บทที่ 5

ทฤษฎีการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์

5.1 การนำความร้อนทิ้งจากก๊าซเสียกลับมาใช้ประโยชน์

อุตสาหกรรมที่มีการใช้เตาเผาเช่น อุตสาหกรรมเหล็ก อุตสาหกรรมแก้วและเซรามิค อุตสาหกรรมซีเมนต์ เป็นต้น เป็นอุตสาหกรรมที่มีการติดตั้งและใช้งานระบบกานำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่กับอย่างแพร่หลายซึ่งโดยทั่วไประบบจะมีรูปแบบดังแสดงในรูปที่ 5.1

จากรูปที่ 5.1 แสดงให้เห็นถึงรูปแบบของระบบการนำความร้อนจากไอเสียกลับมาใช้ใหม่และการนำไปใช้ประโยชน์ โดยจากรูป 5.1 a คือเตาเผาที่ยังไม่ได้ติดตั้งระบบการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์ รูป 5.1 b คือเตาเผาที่ได้ติดตั้งระบบการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์โดยติดตั้ง Recuperator เพื่ออุ่นอากาศที่ใช้ในการสันดาป Combustion air ให้ร้อนขึ้นก่อนส่งเข้าเผาไหม้รูป 5.1 c คือเตาเผาที่ติดตั้ง heat exchanger เพื่อเก็บความร้อนจากไอเสียไปใช้ในกระบวนการอื่นๆ เช่น การอบผลิตภัณฑ์ให้แห้ง การผลิตน้ำร้อน หรือ ไอน้ำ เพื่อใช้ในกระบวนการอื่น เป็นต้น รูป 5.1 d คือเตาเผาที่ติดตั้ง recuperator เพื่อเก็บความร้อนจากไอเสียไปใช้อุ่นอากาศที่ใช้ในการสันดาปให้ร้อนขึ้นก่อนส่งเข้าห้องเผาไหม้ สำหรับไอเสียที่ผ่าน recuperator ที่ยังมีอุณหภูมิสูงอยู่ยังนำไปใช้ประโยชน์ในกระบวนการความร้อนอื่นๆ ได้อีกโดยการติดตั้ง heat exchanger ในกรณีที่จำเป็นต้องมีการกำจัดฝุ่นออกจากไอเสียก่อนปล่อยสู่บรรยากาศ รูปแบบของระบบอาจเป็นรูปที่ 5.1 c โดยการติดตั้ง recuperator เพื่อนำความร้อนจากไอเสียไปใช้อุ่นอากาศ ส่วนไอเสียที่ออกจาก recuperator อาจยังมีอุณหภูมิอยู่จำเป็นต้องลดอุณหภูมิลงโดยให้ไอเสียผ่าน heat exchanger เพื่อลดอุณหภูมิไอเสียผ่านระบบกำจัดฝุ่นต่อไป

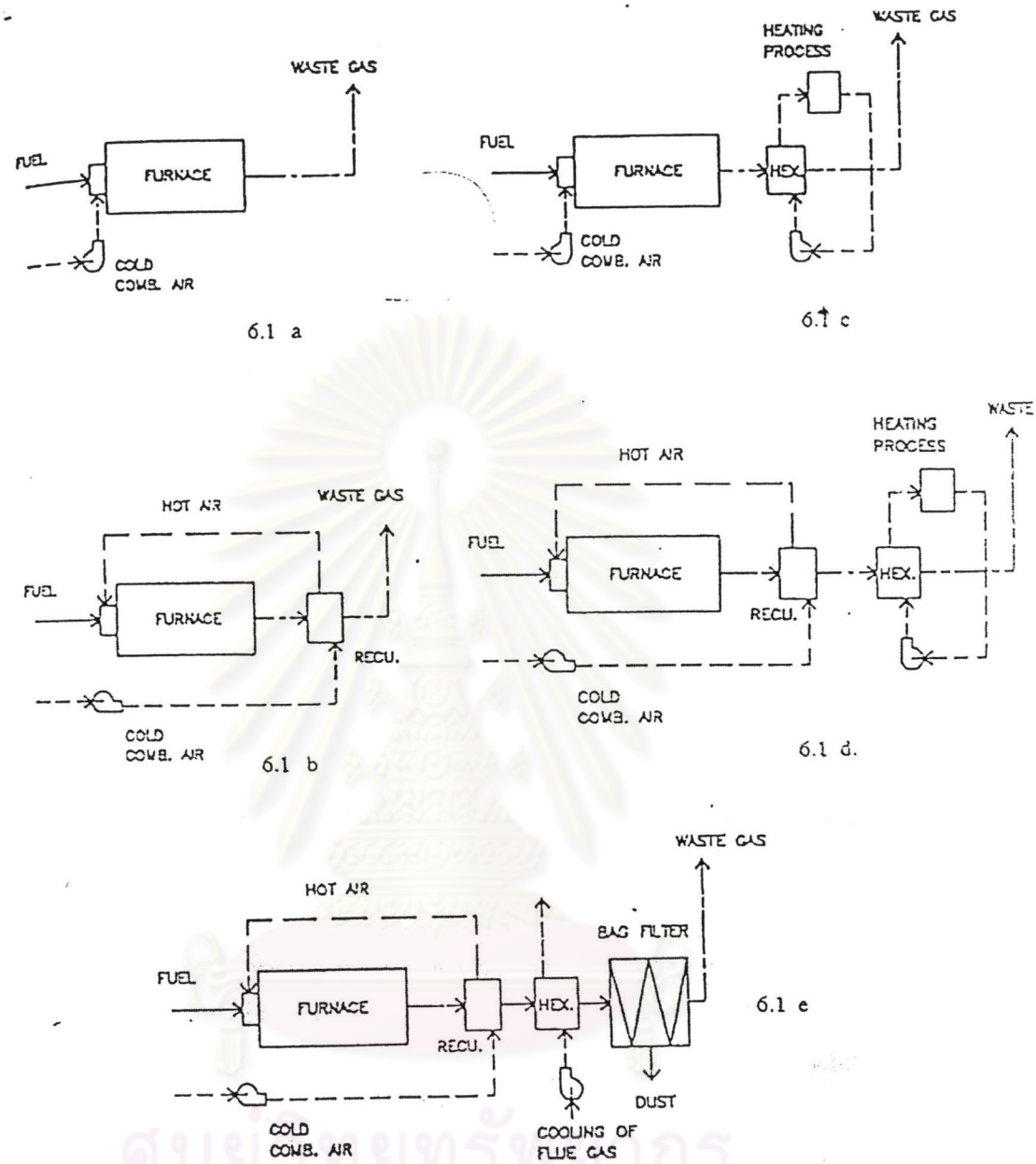
การติดตั้งระบบการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์ดังที่แสดงในรูปที่ 5.1 จะมีผลดีคือลดปริมาณเชื้อเพลิงที่ต้องใช้ โดยที่อัตราส่วนการประหยัดเชื้อเพลิงจะขึ้นอยู่กับปริมาณความร้อนที่อากาศที่ใช้ในการสันดาปได้รับหรืออุณหภูมิของอากาศที่สูงขึ้นซึ่งสามารถแสดงในรูปสมการได้ดังนี้

$$SF = [1-(Q_f - Q_w)/(Q_f - Q_w + Q_a)] \times 100\% \quad (5.1)$$

โดยที่ SF = อัตราส่วนการประหยัดเชื้อเพลิง%

Q_w = ปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปกับไอเสียที่ออกจากเตา , kJ

Q_f = ปริมาณความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิง , kJ



รูปที่ 5.1 การนำความร้อนทิ้งจากก๊าซเสียกลับมาใช้ประโยชน์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Q_a = ปริมาณความร้อนที่อากาศได้รับ kJ

และปริมาณความร้อนที่ประหยัดได้จะเป็นไปตามสมการดังนี้

$$Q_s = Q_{cold} - Q_{hot} \quad (5.2)$$

และ $$Q_{hot} = Q_{cold}(1\text{-}SF/100) \quad (5.3)$$

โดยที่

Q_s = ปริมาณความร้อนที่ประหยัดได้

Q_{cold} = ปริมาณความร้อนจากเชื้อเพลิงเมื่อไม่มีการอุ่นอากาศ kJ

Q_{hot} = ปริมาณความร้อนจากเชื้อเพลิงเมื่อมีการอุ่นอากาศ kJ

ดังนั้น

$$Qs = Qcold - Qcold(1\text{-}SF/100) \quad (5.4)$$

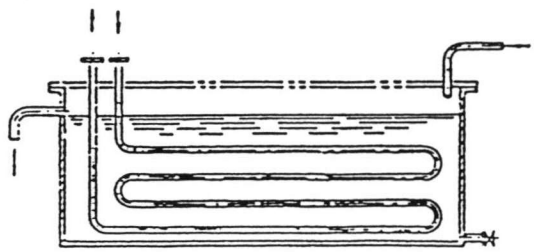
จากสมการที่ 5.1 ถึง 5.4 จะเห็นได้ว่าหากให้ความร้อนกับอากาศ (Q_a) ที่ต้องใช้ก่อนการสันดาปกับเชื้อเพลิงจะช่วยละปริมาณความร้อนที่ต้องการจากเชื้อเพลิงได้ในปริมาณ Qs

5.2 ประเภทของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีมากมายหลายประเภท แต่เมื่อแยกตามโครงสร้างของเครื่องแล้วมีดังต่อไปนี้

5.2.1 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไส้ไก่ (submerged coil Exchanger)

เนื่องจากโครงสร้างของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนี้เป็นแบบง่ายๆ และราคาก็ย่อมเยาว์จึงมีการใช้กันมานานในปัจจุบันจึงพบเห็นกันบ่อยๆ ในรูปของเครื่องระบายความร้อนแบบกล่อง (Box cooler) ในระบบการกลั่นน้ำมัน (รูปที่ 5.2) และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนขนาดเล็กหรือกรณีที่ใช้ของเหลวที่มีฤทธิ์กัดกร่อนสูง

