

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

2.1 การทำงานของระบบกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Flue Gas Desulfurization System: FGD)

ระบบกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เป็นอุปกรณ์ที่ใช้แยกก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ออกจากก๊าซเสียที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง (น้ำมันเตา) ที่มีกำมะถันผสมอยู่

FGD ที่ใช้ในโรงไฟฟ้าราชบุรีเป็นชนิดเปียก (Wet Type FGD) ใช้หินปูน (Calcium Carbonate: CaCO_3) เป็นตัวดูดซับ (Absorbent) เมื่อเกิดปฏิกิริยาทางเคมีแล้วจะได้ยิปซัม (Gypsum: $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) มีประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้มากกว่าร้อยละ 95

การทำงานของระบบ FGD ของโรงไฟฟ้าราชบุรีสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ส่วนใหญ่ๆ ดังนี้

1. ส่วนเตรียมน้ำหินปูน (Slurry Preparation Section)
2. ส่วนดูดซับ (Absorption Section)
3. ส่วนแยกน้ำออกจากยิปซัม (Gypsum Dewatering Section)
4. ส่วนพอก๊าซและการแลกเปลี่ยนความร้อน (Flue Gas Ducting and Reheating)

ซึ่งรายละเอียดของแต่ละส่วน มีดังต่อไปนี้

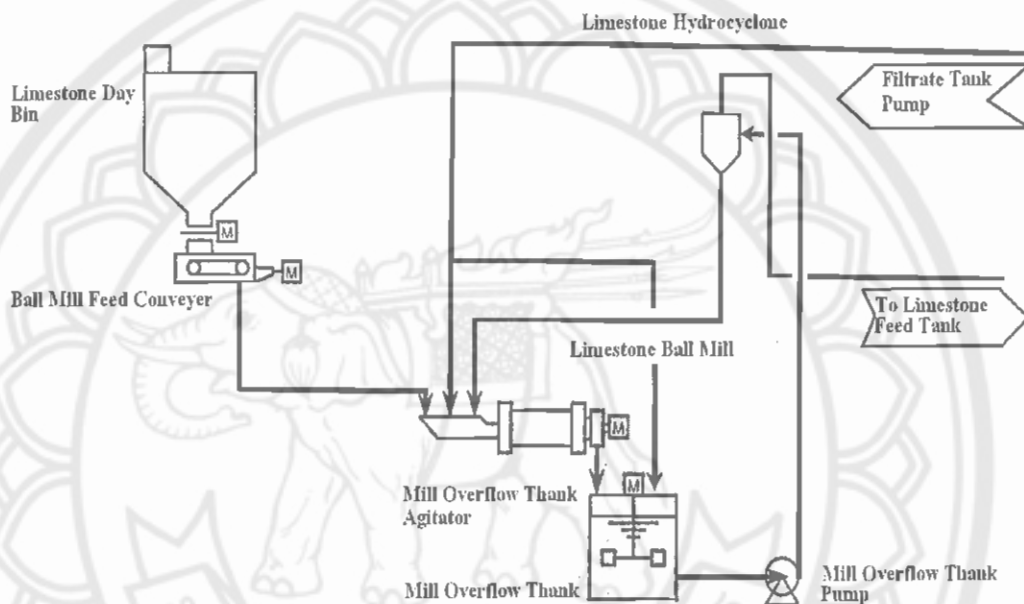
2.1.1 ส่วนเตรียมน้ำหินปูน (Slurry Preparation Section)

รถบรรทุกจะบรรทุกหินปูนจากเหมืองหินปูนมายังบริเวณโรงกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ จากนั้น จะทำการชั่งน้ำหนัก (Scale Bridge) ก่อนลำเลียงเข้าไปเก็บในถังหินปูน (Limestone Silo) จากนั้นจะใช้สายพานลำเลียง (limestone Belt Feeder) ลำเลียงหินปูนไปยังโรงโม่บด (Limestone Ball Mill) ซึ่งทำการโม่บดผสมกับน้ำจนได้เป็นน้ำปูนเหลว จากนั้นจะนำไปเก็บในถังพัก (Limestone Overflow Tank)

น้ำหินปูนในบ่อพักจะถูกสูบโดย Mill Overflow Tank Pump ไปยังชุดแยกขนาด (Hydro Cyclone) โดยน้ำหินปูนที่มีขนาดเหมาะสมสำหรับการใช้งานจะไหลขึ้นทางด้านบน เนื่องจากมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า และถูกสูบไปเก็บยังถังป้อนน้ำหินปูน (Limestone Slurry Feed Tank) ที่น้ำหินปูน จะถูกทำให้มีความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก และถูกสูบไปใช้งานที่ FGD โดย

