า 6.6 kV มีขนาดประมาณ 1.5 x 5.0 x 2.5 เมตร ผลิตในประเทศสวีเดน ยี่ห้อ Wartsila ● หม้อไอน้ำใช้ความร้อนทิ้ง 3 เครื่อง พิกัดเครื่องละ 1.56 ตัน/ชม. ที่ความดันใช้งาน 6 บาร์เกจ (bar_g) เป็นหม้อไอน้ำแบบท่อไฟ (Fire Tube) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.0 เมตร ยาว 3.5 เมตร ผลิตในประเทศเดนมาร์ก ยี่ห้อ Danstoker ซึ่งเครื่องดังกล่าวติดตั้งมาพร้อมกับระบบ ● เครื่องทำน้ำเย็นแบบดูดซึม 3 เครื่อง พิกัดเครื่องละ 360 ตันความเย็น มีขนาดประมาณ 1.5 x 3.5 x 2.2 เมตร ผลิตในประเทศญี่ปุ่น ยี่ห้อ Sanyo ปริมาณการผลิตพลังงานไฟฟ้ารวมของเครื่องยนต์ก๊าซและเครื่องปั่นไฟฟ้าทั้ง 3 เครื่องโดยเฉลี่ยจะอยู่ที่ประมาณ 2,150,000 kWh/เดือน และใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงประมาณ 23,676 ล้านบีทียู (MMBTU) ต่อเดือน ปัจจุบันใช้งานอยู่ที่ประมาณ 70-75% ของพิกัด ไอเสียจากเครื่องยนต์ก๊าซมีอุณหภูมิประมาณ 500°C มีอัตราการไหลประมาณ 150-210 ลูกบาศก์เมตร/ชม./เครื่อง ใช้เป็นความร้อนให้กับหม้อไอน้ำความร้อนทิ้งผลิตไอน้ำเติมที่ประมาณ 1.56 ตัน/ชม./เครื่อง ความดัน 6 บาร์เกจ ใช้งานประมาณ 60-70% ของพิกัด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณไอน้ำที่ต้องการของเครื่องทำน้ำเย็นแบบดูดซึม ถ้าหากความดันหม้อไอน้ำเกิน 6 บาร์เกจ ก๊าซไอเสียจะถูกปล่อยทิ้งไปสู่บรรยากาศทางปล่องของหม้อไอน้ำ ไอน้ำที่ผลิตได้จะนำไปใช้ที่เครื่องทำน้ำเย็นแบบดูดซึมทั้ง 3 เครื่อง ซึ่งมีพิกัดอัตราการทำความเย็นประมาณ 360 ตันความเย็นต่อเครื่อง โดยที่แต่ละเครื่องมีอัตราการไหลของน้ำเย็นประมาณ 218 ลูกบาศก์เมตร/ชม. ในปัจจุบันใช้งานอยู่ที่ประมาณ 60% ของพิกัด น้ำเย็นที่จ่ายออกไปมีอุณหภูมิประมาณ 7°C และไหลกลับเข้าเครื่องที่อุณหภูมิประมาณ 12°C น้ำเย็นนี้นำไปใช้ในการลดความร้อนในกระบวนการผลิตและในการปรับอากาศเฉพาะจุด (Spot Cooling) ให้กับพนักงานฝ่ายผลิต ระบบนี้คาดว่าจะมีอายุการใช้งานได้ประมาณ 15 ปี		
6. การวิเคราะห์ทางเทคนิค		
เงินลงทุน	=	160 ล้านบาท
ผลประโยชน์ที่ได้	=	ประมาณ 25% (เมื่อเปรียบเทียบกับค่าไฟฟ้าถ้าใช้ไฟฟ้าจากการไฟฟ้า)
ระยะเวลาคืนทุน	=	10 ปี
7. การใช้และบำรุงรักษา		
โรงงานใช้หลักการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน (Preventive Maintenance) โดยจัดให้มีการบำรุงรักษาแต่ละเครื่องสลับกันไปตามชั่วโมงการใช้งาน ซึ่งเป็นไปตามข้อเสนอแนะของผู้ผลิต เช่น เครื่องยนต์ก๊าซจะทำการบำรุงรักษาที่ 250, 500, 1,000, 5,000, 10,000 และ 20,000 ชั่วโมง เป็นต้น และทำการบำรุงรักษาครั้งใหญ่เมื่อเดินเครื่องครบ 40,000 ชั่วโมง ส่วนใหญ่วิศวกรและช่างของโรงงานจะเป็นผู้ดูแลระบบและดำเนินการซ่อมบำรุง ในกรณีที่ทำการซ่อมบำรุงที่ 20,000 ชั่วโมง จะว่าจ้างผู้เชี่ยวชาญของบริษัทที่จำหน่ายเครื่องมาสาธิตและเรียนรู้จากผู้เชี่ยวชาญ เช่น การเปลี่ยนแวนลูกสูบ เป็นต้น ในระหว่างที่ทำการบำรุงรักษาจะใช้กระแสไฟฟ้าจากการไฟฟ้าแทน		

8. ข้อเสนอแนะในการนำไปใช้งานกับงานอื่น

สำหรับโรงงานที่ใช้ทั้งพลังงานไฟฟ้าและความร้อนในกระบวนการผลิตในปริมาณที่ค่อนข้างสูง และใช้งานค่อนข้างคงที่ตลอด 24 ชั่วโมง (เช่น มีความต้องการพลังไฟฟ้ามากกว่า 4,000 kW และต้องการใช้น้ำประมาณ 4-5 ตัน/ชม. หรือมากกว่า) และมีท่อก๊าซธรรมชาติอยู่ใกล้โรงงาน หรือมีวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น ฟืน แกลบ กากอ้อย ฯลฯ ในปริมาณที่พอเพียง อาจพิจารณาใช้ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าและความร้อนร่วม (Cogeneration) แต่ควรจะศึกษาความเป็นไปได้ทางด้านเทคนิคและเศรษฐศาสตร์โดยละเอียดก่อน ผลประโยชน์ที่อาจจะได้รับอีกประการหนึ่ง คือ ถ้าผลิตไฟฟ้าเกินความต้องการ ส่วนที่เกินนี้อาจจะขายให้กับ การไฟฟ้าได้ตามนโยบายของสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.)