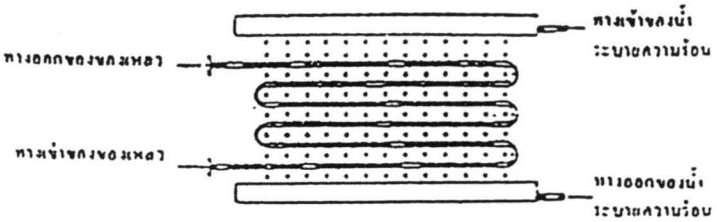


รูปที่ 5.2 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไส้ไก่

ดังที่เห็นได้จากรูป 5.2 โครงสร้างของเครื่องประเภทนี้ไม่ต้องการกรรมวิธีที่ละเอียดละออกวัสดุที่ใช้ทำขดท่อ Coil มีตั้งแต่ท่อทองแดง ท่อเหล็กจนถึงวัสดุที่แปรรูปได้ยาก เช่น กระเบื้องดินเผาเซรามิก แก้ว เหล็กหล่อซิลิกอนสูง High Sillicon Cast Iron กราไฟท์ Graphite ยางสังเคราะห์ Synthetic Resin เป็นต้น เนื่องจากเป็นขดท่อ จึงมีความแข็งแกร่งสูง แม้ว่าของไหลในท่อจะมีความดันสูง ดังนั้น ข้อดีคือ ปัญหาของการรั่วไหลมีน้อย แต่มีข้อเสียคือ ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนต่ำ และมีพื้นที่ในการถ่ายเทความร้อนค่อนข้างน้อย เมื่อเทียบกับสัดส่วนภายนอกของเครื่องด้วยเหตุนี้ อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของเครื่องจึงมีค่าน้อย เครื่องแบบนี้มักใช้สำหรับการควบคุมอุณหภูมิของของหลวในถังเก็บให้มีค่าอยู่ในช่วงที่ต้องการ

5.2.2 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปิด (Open Exchanger)

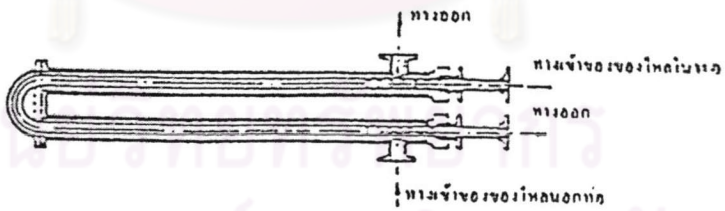
ดังรูปที่แสดงไว้ในรูป 5.3 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้ ใช้ระบายคามร้อนโดยการปล่อยให้น้ำไหลตกลงบนท่อที่ติดตั้งในแนวระดับเพื่อลดอุณหภูมิของของเหลวที่ไหลอยู่ภายในท่อ ชื่อเรียกอื่นๆ ของเครื่องประเภทนี้ก็มีเช่น เครื่องระบายความร้อนแบบทริกเคิล (Trickle Cooler) แบบทรอมโบน (Trombone Cooler) แบบคาสเคด (Cascade Cooler) หรือแบบตัว S (S-type Cooler) เป็นต้น โครงสร้างทั่วไปประกอบด้วย ท่อตรงและส่วนโค้ง (Bend) และสามารถวางซ้อนกันได้ หลายๆ ชั้นเพื่อเพิ่มความสามารถในการทำงานของครื่อง เครื่องแบบนี้เหมาะที่จะใช้กับของไหลความดันสูงที่มีฤทธิ์กัดกร่อนสูงเพราะโอกาศที่จะเกิดการรั่วไหลมีน้อย และถ้าเกิดการรั่วไหลขึ้นก็รู้ได้ทันที วัสดุที่ใช้ทำท่อมีตั้งแต่ท่อเหล็ก จนกระทั่งถึงวัสดุประเภท ต่างๆ ที่ทนต่อการกัดกร่อน ดังเช่นในกรณีของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดท่อ



รูปที่ 5.3 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปิด

5.2.3 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น (Double-pipe Exchanger)

โครงสร้างของเครื่องประเภทนี้ ประกอบด้วยท่อ 2 ขนาดที่วางซ้อนกันอยู่ โดยมีแกนกลางของท่อร่วมกันของเหลวชนิดหนึ่งจะไหลอยู่ในท่อใน และของไหลอีกชนิดหนึ่งจะไหลอยู่ในช่วงว่างรูปวงแหวนระหว่างท่อในและท่อนอก โดยทั่วไปปลายข้างหนึ่งจะถูกเชื่อมด้วยท่อโค้งรูปตัว U (U Bend) ดังในรูป 5.4 บางทีก็เรียกชื่อตามรูปร่างของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแฮร์พิน เครื่องแบบนี้เหมาะสำหรับการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิของของไหลภายในท่อที่มีความดันสูง ความหนืดสูง หรือฤทธิ์กัดกร่อนสูงในบางครั้งจะใช้ท่อที่มีครีบ เป็นท่อชั้นในเพื่อเพิ่มพื้นที่ถ่ายเทความร้อนและความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของเครื่อง



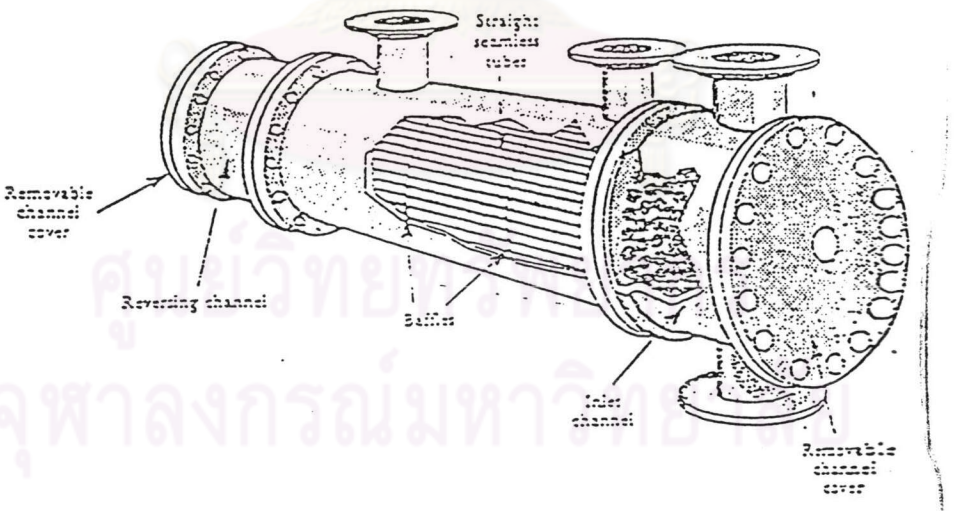
รูปที่ 5.4 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น

ลักษณะเด่นของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น คือ โครงสร้างค่อนข้างง่าย ราคาของเครื่องต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ถ่ายเทความร้อนมีราคาถูก และเมื่อมีความจำเป็น

สามารถเพิ่มความสามารถทำงานได้ง่ายโดยการเอาเครื่องที่มีสัดส่วนเหมือนๆ กันหลายๆ ชุดมาต่ออนุกรม (Series) หรือแบบขนาน (Parallel) เมื่อของไหลไหลสวนทางกันด้วยความเร็วที่เหมาะสมประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่ได้มีค่าสูงในขณะที่ความดันสูญเสียมีค่าต่ำแต่ว่าเมื่อขนาดของเครื่องเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ปริมาตรของเครื่องต่อหน่วยพื้นที่ถ่ายเทความร้อนจะเพิ่มตามขึ้น ทำให้ราคาของเครื่องค่อนข้างแพงเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบอื่น ดังนั้นเครื่องแบบนี้จึงควรเลือกใช้ในกรณีที่ปริมาตรการถ่ายเทความร้อนมีค่อนข้างน้อย หรือในกรณีที่ต้องการพื้นที่ถ่ายเทความร้อนน้อยกว่า 20 m^2

5.2.4 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อ (Shell And Tube Exchanger)

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อเป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้กันกว้างขวางที่สุดในกระบวนการอุตสาหกรรมเคมีเพราะไม่ถูกจำกัดโดยอุณหภูมิและความดันที่จำต้องใช้ในอุตสาหกรรม และสามารถใช้กับงานทุกชนิดตั้งแต่การระเหย (Evaporation) การเพิ่มความร้อนการระบายความร้อนจนกระทั่งการควบแน่น (condensation) ยิ่งกว่านั้นยังมีคุณสมบัติโดยเฉลี่ยดีเยี่ยมในแง่ของการผลิตและการบำรุงรักษา ลักษณะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้แสดงดังรูปที่ 5.5

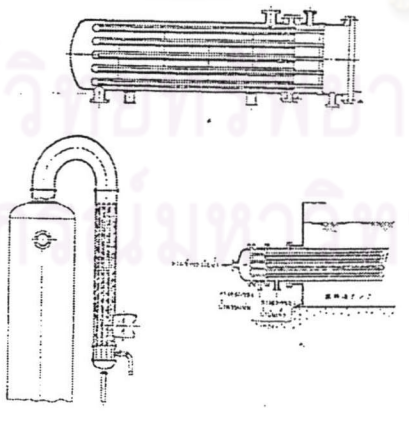


รูปที่ 5.5 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อ

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อแบ่งออกได้เป็น 2 จำพวกใหญ่ ๆ คือ จำพวกท่อในแนวระดับ และจำพวกท่อในแนวดิ่ง เครื่องจำพวกท่อในแนวระดับเป็นแบบธรรมดาที่สุด ในกรณีที่บริเวณติดตั้งมีจำกัด หรือในกรณีที่ระบบท่อหรือมาตรการติดตั้งบีบบังคับให้ท่อถ่ายเทความร้อนตั้งอยู่ในแนวดิ่งเท่านั้น จึงจะใช้เครื่องจำพวกท่อในแนวดิ่ง เนื่องจากค่าความดันสูญเสียของเครื่องจำพวกท่อในแนวดิ่งที่ของไหลผ่านเพียงเที่ยวเดียว (single pass) มีน้อย เครื่องจำพวกนี้จึงเหมาะสำหรับใช้เป็นเครื่องระเหย (Evaporator) เครื่องควบแน่น (condenser) และเครื่องต้มน้ำแบบกาลักน้ำเชิงความร้อน (Thermosyphon Type Reboiler)

