บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผู้วิจัยได้ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

1. ทฤษฎีการเผาไหม้
2. หลักการหม้อไอน้ำเบื้องต้น
3. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchange)
4. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีการเผาไหม้

การเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาทางเคมี ระหว่างเชื้อเพลิงและออกซิเจนซึ่งมีการปลดปล่อยพลังงานความร้อนออกมาพร้อมกันกับการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ปฏิกิริยาที่ให้ความร้อนออกมาความร้อนนี้ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักเชื้อเพลิง ก็คือ ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงนั้น (Heating Value) ปกติเราใช้อากาศซึ่งมีอยู่ทั่วไปเป็นแหล่งออกซิเจนในการเผาไหม้ เพื่อเป็นการใช้เชื้อเพลิงอย่างมีประสิทธิภาพจึงควรทำความเข้าใจกระบวนการเผาไหม้ ซึ่งเป็นการรวมตัวของออกซิเจนเข้ากับคาร์บอน ไฮโดรเจนและซัลเฟอร์ เกิดเป็นสารประกอบใหม่คือ คาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำและซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ซึ่งสามารถเขียนอยู่ในรูปของสมการได้ดังนี้

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

$$C + O_2 = CO_2 \quad (2.1)$$

$$2H_2 + O_2 = 2H_2O \quad (2.2)$$

แต่ปกติกำมะถัน (S) ในเชื้อเพลิง จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนด้วย คือ

$$S + O_2 = SO_2 \quad (2.3)$$

แต่กำมะถันในเชื้อเพลิงชีวมวลนั้นมีปริมาณน้อย จึงไม่มีความจำเป็นที่ต้องนำมาพิจารณาในกระบวนการเผาไหม้ (ในแง่ของการให้ความร้อน)

นอกจากนี้ยังมีปฏิกิริยาปลีกย่อยที่เกิดขึ้นในการเผาไหม้อีกมา เช่น

$$CO_2 + C = 2CO$$
$$C + H_2O = CO + H_2$$
$$2CO_2 - = 2CO + O_2 \qquad (2.4)$$

โดยปกติแล้วจะสมมติว่าไม่เกิดขึ้น เพราะอุณหภูมิของปฏิกิริยาการเผาไหม้ต่ำและเพื่อความสะดวกในการคำนวณทางด้านการเผาไหม้

การเผาไหม้จะเกิดได้ดีจะต้องมีสภาวะที่เหมาะสม นั่นคือ ต้องมีอากาศที่เพียงพอ มีอุณหภูมิที่สูงพอ มีเวลามากพอในการเกิดปฏิกิริยา และมีการผสมผสานของเชื้อเพลิงกับอากาศที่ดีในการเผาไหม้เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาได้สมบูรณ์ จึงต้องเพิ่มปริมาณอากาศให้เพียงพอ ซึ่งจะได้อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงจริงสูงกว่าอัตราส่วนตามทฤษฎี อากาศเกินพอที่ต้องการนั้นเรียกว่า อากาศส่วนเกิน หรืออากาศมากเกินพอ (Excess Air)

<u>หลักการหม้อไอน้ำเบื้องต้น</u>

ไอน้ำ เป็นสิ่งจำเป็นอย่างหนึ่งในอุตสาหกรรม ซึ่งอาจใช้ไอน้ำโดยตรง เช่น ในขบวนการผลิตทางเคมี ในการให้ความร้อน ในด้านเป็นต้นกำลังสำหรับขับเคลื่อน หรือในทางอ้อมก็คือการผลิตไฟฟ้าโดยตรงโรงจักรพลังไอน้ำ

เมื่อไอน้ำมีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมดังกล่าว ฉะนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาถึงอุปกรณ์ที่กำเนิด ได้แก่ หม้อไอน้ำและอุปกรณ์ประกอบ บทนี้จะทำการศึกษาในด้านต่อไปนี้

1. โครงสร้างของหม้อไอน้ำและหลักการผลิตไอน้ำ
2. อุปกรณ์ประกอบต่าง ๆ ของหม้อไอน้ำ
3. ขนาดและประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ
4. การผลิตและการใช้ไอน้ำอย่างมีประสิทธิภาพ

ซึ่งเน้นเฉพาะหม้อไอน้ำขนาดเล็กที่ใช้น้ำมันเชื้อเพลิง เนื่องจากในอุตสาหกรรมมีใช้เป็นส่วนมาก

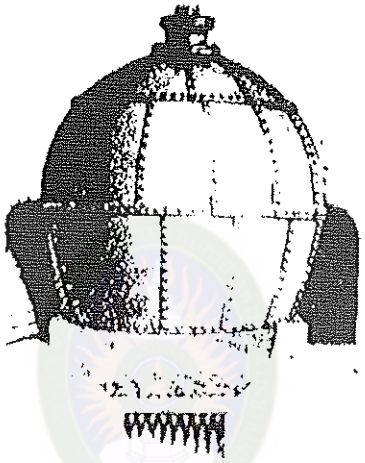
เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

อาจจะประกอบด้วยเครื่องมือต่อไปนี้ เพียงบางส่วนหรือทั้งหมดก็ได้ แล้วแต่สภาพของไอน้ำและการใช้งาน ได้แก่ หม้อไอน้ำ เตาเผา อุปกรณ์เกี่ยวข้องกับเชื้อเพลิง เครื่องอุ่นน้ำ

เลี้ยง เครื่องอุ่นอากาศ เครื่องแยกไอน้ำ ซูเปร์ฮีทเตอร์ และอีโคโนไมเซอร์ เป็นต้น ส่วนสำคัญคือหม้อไอน้ำอุปกรณ์อื่น ๆ เป็นเพียงส่วนประกอบที่จะอำนวยความสะดวก ความปลอดภัยและคุณภาพของไอน้ำ

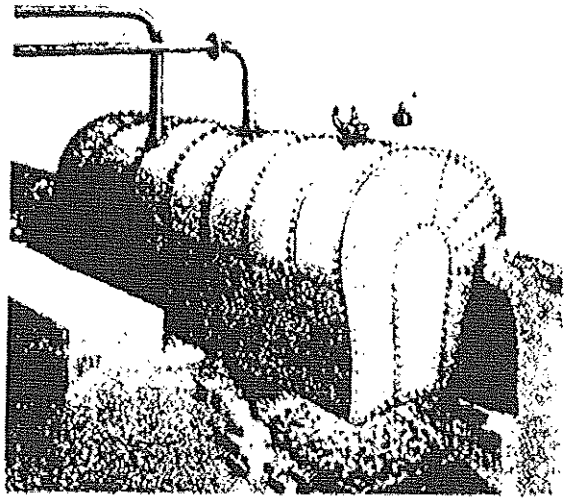
ประวัติหม้อไอน้ำ

หม้อไอน้ำคือภาชนะที่บรรจุน้ำแล้วมีความดันมาทำให้น้ำเดือดกลายเป็นไอคล้ายกับกาต้มน้ำนั่นเอง แต่แตกต่างจากกาน้ำที่หม้อไอน้ำทำงานที่ความดันและอุณหภูมิสูงกว่ากาน้ำ สร้างขึ้นในคริสต์ศตวรรษที่ 18 แบบแรกถูกสร้างขึ้นเป็นแบบหลอดไฟ (Fire tube) ดังภาพประกอบ 1 และ 2 (สุชัย ศศิวิมล. 2539)

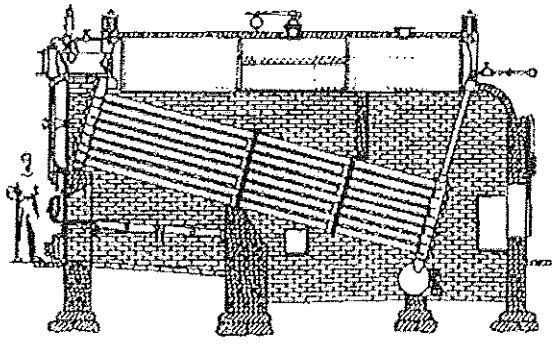


ภาพประกอบ 1 หม้อไอน้ำหลอดไหแนวตั้งในอดีต

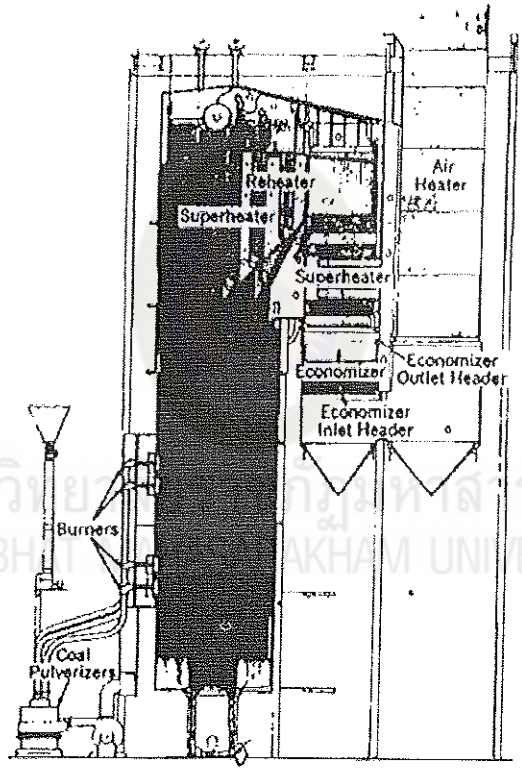
มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY



ภาพประกอบ 2 หม้อไอน้ำหลอดไฟแนวนอนในอดีต



ภาพประกอบ 5 หม้อไอน้ำหลอดน้ำแนวเฉียงในอดีต



มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

ภาพประกอบ 6 หม้อไอน้ำหลอดน้ำขนาดใหญ่

ละ 1 Ton/hr สรุปแล้วถ้าเป็นไปตามแผนงาน 5 ปี จะใช้ไอน้ำ 5 Ton/hr เช่นนี้ทุกปี ปีละตัว เพราะว่าราคาหม้อไอน้ำขนาด 1 Ton/hr กับ 5 Ton/hr มิใช่ราคาต่างกัน 5 เท่าตัว ถ้าหากซื้อหม้อไอน้ำขนาดใหญ่ไปราคาสูงกว่านี้ ทำให้ต้นทุนการผลิตไอน้ำสูงและทำให้หม้อไอน้ำทำงานไม่เต็มที่ด้วย ก็จะไม่ประหยัดเชื้อเพลิงเช่นกัน

ชนิดของไอน้ำ จะต้องพิจารณาของไอน้ำที่ต้องการนำมาใช้กับงานการผลิต เช่น ไอน้ำอิ่มตัว ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง เนื่องจากชรนิดของไอน้ำมีผลต่อต้นกำเนิดคือ หม้อไอน้ำแบบหลอดน้ำสามารถผลิตไอน้ำร้อนยวดยิ่งด้วย ถ้าโรงงานอุตสาหกรรมต้องการไอน้ำในการผลิตทั้ง 2 ชนิด ก็ต้องทราบว่าต้องการอย่างไหนมากกว่ากัน เช่น โรงงานต้องการไอน้ำทั้งสิ้น 5 Ton/hr เป็นไอน้ำอิ่มตัว 4 Ton/hr และไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 1 Ton/hr แบบนี้ไม่ต้องซื้อหม้อไอน้ำ 2 ลูก แยกจากกัน เพียงแต่ซื้อหม้อไอน้ำชนิดที่ผลิตไอน้ำอิ่มตัว 5 Ton/hr 1 ลูก แล้วซื้ออุปกรณ์ซุปเปอร์ฮีทเตอร์ที่สามารถใช้กับไอน้ำขนาด 1 Ton/hr ประกอบเข้าไปอีก 1 ชุดก็พอ หรือในทางกลับกันก็ซื้อหม้อที่ผลิตไอร้อนยวดยิ่งขนาด 5 Ton/hr มา 1 ลูก แล้วติดอุปกรณ์พวกรีซุปเปอร์ฮีทเตอร์ขนาด 4 Ton/hr 1 ชุดได้ ซึ่งแล้วแต่ความเหมาะสมที่จะต้องพิจารณาในหัวข้อต่อไป

ชนิดของเชื้อเพลิง ในการพิจารณาหม้อไอน้ำ ปัญหาเกี่ยวกับเชื้อเพลิงที่จะเป็นตัวให้ความร้อน มีความจำเป็นต้องคำนึงให้มาก การจะใช้เชื้อเพลิงชนิดไหน จะต้องซื้ออุปกรณ์เกี่ยวกับการเผาไหม้เชื้อเพลิงนั้นมาให้ถูก ถ้าสั่งมาผิดจะแก้ไขยาก โดยเฉพาะการใช้เชื้อเพลิงแข็งเปลี่ยนมาใช้เชื้อเพลิงเหลว บางครั้งห้องเผาไหม้ไม่สามารถทำงานได้ก็เสียค่าใช้จ่ายมากเกินไป การที่จะใช้เชื้อเพลิงชนิดหน ก็ต้องพิจารณาถึงค่าแคลอริฟิคของเชื้อเพลิงเทียบกับราคาต่อหน่วยของเชื้อเพลิงนั้น ๆ อันไหนถูกก็ใช้อันนั้น ค่าบำรุงรักษาอุปกรณ์เกี่ยวกับการเผาไหม้ก็ต้องนำมาพิจารณาด้วย

อายุการใช้งาน ด้านอายุการใช้งานของหม้อนั้น ในปัจจุบันหม้อไอน้ำสมัยใหม่อายุการใช้งานแต่ละลูก อายุมากว่า 10 ปีขึ้นไปทั้งสิ้น เพราะชิ้นส่วนต่าง ๆ สามารถจะเปลี่ยนได้เช่นเดียวกับเครื่องยนต์สันดาปภายใน การที่จะมีอายุนานมากน้อยแค่ไหนขึ้นกับการบำรุงรักษาของผู้ใช้มากกว่า ฉะนั้นเรื่องอายุการใช้งานที่จะต้องนำมาพิจารณาเกี่ยวข้องกับการสั่งซื้อก็คือ จะต้องทราบว่าโรงงานอุตสาหกรรมนั้น ๆ มีแผนการผลิตช่วงเวลานานมากน้อยแค่ไหน ถ้ามีเวลาสั้นก็อาจจะซื้อหม้อไอน้ำเก่าที่ยังใช้งานได้มาก็พอ จะได้ลดต้นทุนการผลิตลงได้ เช่น โรงงานอุตสาหกรรมต้องการผลิตงานอย่างหนึ่ง ต้องการใช้ไอน้ำเพียงโครงการระยะ 3 ปี หลังจากนั้นจะเลิกผลิต แบบนี้ก็ควรซื้อของเก่ามากกว่าลงทุนซื้อของใหม่

ด้านเศรษฐศาสตร์ เมื่อพิจารณาถึงองค์ประกอบ ทั้ง 4 ข้อข้างต้นแล้ว สิ่งหนึ่งของผู้ผลิตจะต้องคิดมากคือ ต้นทุนในการลงทุนและราคาต้นทุนการผลิตตลอดจนสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ ซึ่งต้องพิจารณาด้วย โดยเฉพาะปัญหาสิ่งแวดล้อมเป็นพิษสำหรับหม้อไอน้ำคือควันไอเสีย

หม้อไอน้ำแบบหลอดไฟ

หลักการทำงาน อากาศร้อนไหลในท่อซึ่งรอบ ๆ ท่อภายในล้อมรอบด้วยน้ำ โดยปกติเป็นหม้อไอน้ำขนาดเล็กที่มีความดันไม่เกิน 18 bar และสามารถเลือกผลิตไอน้ำได้ไม่เกิน 11.5 Ton/hr. ไอน้ำที่ผลิตได้เป็นแบบไอน้ำอิ่มตัวเท่านั้น แบ่งตามลักษณะโครงสร้างได้ 2 แบบ คือ

ห้องเผาไหม้อยู่ภายนอกหม้อ (External Furnace)

ห้องเผาไหม้อยู่ภายในหม้อไอน้ำ)Internal Furnace)

หม้อไอน้ำที่มีเตาอยู่ภายนอก (Horizontal Returns Tobular or External Furnace) (H.R.T.)

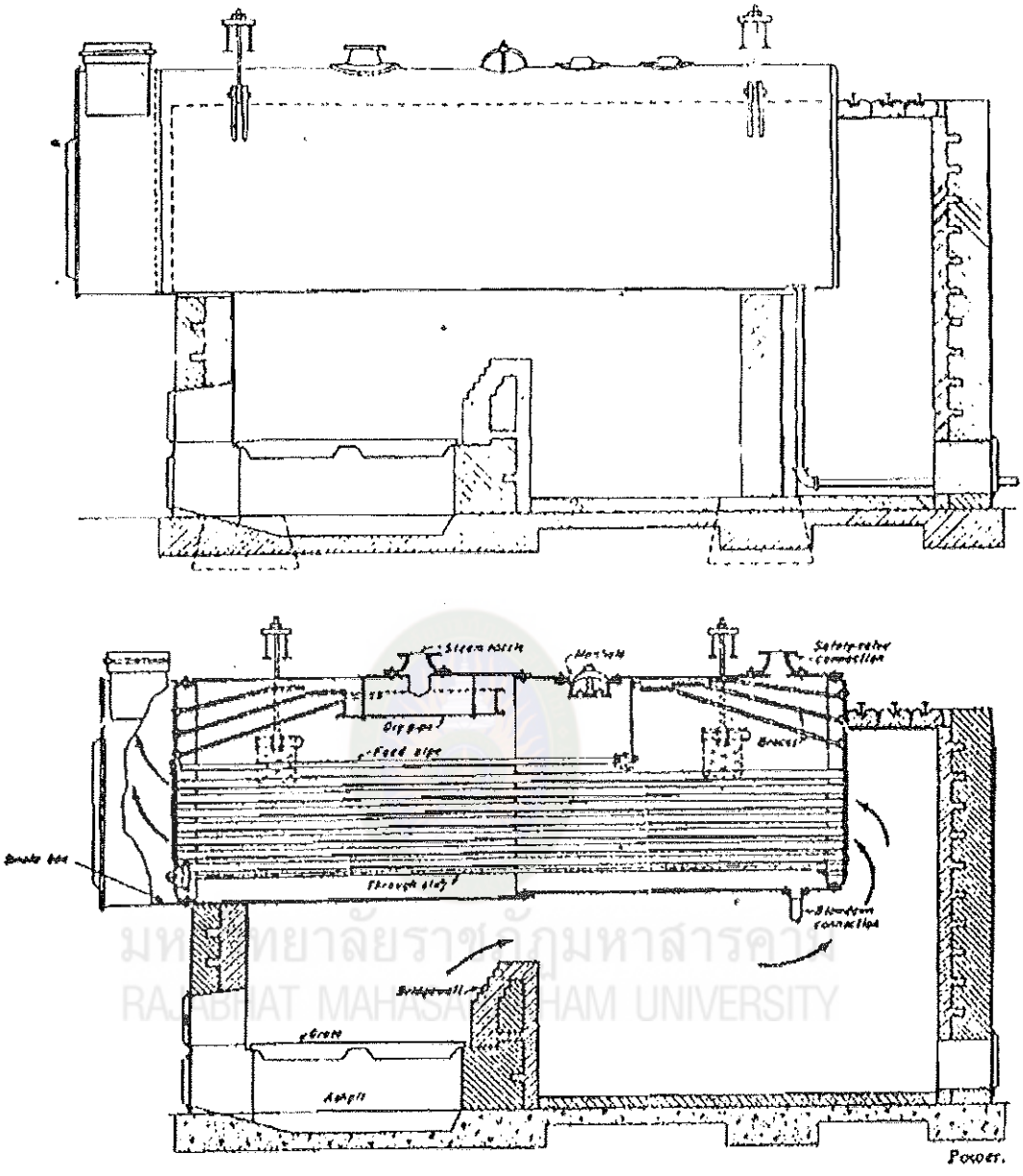
แบบนี้ทั่ว ๆ ไปการเผาไหม้จะเกิดขึ้นที่ภายนอกก่อนเข้าหม้อซึ่งเป็นรูปทรงกระบอกนอน