นอกจากนี้ โรงงานยังมีการจัดการด้านพลังงานที่ดีในเรื่องของการควบคุมค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน โดยมีการตรวจวัดการใช้ไฟฟ้าและปริมาณน้ำเย็นที่ใช้ในแต่ละฝ่ายการผลิต และให้แต่ละฝ่ายรับผิดชอบค่าใช้จ่ายค่าพลังงานที่ใช้ ดังนั้น จึงมีผลทำให้แต่ละฝ่ายต้องวางแผนและควบคุมการใช้พลังงานอย่างรัดกุม

กรณีศึกษาที่ 5 : การนำอากาศร้อนทิ้งจากการระบายความร้อนแผ่นกระเบื้องกลับมาใช้ที่ Spray Dryer**1. ความเป็นมาและลักษณะการใช้งาน**

สถานประกอบการมีอากาศร้อนปล่อยทิ้งจากขั้นตอนการระบายความร้อนให้กับกระเบื้องหลังออกจากเตาเผา ซึ่งมีอุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ 150°C และสถานประกอบการมีขั้นตอนการผลิตอื่นที่สามารถนำความร้อนดังกล่าวไปใช้ให้เกิดประโยชน์ได้

2. ปัญหาของอุปกรณ์/ระบบก่อนปรับปรุง

อากาศร้อนถูกปล่อยทิ้งส่งผลให้สิ้นเปลืองเชื้อเพลิงโดยเปล่าประโยชน์และทำให้สภาวะแวดล้อมมีอุณหภูมิสูงขึ้น

3. แนวคิดและขั้นตอนการดำเนินงาน

นำอากาศร้อนทิ้งที่มีอุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ 150°C ไปใช้ประโยชน์ในขั้นตอนการอบไล่ความชื้นให้กับกระเบื้องดิบที่เตาอบก่อนที่จะเข้าสู่ขั้นตอนการเคลือบสีซึ่งต้องการอากาศร้อนที่มีอุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ 140°C จะส่งผลให้สามารถลดการใช้เชื้อเพลิงในเตาอบไล่ความชื้น โดยขั้นตอนในการดำเนินการปรับปรุงมีดังนี้

1. ตรวจวัดปริมาณและอุณหภูมิของอากาศร้อนที่จะนำกลับมาใช้
2. วิเคราะห์และประเมินผลประหยัด และการลงทุน
3. ทำการเดินท่อนำอากาศร้อนที่ได้จากการ Cooling แผ่นกระเบื้องที่เตาเผากลับมาใช้ผสมเป็นอากาศป้อนเข้าที่ Spray Dryer

4. สภาพก่อนปรับปรุง

Spray Dryer ใช้อากาศร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติที่มีอุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ 150 °C ไปสัมผัสกับวัตถุดิบโดยตรง โดยมีดัชนีการใช้พลังงาน(ก๊าซธรรมชาติต่อน้ำหนักดิน) 14.39 ลบ.ม./ตัน ที่อัตราการผลิตผงดิน 16.38 ตัน/ชั่วโมง



รูปที่ 4.8-1 สภาพก่อนปรับปรุงใช้อากาศที่อุณหภูมิปกติเข้าเผาไหม้ใน Spray Dryer

5. สภาพหลังปรับปรุง

ทำการเดินท่อนำอากาศร้อนที่ได้จากขั้นตอนการระบายความร้อนแผ่นกระเบื้องกลับมาใช้ผสมเป็นอากาศป้อนเข้า Spray Dryer โดยอุณหภูมิอากาศร้อนที่นำกลับมาได้ประมาณ 130°C ส่งผลให้ดัชนีการใช้พลังงาน (ก๊าซธรรมชาติต่อน้ำหนักดิน) ลดลงเป็น 13.93 ลูกบาศก์เมตร/ตัน โดยมีการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นในโบลเวอร์ที่ใช้ดูดอากาศร้อน 4.3 kW



รูปที่ 4.8-2 หลังปรับปรุงนำอากาศร้อนจากการ Cooling แผ่นกระเบื้องผสมอากาศป้อนเข้าเผาไหม้ใน Spray Dryer

6. การวิเคราะห์ทางเทคนิค

ที่อัตราการผลิตผงดิน 16.38 ตัน/ชั่วโมง มีดัชนีการใช้พลังงานก่อนปรับปรุงเท่ากับ 14.39 ลูกบาศก์เมตร/ตัน และหลังปรับปรุงเท่ากับ 13.93 ลูกบาศก์เมตร/ตัน กำลังไฟฟ้าของโบลเวอร์ที่ใช้ดูดอากาศร้อนเท่ากับ 4.3 kW เวลาทำงาน 24 ชั่วโมง/วัน 150 วัน/ปี ค่าเชื้อเพลิงเฉลี่ย (ก๊าซธรรมชาติ) 10.31 บาท/ลูกบาศก์เมตร ค่าไฟฟ้าเฉลี่ย 2.6 บาท/kWh