5.2.5 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบดาบปลายปืน (Bayonet Exchanger)

ดังแสดงไว้ในรูป 5.6 ก เส้นทางการไหลภายในท่อประกอบด้วยท่อนอกซึ่งปลายข้างหนึ่งมีฝาปิดอยู่และท่อในซึ่งสอดอยู่ในท่อนอก ของไหลภายในท่อจะแลกเปลี่ยนความร้อนกับของไหลภายในเชลล์ ในระหว่างที่ไหลอยู่ในช่องว่างระหว่างท่อในและท่อนอก เนื่องจากมัดท่อของเครื่องแบบนี้สามารถติดตั้งหรือถอดออกได้โดยไม่เกี่ยวข้องกับของไหลภายในเชลล์ รูปที่ 5.6 ข แสดงตัวอย่างของการสอดเข้าไปในระบบท่อเพื่อทำความเย็นให้กับไอที่มาจากยอดของหอกลั่น ส่วนรูป 5.6 ค แสดงตัวอย่างของการติดตั้งที่ผนังด้านข้างของถังเก็บน้ำมันเชื้อเพลิง เพื่อเพิ่มอุณหภูมิของน้ำมันที่ปากทางออก เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบดาบปลายปืนมีราคาสูงเมื่อเทียบกับเครื่องชนิดอื่นๆ ดังนั้นจึงไม่เหมาะสมสำหรับงานที่มีอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนสูง แต่เหมาะสำหรับใช้กับอุปกรณ์ที่มีอยู่แล้วเพื่อเสริมอัตราการถ่ายเทความร้อนที่มีอยู่แล้วให้เพียงพอ



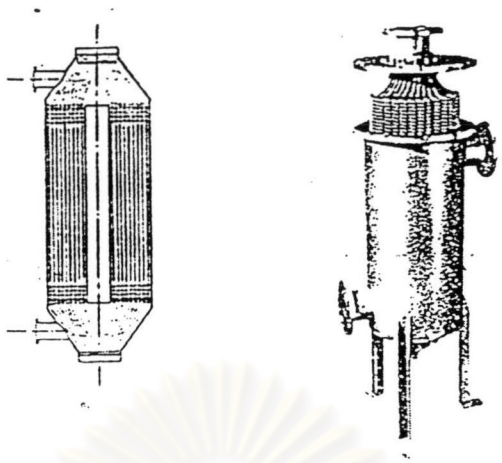
รูปที่ 5.6 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบดาบปลายปืน

5.2.6 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อขดแบบก้นหอย(Spiral-WoundType - Exchanger)

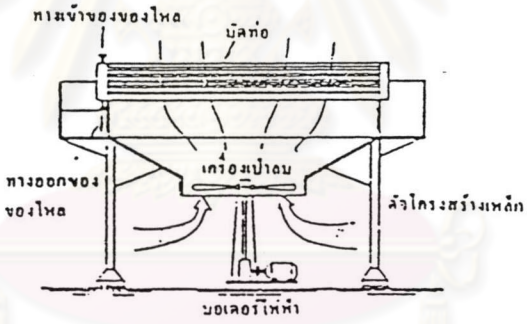
ดังที่แสดงไว้ในรูป 5.7 โครงสร้างของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้ประกอบด้วยท่อทองแดง ท่ออลูมิเนียมหรือท่อวัสดุอ่อนอื่นๆ ซึ่งเล็กและยาวหมุนวนเป็นเกลียวหลายๆ ชั้น แล้วบรรจุในภาชนะรูปทรงกระบอกผลที่ได้คือ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีพื้นที่ถ่ายเทความร้อนมาก แต่มีการสูญเสียความร้อนน้อยมาก เพราะพื้นผิวที่ความร้อนหนีออกจากเครื่องมีน้อย โดยโครงสร้างนอกจากการผลิต การซ่อมแซมทำได้ยากและราคาสูงแล้ว ข้อเสียอย่างอื่นคือของไหลในท่อและในเชลล์จะต้องสะอาดและมีฤทธิ์กัดกร่อนน้อยจึงจะใช้ได้ ในปัจจุบันนี้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อขดแบบก้นหอยส่วนใหญ่จะใช้กับอุปกรณ์แยกก๊าซซึ่งทำให้อากาศหรือก๊าซอื่นๆ กลายเป็นของเหลวที่อุณหภูมิต่ำมากๆ เพื่อทำการแบ่งแยกก๊าซองค์ประกอบต่อไป

5.2.7 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ (Air – Cooled Heat - Exchanger)

เนื่องจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้ใช้อากาศเป็นตัวระบายความร้อนแทนน้ำเย็น จึงเป็นที่นิยมใช้กันเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในสถานที่ขาดแคลนน้ำระบายความร้อน ดังเห็นได้จากรูป 5.8 โครงสร้างของเครื่องมือมี 3 องค์ประกอบ คือ มัดท่อซึ่งประกอบด้วยท่อถ่ายเทความร้อนที่มีครีบ (Fin) โครงเหล็ก ซึ่งใช้สำหรับยึดมัดท่อ และเครื่องเป่าลมพร้อมมอเตอร์สำหรับเป่าอากาศผ่านมัดท่อ (Forced-Draft) และระบบที่ชักนำอากาศเข้าท่อ (Induced-Draft) คุณลักษณะพิเศษของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนประเภทนี้คือ ไม่ต้องอาศัยน้ำเป็นตัวระบายความร้อน(ผลคือไม่ต้องกังวลเรื่องแสวงหาแหล่งน้ำหรือการแก้ไขคุณภาพของน้ำที่ใช้) และอากาศที่ใช้สำหรับระบายความร้อนก็มีอยู่ไม่จำกัดปริมาณยิ่งกว่านั้นเหตุขัดข้องที่เกิดจากสนิมหรือความสกปรกของกรณีที่ใช้น้ำระบายความร้อนก็ไม่มี ข้อดีอย่างอื่นคือ ค่าบำรุงรักษาถูกกว่ากรณีที่ใช้น้ำและเวลาเกิดการรั่วไหลของท่อขึ้น เรื่องที่น้ำจะเข้าไปปนกับของเหลวภายในท่อก็ไม่มี อย่างไรก็ดีมีข้อเสียหลายอย่างเช่น เสียงดัง ต้องใช้พื้นที่ติดตั้งมาก ค่าก่อสร้างสูง และต้องเลือกสถานที่ติดตั้งให้ดี



รูปที่ 5.7 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อขดก้นหอย

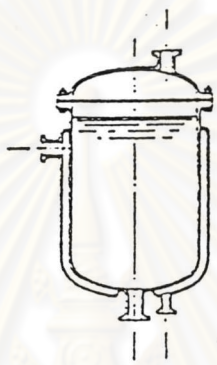


รูปที่ 5.8 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ

5.2.8 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบปลอกหุ้ม (Jacketed Type Exchanger)

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบปลอกหุ้มนี้ใช้ในกระบวนการของอุตสาหกรรมเคมีมาเป็นเวลานานดังแสดงไว้ในรูป 5.9 โครงสร้างของเครื่องประเภทนี้ประกอบด้วยปลอกหุ้มถังเก็บหรือถังปฏิกรณ์ (Reactor) เพื่อแลกเปลี่ยนความร้อน ข้อเสียคือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมมีค่าต่ำเมื่อเทียบกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเซลล์และท่อรหือแบบอื่นๆ อีกทั้งพื้นที่ถ่ายเทความร้อนก็จะถูกจำกัดโดยขนาดของตัวถัง ดังนั้นจึงไม่เหมาะสมสำหรับงานที่มีจุด

ประสงค์ใหญ่เพื่อแลกเปลี่ยนความร้อน ส่วนข้อดีคือ โครงสร้างเป็นแบบง่ายๆ ราคาถูก และความจุของภาชนะสูง ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับการให้ความร้อนหรือทำความเย็นแก่ของเหลวโดยเฉพาะอย่างยิ่งสะดวกสำหรับการรักษาอุณหภูมิของของไหลในถัง หรือเพิ่มพื้นที่การถ่ายเทความร้อนโดยใช้ขดท่อถ่ายเทความร้อนด้วย โดยปกติแล้วการทำความสะอาดภายในปลอกหุ้มทำไม่ได้ ดังนั้นของไหลที่ใช้ในปลอกหุ้มควรเป็นไอน้ำ น้ำเย็นหรือ ฟรีออน (Freon) หรือแอมโมเนีย (Ammomia) ที่มีความสกปรกน้อย