Limestone Slurry Feed Tank Pump ส่วนที่ยังไม่สามารถใช้งานได้จะไหลลงทางด้านล่างของ Hydro Cyclone และจะถูกสูบกลับไปโม่บดอีกครั้งเพื่อให้ได้ขนาดตามต้องการ

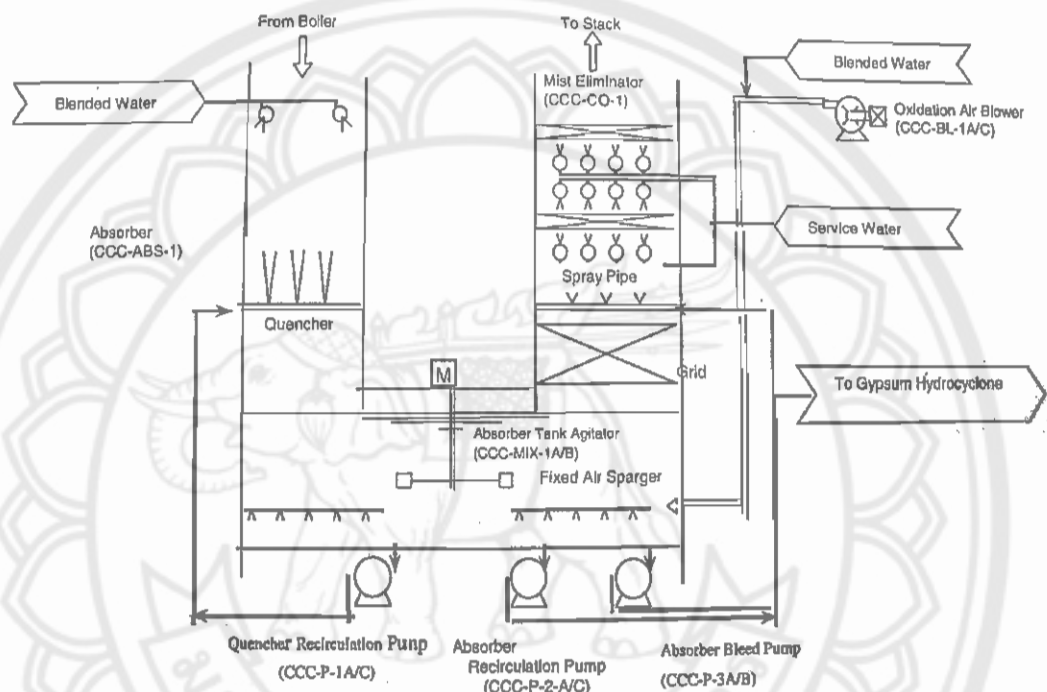
ระบบเตรียมน้ำหินปูนได้ออกแบบให้มีการไหลวน (Recirculation) ของน้ำหินปูนเพื่อป้องกันอุกตันภายในท่อ และภายในถังพักและถังป้อนน้ำหินปูนได้มีการติดตั้งใบพาย (Agitator) หมุนกวนอยู่ตลอดเวลาเพื่อป้องกันหินปูนตกตะกอน การทำงานของส่วนเตรียมน้ำหินปูนสามารถสรุปเป็นแผนผัง ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แผนภาพการทำงานโดยรวมของส่วนเตรียมน้ำหินปูน (ที่มา: Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.Mcec)

2.1.2 ส่วนดูดซับ (Absorber Section)

ส่วนดูดซับของระบบ FGD มีลักษณะเป็นหอคอยรูปตัว U แสดงดังรูปที่ 2.2 โดยด้านข้างด้านหนึ่งการไหลของก๊าซเสีย (Flue Gas) กับน้ำหिनปูนเป็นแบบไหลทางเดียวกัน เรียกว่า ด้าน Quencher และอีกด้านเป็นการไหลแบบสวนทาง เรียกว่า ด้าน Absorber และทั้งสองด้านจะมารวมกันที่ด้านล่าง เรียกว่า Absorber Tank รายละเอียดของการทำงานของแต่ละด้านมี ดังนี้



รูปที่ 2.2 แผนผังการทำงานโดยรวมของส่วนดูดซับ

(ที่มา: Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.Mcec)

ก๊าซเสียจากหม้อไอน้ำ (Boiler) จะไหลผ่านส่วนของ Flue Gas Ducting and Reheating เข้ามาทางด้าน Quencher ที่มีหัวฉีดจำนวน 280 หัวฉีด รับน้ำหिनปูนจาก Quencher Recirculation Pump ฉีดกระจายคลุมพื้นที่ทั้งหมดของหอคอย เพื่อให้ Flue Gas สัมผัสกับน้ำหिनปูน ทำให้ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์บางส่วนใน Flue Gas เกิดปฏิกิริยาทางเคมี และทำให้อุณหภูมิของ Flue Gas ลดลง จากนั้น Flue Gas และน้ำหिनปูนที่ถูกฉีดขึ้นไปจะตกลงสู่ Absorber Tank