ปริมาณเชื้อเพลิงที่ประหยัดได้	=	$(SEC_1 - SEC_2) \times Q \times \text{ชั่วโมงทำงาน} \times \text{วันทำงาน}$
	=	$(14.39 - 13.93) \times 16.38 \times 24 \times 150$
	=	27,125.28 ลบ.ม./ปี
พลังงานไฟฟ้าที่ต้องใช้	=	$4.3 \times 24 \times 150$
	=	15,480 kWh/ปี
คิดเป็นเงินที่ประหยัดได้	=	$(27,125.28 \times 10.31) - (15,480 \times 2.6)$
	=	239,413.64 บาท/ปี
7.การวิเคราะห์ผลตอบแทนการลงทุน		
เงินลงทุน	=	70,000 บาท
ประหยัดค่าพลังงาน	=	239,413.64 บาท/ปี
ระยะเวลาคืนทุน	=	$70,000 / 239,413.64$
	=	0.29 ปี

กรณีศึกษาที่ 6: การนำอากาศร้อนที่ปล่อยทิ้งจากเตาอบแห้งกลับมาใช้หมุนเวียนในเตา อีกครั้ง

1. ความเป็นมาและลักษณะการใช้งาน

ขั้นตอนการอบแห้งผลิตภัณฑ์ จะใช้อากาศร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 140°C ส่งผ่านเข้าไปในเตาอบแห้งเพื่อระเหยน้ำออกจากผลิตภัณฑ์โดยอากาศร้อนที่ปล่อยทิ้งจากเตาอบมีอุณหภูมิประมาณ 90°C ซึ่งอากาศร้อนที่ปล่อยทิ้งนั้นสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ และเตาอบแห้งเดิมมีการกระจายความร้อนไม่ทั่วถึงส่งผลให้ชิ้นงานแห้งไม่พร้อมกัน

2. ปัญหาของอุปกรณ์/ระบบก่อนปรับปรุง

อากาศร้อนที่ปล่อยทิ้งจากเตาอบมีอุณหภูมิประมาณ 90°C และการกระจายอากาศร้อน ไม่ทั่วถึงชิ้นงานทำให้ต้องใช้เวลาในการอบมาก ส่งผลให้ดัชนีการใช้พลังงานสูง

3. แนวคิดและขั้นตอนการดำเนินงาน

มีแนวคิดที่จะติดตั้งระบบนำอากาศร้อนกลับมาใช้ใหม่ เพื่อช่วยในการประหยัดพลังงานและเพิ่มการกระจายลมในห้องให้ทั่วถึงผลิตภัณฑ์ทุกชิ้นซึ่งจะทำให้สามารถลดดัชนีการใช้พลังงานในการอบ โดยขั้นตอนการดำเนินงานมีดังนี้

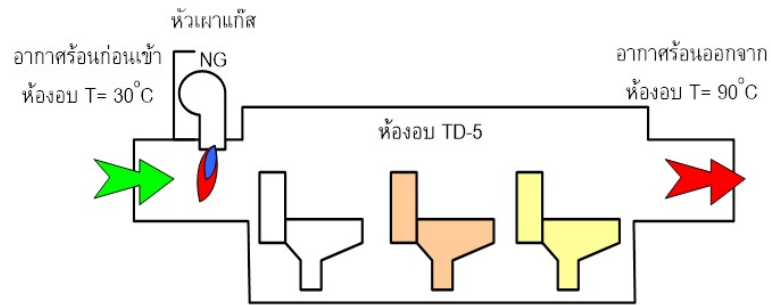
1. ตรวจสอบอัตราการไหลของอากาศเพื่อคำนวณหาขนาดของท่อ และขนาดของพัดลมดูดอากาศ เพื่อช่วยในการกระจายลมภายในห้องอบให้เป็นไปอย่างทั่วถึงและมีความเร็วที่เหมาะสมและทำการหุ้มฉนวนท่อ
2. ทำการปรับสัดส่วนระหว่างอากาศที่นำกลับมาใช้ใหม่ต่ออากาศทั้งหมดให้อยู่ในสัดส่วนประมาณ 80-90%
3. เปรียบเทียบปริมาณการใช้เชื้อเพลิงต่อน้ำหนักชิ้นงานก่อนและหลังปรับปรุง

4. สภาพก่อนปรับปรุง

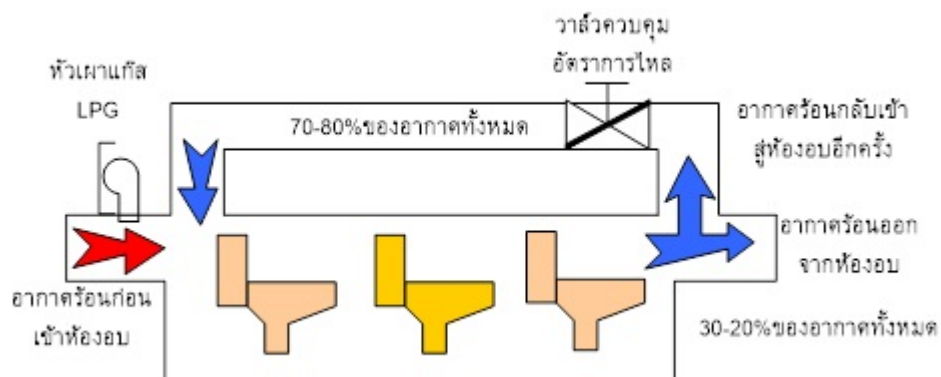
หาดัชนีการใช้พลังงานโดยการบันทึกปริมาณการผลิตและเชื้อเพลิงที่ใช้ในเวลาเดียวกัน พบว่า ดัชนีการใช้พลังงานประมาณ 0.097 Nm³/kg และมีการใช้เชื้อเพลิงปีละ 1,350.50 MMBTU