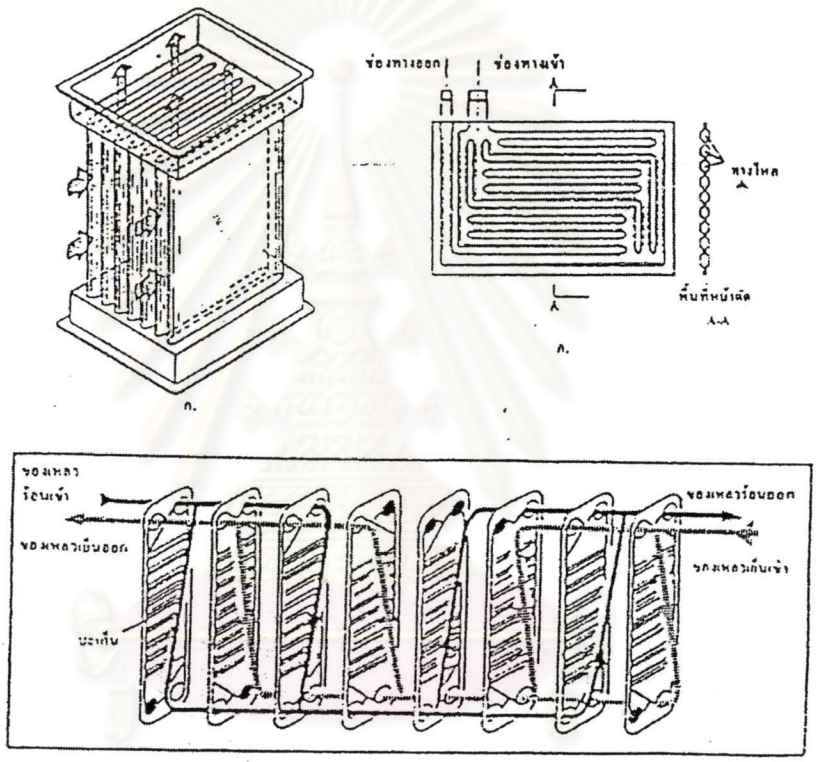


รูปที่ 5.9 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบปลอกหุ้ม

5.2.9 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น (Plate Type Exchanger)

คุณลักษณะพิเศษของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น คือการเอาแผ่นถ่ายเทความร้อนหลายๆ แผ่นมาวางเรียงกันในระยะที่ห่างคงที่ แล้วให้ของเหลวแต่ละชนิดไหลผ่านช่องว่างระหว่างแผ่นในลักษณะสลับกันช่องเว้นช่อง เครื่องแบบนี้มักใช้กับการเพิ่มอุณหภูมิของอากาศก่อนเข้าหม้อไอน้ำ (Boiler) ในกรณีนี้ค่าความดันสูญเสียจะมีค่าน้อย แต่ประสิทธิภาพก็ไม่สู้ดีนัก จึงได้มีการพัฒนาปรับปรุงให้ดีขึ้นดังแบบที่แสดงอยู่ในรูป 5.10 ซึ่งเป็นแบบที่จำหน่ายแพร่หลายในท้องตลาด เครื่องที่ปรับปรุงแล้วนี้ทำด้วยแผ่นเหล็กสแตนเลส (Stainless Steel) บางๆ หรือแผ่นไทเทเนียม (Titanium) ซึ่งทนต่อสนิมได้อย่างดีเอามาอัดให้เกิดส่วนนูนส่วนเว้า และวางประกบกันหลายๆ แผ่น ของไหลแต่ละชนิดจะไหลสลับกันไปตามช่องว่างที่เกิดจากการประกบเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อเพิ่มความแข็งแกร่งป้องกันการรั่วและให้มีช่องว่างสำหรับการไหล ผิวของแผ่นนำความร้อนจะมีทั้งส่วนที่นูนและส่วนที่เว้า ปะเก็น (Gasket) จะถูกติดตั้งไว้ในตำแหน่งที่เหมาะสมเพื่อป้องกันไม่ให้รั่ว และรักษาระยะห่างระหว่างแผ่นที่ต้องการ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบปรับปรุงใหม่นี้มีค่าสูงส่วนคุณลักษณะที่ดีเด่นอย่างอื่นคือ สามารถถอดออกเป็นแผ่นๆ ออกมาทำความสะอาดได้ทั่วถึง การ

บำรุงรักษาก็ง่าย และสามารถปรับปริมาณการถ่ายเทความร้อนได้ โดยการเพิ่มหรือลดจำนวนแผ่นการถ่ายเทความร้อน เนื่องจากปะเก็นที่ใช้โดยปรกติทำจากยางหรือยางสังเคราะห์ จึงไม่เหมาะที่จะใช้กับอุณหภูมิหรือความดันสูง เครื่องแบบนี้นิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมเวชภัณฑ์และอุตสาหกรรมอาหาร ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม สูงประมาร 1300-3500 kcal/m^2 hr^{o} C ส่วนความดันและอุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ได้ประมาณ 5 kg/cm^2 และ 150^{o}C ตามลำดับ



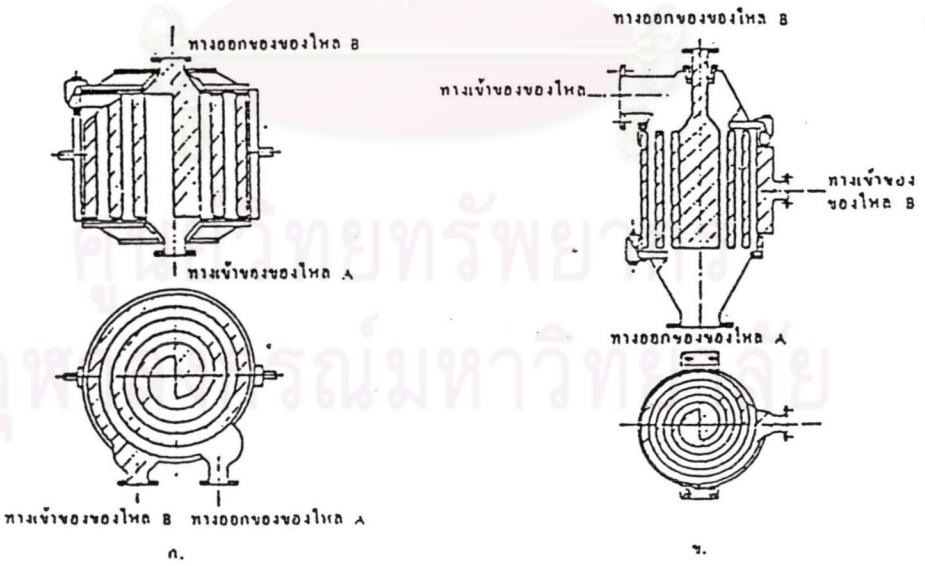
รูปที่ 5.10 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น

รูป 5.10 แสดงลักษณะของขดท่อที่ผลิตจากเครื่องถ่ายเทความร้อน (Plate Coil) โดยการเอาแผ่นถ่ายเทความร้อน 2 แผ่นมาประกบกันให้เกิดช่องทางไหลเหมือนกับขดท่อ ลักษณะการใช้มีตั้งแต่การเอาวางประกบกันหลายๆ แผ่น ให้เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดแผ่นการวางใช้ในภาชนะบรรจุแทนขดท่อถ่ายเทความร้อน (Coil) ตลอดจนการวางติดกับผนังถังแทนปลอกหุ้ม (Jacket)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.2.10 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบหอยโข่ง (Volute type Exchanger)

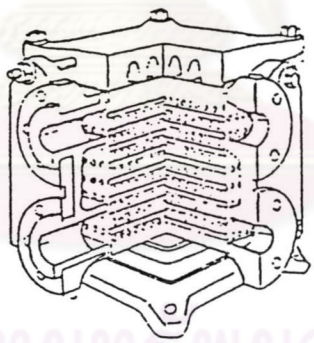
เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้สร้างขึ้นจากแผ่นราบ 2 แผ่นที่เอามาคัดขนานกันให้เหมือนลายก้นหอยโข่ง รูป 5.11 ก แสดงเครื่องชนิดไหลสวนทาง (Counter Flow) ส่วนรูป 5.11 ข แสดงเครื่องชนิดไหลตั้งฉาก (Cross Flow) คุณลักษณะที่ดีคือ โครงสร้างไม่จำเป็นต้องคำนึงถึงการยืดหดตัวเชิงความร้อน สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมสูง เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความดันสูญเสียที่น้อยและการไหลที่สม่ำเสมอด้วยดังนั้นจึงสามารถออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้ขนาดเล็กเมื่อเปรียบเทียบกับพื้นที่ร่ถ่ายเทความร้อนข้อเสียคือ ทำความสะอาดและซ่อมแซมได้ยากเพราะปกติสร้างขึ้นโดยการเชื่อมโลหะ (Welding) ดังนั้นจึงไม่เหมาะสมกับของไหลที่สกปรกมากของไหลที่มีฤทธิ์กัดกร่อนแตกต่างกันหรือของไหลที่มีความดันสูง ในปัจจุบันเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดนี้มีใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมอาหาร เป็นต้น แต่การใช้ที่เหมาะสมคือใช้ทำเป็นเครื่องทำความเย็นในกระบวนอุตสาหกรรมเคมี โดยเฉพาะอย่างยิ่งใช้เป็นเครื่องควบแน่นที่ความดันใกล้สูญญากาศ



รูปที่ 5.11 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบหอยโข่ง

5.2.11 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบบล็อก (Block Type Exchanger)

ส่วนใหญ่แล้วการเลือกใช้วัสดุประเภทโลหะที่เหมาะกับการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสารเคมีสองชนิดที่มีฤทธิ์กัดกร่อนผิดแผกกันนี้ทำได้ลำบาก ในกรณีเช่นนี้สมควรที่จะใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบบล็อกซึ่งทำจากกราไฟท์ หรือวัสดุทนการกัดกร่อนอื่นๆ ก่อนๆ เดียว ดังแสดงไว้ในรูป 5.12 โครงสร้างของเครื่องประกอบด้วยวัสดุทนการกัดกร่อนซึ่งเจาะรูยาวจำนวนมากให้ตั้งฉากกันระหว่างชั้นของรูปของไหลแต่ละชนิดไหลสลับชั้นกันไปตามรูปที่เจาะไว้ เครื่องแบบนี้มีใช้ในอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์ เช่น กรดเกลือ กรดกำมะถันและเคมีภัณฑ์อื่นๆ แต่โครงสร้างของเครื่องจำกัดการใช้ในเฉพาะกรณีปริมาณการแลกเปลี่ยนความร้อนน้อยที่ความดันต่ำและอุณหภูมิต่ำ