Absorber Tank เป็นที่เก็บน้ำหिनปูน และเป็นที่เกิดปฏิกิริยาเคมี พื้นผิวภายในถูกหุ้มด้วยวัสดุทนการกัดกร่อน มีอุปกรณ์ที่สำคัญ ดังนี้

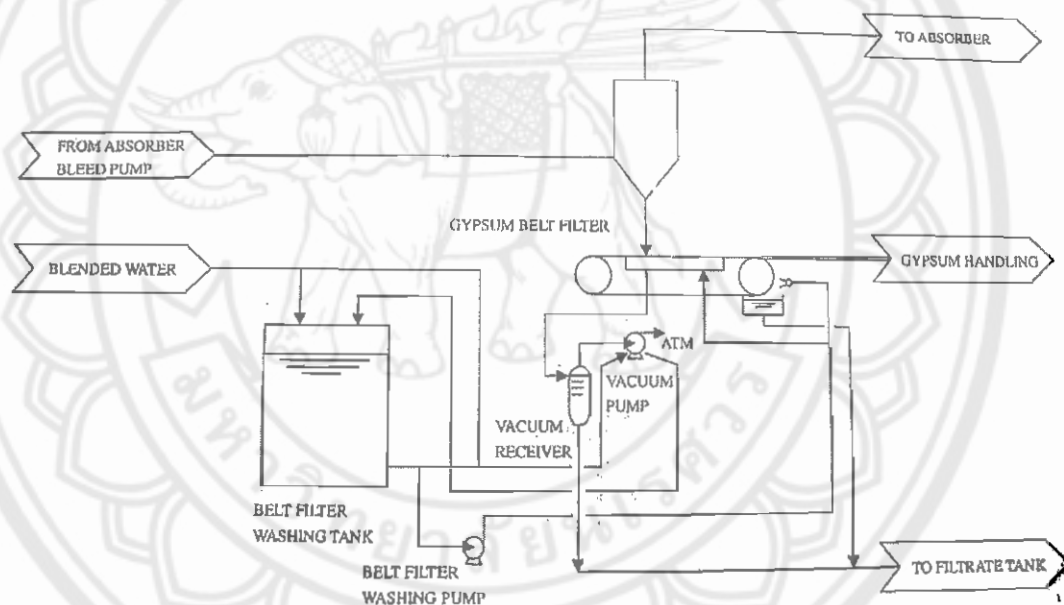
- Quencher Recirculation Pump จำนวน 3 ตัว (ใช้งาน 2 ตัว สำรอง 1 ตัว) ทำหน้าที่ปั้มน้ำ หินปูนจาก Absorber Tank ส่งไปยังหัวฉีดด้าน Quencher หมุนเวียนตลอดเวลา เพื่อ ป้องกันการตกตะกอนของหินปูนภายในท่อ
- Absorber Recirculation Pump จำนวน 3 ตัว (ใช้งาน 2 ตัว สำรอง 1 ตัว) ทำหน้าที่ปั้มน้ำ หินปูนจาก Absorber Tank ส่งไปยังหัวฉีดด้าน Absorber หมุนเวียนตลอดเวลา เพื่อ ป้องกันการตกตะกอนของหินปูนภายในท่อ
- Absorber Blced Pump จำนวน 2 ตัว (ใช้งาน 1 ตัว สำรอง 1 ตัว) ทำหน้าที่ปั้มน้ำหินปูน จาก Absorber Tank ที่มีความเข้มข้นของยิปซัมประมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนักส่งไปยัง ระบบแยกน้ำออกจากยิปซัม (Gypsum Dewatering Section)
- Fixed Air Sparger (FAS) ทำหน้าที่กระจายอากาศที่ถูกส่งมาจาก Oxidation Air Blower (OAB) เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเติมออกซิเจน (Oxidation Reaction) ในกระบวนการกำจัด ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์
- Absorber Tank Agitator เป็นอุปกรณ์ที่มีลักษณะเป็นใบพัด ทำหน้าที่กวนสารละลายใน Absorber Tank ให้ผสมกัน และป้องกันการตกตะกอนของหินปูน

หลังจากผ่านส่วนของ Absorber Tank แล้ว Flue Gas จะ ไหลขึ้นทางด้าน Absorber ไปสัมผัส กับน้ำหินปูนที่ถูกฉีดผ่านหัวฉีดที่รับน้ำหินปูนจาก Absorber Recirculation Pump น้ำหินปูนส่วนนี้ จะตกกระทบกับ Grid Packing ทำให้น้ำหินปูนแตกเป็นละอองน้ำทำให้มีพื้นที่สัมผัสกับก๊าซ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ใน Flue Gas ได้มากขึ้น ระหว่างชุดหัวฉีดด้านนี้กับชุดแลกเปลี่ยนความร้อนจะมี ตะแกรงดักไอน้ำ (Mist Eliminator) ติดอยู่เพื่อลดปริมาณ ไอน้ำที่จะออกไปกับ Treated Gas ซึ่งจะ ไปทำให้เกิดการกัดกร่อนที่บริเวณอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