5. สภาพหลังปรับปรุง

บันทึกค่าหลังจากปรับปรุงจำนวน 2 ครั้ง พบว่าดัชนีการใช้พลังงานลดลงเป็น 0.058 Nm³/kg ซึ่งลดลงจากเดิมร้อยละ 40.61



รูปที่ 4.8-3 สภาพห้องอบก่อนทำการปรับปรุง





รูปที่ 4.8-4 สภาพห้องอบหลังทำการปรับปรุง

6. การวิเคราะห์ทางเทคนิค

ปริมาณก๊าซธรรมชาติที่ประหยัดได้	=	$0.4061 \times 1,350.50$	MMBTU/ปี
	=	548.40	MMBTU/ปี
	=	578,565.68	MJ/ปี
คิดเป็นเงินที่ประหยัดได้	=	144,637.37	บาท/ปี
(ค่าความร้อนของ NG 1,055.00 MJ/MMBTU ราคา 263.74 บาท/MMBTU)			

7.การวิเคราะห์ผลตอบแทนการลงทุน

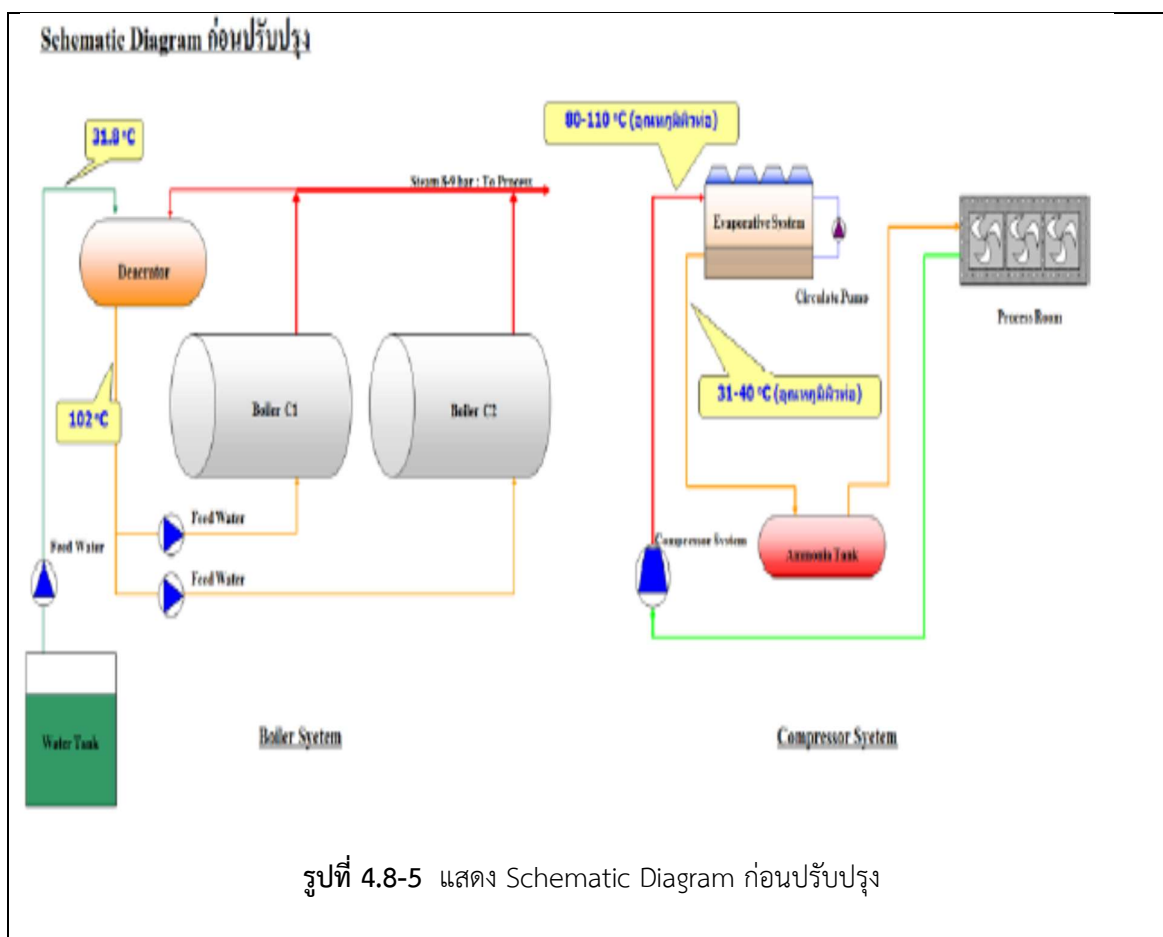
เงินลงทุน	=	25,000.00	บาท
ประหยัดค่าพลังงาน	=	144,637.37	บาท/ปี
ระยะเวลาคืนทุน	=	$25,000/144,637.37$	
	=	0.17	ปี

กรณีศึกษาที่ 7: การอุ่นน้ำป้อนหม้อไอน้ำโดยใช้ระบบ Heat Recovery จากเครื่องทำความเย็น (Compressor)**1. ความเป็นมาและลักษณะการใช้งาน**