รูปที่ 5.12 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบบล็อค

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.2.12 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบกะทัดรัด (Compact Exchanger)

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้ได้จากความคิดริเริ่มที่ต้องการลดขนาดของเครื่องให้เล็กที่สุดแต่มีพื้นที่ถ่ายเทความร้อนสูง เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบกะทัดรัดจะเรียกชื่อได้ก็ต่อเมื่ออัตราส่วนระหว่างพท้นที่ถ่ายเทความร้อน (ในหน่วย m^2) กับปริมาตร (ในหน่วย m^3) ของเครื่องมีค่ามากกว่า 660 ขึ้นไป เพื่อให้พื้นที่ถ่ายเทความร้อนต่อปริมาตรหนึ่งหน่วยมีค่าสูง ในกรณีที่ใช้ท่อกลมปรกติจะใช้ท่อที่มีเส้นศูนย์กลางเล็กกว่า ¼ นิ้วที่ติดครีบ (Fin) รูป 6.1.3 แสดงตัวอย่างทั่วไปของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบกะทัดรัด เนื่องจากโครงสร้างแบบนี้ซ่อมแซมทำความสะอาดได้ยากและอุณหภูมิหรือความดันที่ใช้ก็มีค่าจำกัด จึงไม่ค่อยใช้ในกระบวนการอุตสาหกรรมเคมี แต่เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ดีเลิศระหว่างก๊าซ 2 ชนิดที่มีค่าสกปรกน้อย

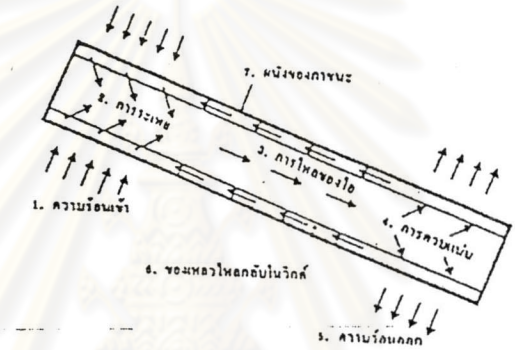
รูปที่ 5.13 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบกะทัดรัด

5.2.13 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีตไปป์ (Heat Pipe Heat Exchanger)

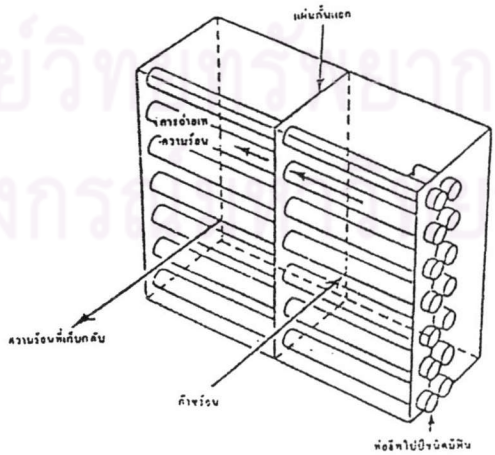
เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแนวใหม่ที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงและมีสมรรถนะสูงแม้ว่าผลต่างของอุณหภูมิระหว่างแหล่งให้ความร้อน (Heat Source) และแหล่งรับความร้อน (Heat Sink) มีค่าค่อนข้างน้อยก็คือ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์ประกอบด้วยฮีทไปป์ ซึ่งเป็นท่อปิดผนังภายในบรรจุวิกค์ (Wick) และของเหลวใช้งาน (Working Fluid) ที่ความดันสูญญากาศ (ไม่มีก๊าซไม่ควบแน่นเหลืออยู่)

ลักษณะการทำงานของฮีทไปป์มีแสดงในรูป 5.14 กล่าวคือเมื่อฮีทไปป์รับความร้อนจากแหล่งให้ความร้อนผ่านผนังท่อของช่วงการระเหย (Evaporation Section) ไปยังวิกค์ ของเหลวใช้งานที่อยู่ในวิกค์จะระเหยกลายเป็นไอ ไอที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่ตามท่อไปยังช่วงการควบแน่น (Condensation Section) ซึ่งมีความดันไอต่ำกว่า ณ ที่นี้ความร้อนแฝงที่เกิดจากการควบแน่นจะถ่ายเทจากผนังท่อไปสู่แหล่งรับความร้อนส่วนของเหลวจากการควบแน่นจะไหลซึมกลับไปยังช่วงการระเหยโดยแรงคาพิวลารี (Capillary Action) ของวิกค์



รูปที่ 5.14 ลักษณะการทำงานของฮีทไปป์



รูปที่ 5.15 โครงสร้างของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์

รูปที่ 5.15 แสดงตัวอย่างของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ฮีทไปป์เป็นตัวถ่ายเทความร้อน จุดเด่นของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ฮีทไปป์มีดังต่อไปนี้

1. **ไม่ต้องการใช้พลังงานเสริมในการใช้งาน ยกเว้นเครื่องเป่าลมหรือเครื่องสูบของเหลว**
2. **อุณหภูมิที่ใช้งานมีช่วงกว้างและสามารถทำงานได้แม้อุณหภูมิระหว่างแหล่งให้ความร้อนและแหล่งรับความร้อนต่างกันไม่มากถ่ายเลือกของเหลวที่ใช้งานให้เหมาะสมกับช่วงอุณหภูมิแสดงในตารางที่ 5.1**

ตารางที่ 5.1 ตารางความสัมพันธ์ระหว่างของเหลวใช้งานกับอุณหภูมิ

ช่วงอุณหภูมิ (องศาเซนติเมตร)	ของเหลวใช้งาน
20-40	แอมโมเนีย
50-200	น้ำ
250-650	ปรอท
400-800	โปแตสเซียม
500-1000	โซเดียม
1000-1800	ลิเธียม

3. อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่หนึ่งหน่วยมีค่าสูงกว่าอัตราการนำความร้อนของโลหะมาก
4. ปัญหาการใช้งานและการดูแลรักษามีน้อย เพราะไม่มีส่วนเคลื่อนไหว (Moving Parts)

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในลักษณะต่างๆ เช่นในการรักษาอุณหภูมิในยานอวกาศให้มีค่าสม่ำเสมอทุกจุด ในการจำกัดความร้อนออกจากชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ประเภททรานซิสเตอร์อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำและวงจรไอซี ในการถ่ายเทความร้อนระหว่างก๊าซร้อนและก๊าซเย็นเพื่อประหยัดพลังงาน ในการควบคุมอุณหภูมิภายในถังปฏิกรณ์เคมี ในการอบแห้งเส้นใยและกระดาษในการเก็บความร้อนทิ้งจากหม้อไอน้ำ ในการระบายความร้อนจากระบบเบรคของเครื่องบิน เตาเผาขยะและกระบวนการผลิต เป็นต้น

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้สำหรับการถ่ายเทความร้อนระหว่างก๊าซร้อนและก๊าซเย็นในอดีตมีหลายประเภท การเปรียบเทียบเชิงปริมาณระหว่างสมรรถนะของเครื่องแลก

เปลี่ยนความร้อนแบบฮีทไปป์กับเครื่องประเภทอื่นๆ ทำได้ค่อนข้างลำบากก็จริงแต่ Basilius ก็เคยลองทำการเปรียบเทียบโดยวิธีให้คะแนนหัวข้อเปรียบเทียบต่างๆ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 5.2

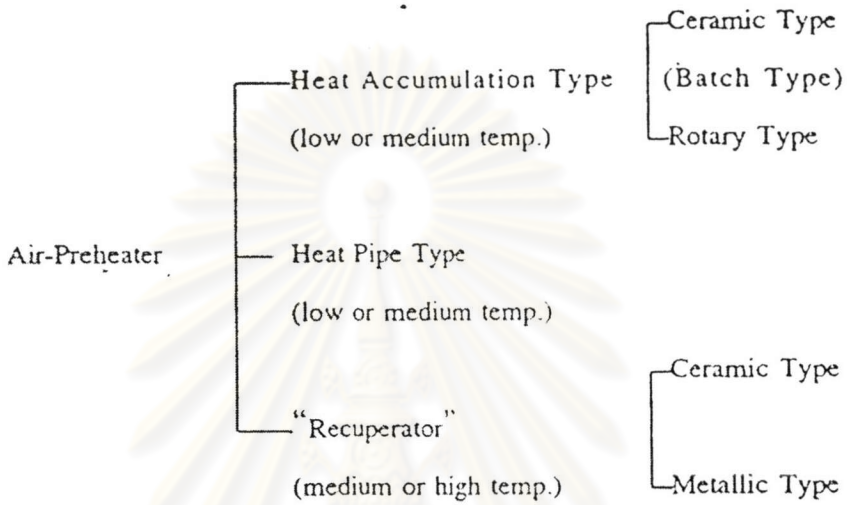
ตารางที่ 5.2 การเปรียบเทียบเชิงสมรรถนะของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบต่างๆ สำหรับกรณีของก๊าซร้อนและก๊าซเย็น

ประเภทของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน	ความดันที่สูญเสีย	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน	การบำรุงรักษา	ราคา	พลังงานเสริม	การรั่วผสมของของไหล	พื้นที่ถ่ายเทความร้อนต่อปริมาตร 1 หน่วย	คะแนนรวม
Regeneration	ปานกลาง 3	สูง 3	ยาก 2	สูง 2	ไม่จำเป็น	มี 0	มาก 4	15
Shell and tube	สูง 2	สูง 2	ธรรมดา 3	ปานกลาง 3	ไม่จำเป็น	ไม่มี 5	น้อย 2	19
Plate fin	ต่ำ 4	ปานกลาง 4	ธรรมดา 3	สูง 2	ไม่จำเป็น	ไม่มี 5	มากพิเศษ 5	22
Recalculating	ต่ำ 4	ต่ำ 4	ยาก 2	สูง 2	จำเป็น	ไม่มี 5	ปานกลาง 3	18
Secondary medium Heat-pipe	ต่ำ 4	สูง 4	ง่าย 5	ปานกลาง 3	ไม่จำเป็น	ไม่มี 5	มาก 4	25