2.1.3 ส่วนแยกน้ำออกจากยิปซัม (Gypsum Dewatering Section)

เมื่อเครื่องวัดความหนาแน่นตรวจวัดแล้วพบว่าในน้ำหिनปูนมีปริมาณของยิปซัมอยู่ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก สารละลายจะถูกบีบโดย Absorber Bleed Pump ส่งไปยัง Hydro Cyclone เพื่อแยกน้ำ และยิปซัมในชั้นแรก ส่วนที่เบากว่าจะถูกส่งกลับไปยัง Absorber Tank และส่วนที่หนักกว่า (ส่วนที่มีความเข้มข้นของยิปซัมสูง) จะถูกส่งไปยัง Gypsum Belt Filter ซึ่งเป็นสายพานสูญญากาศเมื่อ ยิปซัมผ่านสายพานนี้แล้วยิปซัมจะมีความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก จากนั้นยิปซัมจะถูก ลำเลียงโดยสายพาน (Gypsum Transfer Conveyor) ไปยังลานกองยิปซัมเพื่อนำไปฝังกลบต่อไป

ส่วนน้ำที่ถูกแยกออกจากยิปซัม และน้ำล้าง Gypsum Belt Filter จะถูกส่งไปยัง Filtrate Tank เพื่อนำกลับเข้ามาใช้ในระบบอีกครั้งหนึ่ง โดยการทำงานของส่วนแยกน้ำออกจากยิปซัมสามารถ สรุปเป็นแผนผังได้ดังรูปที่ 2.3

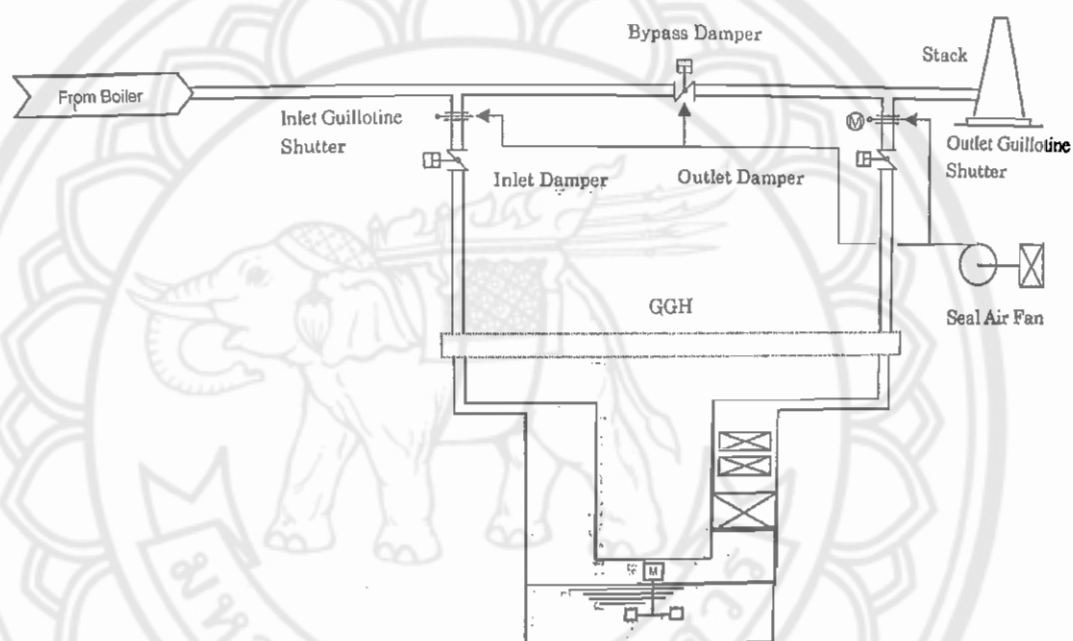


รูปที่ 2.3 แผนผังการทำงานโดยรวมของส่วนแยกน้ำออกจากยิปซัม

(ที่มา: Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.Mcec)

2.1.4 ส่วนท่อก๊าซและการแลกเปลี่ยนความร้อน (Flue Gas Ducting and Reheating)

ส่วนของท่อไอเสีย (Flue Gas Duct) ของระบบ FGD แสดงดังรูปที่ 2.4 เริ่มจากทางออกของพัดลมดูดส่ง (Induced draught Fan: I.D. Fan) ของหม้อไอน้ำดูดไอเสียผ่าน FGD Inlet Damper ผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิด Ljungstrom (Ljungstrom type regenerative Gas-to-Gas Reheater: GGH) Flue Gas ที่มีอุณหภูมิ 145°C จะมีอุณหภูมิลดลงเหลือประมาณ 110°C แล้วจึงเข้าสู่ส่วน Absorber แล้ว Treated Gas ที่มีอุณหภูมิ 55°C เมื่อผ่าน GGH แล้วอุณหภูมิของ Treated Gas จะเพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 81°C ก่อนปล่อยออกสู่บรรยากาศ