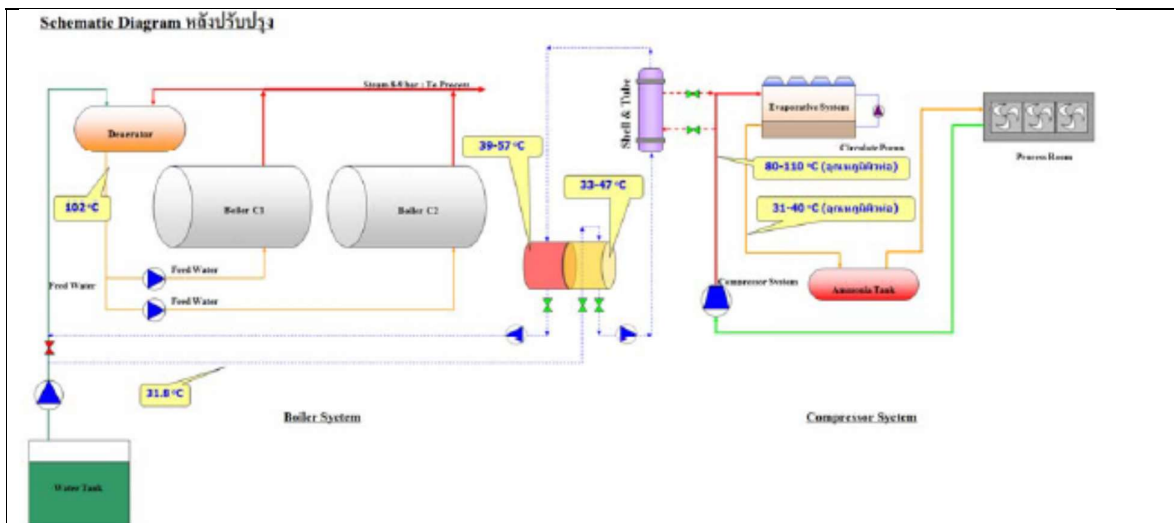
โรงงานแห่งหนึ่งมีการใช้งานหม้อไอน้ำและเครื่องทำความเย็นโดยมีรายละเอียดดังนี้

Boiler : โรงงานมีการใช้งาน Boiler ถ่านหิน สำหรับการผลิตไอน้ำ โดยปกติใช้งาน Boiler วันละ 2 ชุด ที่ความดันใช้งานประมาณ 8 - 10 bar ใช้น้ำในการผลิตไอน้ำเฉลี่ยวันละ 305 m³/day น้ำจาก Water Tank มีอุณหภูมิประมาณ 31.7 °C ถูกส่งไปยัง Deaerator มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 102 °C จากนั้นส่งเข้า Boiler ทั้ง 2 ชุด

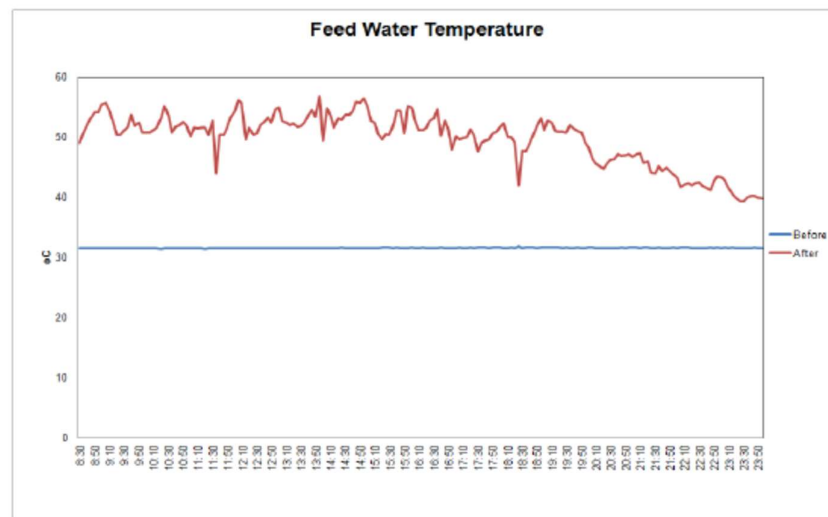
Compressors : โรงงานมีระบบ Compressor สำหรับทำความเย็นใช้ใน Process ใช้แอมโมเนียเป็นสารทำความเย็น Compressor ทำงานวันละ 6 ชุด การระบายความร้อนจะถูกส่งไปที่ Evaporative Cooling Tower โดยอุณหภูมิแอมโมเนียก่อนเข้า และออกจาก Evaporative Cooling Tower เท่ากับ 96.4 °C , 35.3 °C ตามลำดับ



2. ปัญหาของอุปกรณ์/ระบบก่อนปรับปรุง
การที่น้ำป้อนเข้าหม้อไอน้ำมีอุณหภูมิต่ำจะส่งผลให้หม้อไอน้ำใช้พลังงานความร้อนเพิ่มขึ้น
3. แนวคิดและขั้นตอนการดำเนินงาน
อุณหภูมิของสารทำความเย็น แอมโมเนีย ก่อนเข้า Evaporative Cooling Tower ค่อนข้างสูงซึ่งสามารถนำความร้อนส่วนนี้มาใช้ประโยชน์ได้
4. สภาพหลังปรับปรุง
ติดตั้งระบบ Heat Recovery เพื่ออุ่นน้ำป้อนก่อนเข้า Deaerator ส่งผลให้ปริมาณไอน้ำที่ใช้ใน Deaerator ลดลง และสามารถประหยัดเชื้อเพลิงจากถ่านหินได้ จากการปรับปรุงทำให้อุณหภูมิน้ำเต็มก่อนเข้า Deaerator เพิ่มขึ้นเฉลี่ย 18 °C