หม้อไอน้ำที่เตาอยู่ภายใน (Internal Furnace or Scotch Type)

ซึ่งแบบนี้จะมีเตา (Furnace) อยู่ภายในหม้อไอน้ำ (Boiler) การเผาไหม้จะเกิดภายในเตา (Furnace) ก่อนแล้วส่งผ่านเข้าท่อ ซึ่งมีทั้งแบบตั้งฉากและแนวระนาบกับพื้น

นอกจากนี้ยังสามารถแบ่งตามลักษณะการไหลของ Hot Gas ซึ่งไม้ไอน้ำใหม่แบบแพคเก็จ (package) นิยมสร้างกัน แบ่งออกได้ดังนี้

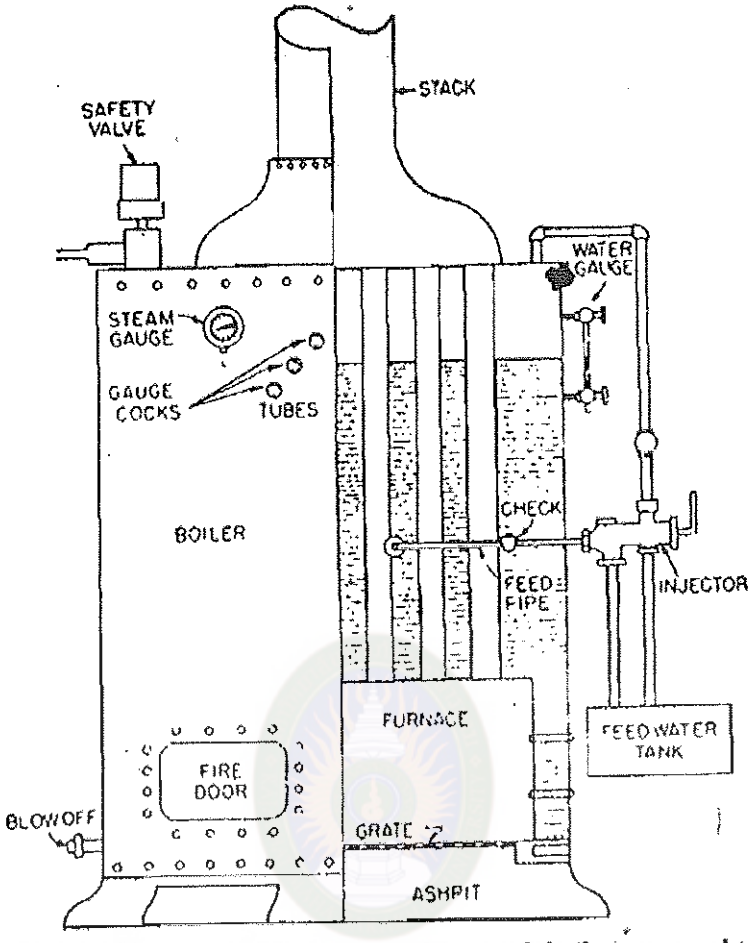
1. ชนิดไฟไหลในท่อ 2 กลับผนังแห้ง (2 Pass Dry Back) ภาพประกอบ 8
2. ชนิด 3 กลับผนังแห้ง (3 Pass Dry Back) ดังภาพประกอบ 11
3. ชนิด 3 กลับผนังเปียก (3 Pass Wet Back) ภาพประกอบ 11
4. ชนิด 4 กลับผนังแห้งหรือเปียก (4 Pass Wet or Dry Back) ภาพประกอบ 13



Typical setting of an HRT boiler.

ภาพประกอบ 8 หม้อไอน้ำท่อไฟที่มีเตาอยู่ด้านนอก

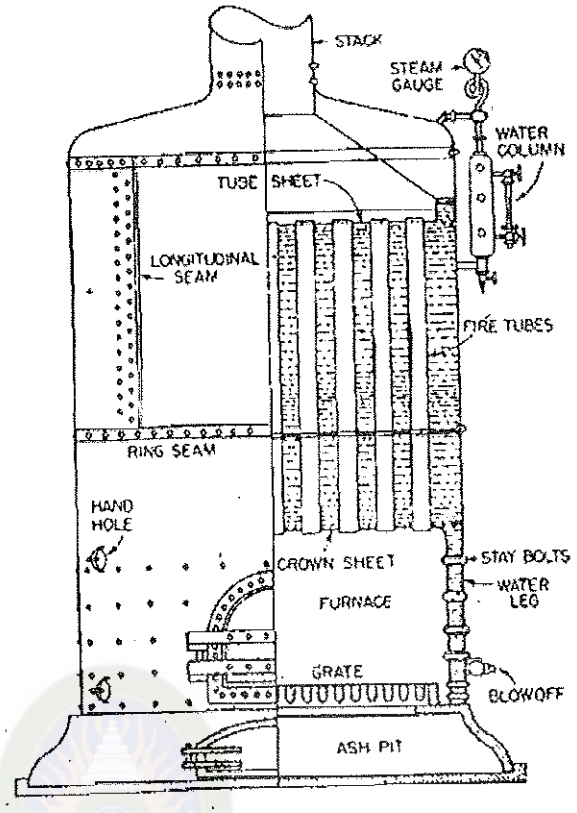
มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY



Sectional view of vertical boiler—exposed tube

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

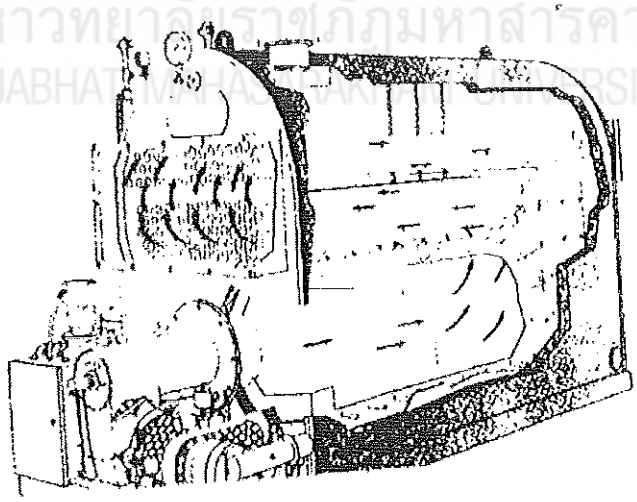
ภาพประกอบ 9 หม้อไอน้ำท่อไฟในแนวตั้ง



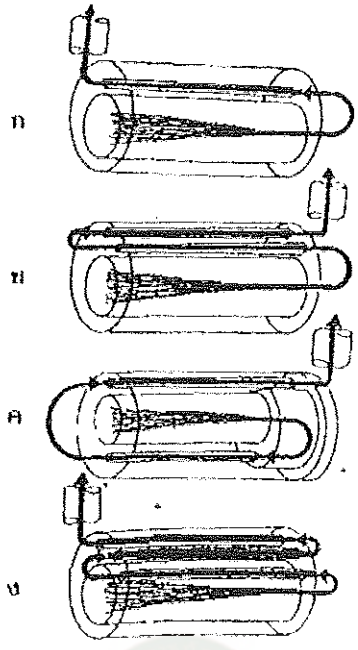
Sectional view of vertical boiler—submerged-tube type.

ภาพประกอบ 10 หม้อไอน้ำในแนวตั้ง

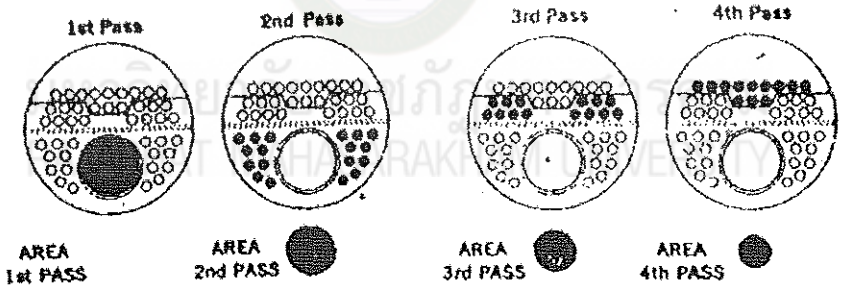
มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY



ภาพประกอบ 11 แสดงทิศทางการไหลของ Flue Gas



ภาพประกอบ 12 แสดงการไหล



ภาพประกอบ 13 แสดงการไหลของแก๊สร้อน 1 2 3 และ 4 กลับตามลำดับ

หม้อไอน้ำชนิดหลอดน้ำ

ในแบบนี้น้ำหรือไอน้ำจะไหลผ่านตามท่อ ซึ่งจะมีอากาศร้อนไหลผ่านรอบ ๆ ผิวนอกของท่อ ใช้กับหม้อไอน้ำขนาดใหญ่ ความดันสูง กำลังผลิตไอน้ำสูงถึง 450 Ton/hr.