อย่างไรก็ตาม ถ้าการเลือกวัสดุและการออกแบบฮีทไปป์กระทำอย่างไรถูกต้อง ก็อาจเกิดปัญหาในการใช้งานได้ เช่น การผุทะลุของผนังท่อจะทำให้ฮีทไปป์หมดประสิทธิภาพในการทำงานโดยสิ้นเชิง การผุกร่อนของผนังด้านในอาจก่อให้เกิดการอุดตันหรือเสื่อมคุณภาพของวิกค์ได้บางครั้งวิกค์อาจเกิดการแห้งตัวได้ (Dry out) ถ้าแรงคาพิลลารีมีไม่เพียงพอที่จะถ่ายเทของเหลวควบแน่นกลับไปยังช่างการระเหยได้ทัน ของเหลวที่ใช้งานยังอาจเสื่อมคุณภาพได้ที่อุณหภูมิสูงเกินไป

5.3 ประเภทของเครื่องอุ่นอากาศ

เครื่องอุ่นอากาศเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนประเภทหนึ่ง ที่ออกแบบมาเพื่อเก็บความร้อนจากไอเสียกลับมาใช้ใหม่ เครื่องอุ่นอากาศที่ใช้กับเตาเผาโดยทั่วไปอาจจำแนกได้ดังนี้

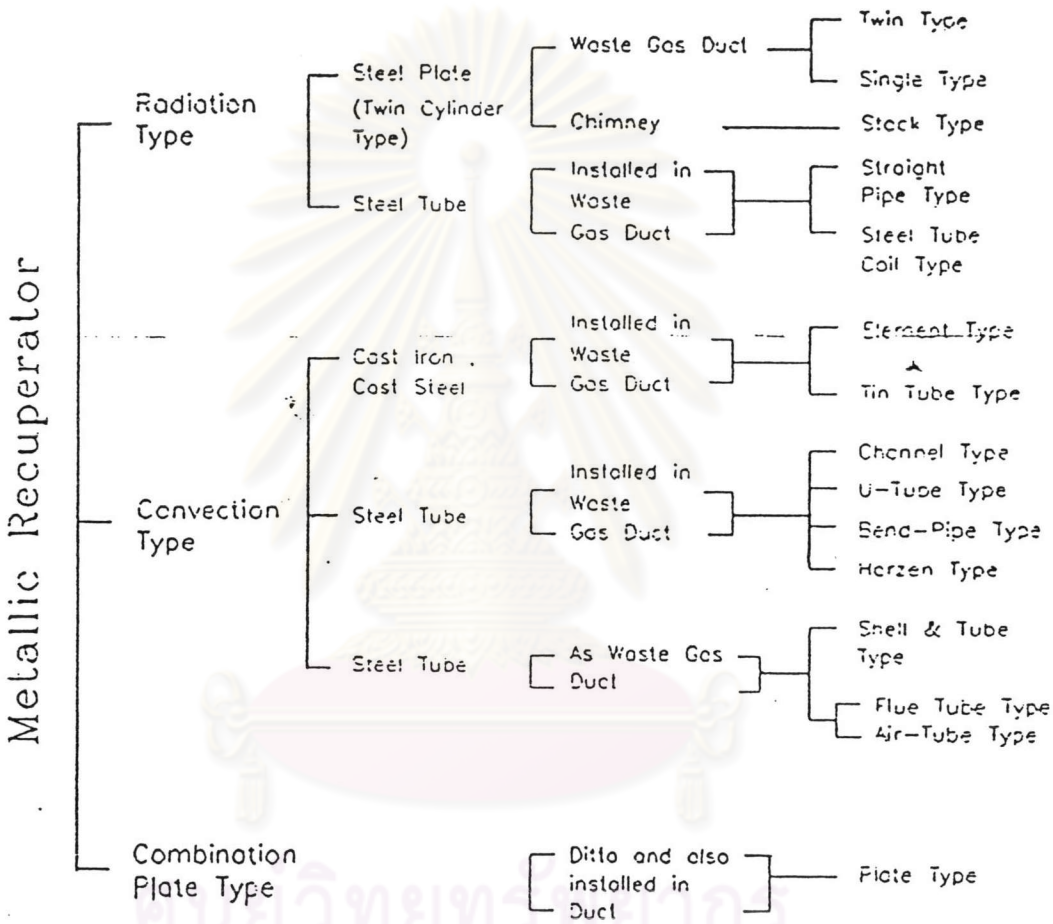


รูปที่ 5.16 การแยกประเภทของ air-preheater โดยทั่วไป

รูปที่ 5.16 แสดงให้เห็นถึงการแยกประเภทของเครื่องอุ่นอากาศโดยทั่วไปที่ใช้กับ เตาเผาในอุตสาหกรรม โดยแยกตามวิธีการถ่ายเทความร้อนและชนิดของ material สำหรับเครื่องอุ่นอากาศแบบ accumulating type (หรือ regenerator type) และ แบบ heat pipe type เหมาะกับการเก็บความร้อนกลับคืนในช่วงอุณหภูมิปานกลาง (ระหว่าง 230-600°C) และต่ำ (ต่ำกว่า 230°C) นิยมใช้เป็นเครื่องอุ่นอากาศของหม้อไอน้ำขนาดใหญ่ที่มีอุณหภูมิของก๊าซเสียค่อนข้างต่ำ หรือเพื่อเก็บความร้อนคืนจาก hot-air furnace หรือ anti-pollution equipment ที่ต้องการลดอุณหภูมิของไอเสียด้วย ส่วน recuperator เหมาะสมกับการเก็บความร้อนกลับคืนในช่วงอุณหภูมิปานกลาง (230-600°C) และสูง (มากกว่า 600°C ขึ้นไป) นิยมใช้เป็นเครื่องอุ่นอากาศของเตาเผาในอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ อย่างแพร่หลายโดยเฉพาะ metallic type เช่น soaking pit, hot blast cupola, glass melting furnace, air preheating for hot stove และ tunnel kiln for brick making เป็นต้น ดังนั้นในที่นี้จะขอกล่าวถึงรายละเอียดเฉพาะเครื่องอุ่นอากาศประเภท metallic recuperator เท่านั้น

5.3.1 Metallic Recuperator

Metallic recuperator อาจแบ่งประเภทได้ตามวิธีการถ่ายเทความร้อน, ชนิดของวัสดุที่ใช้ทำผิวถ่ายเทความร้อน, ลักษณะการติดตั้ง, ลักษณะโครงสร้างหรือรูปร่างของ recuperator และตามทิศทางการไหล ดังแสดงในรูปที่ 5.17 ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะการแบ่งประเภทตามวิธีการถ่ายเทความร้อน และลักษณะการติดตั้งเท่านั้น



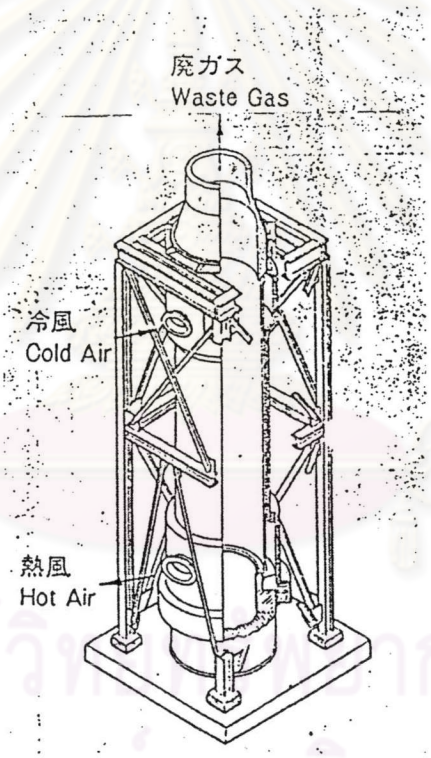
รูปที่ 5.17 Metallic Recuperator ประเภทต่างๆ

5.3.1.1 Radiation type

recuperator ประเภทนี้ใช้กันมากในกรณีที่อุณหภูมิของไอเสียสูงกว่า 1000°C (1000-1300°C) กลไกการถ่ายเทความร้อนจากก๊าซร้อนไปสู่ผิวถ่ายเทความร้อนของ

recuperator เป็นแบบการแผ่รังสีความร้อน recuperator ประเภทนี้ที่นิยมใช้ได้แก่ แบบ stack type และ steel tube หรือ cage type

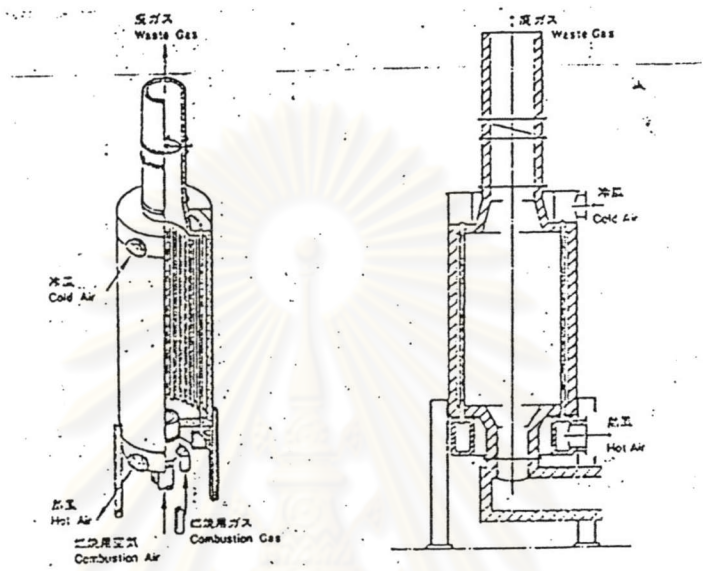
Stack Type Recuperator จะติดตั้งที่ปล่องเตาในแนวดิ่งดังแสดงในรูปที่ 5.18 ตัว recuperator จะทำหน้าที่เป็นปล่องไฟของเตาด้วย ลักษณะโครงสร้างของ recuperator แบบนี้เป็นแบบท่อซ้อนท่อ โดยก๊าซร้อนจะไหลอยู่ภายในท่อใน ส่วนอากาศที่ต้องการทำให้ร้อนจะไหลอยู่ระหว่างท่อ ทิศทางการไหลของก๊าซร้อน และอากาศมีทั้งแบบไหลตามกัน (parallel flow) และไหลสวนทางกัน (counter flow) stack type recuperator จะนิยมใช้กับเฉพาะเตาเผาขนาดใหญ่เช่น soaking pits หรือ steel making โดยอาจติดตั้งเพียงตัวเดียว หรือติดตั้งคู่โดยต่ออนุกรม (twin stack type recuperator)



รูปที่ 5.18 stack type recuperator

Steel tube หรือ Cage Type Recupertor อาจจะติดตั้งที่ปล่องเตา หรือแยกจากเตาไว้ต่างหาก ดังแสดงในรูปที่ 5.19 ลักษณะโครงสร้างของ recuperator แบบนี้เป็นแบบ shell & tube ลักษณะการวางท่อจะวางไว้รอบ ๆ อยู่ภายใน shell ตามแนวยาว อากาศที่ต้องการทำให้ร้อนจะ

ไหลอยู่ภายในท่อ ส่วนก๊าซร้อนจะไหลอยู่ภายใน Shell การออกแบบ recuperator แบบนี้จะออกแบบให้ทิศทางการไหลของก๊าซร้อน และอากาศเป็นแบบไหลสวนทางกัน (counter flow)



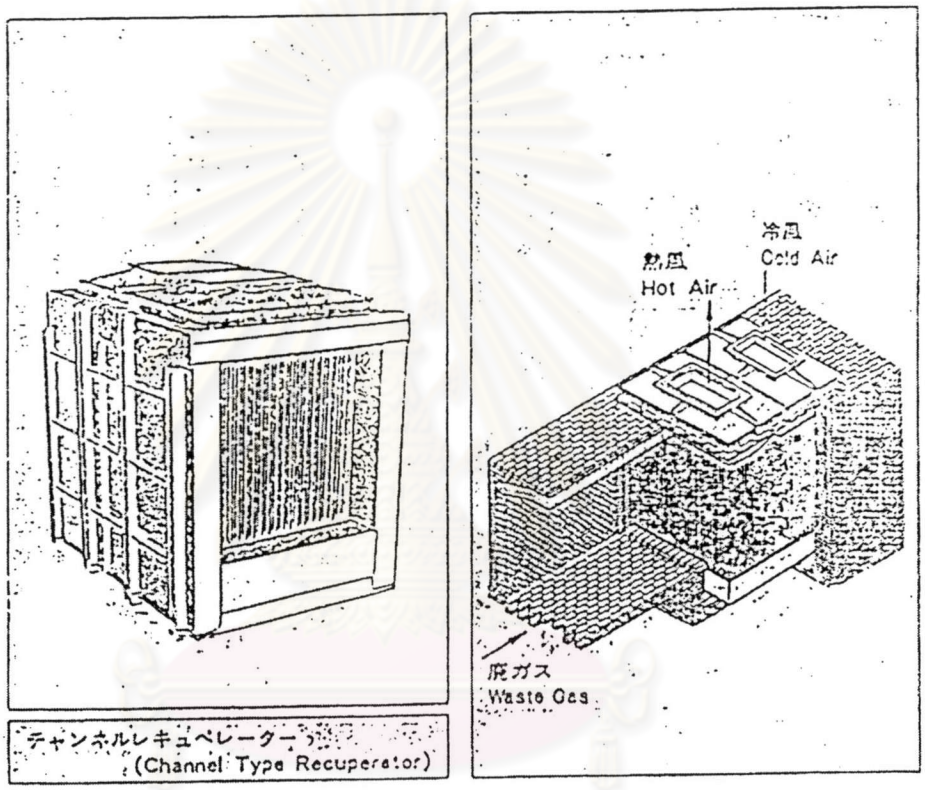
รูปที่ 5.19 Cage type recuperator

5.3.1.2 Convection type

recuperator ประเภทนี้จะใช้ในกรณีที่อุณหภูมิของไอเสียต่ำกว่า 900-1000°C กลไกการถ่ายเทความร้อนจากก๊าซร้อนไปสู่ผิวถ่ายเทความร้อนของ recuperator เป็นแบบการพาความร้อนแบบที่นิยมใช้กับเตาเผาในอุตสาหกรรม ได้แก่ แบบ channel type และแบบ flue tube type

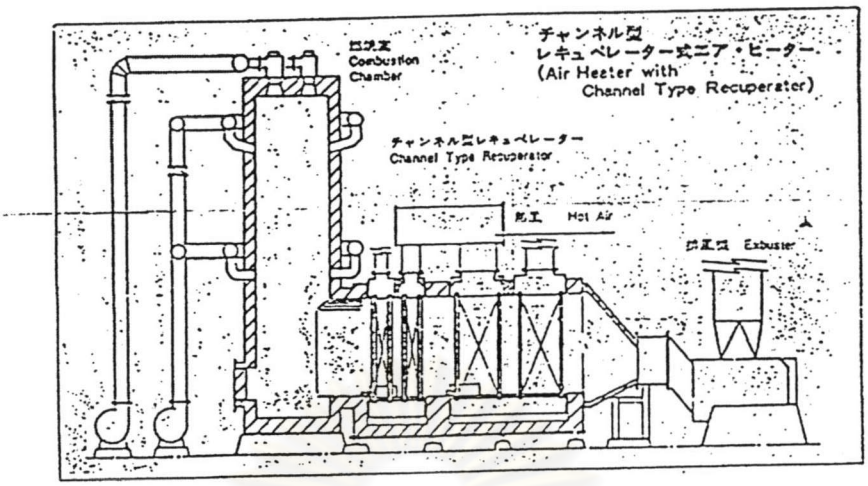
Channel type recuperator เรียกอีกชื่อหนึ่งว่าแบบ multitube type recuperator รูปร่างของ recuperator แสดงในรูปที่ 5.20 และ 5.21 โดยทั่วไปจะออกแบบให้อากาศเย็นไหลในกลุ่มท่อที่วางขวางในแนวตั้งฉากกับทิศทางการไหลของก๊าซเสีย (cross-flow) ท่ออาจติดครีบ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์ การออกแบบส่วนใหญ่จะออกแบบให้อากาศที่ต้องการทำให้ร้อนไหลในท่อ 2 เที่ยวหรือ 2 กลับ หรือมากกว่านั้น การติดตั้ง recuperator แบบนี้อาจติดตั้งทางท่อควันแยกต่างหากจากเตา หรือ อาจติดตั้งที่ปล่องควันของเตาก็ได้

Flue tube type recuperator มีรูปร่างโดยทั่วไปแสดงในรูปที่ 5.22 ลักษณะของ recuperator แบบนี้คล้ายแบบ cage type แต่แตกต่างกันที่ออกแบบให้ก๊าซเสียไหลในท่อ ส่วนอากาศที่ต้องการทำให้ร้อนไหลใน shell โดยการจัด baffle เพื่อบังคับทิศทางการไหลไว้ใน shell ให้เกิดการไหลตามแนวขวาง การติดตั้ง recuperator แบบนี้อาจติดตั้งทางปล่องควันของเตาหรือติดตั้งทางท่อควันแยกต่างหากจากเตาก็ได้

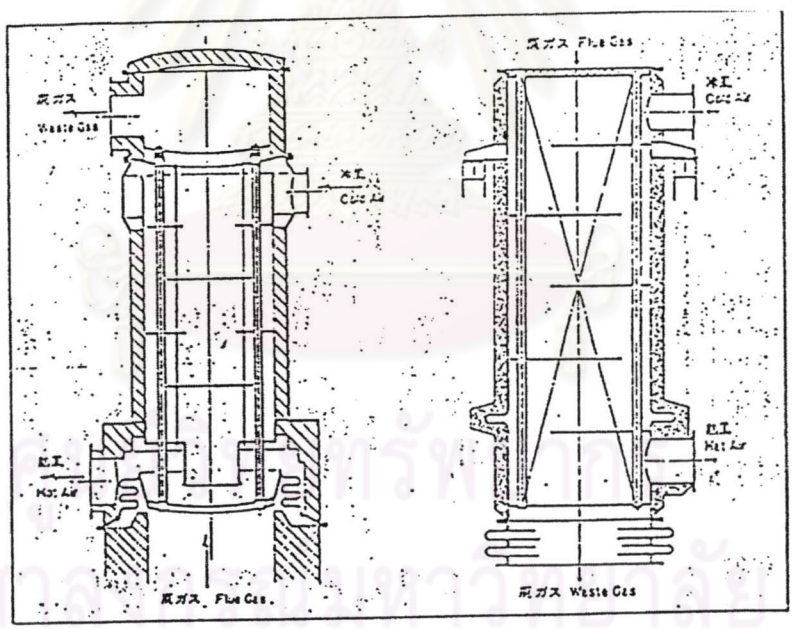


รูปที่ 5.20 Channel type recuperator แบบติดตั้งทางท่อควัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



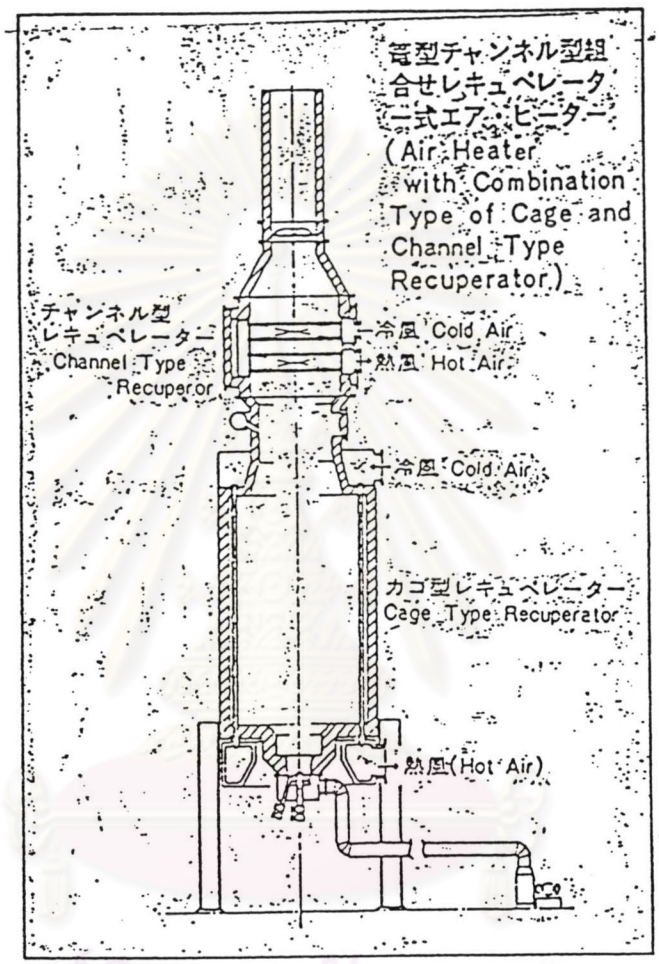
รูปที่ 5.21 แสดงการติดตั้ง Channel type recuperator



รูปที่ 5.22 Flue tube type recuperator

5.3.1.3 Combination type

คือการใช้ recuperator ประเภท radiation type และ convection type ผสมกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.23 จากรูปเป็นการติดตั้ง recuperator แบบ cage type และแบบ channel type



รูปที่ 5.23 Air Heater with Combination type of Cage and Channel type Recuperator

5.4 การพิจารณาเลือก Recuperator ที่เหมาะสมกับเตาเผาเซรามิค

Recuperator แต่ละแบบมีข้อจำกัดในการใช้งานแตกต่างกันเนื่องจากขีดจำกัดทางด้านคุณสมบัติของวัสดุที่นำมาใช้ JETRO และ OEC ได้เรียบเทียบประเภทของ Recuperator กับขีดจำกัดของอุณหภูมิของก๊าซเสียและอุณหภูมิของอากาศที่สามารถอุ่นให้ร้อนได้ดังแสดงในตารางที่ 5.3 นอกจากนี้ยังได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประเภทของ recuperator กับอุณหภูมิของ

อากาศที่อุ่นให้ร้อนและประสิทธิภาพการเก็บความร้อนกลับคืนด้วย ดังแสดงในตารางที่ 5.4 และ 5.5

ตารางที่ 5.3 การเปรียบเทียบ Metallic recuperator กับ Ceramic recuperator

ประเภทของ recuperator	รูปแบบ	ขีดจำกัดของอุณหภูมิของก๊าซทิ้ง	อุณหภูมิของ preheated air	วัสดุ
Matallic recuperator - แบบติดตั้งทางท่อควัน - แบบติดตั้งทางปล่องไฟ	Convection type - Multitube type - Flue tube type - แบบแผ่รังสีความร้อน - แบบแผ่รังสี + พาความร้อน	ต่ำกว่า 1000°C 1000 - 1300°C	350 - 500°C	เหล็กเหนียวหล่อที่ทนความร้อนสูง stainless steel, เหล็กกล้าคาร์บอน
Ceramic recuperator	- Armu type - Stein type	1300 - 1400°C	600 - 700°C	Chamotte brick, High-alumina brick

ตารางที่ 5.4 ประเภทของ recuperator กับอุณหภูมิของอากาศที่อุ่นร้อน

ประเภทเตาเผา / ประเภทของ recuperator		Soaking Pit (°C)	Heating furnace for hot rolling of thick plate (°C)	Die Steel Wire Heating furnace (°C)	Heating furnace อื่นๆ (°C)
Multitube type	- Design	450-600	300-500	200-450	550-600
	- Actual	400-500	300-450	200-350	300-500
Flue tube type	- Design	500	400	300-400	300-350
	- Actual	300-500	350	200-300	300
Radiation	- Design	400-600	400-450	400-600	400
	- Actual	400-500	350-400	350-500	400
Combined type	- Design	500-550	-	450-500	-
	- Actual	450-500	-	300	-

ตารางที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างประเภทของ recuperator กับประสิทธิภาพของการเก็บความร้อนกลับคืน

ประเภทของ recuperator	Soaking Pit (°C)	Heating furnace for hot rolling of thick plate (°C)	Die Steel Wire Heating furnace (°C)	Heating furnace อื่นๆ (°C)
Multitube type	30	25-35	20-34	25-40
Flue tube type	24-34	25	28	22
Radiation	22-30	25	25	20
Combined type	12-20	-	29	-

จากการทดลองเผาเคลือบ และเผา biscuit จากตารางที่ 4.2 และตารางที่ 4.4 พบว่าอุณหภูมิของก๊าซเสียที่ออกจากปล่องเตาเผาเซรามิคมีค่าอุณหภูมิก๊าซเสียสูงสุดเฉลี่ยเท่ากับ 815°C เมื่อนำค่าอุณหภูมิที่วัดได้มาพิจารณา เลือกอุปกรณ์อุ่นอากาศเพื่อเปรียบเทียบดังตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.6 เปรียบเทียบช่วงอุณหภูมิที่ใช้งานของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

TYPE	Temperature
Heat Accumulation Type (low or medium temp)	230-300°C
Heat Pipe Type (low or medium temp)	ต่ำว่า 230°C
Recuperator (medium or high temp)	สูงกว่า 600°C

จากตารางที่ 5.6 เป็นการเปรียบเทียบช่วงอุณหภูมิของการใช้งาน พบว่าเครื่องอุ่นอากาศชนิด Recuperator มีความเหมาะสมที่จะนำมาศึกษาเพราะช่วงอุณหภูมิของไอเสียที่จะเข้าสู่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าเฉลี่ย 815°C เครื่องอุ่นอากาศชนิด Recuperator ยังสามารถแบ่งตามชนิดของวัสดุที่ใช้สร้างได้ 2 ประเภทได้แก่

1. Metallic type
2. Ceramic type

Recuperator แต่ละแบบมีข้อจำกัดในการใช้งานแตกต่างกันเนื่องจากขีดจำกัดทางด้านคุณสมบัติของวัสดุที่นำมาใช้ JETRO ได้เปรียบเทียบประเภทของ recuperator กับขีดจำกัดของอุณหภูมิของก๊าซเสียและอุณหภูมิของอากาศที่สามารถอุ่นให้ร้อนได้ดังแสดงในตารางที่ 5.3 สามารถเลือก Recuperator ชนิด Metallic recuperator ซึ่งเหมาะสมกับช่วงอุณหภูมิใช้งานและวัสดุที่ใช้สร้างหาง่ายมีราคาถูกกว่าชนิด Ceramic recuperator

Metallic recuperator สามารถแบ่งประเภทตามวิธีการถ่ายเทความร้อน ชนิดของวัสดุที่ใช้ทำผิวถ่ายเทความร้อน ลักษณะการติดตั้ง ลักษณะโครงสร้างหรือรูปร่างของ recuperator และทิศทางการไหล ดังแสดงในตารางที่ 5.7

ตารางที่ 5.7 ความเหมาะสมในการเลือกชนิดของ Metallic recuperator

ข้อมูลเปรียบเทียบ	Rediation type	Convection type	Combination type
อุณหภูมิของไอเสีย	สูงกว่า 1000°C	ต่ำกว่า 900°C	-
ลักษณะการถ่ายเทความร้อน	การแผ่รังสี	การพาความร้อน	-
การติดตั้ง	ที่ปล่องเตา	ท่อควันแยกต่างหาก	ปล่องเตา
ทิศทางการไหล	ไหลตามหรือไหลสวนทางกัน	ไหลตามแนวขวาง	สวนทางกันและตั้งฉากกัน
ลักษณะโครงสร้าง	ท่อซ้อนกันตามแนวตั้ง	กลุ่มท่อขวางกับทิศทางการไหล	รวมกันทั้งสองแบบ

จากตาราง 5.7 สามารถเลือกชนิดของ Metallic recuperator ที่เหมาะสมกับแบบที่จะทำการติดตั้งกับเตาเผาเซรามิคซึ่งเป็นแบบ Convection type จากนั้นทำการเลือกเส้นทางการไหลใน recuperator โดยทำการเลือกให้ของไหลร้อนไหลในท่อซึ่งในกรณีที่ของไหลร้อนไหลในท่อและของไหลเย็นไหลในเชลล์ ของไหลเย็นนอกท่อจะทำหน้าที่คล้ายฉนวนกันความร้อน เนื่องจากผนังเชลล์ซึ่งสัมผัสกับของไหลเย็นในเชลล์จะมีอุณหภูมิต่ำกว่าในแบบของไหลร้อนไหลในเชลล์ และความร้อนที่สูญเสียออกจาก recuperator จะมีน้อยกว่าทำให้สามารถลดความหนาของฉนวนลงได้ซึ่งทำให้ต้นทุนของ recuperator ลดลงด้วย