รูปที่ 4.8-6 แสดง Schematic Diagram หลังปรับปรุง



รูปที่ 4.8-7 แสดง Feed Water Temperature



รูปที่ 4.8-8 Tank และ Heat Exchanger ที่ติดตั้ง

5. การวิเคราะห์ทางเทคนิค

$$Q = m \cdot C_p (T_2 - T_1)$$

Water Flow Rate (m.)	=	121,614	m ³ /yr
Specific Heat (Cp)	=	1.0	kcal/kg-°C
Water Temperature (Before ; T1)	=	31.8	°C
Water Temperature (After ; T2)	=	49.7	°C
Total Energy Saving	=	2,172,056,280	kcal/yr
Total Energy Saving	=	8,619	MMBtu/Yr
LHV of Fuel (Coal)	=	6,349	kcal/kg
Fuel Cost (Coal)	=	3.6	฿/kg
Fuel Cost (Coal)	=	142.90	฿/MMBtu
Fuel Saving (Coal)	=	342,110	kg/Yr
Cost Saving	=	1,231,595.94	฿/Yr

6.การวิเคราะห์ผลตอบแทนการลงทุน

Investment	=	3,005,750	฿
Payback Period	=	2.44	Yr

หมายเหตุ : ประสิทธิภาพของ Compressor ดีขึ้นเนื่องจากสามารถระบายความร้อนได้มากขึ้น

สรุปเนื้อหาวิชา

1. แหล่งความร้อนทั้งในอุตสาหกรรม
ความร้อนที่ปล่อยทิ้งจากกระบวนการอุตสาหกรรมมี 2 รูปแบบ 1.1 ของเหลวร้อน เช่น • น้ำร้อน (อาจมีสารปนเปื้อน) • น้ำมันร้อน • ของเหลวร้อนอื่น ๆ 1.2 ก๊าซร้อน เช่น • ก๊าซร้อนจากเตาเผาและเตาอบ • อากาศร้อนจากกระบวนการระบายความร้อน • ก๊าซร้อนจากแหล่งอื่น ๆ
2. ระดับอุณหภูมิของแหล่งความร้อนทั้งแบ่งออกได้เป็น 3 ระดับ คือ
2.1 อุณหภูมิสูง หมายถึง อุณหภูมิ $> 650^{\circ}\text{C}$ 2.2 อุณหภูมิปานกลาง หมายถึง อุณหภูมิระหว่าง $230\text{-}650^{\circ}\text{C}$ 2.3 อุณหภูมิต่ำ หมายถึง อุณหภูมิ $< 230^{\circ}\text{C}$
3. ตัวแปรที่ใช้ประเมินความร้อนทั้งจากก๊าซไอเสีย
3.1 อัตราการไหลของกระแสก๊าซไอเสีย 3.2 อุณหภูมิของก๊าซไอเสีย 3.3 องค์ประกอบของก๊าซไอเสีย
4. การคำนวณหาอัตราการถ่ายเทของพลังงานในก๊าซไอเสีย
$H = F \times A \times D \times C \times \Delta T \quad (4.1)$
โดย H = อัตราการถ่ายเทของพลังงานในก๊าซ, kW F = อัตราการไหลของก๊าซ, $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ A = พื้นที่หน้าตัดของปล่องปล่อยก๊าซไอเสีย ณ จุดที่วัด, m^2 D = ความหนาแน่นของก๊าซหรือก๊าซผสม, kg/m^3 C = ความร้อนจำเพาะของก๊าซหรือก๊าซผสมที่คำนวณได้, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ΔT = ความแตกต่างของอุณหภูมิของก๊าซที่ปล่อยออกและอุณหภูมิบรรยากาศ, $^{\circ}\text{C}$
5. การใช้ความร้อนทั้งที่คุ้มต่อค่าใช้จ่ายมากที่สุด คือ
การปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานของกระบวนการผลิตความร้อน โดยการนำความร้อนทิ้งในกระบวนการผลิตกลับมาใช้ใหม่โดยทันทีซึ่งสามารถจะช่วย • ลดการใช้เชื้อเพลิงให้น้อยลง • ขจัดขั้นตอนการส่งผ่านความร้อน • การจัดหาและการใช้พลังงานมีความสมดุลกัน

6. ความร้อนทิ้งที่นำกลับมาใช้ใหม่มีความเป็นไปได้ที่จะนำกลับมาใช้ในกรณีต่างๆ ดังนี้

- 6.1 อุ่นอากาศสำหรับการเผาไหม้ ทั้งภายในหัวเผา หรือใช้ที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบรีคูเพอเรเตอร์ (Recuperator) หรือเครื่องสะสมความร้อน (Regenerator)
- 6.2 การอุ่นแท่งเหล็ก (Stock) ก่อนบรรจุเข้าเตาหลอม
- 6.3 การอุ่นเตาหลอมโดยใช้ความร้อนทิ้งจากเตาหลอมอื่น (Furnace Regenerator)
- 6.4 การอบแห้ง เช่น ในการผลิตอิฐ
- 6.5 การให้ความร้อนกับพื้นที่หรือการผลิตน้ำร้อน
- 6.6 ผลิตไอน้ำสำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้า
- 6.7 ผลิตไอน้ำที่ความดันต่ำเพื่อใช้งานในกระบวนการผลิต
- 6.8 อุ่นน้ำมันเชื้อเพลิง เช่น น้ำมันเตา

7. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger)

ทำหน้าที่ถ่ายเทความร้อนจากของไหลชนิดหนึ่งไปยังอีกชนิดหนึ่ง

7.1 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น (Plate Exchanger)

ภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น อากาศเย็นและก๊าซร้อนที่จะมีการไหลสวนทางกัน (Counterflow) ระหว่างแผ่นที่เรียงติดกัน

การใช้งาน	- ใช้ทำความร้อนให้กับพื้นที่ - ใช้อุ่นอากาศให้กับการเผาไหม้
ช่วงอุณหภูมิที่ใช้งาน	- ใช้กับความร้อนทั้งอุณหภูมิน้อยกว่า 200°C
ประสิทธิภาพโดยรวม	- ประมาณ 40-60%
ข้อดี	- สร้างไว้เป็นชุดสำเร็จรูป - ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนสูง - มีหลายขนาดให้เลือก
ข้อด้อย	- อาจมีการรั่วไหล - เกิดความสกปรกหรืออุดตันได้ง่าย - ต้องการการบำรุงรักษามาก

7.2 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ ประกอบด้วยชุดท่อขนาดเล็กมัดรวมกัน แล้วบรรจุไว้ในเปลือกท่อหรือท่อขนาดใหญ่อีกหนึ่ง

การใช้งาน	- ก๊าซกับก๊าซ และ ของเหลวกับของเหลว เช่น การทำความร้อนให้กับ ของไหล
ช่วงอุณหภูมิที่ใช้งาน	- ใช้กับก๊าซทั้งอุณหภูมิสูงสุดถึง 550°C
ประสิทธิภาพโดยรวม	- ประมาณ 70-80%
ข้อดี	- สามารถใช้ได้กับก๊าซแรงดันสูง (230 – 250 bar) - ง่ายต่อการทำความสะอาด
ข้อด้อย	- ราคาแพง - ขนาดค่อนข้างใหญ่ - ต้องออกแบบตามวัตถุประสงค์ของการใช้งานแต่ละงาน - ประสิทธิภาพแลกเปลี่ยนความร้อนต่ำกว่า Plate HE

8. รีคูเพอเรเตอร์ (Recuperator)

รีคูเพอเรเตอร์เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดหนึ่งที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อนจากก๊าซไอเสียร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ กับอากาศเย็นเพื่อนำไปใช้สำหรับการเผาไหม้

8.1 รีคูเพอเรเตอร์แบบถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสี (Radiation Tubes with Recuperator)

อากาศเย็นและก๊าซร้อนทั้งไหลสวนทางกันตามแนวท่อซึ่งมีจุดศูนย์กลางร่วมกัน การถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นจากการแผ่รังสีจากผิวท่อ

การใช้งาน	- ใช้อุ่นอากาศสำหรับการเผาไหม้ - นิยมใช้ในอุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้าที่มีเตาหลอมให้ความร้อนซ้ำ (Reheating Furnace) ขนาดใหญ่ และบ่อชุบ (Soaking Pit)
ช่วงอุณหภูมิที่ใช้งาน	- ใช้กับก๊าซทั้งที่มีอุณหภูมิสูงสุดถึง 1,400°C
ประสิทธิภาพโดยรวม	- ประมาณ 10-20%
ข้อดี	- สามารถใช้งานในสภาพที่มีอุณหภูมิสูงและก๊าซมีสารปนเปื้อนมาก - มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน - มีค่าใช้จ่ายต่ำ
ข้อด้อย	- มีประสิทธิภาพต่ำ

8.2 รีคูเพอเรเตอร์แบบถ่ายเทความร้อนโดยการพา (Convection Tubes with Recuperator)

อากาศเย็นสำหรับการเผาไหม้ไหลอยู่ภายในท่อที่ยึดติดกับแผ่นซีล ในขณะที่ก๊าซร้อนทั้งไหลผ่านภายนอกท่อ โดยการไหลของก๊าซทั้งอย่างปั่นป่วน (Turbulent)

การใช้งาน	- ใช้อุ่นอากาศสำหรับการเผาไหม้
ช่วงอุณหภูมิที่ใช้งาน	- ใช้กับก๊าซทั้งที่มีอุณหภูมิสูงสุดถึง 1,200°C
ประสิทธิภาพโดยรวม	- ประมาณ 30-50%
ข้อดี	- สามารถทนทานต่ออุณหภูมิสูง - สามารถทนทานต่อก๊าซปนเปื้อนบางชนิด
ข้อด้อย	- มีราคาแพง - มีปัญหาการรั่วซึมบริเวณซีลของท่อและผนัง

8.3 หัวเผาแบบรีคูเพอเรทีฟและหัวเผาแบบเซลฟ์-รีคูเพอเรทีฟ (Recuperative Burner System and Self-recuperative Burner)

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นและท่อแผ่รังสี (Plate and Radiation Tube Heat Exchanger) เมื่อนำมาใช้ร่วมกับหัวเผาความร้อนสูง ทำให้เกิดเป็นหัวเผาแบบรีคูเพอเรทีฟ

การใช้งาน	- ใช้อุ่นอากาศสำหรับการเผาไหม้
ช่วงอุณหภูมิที่ใช้งาน	- ใช้กับก๊าซทั้งที่มีอุณหภูมิสูงสุดถึง 1,500°C
ประสิทธิภาพโดยรวม	- ประมาณ 20-40%
ข้อดี	- มีขนาดกะทัดรัด (หัวเผาแบบเซลฟ์-รีคูเพอเรทีฟ) สะดวกต่อการติดตั้ง
ข้อด้อย	- ต้องใช้กับก๊าซทั้งที่สะอาด

9. เครื่องสะสมความร้อน (Regenerator)