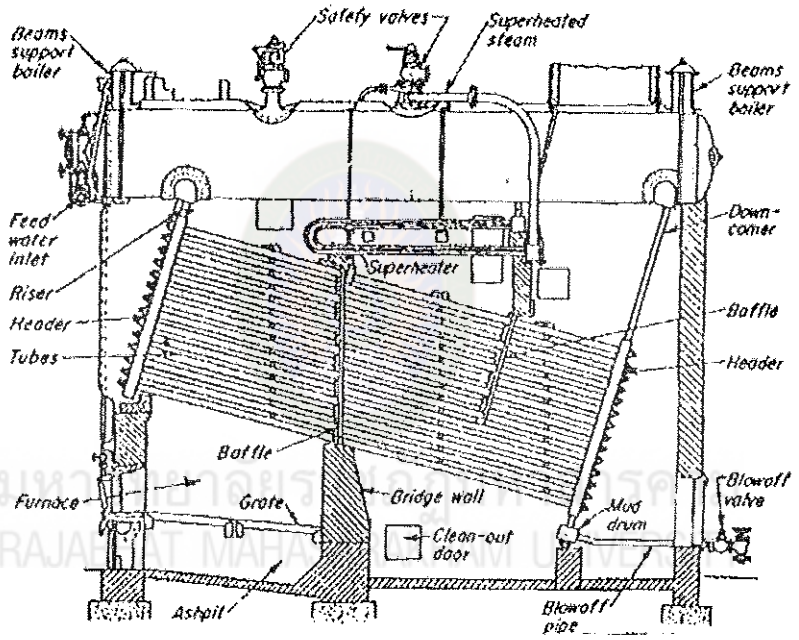
ถ้าแบ่งตามลักษณะโครงสร้างท่อของหม้อไอน้ำแบบหลอดน้ำได้ดังนี้

1. ชนิดท่อเอียงหรือท่อตรง (Inclined - Tube Boiler or Straight Tube) ภาพประกอบ

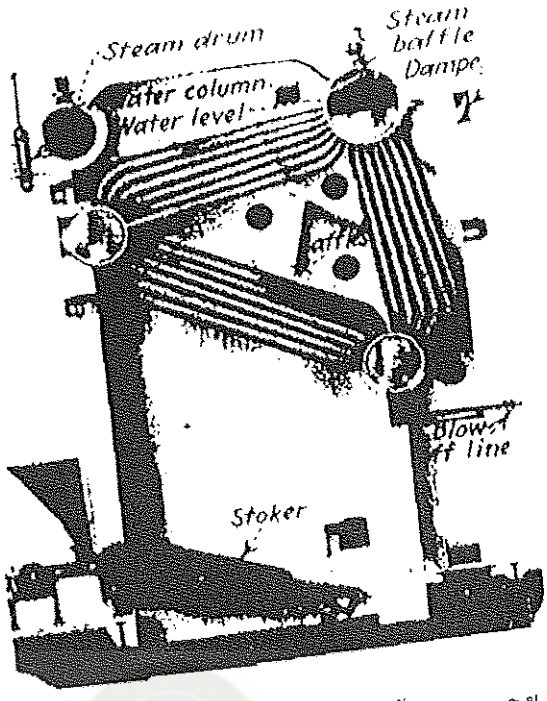
2. ชนิดท่อโค้ง (Bent – Tube Boiler) เป็นหม้อไอน้ำ (Boiler) ขนาดกลางมีกำลังการผลิตไอน้ำ (Capacity) 4.5 Ton/hr. ถึง 27 Ton/hr. ดังภาพประกอบ 15

แต่ถ้าแบ่งตาลักษณะโครงสร้างของหม้อพัก (Drum) ได้ 3 แบบ คือ แบบ A (A – Type) แบบ D (D Type) และแบบ O (O Type) ดังภาพประกอบ 16 17 และ 18

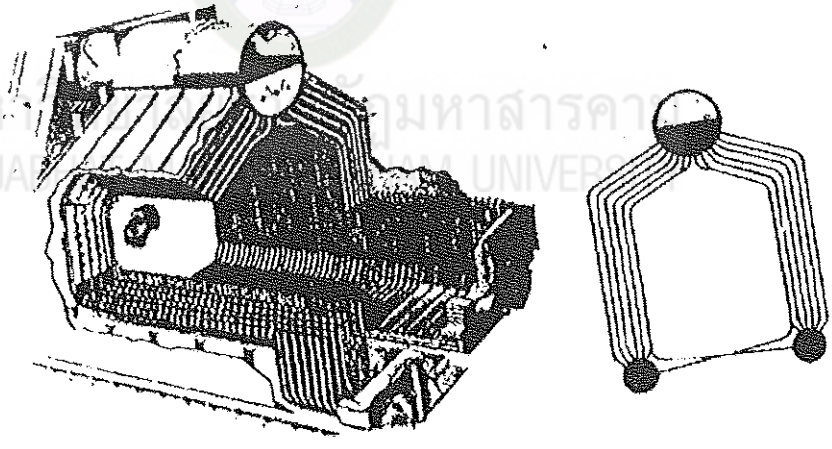
แบบต่าง ๆ ที่แสดงไว้นั้นเป็นการออกแบบไว้ตามแบบแพคเก็จ (Package Type) ถ้าขนาดใหญ่กว่านี้ การออกแบบก็ขึ้นอยู่กับความต้องการของแต่ละลักษณะงาน



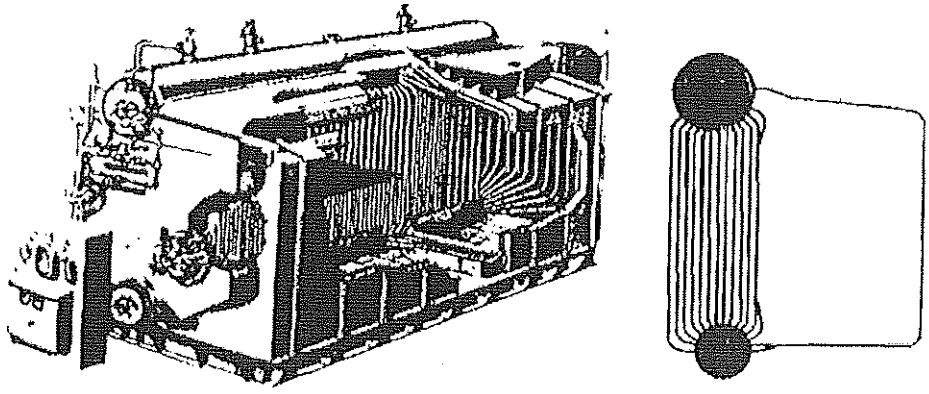
ภาพประกอบ 14 หม้อไอน้ำหลอดน้ำชนิดท่อตรงแนวเฉียง



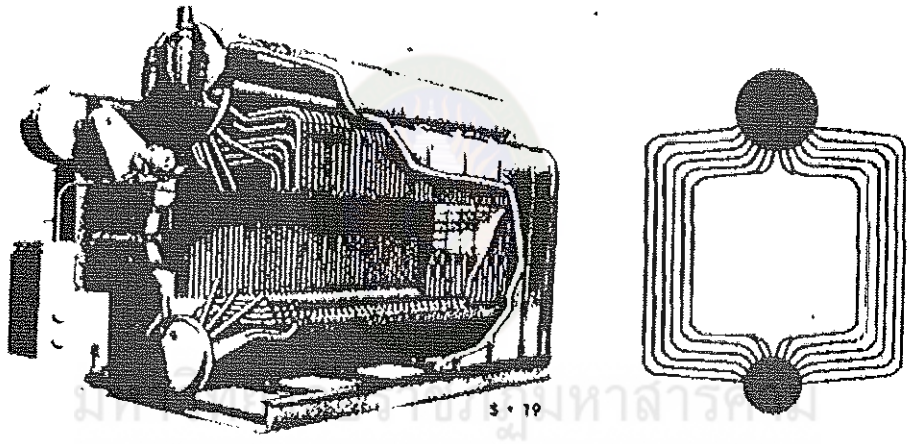
ภาพประกอบ 15 หม้อไอน้ำหลอดน้ำชนิดท่อโค้ง



ภาพประกอบ 16 แบบ A – Type Drum



ภาพประกอบ 17 แบบ D – Type Drum



ภาพประกอบ 18 แบบ O – type Drum

การเปรียบเทียบระหว่างข้อดี ข้อเสีย ของหม้อกำเนิดไอน้ำ แบบหลอดน้ำกับหลอดไฟ

ข้อดีหม้อไอน้ำแบบหลอดไฟ

1. มีขนาดเล็ก กะทัดรัด เมื่อเทียบกับแบบหลอดน้ำ
2. สามารถสร้างเป็นหน่วยเล็ก ๆ ได้ง่าย
3. คุณภาพน้ำไม่ต้องการที่บริสุทธิ์มากนัก
4. สะดวกในการทำความสะอาดและการซ่อมแซม
5. จ่ายไอน้ำได้สม่ำเสมอ
6. สามารถควบคุมการทำงานได้ทั้งแบบธรรมดาและแบบอัตโนมัติ