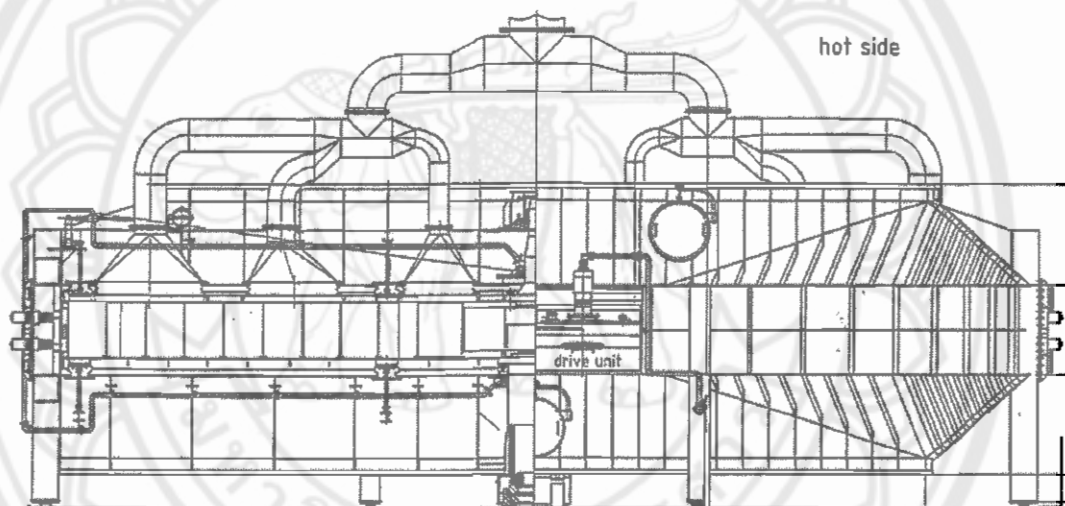


รูปที่ 2.4 แผนผังการทำงานโดยรวมของส่วนท่อก๊าซและการแลกเปลี่ยนความร้อน
(ที่มา: Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.Mccc)

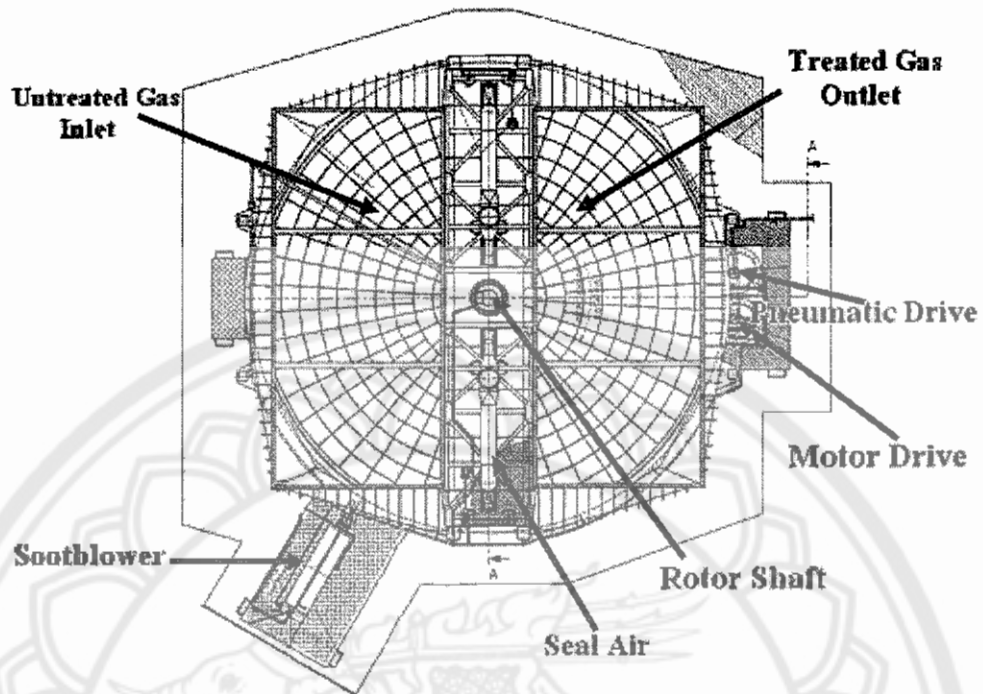
2.1.5 การทำงานของ Gas Gas Heater

Gas Gas Heater เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนประเภทรีเจนเนอเรเตอร์ที่มีเพลลาอยู่ในแนวตั้ง ติดตั้งอยู่ส่วนบนสุดของระบบกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ทำหน้าที่รับความร้อนจากไอเสีย (Flue gas) ที่มีอุณหภูมิสูง แล้วสะสมความร้อนไว้ในอุปกรณ์ทำความร้อน (Heating element) ที่ทำมาจากแผ่นเหล็กบางคัดขึ้นรูปแบบ NF 6 + E เคลือบด้วย Enamel เพื่อป้องกันการกัดกร่อน และเพื่อการถ่ายเทความร้อนได้ดี Gas Gas Heater หมุนอย่างต่อเนื่องด้วยความเร็ว 0.6 รอบต่อนาที เพื่อถ่ายเทความร้อนที่สะสมไว้ให้กับ ไอเสียที่ได้รับการกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์แล้ว (Treated gas) เพื่อให้ Treated gas ไหลออกจากระบบทาง Stack แล้วสามารถกระจายตัวได้ในบริเวณกว้างไม่กระจุกตัวอยู่บริเวณโคบรีเวนหนึ่ง (Stack effect)

องค์ประกอบของ Gas Gas Heater สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.5 ถึงรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.5 ภาพตัดขวางด้านข้างของ Gas-Gas-Heater
(ที่มา: Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.Mcec)



รูปที่ 2.6 ภาพตัดขวางด้านบนของ Gas-Gas-Heater
(ที่มา: Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.Mccc)



รูปที่ 2.7 Gas Gas Heater ด้าน Quencher

2.2 กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับระบบเปิด

ระบบเปิดหรือปริมาตรควบคุม (Control volume) คือระบบที่มีการไหลของมวลผ่านขอบเขตของระบบ มีอุปกรณ์ในงานทางวิศวกรรมหลายชนิดที่มีลักษณะเป็นระบบเปิด เช่น กังหัน (Turbine) เครื่องอัด (Compressor) หัวฉีด (Nozzle) และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) เป็นต้น

2.2.1 กฎการอนุรักษ์มวลสำหรับระบบเปิด

กฎการอนุรักษ์มวลสำหรับระบบเปิดใดๆ แสดงได้ดังต่อไปนี้

$$[\text{มวลที่เข้าสู่ระบบ}] - [\text{มวลที่ออกจากระบบ}] = [\text{มวลในระบบที่เปลี่ยนแปลง}]$$

สำหรับกระบวนการไหลคงตัว

$$[\text{มวลที่เข้าสู่ระบบ}] = [\text{มวลที่ออกจากระบบ}]$$

$$\dot{m}_i = \dot{m}_e \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลเชิงมวลกับอัตราการไหลเชิงปริมาตร เป็นดังนี้

$$\dot{m} = \rho \dot{V} \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

2.2.2 กฎการอนุรักษ์พลังงานสำหรับระบบเปิดที่มีการไหลคงตัว

เนื่องจากในกระบวนการไหลแบบคงตัว พลังงานในระบบมีค่าคงที่ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการได้ดังนี้

$$\dot{Q} - \dot{W} + \sum \dot{m}_i \left(h_i + \frac{V_i^2}{2} + gz_i \right) - \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) = 0$$

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) - \sum \dot{m}_i \left(h_i + \frac{V_i^2}{2} + gz_i \right)$$

สำหรับระบบที่ความเร็ว และความสูงของสารทำงานเปลี่ยนแปลงน้อยมาก และไม่มีงานเนื่องจากเพลานะไม่มีงานอื่นๆ นอกจากงานเนื่องจากการไหล จะได้

$$\dot{Q} = \sum \dot{m}_e h_e - \sum \dot{m}_i h_i$$

จากสมการ (2.1) จะได้

$$q = h_e - h_i \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

2.3 ก๊าซผสม

2.3.1 สัดส่วนเชิงมวลของก๊าซผสม

พิจารณาก๊าซผสมที่ประกอบด้วยส่วนประกอบ k ชนิด มวลรวมของก๊าซผสม m_m นี้จะมีค่าเท่ากับผลรวมของมวลของส่วนประกอบแต่ละชนิด สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$m_m = \sum_{i=1}^k m_i \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

อัตราส่วนระหว่างมวลของส่วนประกอบต่อมวลของก๊าซผสม เรียกว่า สัดส่วนเชิงมวล (Mass fraction), mf_i , สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$mf_i = \frac{m_i}{m_m} \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

จากความสัมพันธ์ $m = \rho V$ และสมการที่ (2.5) จะได้

$$mf_i = \frac{\rho_i}{\rho_m} \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