เครื่องสะสมความร้อนทำงานโดยใช้หลักการของวัฏจักรการเก็บความร้อนระยะสั้น โดยทั่วไประบบสะสมความร้อนจะประกอบด้วย แท่งเซรามิกสำหรับเก็บความร้อนหนึ่งคู่ ต่อเข้ากับหัวเผาหนึ่งคู่หรือหัวเผาเดียว โดยก๊าซร้อนที่จะไหลผ่านแท่งเซรามิกแท่งใดแท่งหนึ่งของเครื่องสะสมความร้อน เมื่อวัฏจักรย้อนกลับอากาศเย็นที่ไหลเข้ามาใหม่จะถูกทำให้ร้อนขึ้นโดยไหลผ่านไปยังแท่งที่ร้อนของเครื่องสะสมความร้อนซึ่งก่อนหน้านี้ได้สะสมความร้อนจากก๊าซร้อนทิ้งไว้แล้ว

9.1 เครื่องสะสมความร้อนแบบอยู่กับที่ (Static Regenerator)

ตัวเครื่องจะทำด้วยอิฐทนไฟ เครื่องมีขนาดใหญ่ประมาณเท่ากับขนาดของบ้านสองชั้น

การใช้งาน	- ใช้อุ่นอากาศสำหรับการเผาไหม้
ช่วงอุณหภูมิที่ใช้งาน	- ใช้กับก๊าซทิ้งที่มีอุณหภูมิสูงสุดถึง 1,500°C
ประสิทธิภาพโดยรวม	- ประมาณ 70-90%
ข้อดี	- มีประสิทธิภาพสูง - ต้องการการบำรุงรักษาต่ำ - สามารถใช้กับก๊าซที่มีสารปนเปื้อนได้
ข้อด้อย	- มีขนาดใหญ่ - มีราคาแพง

9.2 เครื่องสะสมความร้อนแบบหมุน (Rotary Regenerator)

ตัวเครื่องจะเก็บความร้อนเมื่อหมุนผ่านก๊าซร้อนที่ปล่อยออกมา และความร้อนนี้จะถูกถ่ายเทเมื่อเครื่องหมุนผ่านอากาศเย็น

การใช้งาน	- ใช้อุ่นอากาศสำหรับการเผาไหม้ - การให้ความร้อนกับพื้นที่
ช่วงอุณหภูมิที่ใช้งาน	- ใช้กับก๊าซทิ้งที่มีอุณหภูมิสูงสุดถึง 1,700°C
ประสิทธิภาพโดยรวม	- ประมาณ 70-90%
ข้อดี	- มีขนาดกะทัดรัด - สามารถใช้ได้กับก๊าซที่มีปริมาณมาก - ทำงานได้อย่างต่อเนื่อง
ข้อด้อย	- มีความดันตกสูง (High Pressure Drop) - ง่ายต่อการรั่วซึม - ไม่เหมาะสำหรับก๊าซที่มีฝุ่นละอองเจือปน เพราะอาจเกิดการปนเปื้อนข้ามถึงกันได้ - มีราคาแพง

9.3 เครื่องสะสมความร้อนชนิดทำด้วยเซรามิกแบบกะทัดรัด (Compact Ceramic Regenerators)

เครื่องสะสมความร้อนและหัวเผาจะทำงานพร้อมกัน เวลาที่ใช้ในการสลับเปลี่ยนการทำงานโดยทั่วไปจะอยู่ที่ประมาณ 60-120 วินาที ประสิทธิภาพในการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่ตามที่มีการรายงานไว้อาจสูงถึง 90%

การใช้งาน	- ใช้อุ่นอากาศสำหรับการเผาไหม้
ช่วงอุณหภูมิที่ใช้งาน	- ใช้กับก๊าซทิ้งที่มีอุณหภูมิสูงสุดถึง 1,500°C
ประสิทธิภาพโดยรวม	- ประมาณ 70-90%
ข้อดี	- มีขนาดกะทัดรัด - สามารถใช้งานได้กับก๊าซที่ปนเปื้อนบางชนิด - ง่ายต่อการทำความสะอาด
ข้อด้อย	- อาจเกิดการอุดตันได้ขึ้นอยู่กับการใช้งาน

9.4 หัวเผาอุ่นอากาศโดยใช้ไฟพ่น (Impulse-fired Regenerative Burner)

เป็นหัวเผาแบบสะสมความร้อน (Regenerative Burner) หัวเผาแต่ละหัวเผาจะสลับกันทำงานประมาณ 15 วินาที

การใช้งาน	- ใช้อุ่นอากาศสำหรับการเผาไหม้
ช่วงอุณหภูมิที่ใช้งาน	- ใช้กับก๊าซทิ้งที่มีอุณหภูมิสูงสุดถึง 1,500°C
ประสิทธิภาพโดยรวม	- ประมาณ 70-90%
ข้อดี	- ไม่จำกัดอุณหภูมิ - ประหยัดได้ประมาณ 50% เมื่อเทียบกับแบบหัวเผาทั่วไป - สามารถใช้งานได้กับก๊าซที่ปนเปื้อนบางชนิด - ง่ายต่อการทำความสะอาด
ข้อด้อย	- ใช้พื้นที่มากในการติดตั้งเพราะมีอุปกรณ์หลายส่วน

เอกสารอ้างอิง
[1] คู่มือการจัดการพลังงานความร้อน หลักสูตรฝึกอบรมผู้รับผิดชอบด้านพลังงาน (ผชพ.) กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน พฤศจิกายน พ.ศ. 2547
[2] http://www.shg-schack.com/
[3] รศ.ดร.วิวัฒน์ ตัณตะพานิชกุล , อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในอุตสาหกรรม ฉบับปรับปรุงใหม่, คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
[4] แนวทางปฏิบัติเพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพในภาคอุตสาหกรรมของเอเชีย www.energyefficiencyasia.org ©UNEP