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

ข้อเสียของหม้อไอน้ำแบบหลอดไฟ

1. มีน้ำหนักมากเมื่อเทียบต่อหน่วยพิกัดไอน้ำที่ผลิตได้
2. ไม่สามารถแร่งไอน้ำได้มาก
3. ความดันต่ำ

ส่วนประกอบของหม้อไอน้ำ

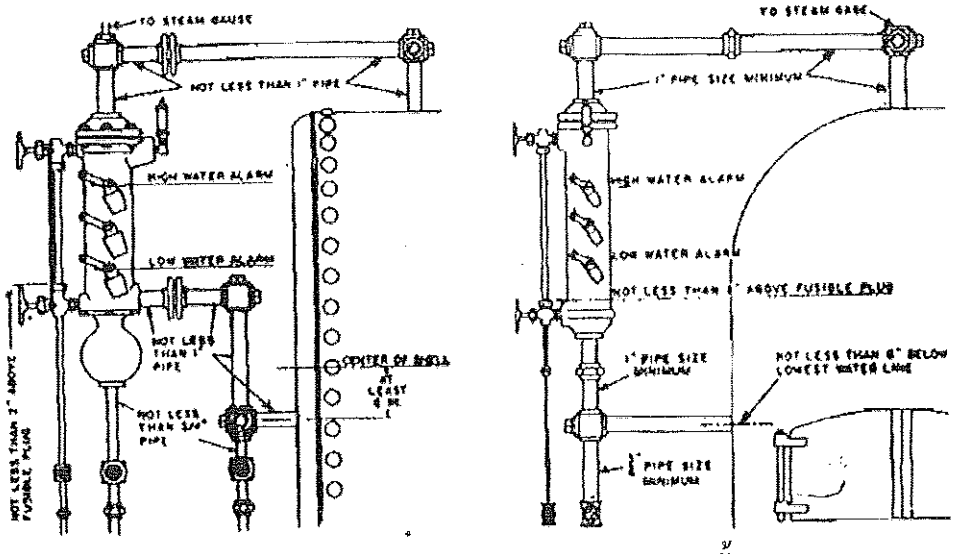
โดยปกติหม้อไอน้ำจะมีอุปกรณ์อีกหลายชิ้นประกอบอยู่ เพื่อทำหน้าที่ควบคุมและวัดค่าต่าง ๆ ซึ่งมีดังต่อไปนี้

1. มาตรวัดความดันไอน้ำ (Steam Pressure Gauge) ทำหน้าที่วัดความดันภายในหม้อไอน้ำว่ามากน้อยแค่ไหน

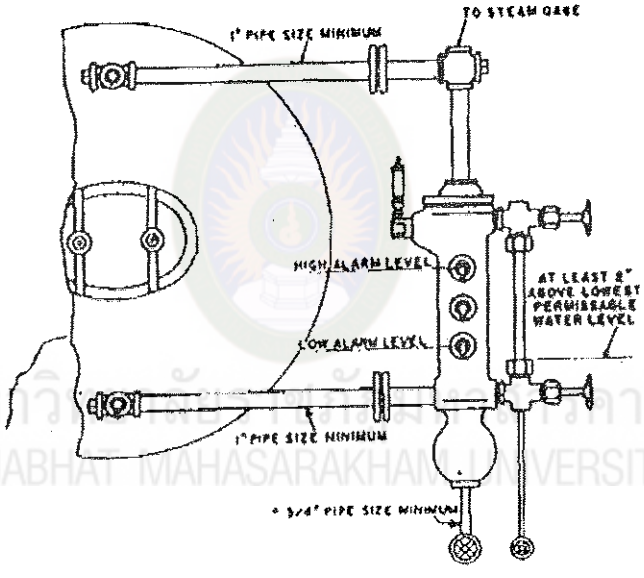
2. หลอดแก้ววัดระดับ (Water level Column) ทำหน้าที่ตรวจวัดระดับน้ำภายในหม้อไอน้ำมีมากน้อยเท่าใด ดังภาพประกอบ 19 และ 20

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์ งานวิจัย สำนักวิทยบริการฯ มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม



ภาพประกอบ 19 หลอดแก้ววัดระดับสำหรับแนวตั้ง

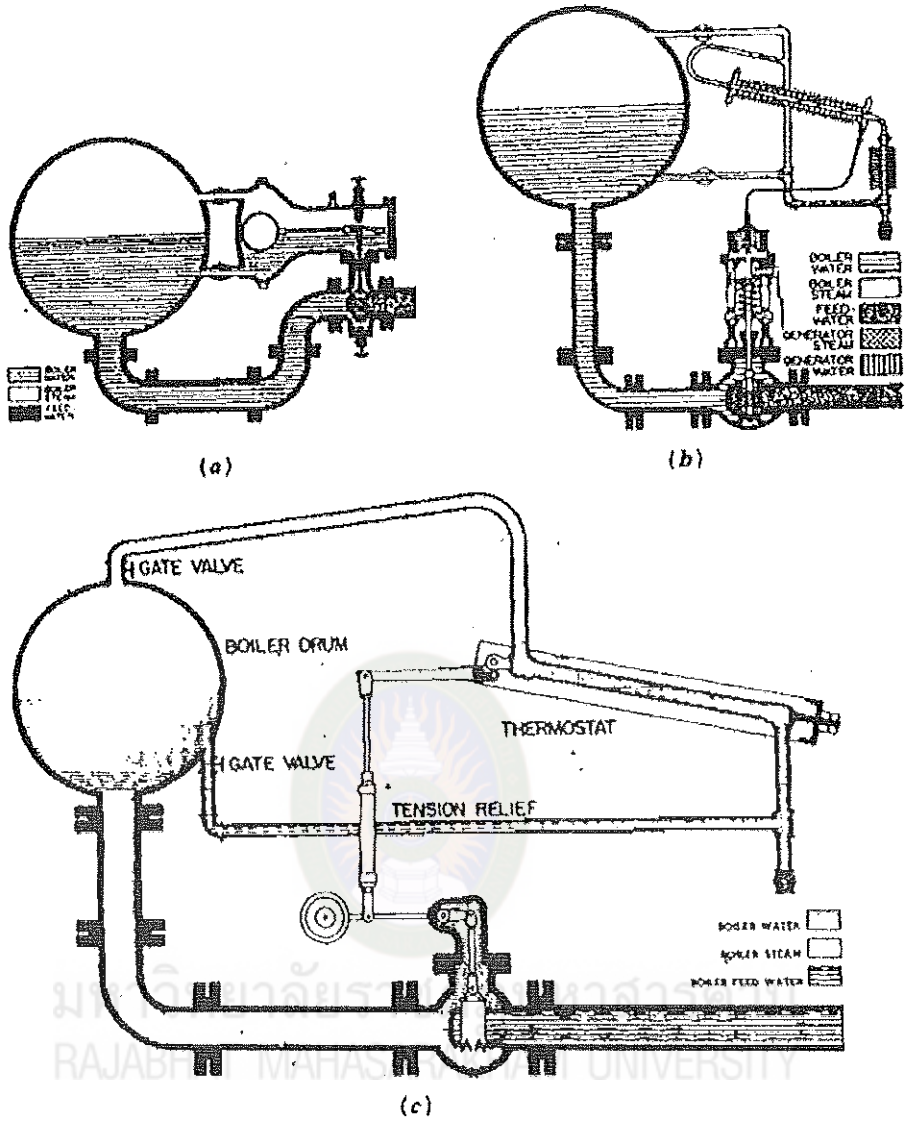


มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

ภาพประกอบ 20 หลอดแก้ววัดระดับสำหรับแนวนอน

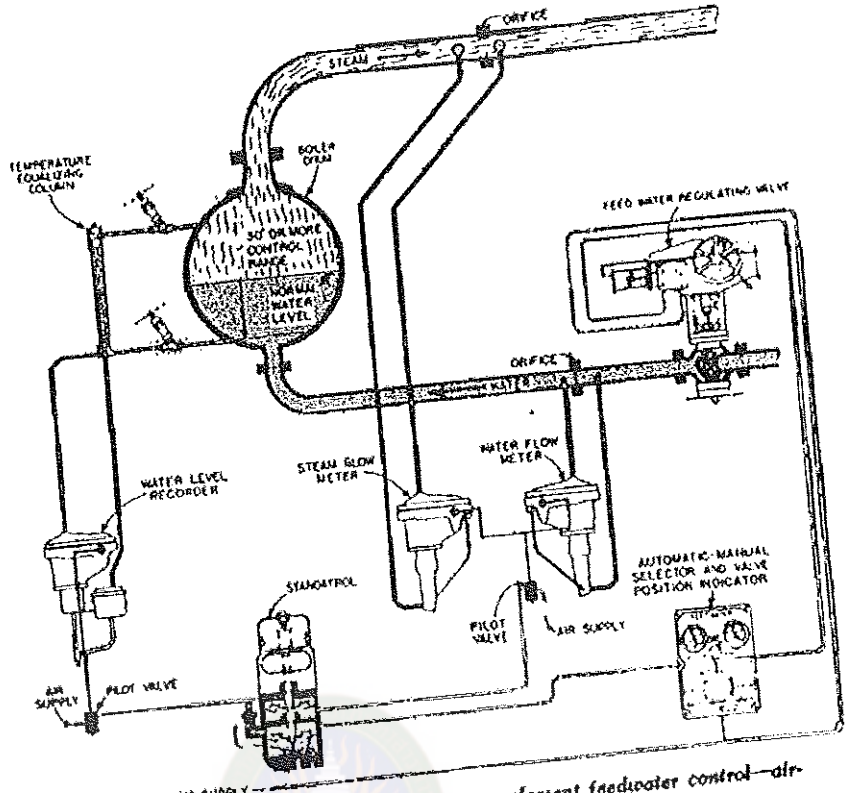
3. ชุดควบคุมระดับน้ำเลี้ยงหม้อไอน้ำ (Feed Water Regulator) ทำหน้าที่ควบคุมการจ่ายน้ำเข้าไปในหม้อไอน้ำ เพื่อรักษาระดับน้ำภายในหม้อไอน้ำมีระดับอยู่คงที่ (เกือบ) (เพราะในขณะที่หม้อไอน้ำทำงาน น้ำจะเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอ ระดับน้ำย่อมลดลง) หลักการทำงานของชุดควบคุมระดับน้ำเลี้ยง (Feed Water Regulator) นั้นทำงานในแบบอัตโนมัติ (Automatically) ซึ่งมีอยู่แบบต่าง ๆ กันเช่น Float Lever , Thermo Hydraulic, Thermostatic Expansion และ Pneumatic