2.3.2 ค่าสมบัติของก๊าซอุดมคติ

ค่าสมบัติที่ไม่ขึ้นกับมวล (Intensive properties) ของก๊าซผสมสามารถคำนวณหาได้โดยวิธีการเฉลี่ยตามน้ำหนัก ดังสมการ

$$u_m = \sum_{i=1}^k mf_i u_i \quad (\text{kJ/kg}) \quad \dots\dots\dots (2.7)$$

$$h_m = \sum_{i=1}^k mf_i h_i \quad (\text{kJ/kg}) \quad \dots\dots\dots (2.8)$$

$$s_m = \sum_{i=1}^k mf_i s_i \quad (\text{kJ/kg}) \quad \dots\dots\dots (2.9)$$

$$C_{p,m} = \sum_{i=1}^k mf_i C_{p,i} \quad [\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})] \quad \dots\dots\dots (2.10)$$

2.4 ทฤษฎีของ Regenerator

2.4.1 สมมติฐานสำหรับวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนของ Regenerator

1. การทำงานของ Regenerator อยู่ภายใต้เงื่อนไขของ Quasi-steady-state คือ สารทำงานมีอัตราการไหลและอุณหภูมิคงที่ที่ทางเข้าของ Regenerator ทั้งสองด้าน (ด้านร้อนและด้านเย็น)
2. ความร้อนถ่ายเทระหว่างระบบกับสิ่งแวดล้อมมีค่าน้อยมาก
3. ไม่มีแหล่งกำเนิดความร้อนที่ผนังของ Regenerator หรือตัวของไหลเอง

4. ไม่มีการเปลี่ยนสถานะภายใน Regenerator
5. ความเร็วและอุณหภูมิของของไหลแต่ละด้านเป็นค่าคงที่ตลอดหน้าตัดการไหล และไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา
6. การวิเคราะห์ห้อยู่บนพื้นฐานของการใช้ค่าความเร็วและสมบัติทางความร้อนของของไหลที่เป็นค่าเฉลี่ย
7. ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลและอุปกรณ์ทำความร้อนเป็นค่าคงที่ตลอดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
8. การนำความร้อนในทิศทางการไหลของอุปกรณ์ทำความร้อนมีค่าน้อยมาก
9. อุณหภูมิของอุปกรณ์ทำความร้อนในแนวความหนาของแต่ละชั้นเป็นค่าคงที่
10. ไม่มีการรั่วไหลของสารทำงานจากด้านใดด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่ง
11. พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนของอุปกรณ์ทำความร้อนมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ
12. เวลาที่ต้องการใช้ในการสลับ Regenerator จากด้านของไหลร้อนไปยังด้านของไหลเย็นมีค่าน้อยมาก
13. การถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการแผ่รังสีความร้อนมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการพาความร้อน
14. เวลาที่ของไหลอยู่ในอุปกรณ์ทำความร้อนสั้นมาก ดังนั้น จึงกล่าวได้ว่าไม่มีมวลของของไหลสะสมในอุปกรณ์ทำความร้อน ทำให้ไม่มีการรั่วไหลของสารทำงานจากด้านใดด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่ง

2.4.2 นิยามและรายละเอียดของตัวแปรที่สำคัญ

ความสัมพันธ์ของ Heat capacity rate “C”

$$C_j = \dot{m}c_{p,j}$$

$$\bar{C}_j = M_j c_{p,j} = C_j \tau_{d,j} = \left(\frac{CL}{u_m} \right)_j \quad j = h \text{ หรือ } c \quad \dots\dots\dots (2.11)$$

ค่า Heat capacity rate ของอุปกรณ์ทำความร้อน

$$\bar{C}_r = M_w c_w \quad \dots\dots\dots (2.12)$$

$$C_r = M_w c_w N = \bar{C}_r N \quad \dots\dots\dots (2.13)$$

ค่าความพรุนของอุปกรณ์ทำความร้อนที่มีการไหลแบบต่อเนื่อง
 นิยาม “ค่าความพรุนของอุปกรณ์ทำความร้อน คือ อัตราส่วนของพื้นที่การไหลกับพื้นที่
 ด้านหน้าของแกนกลาง”

$$\sigma = \frac{A_o}{A_f} \dots\dots\dots (2.14)$$

2.4.3 สมการทั่วไป

Hot Period: Fluid

$$C_h T_h - C_h \left(T_h + \frac{\partial T_h}{\partial x} dx \right) - h_h \frac{A_h dx}{L} (T_h - T_{w,h}) = \bar{C}_h \frac{dx}{L} \frac{\partial T_h}{\partial \tau_h} \dots\dots\dots (2.15)$$

แทนค่า \bar{C}_h จากสมการ (2.11) จะได้

$$\frac{\partial T_h}{\partial \tau_h} + \frac{L}{\tau_{d,h}} \frac{\partial T_h}{\partial x} = \frac{(hA_h)}{C_h \tau_{d,h}} (T_{w,h} - T_h) \dots\dots\dots (2.16)$$

Hot Period: Matrix (Heating Element)

$$\left(\frac{\bar{C}_{r,h}}{L} \frac{dx}{L} \right) \frac{\partial T_{w,h}}{\partial \tau_h} = h_h \frac{A_h dx}{L} (T_h - T_{w,h}) \dots\dots\dots (2.17)$$

เมื่อรวมสมการ (2.17) กับสมการ (2.13) จะได้

$$\frac{\partial T_{w,h}}{\partial \tau_h} = \frac{(hA)_h}{C_{r,h} P_h} (T_h - T_{w,h}) \dots\dots\dots (2.17)$$

Cold Period: Fluid and Matrix

$$-\frac{\partial T_c}{\partial \tau_c} + \frac{L}{\tau_{d,c}} \frac{\partial T_c}{\partial x} = \frac{(hA_c)}{C_c \tau_{d,c}} (T_c - T_{w,c}) \dots\dots\dots (2.18)$$

$$-\frac{\partial T_w}{\partial \tau_c} = \frac{(hA_c)}{C_{r,c} P_c} (T_{w,c} - T_c) \dots\dots\dots (2.19)$$

เงื่อนไขขอบเขต

- อุณหภูมิของก๊าซร้อนที่เข้า Regenerator มีค่าคงที่ตลอดช่วงที่มีการไหลของก๊าซ

- อุณหภูมิของก๊าซเย็นที่เข้า Regenerator มีค่าคงที่ตลอดช่วงที่มีการไหลของก๊าซ

$$T_h(0, \tau_h) = T_{h,i} = \text{constant} \quad \text{สำหรับ } 0 \leq \tau_h \leq P_h \quad \dots\dots\dots (2.20)$$

$$T_c(L, \tau_c) = T_{c,i} = \text{constant} \quad \text{สำหรับ } 0 \leq \tau_c \leq P_c \quad \dots\dots\dots (2.21)$$

2.4.4 การหาค่าประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

ค่าการถ่ายเทความร้อนจริงของ Rotary regenerator

$$\dot{q} = C_h(T_{h,i} - \bar{T}_{h,o}) = C_c(\bar{T}_{c,o} - T_{c,i}) \quad \dots\dots\dots (2.22)$$

สำหรับอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนที่สมบูรณ์แบบ

$$\dot{q}_{\max} = C_{\min}(T_{h,i} - T_{c,i}) \quad \dots\dots\dots (2.23)$$

เมื่อ C_{\min} คือ ค่าที่น้อยที่สุดระหว่าง C_h และ C_c

- การหาค่าประสิทธิภาพ “ ε ” ด้วยวิธีทางความร้อน

การหาค่าประสิทธิภาพด้วยวิธีทางความร้อน สามารถหาได้จากสมการ ดังต่อไปนี้

$$\varepsilon = \frac{q}{q_{\max}} = \frac{C_h(T_{h,i} - \bar{T}_{h,o})}{C_{\min}(T_{h,i} - T_{c,i})} = \frac{C_c(\bar{T}_{c,o} - T_{c,i})}{C_{\min}(T_{h,i} - T_{c,i})} \quad \dots\dots\dots (2.24)$$

- การหาค่าประสิทธิภาพ “ ε ” ด้วยวิธีกลุ่มตัวแปรไร้มิติ (NTU_0)

การหาค่าประสิทธิภาพด้วยวิธี NTU_0 สามารถหาได้จากสมการ ดังต่อไปนี้

$$\varepsilon = \phi[NTU_0, C^*, C_r] \quad \dots\dots\dots (2.25)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_{cf} \left[1 - \frac{1}{9(C_r^*)^{1.93}} \right] \quad \dots\dots\dots (2.26)$$

$$\varepsilon_{cf} = \frac{1 - \exp[-NTU_0(1 - C^*)]}{1 - C^* \exp[-NTU_0(1 - C^*)]} \quad \dots\dots\dots (2.27)$$

$$NTU_0 = \frac{UA}{C_{\min}} \quad \dots\dots\dots (2.28)$$

$$C^* = \frac{C_{\min}}{C_{\max}} \quad \dots\dots\dots (2.29)$$

$$C_r^* = \frac{C_r}{C_{\min}} \quad \dots\dots\dots (2.30)$$

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (Overall Heat Transfer Coefficient) “ UA ” สามารถหาได้จากสมการ ดังต่อไปนี้

$$q = \dot{m}_h c_{p,h} (T_{h,i} - \bar{T}_{h,o}) = UA \Delta T_{lm} \quad \dots\dots\dots (2.31)$$

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln(\Delta T_2 / \Delta T_1)} \quad \dots\dots\dots (2.32)$$

เมื่อ

$$\Delta T_1 = T_{h,i} - T_{c,o}$$

$$\Delta T_2 = T_{h,o} - T_{c,i}$$