199679



ภาพประกอบ 21 ชุดควบคุมระดับน้ำเลี้ยงหม้อไอน้ำ

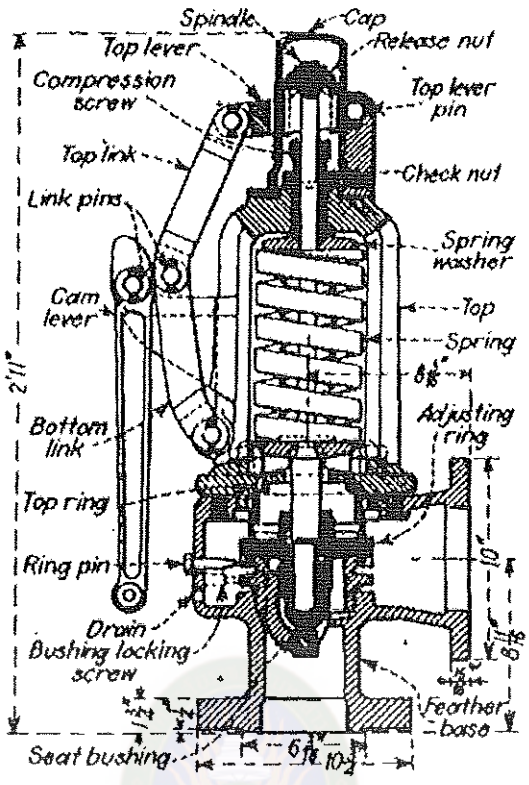
มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY



Diagrammatic layout of three-element feedwater control—air-operated type. (Bailey Meter Co.)

ภาพประกอบ 22 ชุดควบคุมระดับน้ำเลี้ยงหม้อไอน้ำ

4. ลิ้นนิรภัย (Safety Valve) ทำหน้าที่ควบคุมความดันภายในหม้อไอน้ำไม่ให้สูงเกินกว่าที่กำหนด (ถ้าความดันในหม้อไอน้ำสูงกว่าที่กำหนด อาจจะทำให้อุปกรณ์และหม้อไอน้ำทนแรงอัดไม่ได้ เกิดการระเบิด) หลักการทำงาน ถ้าความดันสูงกว่าที่กำหนด ลิ้นนิรภัยจะเปิดวาล์วแบบอัตโนมัติให้ไอน้ำในหม้อไอน้ำได้ระบายออกอยากรวดเร็ว เพื่อให้ความดันภายในหม้อไอน้ำต่ำลง ส่วนประกอบดังภาพประกอบ 23

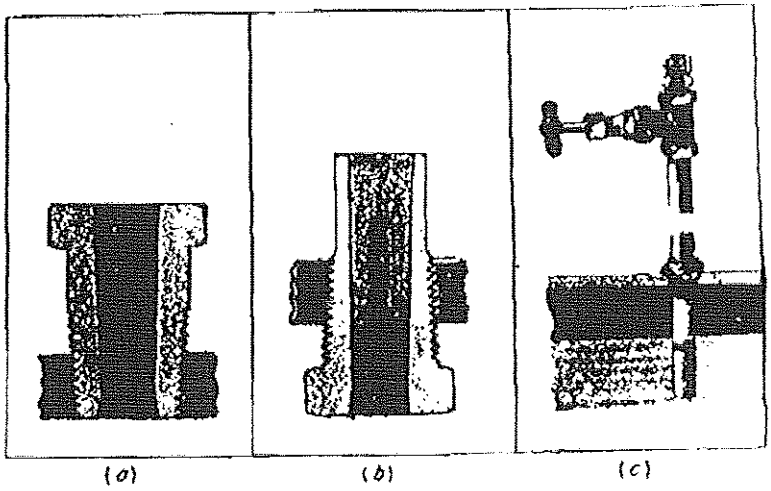


ภาพประกอบ 23 ลิ้นนิรภัย

5. Blow Offs or Blow Down Valve เป็นลิ้นที่ทำหน้าที่ปล่อยน้ำที่อยู่ในหม้อไอน้ำที่สกปรกจากหม้อไอน้ำ

6. ชุดควบคุมความดันและอุณหภูมิ (High Limit) Pressure or Temperature Control) ทำหน้าที่สร้างสำหรับตัดวงจรการเผาไหม้ในหม้อไอน้ำ เมื่อความกันหรืออุณหภูมิภายในหม้อไอน้ำสูงขึ้น จนถึงตำแหน่งที่ตั้งไว้ เครื่องมือนี้สามารถปรับหรือตั้งให้ตัดที่ความดันหรืออุณหภูมิใดที่ต้องการได้

7. Fusible Plugs ในหม้อไอน้ำขนาดเล็กที่ทำงานต่ำกว่า 15 bar นั้น บางแบบจะมีเครื่องมือเหล่านี้ติดอยู่ ซึ่งเครื่องมือเหล่านี้ทำหน้าที่คล้ายคล้ายกับลิ้นนิรภัย ดังภาพประกอบ 24 เครื่องมือเหล่านี้จุดหลอมเหลว 235o C ถูกใส่ไว้ตรงระดับน้ำต่ำสุดในหม้อไอน้ำที่จะยอมให้ได้ (ถ้าต่ำกว่านี้แล้วความดันในหม้อนี้จะสูงเกินกว่ากำหนดคือ เตาร้อนเกินไป จุดหลอมเหลวของเครื่องมือไว้ก็จะทำให้เครื่องมือนี้หลอมเหลว ไอน้ำจะหนีออกมาได้ เป็นการลดความดันทำให้ผู้ควบคุมทราบได้ทันท่าในขณะนั้นหม้อไอน้ำร้อนเกินพิกัด



ภาพประกอบ 24 Fusible Plugs

8. ปั๊มน้ำเลี้ยง (feed Pump) ทำหน้าที่ปั๊มน้ำจากถังพักน้ำหรือถังอุ่นน้ำเข้าสู่หม้อไอน้ำซึ่งปั๊มที่ใช้กันมี 3 แบบ คือ

8.1 ปั๊มแบบแรงเหวี่ยง (Centrifugal Pump)

8.2 ปั๊มโรตารี่ (Rotary Pump)

8.3 ปั๊มลูกสูบ (Reciprocating Pump)

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

<u>เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchange)</u>

เจริญพร เลิศสถิตธนกร (2546) กล่าวถึง เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน คือ อุปกรณ์ที่ใช้ถ่ายเทความร้อนของของไหลตัวหนึ่งไปสู่ของไหลอีกตัวหนึ่ง หลักการที่ง่ายที่สุดในการแลกเปลี่ยนความร้อน คือ การนำเอาของไหลที่เย็นและร้อนมาผสมกันเข้าโดยตรง แต่โดยทั่วไปมักจะจัดให้ของไหลทั้งสอง ไหลอยกออกจากกันโดยมีผนังเป็นตัวกั้น ลักษณะการแลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้เรียกว่า รีคูเพอเรเตอร์ (Recuperator) ซึ่งอาจจัดอยู่ในรูปของผนังระนาบง่าย ๆ ที่กั้นอยู่ระหว่างของไหลที่มีการไหลทั้งสอง ไปสู่การไหลที่ซับซ้อนตามลักษณะการจัดการและรวมทั้งการจัดให้ของไหล ไหลผ่านเข้าไปหลาย ๆ ครั้ง อาจใช้ครีบหรือตัวกั้นเพื่อบังคับทิศทางของการไหล ในการถ่ายเทความร้อนนี้ จะเป็นการนำความร้อนและการพาความร้อนและบางครั้งมีการแผ่รังสี

ชนิดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนอย่างง่ายประกอบด้วยท่อสองท่อที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางต่างกันวางซ้อนกันอยู่เรียกว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อซ้อน ของไหลชนิดหนึ่งไหลผ่านท่อเล็ก ๆ ขณะที่ของไหลอีกชนิดหนึ่งจะไหลผ่านท่อใหญ่ การไหลจะมีสองแบบคือ

1. ไหลขนานกัน (Parallel Flow) คือของไหลเย็นและร้อนจะไหลไปในทิศทางเดียวกัน

2. ไหลสวนทางกัน (Counter Flow) คือ ของไหลเย็นและร้อนจะไหลในทิศทางตรงข้ากัน

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ออกแบบมาให้มีพื้นที่ผิวระนาบความร้อนต่อนึ่งหน่วยปริมาตรมาก เรียกว่า เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบกะทัดรัด (Compact heat Exchange) อัตราส่วนของพื้นที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อนต่อปริมาณของมันเรียกว่า ความหนาแน่นของพื้นที่ (The Area Density, β)

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มี $\beta > 700\ m^2/m^3\ (200ft^2/ft^3)$ จัดเป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบกะทัดรัด ตัวอย่างเช่น หม้อไอน้ำรถยนต์ ($\beta \approx 1000\ m^2/m^3$) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้สามารถใช้ได้ดีมีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงและมักจะประยุกต์ใช้กับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีข้อจำกัดทั้งน้ำหนักและปริมาณ

พื้นที่ผิวส่วนใหญ่ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบกะทัดรัดนั้นเกิดจากการทำเป็นครีบ เช่น แผ่นแบนบาง ติดพื้นที่ผนังท่อ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบกะทัดรัด ใช้แลกเปลี่ยนความร้อนได้ทั้งก๊าซกับก๊าซและก๊าซกับของเหลว

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

การไหลของของไหลในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบกะทัดรัดจะไหลตั้งฉากกันเรียกว่า ไหลข้ามกัน (Cross Flow) การไหลข้ามกันยังแบ่งออกเป็นการไหลแบบไม่ผสมและผสมกันอีกด้วย

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มักพบในโรงงานอุตสาหกรรมเรียกว่า Shell and Tube Heat Exchange

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้จะบรรจุท่อจำนวนมากไว้ (บางครั้งเป็นร้อย ๆ ท่อ) จะบรรจุไว้ในเปลือก โดยวางในแนวขนานกันกับเปลือก การถ่ายเทความร้อนจะเกิดจากการไหลของของไหลในท่อขณะที่ของไหลอีกชนิดหนึ่งไหลนอกท่อผ่านเปลือก แผ่นกั้น (Buffles) จะถูกติดตั้งในเปลือกเพื่อช่วยเพิ่มระยะเวลาให้ของไหลสัมผัสกับท่อได้นานขึ้นและเพิ่มการถ่ายเทความร้อน Shell and Tube Heat Exchange ไม่เหมาะที่จะใช้ในรถยนต์ เครื่องบิน หรือเรือ เนื่องจากมีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมาก

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยทั่วไปจะเกี่ยวข้องกับการไหลของของไหลสองอย่างซึ่งจะถูกแยกจากกันโดยผนัง ความร้อนจะถูกถ่ายเทจากของไหลร้อนสู่ผนังโดยการพาผ่านผนังโดยการนำและออกจากผนังด้วยของไหลเย็นโดยการพาอีกครั้งหนึ่ง ผลของการแผ่รังสีความร้อนมักจะถูกรวมไว้ใน ส.ป.ส. การพาความร้อนแล้ว

การวิเคราะห์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

ในการวิเคราะห์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เรามักจะรวมความต้านทานความร้อนทุกตัวในเส้นทางการไหลของความร้อนจากของไหลร้อนสู่ของไหลเย็นเป็นความต้านทานตัวเดียว อัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลทั้งสองคือ

$$Q = \frac{\Delta T}{R} = UA\Delta T = U_i A_i \Delta T = U_0 A_0 \Delta T \qquad (2.5)$$

เมื่อ U คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (The Overall Heat Transfer Coefficient, W/m^2C)

ถ้ากำจัด ΔT ออก จะลดรูปลงเหลือ

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{U_1 A_1} = \frac{1}{U_0 A_0} = R = \frac{1}{h_i A_i} + R_{wall} + \frac{1}{h_0 A_0} \qquad (2.6)$$

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

เมื่อผนังท่อยาวและวัสดุที่ผิวท่อมีค่าการนำความร้อนสูง ค่าความต้านทานความร้อนของท่ออาจตัดทิ้งได้ ($R_{wall} \approx 0$) พื้นที่ผิวภายในและภายนอกมีค่าใกล้เคียงกัน ($A_i \approx A_0 \approx A$) ดังนั้น ค่า ส.ป.ส. การถ่ายเทความร้อนรวมจะกลายเป็น

$$\frac{1}{U} \approx \frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_0} \qquad (2.7)$$

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมักจะทำงานเป็นระยะเวลายาวนาน โดยไม่เปลี่ยนแปลงเงื่อนไขของการทำงาน ดังนั้นเราจะกำหนดให้เป็นอุปกรณ์ที่อยู่ในสภาวะคงตัว (Steady – flow – devices) เช่น อัตราการไหล และอุณหภูมิ เป็นต้น แม้ว่าอาจมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วและระดับ แต่ก็เล็กน้อยเท่านั้นจะไม่คิดผลของพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ ไม่คิดผลของการเปลี่ยนแปลงค่าความร้อนจำเพาะของของไหล ที่ผิวด้านนอกของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีการหุ้ม

ฉนวนอย่างดี ซึ่งไม่มีการสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อม การถ่ายเทความร้อนเกิดระหว่างของไหลทั้งสองเท่านั้น

ภายใต้สมมติฐานที่กล่าวมานั้น ทำให้สามารถหาอัตราการถ่ายเทความร้อนของของไหลร้อนและเย็น คือ

$$Q_c = m_c\ Cp_c\ (T_{c,out} - T_{cmin}) \quad (2.8)$$

$$Q_c = m_h Cp_h\ (T_{h,in} - T_{h\text{-}out}) \quad (2.9)$$

ตัวห้อย c และ h แทนของไหลเย็นและร้อนตามลำดับ

ตัวห้อย in และ out แทนทางเข้าและออกตามลำดับ

m คือ อัตราการไหลเชิงมวล

Cp คือ ค่าความร้อนจำเพาะ

T คือ อุณหภูมิขาออก

เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน จะทำการรวมค่าความร้อนจำเพาะกับอัตราการไหลเชิงมวลเข้าด้วยกันเรียกว่าอัตราจุความร้อน (Heat Capacity Rate)

$$C = mCp$$

ดังนั้น

$$Q_c = C_c\ (T_{c,out} - T_{cmin}) \quad (2.10)$$

$$Q_c = C_h\ (T_{h,in} - T_{h\text{-}out}) \quad (2.11)$$

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดพิเศษที่ใช้ในทางปฏิบัติคือ เครื่องควบแน่น (Condensers) และหม้อไอน้ำ (Boilers) ของไหลชนิดหนึ่งในจะอยู่ภายใต้กระบวนการเปล่อยสถานะ (Phase – Change)

อัตราการถ่ายเทความร้อนคือ

$$Q = mh_{fg} \quad (2.12)$$

เมื่อ m = อัตราการระเหยหรือิ่มตัวของของไหล

h_{fg} = เอนทาลปีของการุกลายเป็นไอ

Kays and London (Holman. 1997) ได้เสนอวิธีคำนวณในปี ค.ศ. 1955 เรียกว่า Effectiveness – NTU method วิธีนี้จะใช้พารามิเตอร์ไร้หน่วยที่เรียกว่า Effectiveness

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_{mas}} = \frac{\text{Actual heat transfer rate}}{\text{Max.possibleheattransferrate}} \qquad (2.13)$$

อัตราการถ่ายเทความร้อนจริงในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถคำนวณจากการสมดุลพลังงานที่ของไหลร้อนและเย็น

$$Q = C_c\ (T_{c,out} - T_{c,in}) = Ch\ (T_{h,in} - T_{h,out}) \qquad (2.14)$$

อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่เป็นไปได้

$$\Delta T_{max} = T_{h,in} - T_{c,in}$$

การถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะมีค่าสูงสุดเมื่อ

1. ของไหลเย็นถูกทำให้ร้อนเท่ากับอุณหภูมิขาเข้าของของไหลร้อน
2. ของไหลร้อนถูกทำให้เย็นเท่ากับอุณหภูมิขาเข้าของของไหลเย็น

สองเงื่อนไขนี้จะไม่เกิดขึ้นพร้อมกันเว้นแต่ $C_c = C_h$

ถ้า $C_c \neq C_h$ ซึ่งโดยปกติมักเป็นกรณีนี้ ของไหลที่มีค่าความจะความร้อนต่ำจะมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมาก ดังนั้นการถ่ายเทความร้อนสูงสุดในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนคือ

$$Q_{max} = C_{mn}\ (T_{h,in} - T_{c,in}) \qquad (2.16)$$

เมื่อ C_{min} เป็นค่าน้อยของ C_c หรือ C_h

ความสัมพันธ์ของ Effectiveness ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน จะเกี่ยวข้องกับตัวแปรไร้หน่วย UA/Cmin จะเรียกว่า Number of Transfer Unit (NTU)

$$NTU = \frac{UA}{C_{min}} \qquad (2.17)$$

ในการวิเคราะห์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อความสะดวกเราจะนิยามตัวแปรไร้หน่วยที่เรียกว่าอัตราส่วนความจุ (capacity Ratio, C)

$$C = \frac{C_{min}}{C_{max}} \qquad (2.18)$$

ดังนั้น Effectiveness ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะเป็นฟังก์ชันของ NTU และ C

สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการเปลี่ยนสถานะ เช่น หม้อไอน้ำ

$$C = \frac{C_{min}}{C_{max}} \rightarrow 0,\ C_{max} \rightarrow \infty$$

ในกรณีนี้ $\varepsilon = \varepsilon_{max} = 1 - \exp(-NTU)$ (2.19)

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของเตา สามารถคำนวรหาได้ดังนี้

$$\eta = \frac{m_l Cp_l (T_{flue} - T_l)}{m_f HHV} \times 100 \qquad (2.20)$$

เมื่อ η_r = ประสิทธิภาพของเตาเผา, %

m_a = อัตราการไหลของอากาศ , kg/s

Cp = ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ, kJ/kg.K

T_a = อุณหภูมิล้อมรอบ, K

T_l = อุณหภูมิทางออกของเตา , K

m_f = อัตราการป้อนเชื้อเพลิง, kg/s

HHV = ค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิง, kJ/kg

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการเผาไหม้คาร์บอน

$$\eta_c = \frac{C_h - C_a}{C_h} \times 100$$

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

เมื่อ η_c = ประสิทธิภาพการเผาไหม้คาร์บอน, %

C_a = ร้อยละของคาร์บอนในเถ้า × น้ำหนักเถ้า, kg

C_h = ร้อยละของคาร์บอนในเชื้อเพลิง × น้ำหนักเชื้อเพลิง, kg

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ

$$\eta_{system} = \frac{m_h(h_e - h_c)}{m_f HHV} \times 100 \qquad (2.22)$$

เมื่อ η_b = ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ, %

m_s = อัตราการไหลของไอน้ำ, kg/s

h_c = เอนทาลปีของไอน้ำที่ออกจากระบบ, kJ/kg

hi = เอนทาลปีของน้ำที่เข้าสู่ระบบ, kJ/kg

mf = อัตราการป้อนเชื้อเพลิง, kg/S

HHV = ค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิง, kJ/kg

การวิเคราะห์ประสิทธิผลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

$$\varepsilon = \frac{Q_{act}}{Q_{max}} = \frac{m_h Cp_b (T_{h,i} - T_{h,0})}{C_{mm}(T_{h,i} - T_{c,t})}$$

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY

เมื่อ ε = ประสิทธิผลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

Q_{act} = อัตราการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องทำได้จริง, kW

Q_{max} = อัตราการถ่ายเทอความร้อนเครื่องทำได้สูงสุด, kW

M_h = อัตราการไกลของของไหลร้อน, kg/s

Cp_h = ความจุความร้อนจำเพาะของของไหลร้อน, kJ/kg.K

C_{mm} = อัตราจุความร้อนที่น้อยที่สุด, kJ/s.K

$T_{h,1}$ = อุณหภูมิของไหลร้อนที่ทางเข้า, K

$T_{h,0}$ = อุณหภูมิของไหลร้อนที่ทางออก, K

$T_{c,i}$ = อุณหภูมิของไหลเย็นที่ทางเข้า, K

เผาไหม้สูงสุดของกากมันสำปะหลัง เปลือกถั่วลิสงและฟางข้าว มีค่าเท่ากับ 7.25 6.0 และ 7.15 ตามลำดับ จะได้ค่าประสิทธิภาพเท่ากับร้อยละ 99.71 99.07 และ 9782 ตามลำดับ และพบว่าอุณหภูมิเหนือเบดสูงกว่าอุณหภูมิในเบดเป็นเพราะชีวมวลที่ใช้มีสารระเหยสูง

สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ และคณะ (2543 : 68 – 80) ได้ทำการทดลองโดยการป้อนแกลบ 110-136 กก./ชม. อากาศส่วนเกินร้อยละ 265 – 350 อุณหภูมิของอากาศเผาไหม้อยู่ในช่วง 523 – 710 องศาเซลเซียส ที่ความสูงของเถ้าบนตะแกรงขณะเผาไหม้ 30 45 50 และ 60 ซม. พบว่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาทั้งระบบเพิ่มขึ้นตามอากาศส่วนเกินโดยมีค่าร้อยละ 57 – 73 ประสิทธิภาพการเผาไหม้คาร์บอนมีค่าร้อยละ 89 – 97

สำราญ ธิช่างทอง (2543 : 77 - 78) ได้ทำงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ การพัฒนาเครื่องต้นแบบของเครื่องอบแห้งกุ้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง เตาเผาจะมีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกหรือทรงเหลี่ยมก็ได้ขึ้นอยู่กับการออกแบบ การเผาไหม้ในเตาฟลูอิดไดซ์เบดเกิดขึ้นโดยเชื้อเพลิงจะถูกพยุงให้ลอยตัวด้วยก๊าซหรืออากาศที่เข้าสู่เตาเผาโดยผ่านแผ่นกระจายลม เชื้อเพิงจะมีสภาพคล้ายของไหล ภายในเตาเผาจะมีเบดที่ร้อน เช่น ทราย รวมทั้งเถ้าที่เกิดจากการเผาไหม้ ลักษณะการเผาไหม้ในเตาฟลูอิดไดซ์เบดก็จะมีลักษณะคล้ายกับผาแบบไวโดน คือมีการผสมผสานระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศได้ดีตลอดเวลา และเป็นการเผาไหม้เชื้อเพลิงคุณภาพต่ำได้ดี ให้ประสิทธิภาพในการเผาไหม้ดี สามารถควบคุมมลพิษได้ง่าย

Permchart และ Kouprianov (2004 : 83-91) ได้ศึกษาเตาเผาเชื้อเพลิงชีวมวลแบบฟลูอิดไดซ์เบดที่ใช้ร่วมกับหม้อไอน้ำ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเผาไหม้ขี้เลื่อย แกลบ และชานอ้อย ในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบด โดยประยุกต์ให้เตาเผาฟลูอิดไอซ์เบดจะมีลักษณะเป็นกรวยตรงบริเวณฐานตลอดจนศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อเตา ได้แก่ ปริมาณอากาศส่วนเกินและอัตราการป้อนเชื้อเพลิง พบว่า ปัจจัยดังกล่าวมีผลต่อระสิทธิภาพการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงภายในเตาเป็นอย่างมาก

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเตาเผาแบบตะกรับ เตาเผาจะมีลักษณะเป็นห้องสี่เหลี่ยม มีการป้อนเชื้อเพลิงบนแผ่นตะกรับและให้เชื้อเพลิงเผาไหม้จนกลายเป็นเถ้าพอดีบนตะกรับ โดยมีการป้อนอากาศส่วนเกิน อากาศส่วนแรกป้อนผ่านจากใต้ตะกรับขึ้นมา และหากเตามีขนาดใหญ่มาก ก็จะมีการเป่าอากาศส่วนที่สอง บริเวณเหนือตะกรับอีกด้านหนึ่งด้วย เพื่อทำปฏิกิริยากับสาระระเหยได้เพื่อให้การเผาไหม้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ซึ่งเตาเผาแบบตะกรับนี้สามารถแบ่งออกได้อีก 2 ชนิด คือ ตะกรับอยู่กับที่และตะกรับเลื่อน

Launchard และ Thoma (2003 : 199 – 206) ได้ทำการศึกษากระบวนการตรวจสอบตัวก่อให้เกิดมลภาวะที่เป็นสารอินทรีย์จากระบบความร้อนโดยใช้เชื้อเพลิงชีวมวลหลายชนิด เช่น

ฟางข้าวพืชที่ให้เมล็ดต่าง ๆ รวมทั้งต้นหญ้าที่อยู่ริมทางและพืชจำพวกไม้สน การตรวจสอบนี้จะถูกกระทำในเตาเผาแบบตะกรับและจะมีตัววัดค่าสารที่บริเวณปล่อง จากรูปแบบที่ใช้ในการเผาไหม้สามารถนำไปใช้กับหม้อไอน้ำได้ด้วยเช่นกัน

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเตาเผาแบบเผาไหม้อยู่กับที่ เตาเผาประเภทนี้เชื้อเพลิงจะถูกเผาไหม้อยู่กับที่บนพื้น มีการป้อนเชื้อเพลิงเข้ามาแบบอัตโนมัติ เพื่อให้ได้ความร้อนสม่ำเสมอ และป้อนอากาศส่วนเกินทางด้านข้างและด้านบน และต้องมีการกวาดเอาเถ้าออกเป็นประจำ

Erik Flojgaard Kristensen และ Jens Kristian Khistensen (2004 : 561 – 569) ได้ทำการพัฒนาและทดสอบเตาเผาฟางข้าวขนาดเล็กแบบป้อนเชื้อเพลิงเข้าห้องเผาไหม้ทีละชุด และนำความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ไปใช้ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อพัฒนาหม้อไอน้ำจากอดีตจนถึงปัจจุบันให้มีประสิทธิภาพสูงที่สุด โดยได้มีการปรับปรุงส่วนต่าง ๆ ดังนี้

1. การปรับปรุงฉนวนกันความร้อนด้านในห้องเผาไหม้และติดตั้งด้านบนเพิ่ม ให้มีสภาพดี ป้องกันการรั่วให้มากที่สุดเพื่อป้อกันความร้อนสูญเสียออกจากเตา

2. การป้อนอากาศส่วนเกิน โดยเพิ่มอากาศส่วนที่สองบริเวณด้านข้างเตา และควบคุมการป้อนอากาศด้วยความสัมพันธ์กับอุณหภูมิก๊าซไอเสียและปริมาณออกซิเจน

3. การปรับปรุงในส่วนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน คือทำให้ก๊าซร้อนเย็นตัวลงมากขึ้น โดยใช้อุปกรณ์ที่ทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วนใส่เข้าในท่อควันของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY