

บทที่ 1

ระบบความร้อนและอุปกรณ์ที่ใช้ไอน้ำ

Thermal system and steam utilizing equipment

ความสำคัญของเนื้อหาวิชา (Overview)

ระบบความร้อนเป็นระบบที่ใช้พลังงานส่วนใหญ่ในโรงงานอุตสาหกรรม ดังนั้นเพื่อทำการอนุรักษ์พลังงานให้ประสบความสำเร็จ จะต้องเข้าใจในหลักการทำงานของระบบต่างๆ ก่อน ระบบความร้อนต่างๆ ได้แก่ ระบบหม้อไอน้ำ ฉนวนกันความร้อน หรืออุปกรณ์ดักจับไอน้ำ เป็นต้น ในขณะที่เดียวกันเครื่องต้นกำลังมีหน้าที่ผลิตกระแสไฟฟ้าเพื่อป้อนให้โรงงานโดยใช้พลังงานจากการสันดาปเชื้อเพลิงก็ต้องการความรู้ในการบริหาร และจัดการให้เกิดการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ เครื่องต้นกำลังต่างๆ ได้แก่ เครื่องยนต์สันดาปภายใน ระบบผลิตกำลังจากไอน้ำ เป็นต้น

วัตถุประสงค์ (Objective)

1. อธิบายหลักการทำงานของหม้อไอน้ำ และอุปกรณ์ที่ใช้ไอน้ำ
2. อธิบายวิธีการตรวจวัด และวิเคราะห์การใช้พลังงานความร้อน

บทนำ (Introduction)

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงระบบหม้อไอน้ำ หลักการส่งถ่าย และกักเก็บไอน้ำ การปรับปรุงประสิทธิภาพหม้อไอน้ำ การควบคุมความดันไอน้ำให้ เหมาะสมกับภาระ การหุ้มฉนวนกันความร้อน การเลือกใช้และการติดตั้งกับดักไอน้ำ การอนุรักษ์พลังงานโดยการนำคอนเดนเสดกลับมาใช้ใหม่ โรงไฟฟ้าพลังไอน้ำ หลักการทำงานของโรงไฟฟ้าพลังไอน้ำ เครื่องยนต์สันดาปภายใน หลักการทำงานของเครื่องยนต์สันดาปภายใน กังหันก๊าซ หลักการทำงานของกังหันก๊าซ ระบบผลิตไฟฟ้า และความร้อนร่วม ระบบ Combined Cycle ระบบแลกเปลี่ยนความร้อน หลักการทำงานของระบบแลกเปลี่ยนความร้อน การเลือกใช้ชุดแลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสม และมีประสิทธิภาพ การบำรุงรักษาชุดแลกเปลี่ยนความร้อน

1.1 ระบบหม้อไอน้ำ

1.1.1 โครงสร้างของหม้อไอน้ำ

หม้อไอน้ำเป็นอุปกรณ์ที่ทำงานด้วยการเผาไหม้เชื้อเพลิง แล้วถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นให้กับน้ำในภาชนะอัดความดัน เพื่อกำเนิดไอน้ำที่มีความดัน และอุณหภูมิที่กำหนด ส่วนประกอบหลักของหม้อไอน้ำ ได้แก่ ภาชนะอัดความดันสำหรับบรรจุน้ำและไอน้ำ (ตัวหม้อไอน้ำ) อุปกรณ์เผาไหม้สำหรับเผาไหม้เชื้อเพลิง และอุปกรณ์กำเนิดความร้อนจากการเผาไหม้ กล่าวคือประกอบด้วยเตาไฟนั่นเอง นอกจากนี้ ยังอาจมี Superheater หรือมี Reheater สำหรับเพิ่มอุณหภูมิของไอน้ำให้สูงขึ้นไปอีก มี Economizer หรือมี Air preheater สำหรับนำความร้อนทิ้งในก๊าซไอเสียกลับมาใช้งาน หรือมีอุปกรณ์ควบคุมหม้อไอน้ำอัตโนมัติหรือมีอุปกรณ์ความปลอดภัยต่างๆ รวมทั้งอุปกรณ์เสริม เช่น เครื่อง Aerator (เครื่องเติมอากาศ) เครื่องเติมน้ำ เครื่อง Soot blower (เครื่องเป่าฝุ่น) วาล์วต่างๆ เช่น วาล์วนิรภัย วาล์วไอน้ำ ฯลฯ ระบบท่อ และเครื่องวัดต่างๆ เช่น เครื่องวัดความดัน เครื่องวัดระดับน้ำ เป็นต้น

ไอน้ำที่กำเนิดจากหม้อไอน้ำ สามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย นอกจากใช้ในการทำให้อากาศร้อน ให้ความร้อน อบแห้ง ฯลฯ แล้ว ยังสามารถใช้ขับเคลื่อนเครื่องจักรพลังไอน้ำ เช่น กังหันไอน้ำ ได้อีกด้วย กรณีที่ถือว่าหม้อไอน้ำเป็นอุปกรณ์ที่ทำงานด้วยความร้อน เราสามารถมองว่าหม้อไอน้ำเป็นอุปกรณ์กำเนิดไอน้ำได้ ประเด็นสำคัญในการจัดการพลังงานความร้อนในหม้อไอน้ำ ได้แก่ การลดการใช้เชื้อเพลิงให้เหลือน้อยที่สุด และผลิตไอน้ำตามที่กำหนดโดยที่ประสิทธิภาพสูง

อุปกรณ์เผาไหม้จะขึ้นอยู่กับชนิดของเชื้อเพลิง สำหรับเชื้อเพลิงก๊าซ และเชื้อเพลิงเหลวจะใช้ Burner เป็นหลัก สำหรับเชื้อเพลิงแข็งจะใช้ Stoker หรือ Fluidized bed และหากเชื้อเพลิงแข็งหากนำมาบดเป็นอนุภาคเล็กๆ ด้วยเครื่องบดได้ Pulverized coal ก็สามารถเผาไหม้ด้วย Burner ได้

เตาไฟเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ทำให้ก๊าซที่เผาไหม้เกือบสมบูรณ์แล้วที่อุปกรณ์เผาไหม้ไปสัมผัสกับอากาศอย่างเพียงพอเพื่อให้เผาไหม้สมบูรณ์ และถ่ายเทความร้อนจากก๊าซเผาไหม้อุณหภูมิสูงที่เกิดขึ้นให้แก่ตัวหม้อไอน้ำ เนื่องจากก๊าซเผาไหม้โดยทั่วไปจะมีอุณหภูมิสูงกว่า 1000°C ดังนั้น การถ่ายเทความร้อนให้แก่ตัวหม้อไอน้ำเพื่อทำให้มันระเหยจึงเกิดขึ้นจากการแผ่รังสีเป็นหลัก ก๊าซเผาไหม้ที่ไหลออกจากเตา มักจะนำไปแลกเปลี่ยนความร้อนที่ Superheater, Reheater, Economizer และ Air preheater ตามลำดับ ในอุปกรณ์ข้างต้นก๊าซเผาไหม้จะให้ความร้อนแก่ ไอน้ำ น้ำ และอากาศตามลำดับในระหว่างที่ไหลผ่านทางออกเตาไปปล่อย

ไอน้ำส่วนใหญ่ที่เกิดจากหม้อไอน้ำ จะถูกนำมาใช้งานในสภาพไอน้ำอิ่มตัว แต่กรณีที่น่าไปใช้กับเครื่องผลิตกำลัง เช่น Turbine มักจะใช้งานในสภาพไอน้ำ (Superheated steam) ทำให้ได้ประสิทธิภาพสูงขึ้น การทำไอน้ำจะใช้วิธีนำไอน้ำอิ่มตัวไปไหลผ่าน Superheater เพื่อรับความร้อนจากก๊าซเผาไหม้ในเตาเป็นไอน้ำ ก๊าซร้อนในเตาจะถูกนำไปถ่ายเทความร้อนให้กับตัวหม้อไอน้ำ และ Superheater แต่หลังจากนั้นก็ยังมีความร้อนเหลืออยู่อีกมาก การนำความร้อนในก๊าซไอเสียมาใช้ประโยชน์อย่างมีประสิทธิภาพ เป็นสิ่งสำคัญมากในการอนุรักษ์พลังงาน เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อนำความร้อนที่เหลือนี้มาใช้งาน ได้แก่ Economizer และ Air preheater โดย Economizer เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ความร้อนที่เหลือในก๊าซไอเสียที่ผ่านตัวหม้อไอน้ำมาแล้ว มาอุ่นน้ำที่จะจ่ายเข้าหม้อไอน้ำ เพื่อลดปริมาณเชื้อเพลิงที่ต้องใช้ที่หม้อไอน้ำ ส่วน Air preheater เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ความร้อนที่เหลือในก๊าซไอเสียในการอุ่นอากาศสำหรับเผาไหม้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ

1.1.2 ประเภทของหม้อไอน้ำ

หม้อไอน้ำที่ใช้ในการผลิตไอน้ำ มีใช้กันทั่วไปใน อาคารสำนักงาน โรงงานผลิตต่างๆ เรือ โรงไฟฟ้า เป็นต้น ด้วยเหตุนี้จึงมีการออกแบบหม้อไอน้ำหลายชนิดเพื่อให้ได้รูปแบบที่เหมาะสมกับการใช้งาน หม้อไอน้ำมีหลายขนาดตั้งแต่ไม่กี่ตันต่อชั่วโมง (t/h) จนถึงหลายพัน t/h หม้อไอน้ำสามารถแบ่งได้เป็น Cylindrical boiler ซึ่งตัวหม้อไอน้ำประกอบด้วย Drum รูปทรงกระบอกขนาดใหญ่ Water tube boiler ซึ่งประกอบด้วยท่อน้ำขนาดเล็กจำนวนมาก ตัว Drum และ Header และหม้อไอน้ำชนิดพิเศษซึ่งไม่จัดอยู่ในประเภทใดประเภทหนึ่งข้างต้น ซึ่งแต่ละประเภทสามารถแยกย่อยละเอียดได้อีกดังที่แสดงข้างล่าง

Cylindrical boiler	{	(1) Vertical boiler
		(2) Flue boiler
		(3) Fire tube boiler
		(4) Flue & fire tube boiler
Water tube boiler	{	(5) Natural circulation boiler
		(6) Forced circulation boiler
		(7) Once-through boiler
หม้อไอน้ำพิเศษ	{	(8) หม้อไอน้ำเชื้อเพลิงพิเศษ
		(9) หม้อไอน้ำของเหลวพิเศษ
		(10) Fluidized bed boiler
		(11) Waste-heat boiler
		(12) Cast iron boiler

ในโรงงานขนาดกลาง และขนาดเล็กที่ใช้ไอน้ำประมาณ 1-10 t/h จะใช้หม้อไอน้ำความดันต่ำขนาดเล็ก ส่วนมากจะเป็น Flue & fire tube boiler ที่มีความดันประมาณ 1 MPa (ความดันที่ระบุในบทนี้จะหมายถึงความดันเกจ) สำหรับโรงงานขนาดใหญ่ ที่มีการใช้ไอน้ำมากถึงหลายสิบ t/h ซึ่งต้องใช้ไอน้ำที่มีความดันไอน้ำสูงกว่า 1 MPa ด้วย มักจะใช้ Water tube boiler เมื่อความดันไอน้ำมีค่าเท่ากับ 3 MPa ขึ้นไป เพื่อให้สามารถใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ บางโรงงานจะใช้วิธี Cogeneration โดยนำไอน้ำจากหม้อไอน้ำไปขับกังหันไอน้ำก่อน หลังจากนั้นจึงนำไอน้ำที่เหลือออกไปเป็นแหล่งความร้อนป้อนให้โรงงาน

1.1.2.1 Cylindrical boiler

Cylindrical boiler เป็นหม้อไอน้ำที่ประกอบด้วย Drum รูปทรงกระบอกขนาดใหญ่ ภายใน Drum มีห้องเผาไหม้ติดตั้งอยู่ น้ำในหม้อจะไหลเวียนด้วยวิธี Natural circulation เพื่อรับความร้อนจากห้องเผาไหม้ หม้อไอน้ำแบบนี้นิยมใช้กันมาแต่อดีตในลักษณะของหม้อไอน้ำขนาดเล็ก มีกำลังผลิตไอน้ำไม่เกินกี่สิบ t/h และความดันไม่เกินประมาณ 1 MPa และยังมีติดตั้งอยู่เป็นจำนวนมากในสถานประกอบการต่างๆ

สมบัติของ Cylindrical boiler เทียบกับ Water tube boiler มีดังต่อไปนี้

ข้อดี

- (1) โครงสร้างไม่ซับซ้อน
- (2) การบังคับควบคุม-เดินเครื่องทำได้สะดวก
- (3) ต้นทุนอุปกรณ์ค่อนข้างถูก
- (4) กินพื้นที่ติดตั้งน้อย
- (5) หากปริมาณการใช้ไอน้ำเปลี่ยนไป ความดันไอน้ำก็จะเปลี่ยนแปลงไปน้อย

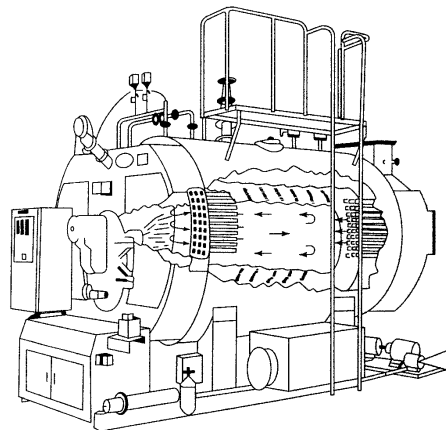
ข้อเสีย

- (1) ไม่เหมาะสำหรับผลิตไอน้ำความดันสูง
- (2) ไม่เหมาะสำหรับผลิตไอน้ำปริมาณมาก
- (3) ใช้เวลานานนับตั้งแต่เริ่มเดินเครื่องจนสามารถผลิตไอน้ำตามที่กำหนดได้

Vertical boiler เป็นหม้อไอน้ำที่ติดตั้ง Boiler drum รูปทรงกระบอกในทิศทางตั้งขึ้น ภายใน Drum มีห้องเผาไหม้ ส่วน Flue boiler เป็นหม้อไอน้ำที่ติดตั้ง Boiler drum รูปทรงกระบอกในทิศทางนอน ภายใน Drum มีท่อ Flue อยู่ 1-3 ท่อ ส่วน Fire tube boiler เป็นหม้อไอน้ำที่อยู่ใน Boiler drum มีน้ำบรรจุอยู่ ในน้ำจะมีท่อขนาดเล็กจำนวนมากซึ่งเป็นช่องทางไหลของก๊าซเผาไหม้ติดตั้งไว้ หม้อไอน้ำเหล่านี้ด้วยข้อจำกัดทางโครงสร้าง ไม่สามารถทำให้พื้นที่ถ่ายเทความร้อนมีขนาดใหญ่ได้ ดังนั้น ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำจึงจำกัดอยู่ที่ 50-80%

รูปที่ 1.1 แสดง Flue & fire tube boiler ซึ่งเป็นหม้อไอน้ำที่มีทั้งท่อ Flue และ Fire tube ในบรรดาหม้อไอน้ำ Cylindrical boiler หม้อไอน้ำแบบนี้จะมีพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนมาก มีประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำสูงถึง 85-90%

หม้อไอน้ำในปัจจุบันเกือบทั้งหมด จะเป็น Package boiler ซึ่งโรงงานผลิตจะประกอบตัวหม้อไอน้ำกับอุปกรณ์เสริมต่างๆ เช่น อุปกรณ์ควบคุมการเดินเครื่อง ฯลฯ ให้เสร็จบนฐานโครงเหล็กที่แข็งแรงแล้วขนด้วยรถพ่วง ฯลฯ ไปติดตั้งยังสถานที่ใช้งานโดยตรง หม้อไอน้ำแบบนี้ นอกจากจะลดทอนความยุ่งยากในการติดตั้ง ณ สถานที่จริงได้แล้ว โรงงานผลิตยังทำการทดลองเดินเครื่องและปรับแต่งมาให้เสร็จก่อนจะส่งมอบ ดังนั้น จึงสามารถลดระยะเวลาที่ต้องในการปรับแต่ง ณ สถานที่จริงได้ ทำให้สามารถมีหม้อไอน้ำใช้งานด้วยราคาถูกกว่า และรวดเร็วกว่าหม้อไอน้ำแบบอื่น จึงนิยมใช้กันมากขึ้นเรื่อยๆ



รูปที่ 1.1 หม้อไอน้ำ Flue & fire tube boiler

1.1.2.2 Water tube boiler

Water tube boiler ประกอบด้วยท่อน้ำจำนวนมากซึ่งมีน้ำไหลอยู่ภายในกับ Drum จำนวน 1 ต้มหรือหลายต้ม ก๊าซเผาไหม้จะให้ความร้อนแก่น้ำในท่อ ทำให้เกิดไอน้ำ หม้อไอน้ำแบบนี้สามารถจัดเรียงท่อน้ำหลายๆ ท่อเพื่อให้มีพื้นที่ถ่ายเทความร้อนมาก จึงสามารถใช้กับหม้อไอน้ำขนาดใหญ่ที่ผลิตไอน้ำที่อุณหภูมิและความดันสูง สมบัติของ Water tube boiler เทียบกับหม้อไอน้ำแบบอื่นๆ มีดังต่อไปนี้

ข้อดี

- (1) สามารถออกแบบให้มีท่อน้ำจำนวนมาก จึงมีพื้นที่ถ่ายเทความร้อนมากสามารถสร้างหม้อไอน้ำขนาดใหญ่ได้
- (2) สามารถออกแบบหม้อไอน้ำให้ท่อน้ำและ Drum มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กกว่าหม้อไอน้ำแบบอื่นๆ จึงเหมาะกับการผลิตไอน้ำความดันสูง
- (3) สามารถออกแบบให้ท่อน้ำจัดเรียงกันอย่างหนาแน่นรับความร้อนจากก๊าซเผาไหม้จึงสามารถผลิตไอน้ำได้จำนวนมากต่อพื้นที่ถ่ายเทความร้อนหนึ่งหน่วย
- (4) มีความยืดหยุ่นในการจัดเรียงท่อน้ำสูง จึงสามารถออกแบบรูปร่างของห้องเผาไหม้และหม้อไอน้ำได้หลายแบบมากขึ้น
- (5) สามารถรักษาประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำให้อยู่ในระดับสูงได้

ข้อเสีย

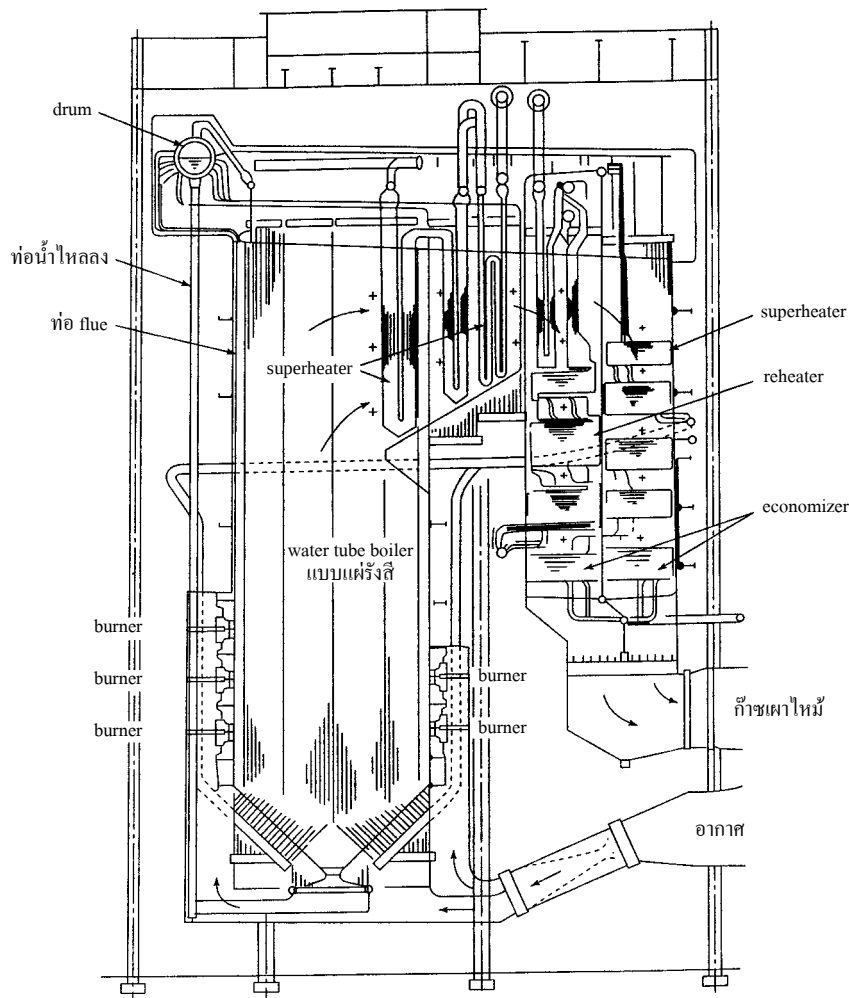
- (1) เนื่องจากน้ำในหม้อจะไหลผ่านท่อน้ำซึ่งมีขนาดเล็กจึงต้องใช้น้ำที่มีคุณภาพสูงและต้องมีระบบบำบัดน้ำที่ดี
- (2) เทียบกับพื้นที่ถ่ายเทความร้อน ส่วนที่เป็นน้ำจะมีขนาดเล็กแต่สามารถผลิตไอน้ำในปริมาณมาก ดังนั้น เมื่อภาระไอน้ำเปลี่ยนแปลงไป ความดันและอุณหภูมิของไอน้ำจะเปลี่ยนแปลงค่อนข้างมาก
- (3) เนื่องจาก Drum มีขนาดเล็ก พื้นที่ผิวน้ำจะมีขนาดเล็กเทียบกับส่วนที่เป็นน้ำ ดังนั้น จึงเกิด Priming ได้ง่าย
- (4) มีโครงสร้างซับซ้อน ต้องใช้ความระมัดระวังในการใช้งาน

Water tube boiler เมื่อจำแนกตามวิธีการไหลเวียนน้ำในหม้ออาจจัดเป็น Natural circulation boiler กับ Forced circulation boiler โดย Natural circulation boiler เป็นหม้อไอน้ำที่ทำการไหลเวียน โดยอาศัยความแตกต่างของความหนาแน่นของน้ำในท่อน้ำที่ได้รับความร้อนจากก๊าซเผาไหม้เมื่อหม้อไอน้ำมีความดันใช้งานสูงขึ้น ค่าความแตกต่างความหนาแน่นระหว่างไอน้ำกับน้ำจะลดลง ทำให้การไหลเวียนของน้ำไม่เพียงพอ จึงต้องใช้วิธีบังคับให้เกิดการไหลเวียนของน้ำในหม้อ โดยใช้ปั๊มหรืออุปกรณ์อื่นๆ บังคับให้เกิดการไหลเวียนของน้ำในหม้อไอน้ำแบบนี้เรียกว่า Forced circulation boiler

Natural circulation boiler แบ่งออกเป็นแบบท่อตรง แบบท่อโค้ง และแบบแผ่รังสี หม้อไอน้ำแบบท่อตรงจะใช้ท่อน้ำที่เป็นท่อตรง ซึ่งอาจใช้กับ Package boiler ขนาดเล็กที่มีความดันไม่เกิน 1 MPa และผลิตไอน้ำได้ไม่กี่ t/h แต่เนื่องจากไม่สามารถรองรับการขยายตัวเนื่องจากความร้อนได้ดี หม้อไอน้ำขนาดนี้จึงมักใช้ใน Cylindrical boiler เป็นหลัก ปัจจุบันนี้ไม่ค่อยผลิตแบบท่อตรงแล้ว ส่วนหม้อไอน้ำแบบท่อโค้งจะติดตั้งท่อน้ำโดยเจาะรู Drum ตามทิศทางรัศมี ความหนาของ Drum จึงสม่ำเสมอ และติดตั้งได้อย่างแน่นหนา รวมทั้งในการผลิตท่อน้ำ จะทำให้สามารถงอได้อย่างค่อนข้างอิสระ เพื่อให้เมื่อขยายตัวด้วยความร้อนแล้วท่อน้ำจะไม่เกิดความเค้นมาก จึงใช้กับหม้อไอน้ำความดันปานกลาง และความดันสูง สำหรับหม้อไอน้ำความดันสูงขนาดใหญ่ เช่น ที่ใช้ในโรงไฟฟ้าพลังความร้อน เนื่องจากความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำจะลดลงเมื่อความดันสูงขึ้น ดังนั้น จึงสามารถทำให้หม้อไอน้ำมีโครงสร้างที่การถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสี

ตอนที่ 3 บทที่ 1 ระบบความร้อนและอุปกรณ์ที่ใช้ไอน้ำ

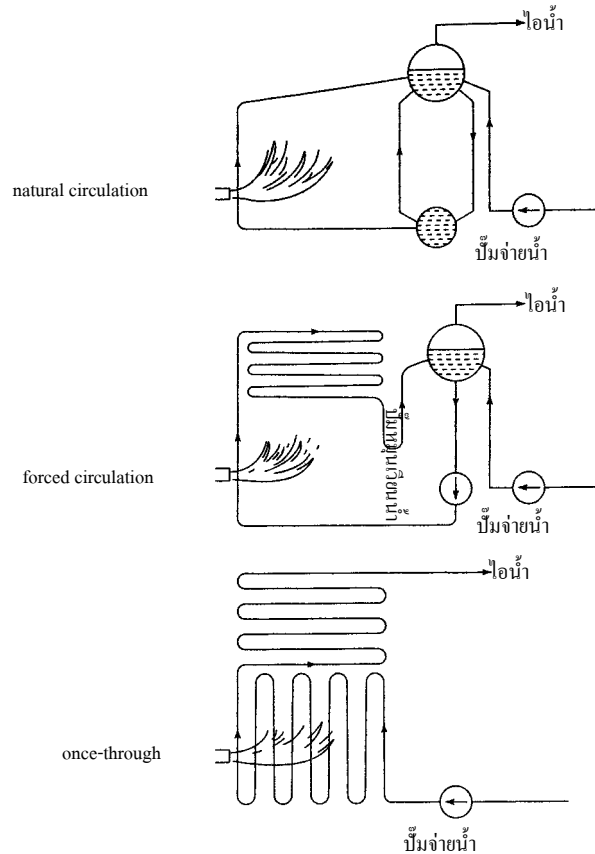
ของก๊าซเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้ (เตา) สามารถขดเคียวความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำในหม้อไอน้ำได้ หม้อไอน้ำแบบนี้เรียกว่า Water tube boiler แบบแฟรงก์ลี ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 Water tube boiler แบบแฟรงก์ลี

หม้อไอน้ำ Water tube boiler แบบ Forced circulation boiler เป็นหม้อไอน้ำที่บังคับให้น้ำในหม้อหมุนเวียนด้วยกำลังขับเคลื่อนจากปั๊มหรืออุปกรณ์อื่นๆ เทียบกับหม้อไอน้ำ Natural circulation boiler แล้ว จะออกแบบให้ท่อไอน้ำมีขนาดเล็กกว่าได้ รวมทั้งไม่มีข้อจำกัดในการออกแบบการจัดวางท่อไอน้ำ และสามารถสร้างหม้อไอน้ำขนาดใหญ่ที่มีความดัน และอุณหภูมิสูงได้ จึงนิยมใช้กันมากในโรงไฟฟ้าพลังความร้อน นอกจากนี้ ในหม้อไอน้ำ Waste-heat boiler ต่างๆ ที่กำเนิดไอน้ำจากความร้อนทิ้งที่มีอุณหภูมิค่อนข้างต่ำ เทียบกับก๊าซเผาไหม้ เช่น จากก๊าซไอเสียจากเตาเผาต่างๆ เราจำเป็นต้องออกแบบพื้นที่ถ่ายเทความร้อนให้มีขนาดใหญ่ที่สุดเท่าที่จะทำได้ภายในมิติที่จำกัด เพื่อให้สามารถนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง ดังนั้น โดยมากมักจะใช้หม้อไอน้ำ Forced circulation boiler

หม้อไอน้ำ Once-through boiler เป็นหม้อไอน้ำที่ทำการให้ความร้อน กำเนิดไอน้ำและทำ Superheat เพื่อกำเนิดไอน้ำโดยมีน้ำเลี้ยงจากปั๊มน้ำ ไหลผ่านท่อไอน้ำยาวต่อเนื่องเพียงครั้งเดียว เนื่องจากหม้อไอน้ำแบบนี้ไม่มีการหมุนเวียนน้ำ ดังนั้น โดยทั่วไปจึงไม่ต้องมี Drum หม้อไอน้ำที่เดินเครื่องด้วยความดันสูงกว่าความดันวิกฤติ จะไม่สามารถแยกไอน้ำออกจากน้ำได้ จึงต้องใช้หม้อไอน้ำ Once-through boiler รูปที่ 1.3 แสดงการไหลของน้ำและไอน้ำของหม้อไอน้ำ Water tube boiler ชนิดต่างๆ



รูปที่ 1.3 ภาพเปรียบเทียบการไหลของน้ำและไอน้ำในหม้อไอน้ำ Water tube boiler แบบต่าง ๆ

1.1.2.3 หม้อไอน้ำพิเศษ

หม้อไอน้ำพิเศษมีหลายชนิด เช่น หม้อไอน้ำที่ใช้เชื้อเพลิงชนิดอื่นนอกเหนือจากเชื้อเพลิงปกติ หม้อไอน้ำที่ใช้ตัวกลางความร้อนชนิดพิเศษมากำเนิดไอน้ำ และหม้อไอน้ำที่มีโครงสร้างพิเศษ

(ก) หม้อไอน้ำเชื้อเพลิงพิเศษ

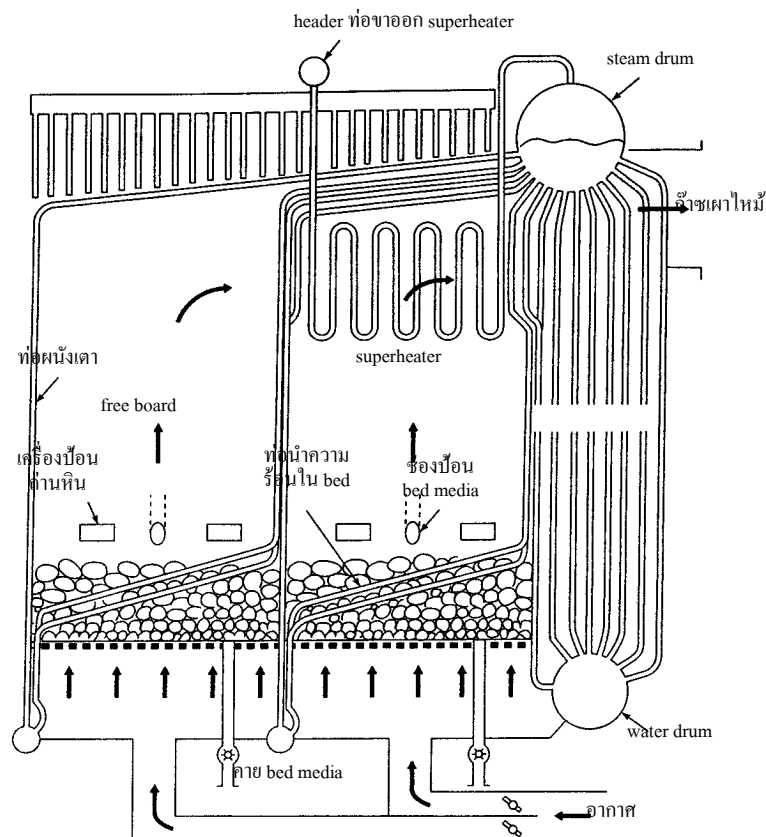
ผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตต่างๆ มีการนำมาใช้ประโยชน์เป็นเชื้อเพลิงตั้งแต่อดีตแล้ว ตัวอย่างเช่น ก๊าซ Blast furnace ก๊าซ Coke oven ก๊าซผลพลอยได้จากโรงงานปิโตรเคมี ของเหลวทิ้งจากโรงงานกระดาษ (Black liquor) เป็นต้น เนื่องจากเชื้อเพลิงผลพลอยได้เหล่านี้มีค่าความร้อนต่ำหรือค่าความร้อนและปริมาณที่เกิดขึ้นอาจเปลี่ยนแปลงไปได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงการเดินเครื่องจักรที่กำเนิดผลพลอยได้เหล่านั้น ดังนั้น จึงต้องใช้หม้อไอน้ำที่สามารถรองรับสภาพเช่นนั้นได้ นอกจากนี้ ยังมีหม้อไอน้ำที่ใช้ COM (Coal oil mixture) และ CWM (Coal water mixture) เป็นเชื้อเพลิงอีกด้วย เชื้อเพลิงเหล่านี้เป็นการนำถ่านหินซึ่งเป็นเชื้อเพลิงแข็งแต่มีปริมาณสำรองมากมายใช้ประโยชน์ โดยนำถ่านหินป่นละเอียดมาผสมกับน้ำมันหนักหรือน้ำ ทำให้ไหลได้ (Fluidization) แล้วใช้เป็นเชื้อเพลิงเหลว

(ข) หม้อไอน้ำของเหลวพิเศษ

หม้อไอน้ำที่ใช้ตัวกลางในการทำงานอื่นนอกเหนือจากน้ำ แต่เดิมเคยนำตัวกลางที่มีจุดเดือดต่ำ เช่น Freon หรือ Fluoreol มาใช้เพื่อนำความร้อนซึ่งที่มีอุณหภูมิต่ำมาใช้ประโยชน์ อย่างไรก็ตาม ด้วยเหตุผลเรื่องการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมโลก ปัจจุบันเราไม่ใช้หม้อไอน้ำที่ใช้ตัวกลางเหล่านี้แล้วแต่มีการพัฒนาหม้อไอน้ำ Waste-heat recovery boiler ซึ่งใช้ตัวกลางของไหล 2 ชนิดที่มีจุดเดือดต่ำผสมกัน ได้แก่ แอมโมเนียกับน้ำ

(ค) Fluidized bed boiler

เพื่อใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ หม้อไอน้ำ Fluidized bed boiler จึงกำลังได้รับความสนใจเนื่องจากสามารถใช้เชื้อเพลิงได้หลายชนิด รวมทั้งถ่านหินที่มีคุณภาพต่ำ ซึ่งแต่เดิมไม่สะดวกที่จะนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง หม้อไอน้ำแบบนี้แสดงไว้ในรูปที่ 1.4 โดยมีโครงสร้างที่ด้านล่างของเตาเผาจะมี Plate distributor ซึ่งมีรูเล็กๆ อยู่จำนวนมากสำหรับพ่นอากาศสำหรับเผาไหม้เข้าไป และจะป้อนถ่านหินป่นเข้าไปในเตาเผา ผงถ่านหินที่ป้อนเข้าไปจะแสดงปรากฏการณ์ Fluidization เหมือนกับของเหลวกำลังเดือดอยู่ และเผาไหม้ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง วิธีนี้ภายใน Fluidized bed จะมีอุณหภูมิต่ำ สามารถลดการเกิดไนโตรเจนออกไซด์ได้ และหากป้อนปูนขาวหรือสารกำจัดกำมะถันอื่นๆ เข้าไปด้วย จะสามารถกำจัดกำมะถันได้ภายในเตา จึงมีสมบัติที่สามารถเผาไหม้ถ่านหินได้อย่างสะอาด นอกจากนี้ ภายหลังกังยังมีการพัฒนาหม้อไอน้ำ Circulating fluidized bed เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้อีกด้วย



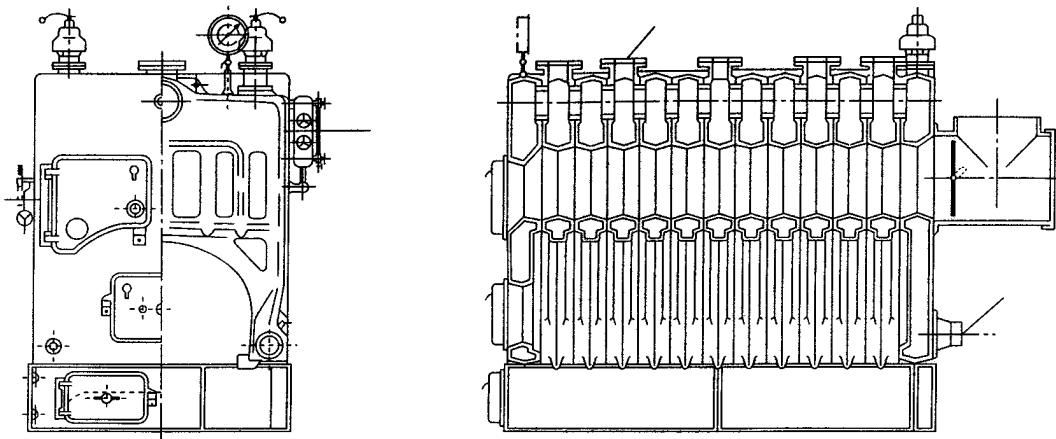
รูปที่ 1.4 หม้อไอน้ำ Fluidized bed boiler

(ง) Waste-heat boiler

ก๊าซไอเสียที่ปล่อยจากเตาให้ความร้อน เตาหลอม และ Cement kiln ต่างๆ จะมีอุณหภูมิค่อนข้างสูง จึงสามารถนำมาเป็นแหล่งความร้อนสำหรับหม้อไอน้ำได้ หม้อไอน้ำที่กำเนิดความร้อนด้วยความร้อนทิ้งแบบนี้จะเรียกรวมๆ ว่า Waste-heat boiler โครงสร้างของตัวหม้อไอน้ำจะไม่แตกต่างจากหม้อไอน้ำทั่วไปมากนัก แต่เนื่องจากอุณหภูมิของความร้อนทิ้งจะต่ำกว่าหม้อไอน้ำแบบเผาไหม้เชื้อเพลิง ดังนั้นจึงมีแนวโน้มที่จะมีพื้นที่ถ่ายเทความร้อนขนาดใหญ่กว่า

(จ) Cast iron boiler

หม้อไอน้ำ Cast iron boiler ใช้กันมากในหม้อไอน้ำความดันต่ำสำหรับปรับอากาศร้อนในอาคาร สำนักงาน ฯลฯ โดยทั่วไปจะประกอบจากชิ้นส่วนรูปกล่องทำจากเหล็กหล่อ เรียกว่า Section ข้อดีคือมีโครงสร้างแบบถอดประกอบ จึงสามารถขนเข้าไปประกอบในห้องใต้ดินหรือสถานที่อื่นๆ ได้สะดวก และสามารถเพิ่มหรือลดความจุ (Capacity) ของหม้อไอน้ำได้สะดวกด้วยการเพิ่มหรือลดจำนวนของ Section รวมทั้งทนการกัดกร่อนได้ดีอีกด้วย



รูปที่ 1.5 หม้อไอน้ำ Cast iron boiler

1.1.3 ความจุ (Capacity) กับประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ

(1) ความจุของหม้อไอน้ำ

ความจุ (ขนาด) ของหม้อไอน้ำ โดยมากจะแสดงด้วยปริมาณไอน้ำที่ผลิตได้ต่อหนึ่งหน่วยเวลา ได้แก่ ปริมาณไอน้ำต่อชั่วโมง W [t/h] อย่างไรก็ตาม ปริมาณไอน้ำที่กำเนิดจากหม้อไอน้ำไม่เพียงแต่จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และความดันของไอน้ำเท่านั้น แต่ยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของน้ำเลี้ยงด้วย ดังนั้น บางครั้งจึงใช้ปริมาณไอน้ำสมมูล ซึ่งเป็นวิธีแสดงด้วยค่าที่แปลงให้เทียบเท่ากับกรณีผลิตไอน้ำแห้ง 100°C จากน้ำอืดตัว 100°C ภายใต้ความดันบรรยากาศมาตรฐาน ถ้าให้เอนทัลปีของน้ำเลี้ยงและของไอน้ำที่เกี่ยวข้องเท่ากับ h_0 และ h_1 [kJ/kg] ตามลำดับ และให้ปริมาณไอน้ำของหม้อไอน้ำเท่ากับ W [t/h] แล้ว ปริมาณไอน้ำสมมูล W' จะเท่ากับ

$$w' = \frac{W(h_1 - h_0)}{2257} \quad (1.1)$$

ค่า 2257 [kJ/kg] เป็นความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอที่ความดันบรรยากาศมาตรฐาน

ความจุของหม้อไอน้ำอาจแสดงด้วยพื้นที่ถ่ายเทความร้อนก็ได้ พื้นผิวที่ด้านหนึ่งสัมผัสกับน้ำ (หรือไอน้ำในกรณีของ Superheater) อีกด้านหนึ่งสัมผัสกับก๊าซเผาไหม้ เรียกว่า พื้นผิวถ่ายเทความร้อน ผลรวมของพื้นที่ที่วัดได้ด้านก๊าซเผาไหม้ เรียกว่า พื้นที่ถ่ายเทความร้อน นอกจากนั้น ปริมาณไอน้ำที่เกิดขึ้นต่อพื้นที่ถ่ายเทความร้อนหนึ่งหน่วย [kg/(m²h)] เรียกว่า Load ratio ของพื้นผิวถ่ายเทความร้อน เนื่องจากค่านี้จะขึ้นอยู่กับประเภทของหม้อไอน้ำเป็นหลัก หากรู้ประเภทของหม้อไอน้ำและพื้นที่ถ่ายเทความร้อน ก็สามารถประมาณความจุโดยคร่าวๆ ได้

นอกจากนี้ สำหรับหม้อไอน้ำที่มี Grate (ตะแกรง) สำหรับเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง บางครั้งจะแสดงความจุของหม้อไอน้ำด้วยพื้นที่ของ Grate ก็ได้

(2) ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ

เชื้อเพลิงที่ใช้ในหม้อไอน้ำ จะถูกเผาไหม้ในเตากลายเป็นก๊าซเผาไหม้ และถูกนำไปใช้ผลิตไอน้ำ ในหม้อไอน้ำในทางปฏิบัติ จะไม่สามารถใช้ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงไปกำเนิดไอน้ำทั้งหมด เนื่องจากมีพลังงานสูญเสียต่างๆ ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ จึงแสดงถึงปริมาณความร้อนที่ได้ประโยชน์เทียบกับความร้อนของเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าไป

ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ แสดงได้ด้วยปริมาณความร้อนที่ต้องใช้ในการผลิตไอน้ำ หากด้วยปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นในการเผาไหม้สมบูรณ์ของเชื้อเพลิงที่ใช้ไป ปริมาณความร้อนที่ต้องใช้ในการผลิตไอน้ำสามารถหาได้จากค่าเอนทัลปีของไอน้ำที่เกิดขึ้นลบด้วยเอนทัลปีของน้ำเลี้ยง และในการคำนวณปริมาณความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง เนื่องจากอุณหภูมิของก๊าซไอเสียที่ออกมาจากหม้อไอน้ำโดยทั่วไปจะไม่ต่ำกว่า 100°C ทำให้ความชื้นในก๊าซไอเสียอยู่ในสภาพไอน้ำ ดังนั้น โดยมากจึงใช้ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง เมื่อให้ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำเท่ากับ η_1 แล้ว จะหาค่าได้ดังสูตรต่อไปนี้

$$\eta_1 = \frac{W(h_1 - h_0)}{GH_L} \quad (1.2)$$

ในที่นี้ ให้ปริมาณการผลิตไอน้ำของหม้อไอน้ำเท่ากับ W [kg/h] ให้เอนทัลปีของน้ำที่ทางเข้าหม้อไอน้ำและของไอน้ำที่ทางออกเท่ากับ h_0 และ h_1 ตามลำดับ ให้ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ไปเท่ากับ G [kg/h] และให้ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิงเท่ากับ H_L [kJ/kg]

(3) ความร้อนสูญเสียของหม้อไอน้ำ

ในจำนวนปริมาณความร้อนที่ป้อนให้แก่หม้อไอน้ำ การพิจารณาแจกแจงปริมาณความร้อนที่ไม่ได้นำไปใช้ในการผลิตไอน้ำ หรือกล่าวอีกนัยคือ ความร้อนสูญเสีย เป็นสิ่งสำคัญในการจัดการประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ นอกจากนี้ ในการพิจารณาวิธีเพิ่มประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ หากไม่ทราบความร้อนสูญเสียที่แท้จริงจะไม่สามารถดำเนินการได้อย่างเหมาะสม

ความร้อนสูญเสียหลักๆ ในหม้อไอน้ำมีดังต่อไปนี้

(ก) ความร้อนสูญเสียในก๊าซไอเสีย

เป็นความร้อนสูญเสียจากความร้อนสัมผัสที่ก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ นำออกไปจากหม้อไอน้ำ เป็นความร้อนสูญเสียที่มีค่ามากที่สุดในจำนวนความร้อนสูญเสียทั้งหมด หากความร้อนสูญเสียในก๊าซไอเสียเพิ่มขึ้น หมายความว่าสาเหตุบางอย่างทำให้ปริมาณก๊าซไอเสียเพิ่มขึ้น หรือทำให้ก๊าซไอเสียมีอุณหภูมิสูงขึ้น ดังนั้น จึงต้องสงสัยว่าเราบ่อนอากาศสำหรับเผาไหม้เข้าไปในหม้อไอน้ำมากเกินไปหรือไม่ เครื่อง Air preheater รั่วหรือไม่ ด้านในเตาสกปรกหรือเสียหายด้วยซ้ำจากการเผาไหม้หรืออื่นๆ หรือไม่ หรือการควบคุมคุณภาพน้ำของหม้อไอน้ำไม่เพียงพอทำให้มีตะกอนเกาะที่พื้นผิวถ่ายเทความร้อนหรือไม่ เป็นต้น

(ข) ความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์

เป็นความร้อนสูญเสียที่เกิดจากการเผาไหม้ไม่ดี ทำให้ในก๊าซไอเสียมีคาร์บอนที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ถูกขับออกไปด้วย ในก๊าซไอเสียจะพบ CO บางครั้งปรากฏการณ์นี้ก็เกิดจากอากาศสำหรับเผาไหม้ไม่เพียงพอ หรือบ่อนอากาศที่ต้องใช้ให้เพียงพอแล้ว แต่อุปกรณ์เผาไหม้ เช่น Burner ทำงานผิดปกติ

(ค) ความร้อนสูญเสียจากเชื้อเพลิงที่ไม่เผาไหม้ เช่น เชม่า ซึ่งเป็นคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้

เป็นความร้อนสูญเสียที่เกิดจากการปล่อยเชื้อเพลิงที่สามารถเผาไหม้ได้ทิ้งไปในการเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลว เช่น น้ำมันหนัก ฯลฯ หรือเชื้อเพลิงแข็ง เช่น ถ่านหิน ฯลฯ การสูญเสียนี้จะมีมากขึ้นหากเผาไหม้ได้ไม่ดีหรืออากาศไม่เพียงพอ

(ง) ความร้อนสูญเสียจากการแผ่รังสี

เป็นความร้อนสูญเสียที่เกิดจากการแผ่รังสีจากผนังหม้อไอน้ำด้านนอก จากท่อต่างๆ จากท่อไอเสีย ฯลฯ เนื่องจากผลต่างอุณหภูมิกับอากาศภายนอก การสูญเสียนี้จะมีมากขึ้นหากฉนวนหุ้มกันความร้อนหลุดลอกหรือเสื่อมคุณภาพ

(จ) ความร้อนสูญเสียอื่นๆ

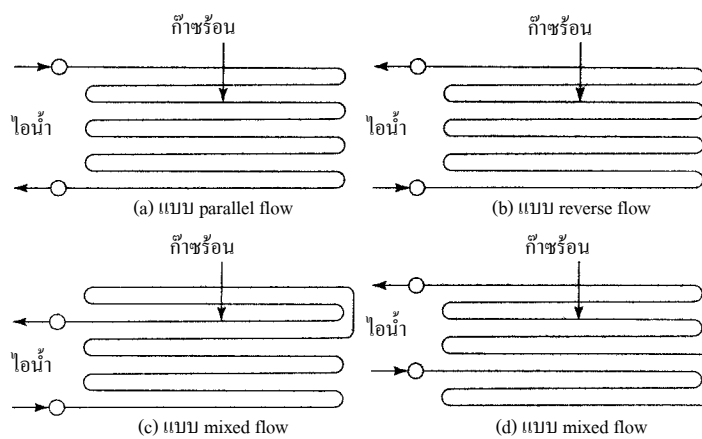
เป็นความร้อนสูญเสียที่เกิดจากการ Blow down หรือ Condensate ของน้ำในหม้อไอน้ำหรือจากไอน้ำรั่ว ฯลฯ สำหรับการ Blow down หรือ Condensate ของน้ำในหม้อไอน้ำ ให้ลองพิจารณาว่า จะสามารถนำความร้อนกลับมาใช้ได้หรือไม่ สำหรับไอน้ำรั่ว ให้ซ่อมแซมให้ดีเพื่อลดความสูญเสีย

1.1.4 อุปกรณ์เสริมที่สำคัญของหม้อไอน้ำ

1.1.4.1 Superheater และ Reheater

ไอน้ำที่ใช้กับกังหันไอน้ำ โดยทั่วไปจะใช้ไอดง (Superheated steam) เพื่อให้ไอน้ำมีอุณหภูมิสูงจะได้มีประสิทธิภาพของ Cycle สูง และเพื่อป้องกันไอน้ำกลายเป็นไอน้ำเปียกที่ทางออกกังหัน ซึ่งอาจทำให้ใบพัดของกังหันเสียหายจากการเสาะกร่อนได้ อุปกรณ์ที่ให้ความร้อนแก่ไอน้ำอ้อมตัวที่ได้จากหม้อไอน้ำภายใต้ความดันคงที่ เพื่อให้กลายเป็นไอดง เรียกว่า Superheater ยิ่งไอน้ำมีอุณหภูมิสูง ประสิทธิภาพก็จะเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ความแข็งแรงของท่อไอน้ำจะลดลง ดังนั้น การเพิ่มอุณหภูมิจึงมีขีดจำกัด โรงไฟฟ้าพลังความร้อนในปัจจุบันจะใช้ไอน้ำที่มีอุณหภูมิ 538-593 °C แล้วแต่ความดันของไอน้ำ

เครื่อง Superheater ประกอบด้วยท่อสำหรับให้ความร้อนไอน้ำ และเฮตเตอร์สำหรับมัดรวมท่อเหล่านี้เข้าด้วยกัน เครื่อง Superheater แบ่งออกตามความสัมพันธ์ของทิศทางการไหลของไอน้ำ และก๊าซเผาไหม้ได้เป็นแบบ Parallel flow แบบ Reverse flow และแบบ Mixed flow ซึ่งจะเลือกใช้ร่วมกันโดยคำนึงการทนความร้อนของท่อ และอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงภาระของหม้อไอน้ำที่จะมีต่ออุณหภูมิของไอน้ำ นอกจากนี้ยังสามารถแบ่งตามวิธีการถ่ายเทความร้อนได้เป็นแบบการพาความร้อน แบบการแผ่รังสี และแบบการพาความร้อนร่วมกับการแผ่รังสี โดยทั่วไปเมื่ออัตราการผลิตไอน้ำของหม้อไอน้ำสูงขึ้น เครื่อง Superheater แบบการพาความร้อนจะมีแนวโน้มให้ความร้อนได้มากขึ้น แต่แบบการแผ่รังสีจะให้ความร้อนได้น้อยลง เมื่อนำมาใช้ร่วมกันจะสามารถลดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิไอน้ำเมื่อภาระของหม้อไอน้ำเปลี่ยนแปลงไปได้



รูปที่ 1.6 รูปแบบการไหลของ Superheater

อุปกรณ์ที่นำไอน้ำความดันสูงที่ขยายตัวแล้วที่กักเก็บไอน้ำ กลับมาที่หม้อไอน้ำเพื่อมาให้ความร้อนใหม่ เรียกว่า Reheater อุปกรณ์นี้จะทำให้ไอน้ำซึ่งมีสภาพใกล้เคียงกับไอน้ำอิ่มตัว กลับไปเป็นไอน้ำอีกครั้ง และนำไปขยายตัวที่กังหันไอน้ำช่วงต่อไป ซึ่งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของ Cycle และป้องกันการเกาะกร่อนของใบพัดกังหันไอน้ำเนื่องจากไอน้ำเปียก อุปกรณ์นี้มีโครงสร้างเหมือนกับ Superheater

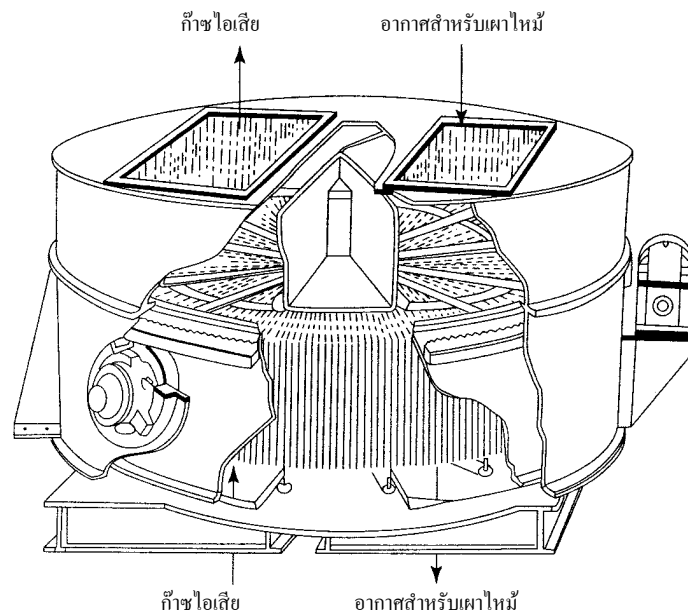
1.1.4.2 Economizer

Economizer เป็นอุปกรณ์ที่นำความร้อนทิ้งในก๊าซเผาไหม้ที่ผ่าน Superheater และ Reheater มาแล้วกลับมาใช้ในการ Preheat น้ำเลี้ยงหม้อไอน้ำ นอกจากนี้ ยังมีผลในการลดผลต่างของอุณหภูมิระหว่างน้ำในหม้อกับน้ำเลี้ยง จึงช่วยลดความเค้นจากความร้อนที่กระทำต่อ Drum อีกด้วย เนื่องจากก๊าซไอเสียมีอุณหภูมิต่ำ จึงต้องใช้พื้นที่ถ่ายเทความร้อนมาก บางครั้งก็ใช้พื้นผิวที่มีครีบ หากติดตั้ง Economizer แล้วทำให้อุณหภูมิของก๊าซไอเสียลดลงประมาณ 20°C จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้หม้อไอน้ำได้ประมาณ 1%

กรณีที่ใช้เชื้อเพลิงที่มีกำมะถันรวมอยู่ด้วย หากลดอุณหภูมิของก๊าซไอเสียมากเกินไป จะมีกรดซัลฟิวริกมาควบแน่นที่ผิวหน้าของ Economizer ทำให้เกิดการกัดกร่อน (Low temperature corrosion) จึงต้องระวังไม่ให้น้ำเข้า Economizer มีอุณหภูมิต่ำเกินไป

1.1.4.3 เครื่อง Air preheater

เครื่อง Air preheater เป็นอุปกรณ์นำความร้อนทิ้งมาใช้ใหม่ โดยใช้ความร้อนทิ้งในก๊าซท่อไอเสียมา Preheat อากาศสำหรับการเผาไหม้ในหม้อไอน้ำ การทำให้อากาศสำหรับการเผาไหม้มีอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้เชื้อเพลิงติดไฟง่ายขึ้น และประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงขึ้น จึงสามารถลดความร้อนสูญเสียจากเชื้อเพลิงไม่เผาไหม้และลดอัตราอากาศส่วนเกินได้ โดยทั่วไปเครื่อง Air preheater ส่วนใหญ่จะติดตั้งไว้หลังจาก Economizer ในหม้อไอน้ำขนาดเล็ก แต่ Economizer อย่างเดียวก็เพียงพอที่จะนำความร้อนทิ้งในก๊าซไอเสียกลับมาใช้ได้อย่างมาก แต่สำหรับหม้อไอน้ำขนาดใหญ่ เช่น ในโรงไฟฟ้า ฯลฯ ก๊าซที่ทางออก Economizer ยังมีอุณหภูมิสูง จึงต้องนำความร้อนที่ปล่อยออกกลับมามีด้วยเครื่อง Air preheater



รูป 1.7 เครื่อง Regenerative air preheater

เครื่อง Air preheater แบ่งเป็นแบบถ่ายเทความร้อนกับแบบ Regenerative โดยแบบถ่ายเทความร้อนจะเหมือนกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทั่วไปที่ถ่ายเทความร้อนจากก๊าซไอเสียให้แก่อากาศผ่านผนังโลหะ ส่วนแบบ Regenerative จะนำแผ่นโลหะหนาประมาณ 1 mm ไปสัมผัสกับก๊าซไอเสียเป็นระยะเวลาหนึ่งเพื่อให้ดูดกลืนความร้อน หลังจากนั้นจึงนำไปสัมผัสกับอากาศสำหรับการเผาไหม้เป็นระยะเวลาหนึ่งเพื่อคายความร้อน ตัวอย่างเช่น Ljungström air preheater ซึ่งจะบรรจุแผ่นโลหะที่เป็นตัวถ่ายเทความร้อนไว้ในภาชนะรูปทรงกระบอก ด้านหนึ่งมีทางไหลของก๊าซไอเสีย อีกด้านหนึ่งมีทางไหลของอากาศสำหรับการเผาไหม้ แล้วหมุนภาชนะนี้ด้วยความเร็ว 2-3 rpm เพื่อถ่ายเทความร้อนในก๊าซไอเสียให้แก่อากาศ เครื่อง Preheater แบบนี้สามารถทำให้มีพื้นที่ถ่ายเทความร้อนขนาดใหญ่ได้ จึงใช้กันมากในหม้อไอน้ำขนาดกลางและขนาดใหญ่

1.1.4.4 การควบคุมหม้อไอน้ำอัตโนมัติ

เราสามารถพิจารณาได้ว่า หม้อไอน้ำเป็นระบบควบคุมหลายตัวแปรที่ซับซ้อน ประกอบด้วยการเปลี่ยนแปลงต่างๆ เช่น การเผาไหม้ การถ่ายเทความร้อน อุณหภูมิ ฯลฯ ที่ดำเนินไปพร้อมกัน และมีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องกัน ซึ่งหมายความว่าต้องควบคุมทั้งสมดุลพลังงาน และสมดุลมวลสารภายในหม้อไอน้ำ อย่างไรก็ตาม เมื่อแบ่งตัวแปรต่างๆ ออกเป็นปริมาณที่ต้องการควบคุม (Controlled variables)

และปริมาณที่สามารถจัดการได้ (Manipulated variable) จะได้ว่า Controlled variable คือ ปริมาณไอน้ำ ความดันไอน้ำ อุณหภูมิไอน้ำ ฯลฯ ส่วน Manipulated variable คือ ปริมาณเชื้อเพลิง ปริมาณอากาศ ปริมาณน้ำเลี้ยง เป็นต้น

(1) การควบคุมน้ำเลี้ยง (FWC : Feed water control)

การควบคุมน้ำเลี้ยง หมายถึง การควบคุมการจ่ายน้ำเลี้ยงให้เหมาะสมกับภาระของ หม้อ ไอน้ำ ตัวแปรสถานะในการควบคุมนี้ สำหรับ Cylindrical boiler ได้แก่ ระดับน้ำของส่วนที่เป็นน้ำ สำหรับ Drum boiler ได้แก่ ระดับน้ำใน Drum การควบคุมจากจะกระทำโดยการวัดระดับน้ำ แล้วปรับ ปริมาณน้ำเลี้ยงให้แปรผันตามผลต่างระหว่างค่าที่วัดได้กับระดับน้ำมาตรฐาน เรียกว่า 1-Element control ซึ่งใช้กับหม้อไอน้ำขนาดเล็กต่างๆ สำหรับหม้อไอน้ำขนาดกลางและขนาดใหญ่ น้ำใน Drum จะมีฟองก๊าซ จำนวนมาก การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของน้ำจึงกลายเป็นการรบกวนทำให้การควบคุมไม่มีเสถียรภาพได้ วิธีแก้ไขทำได้โดยใช้ 2-Element control โดยเพิ่มปริมาณไอน้ำเข้าไปเป็นค่าล่วงหน้าของการเปลี่ยนแปลง ภาระ หรือใช้ 3-Element control โดยเพิ่มการควบคุมที่หาผลต่างระหว่างปริมาณไอน้ำกับปริมาณน้ำเลี้ยง หากผลต่างไม่เท่ากับศูนย์ก็ทำการปรับปริมาณน้ำเลี้ยง

(2) การควบคุมการเผาไหม้ (ACC : Automatic combustion control)

การควบคุมการเผาไหม้บางครั้งก็เรียกว่า การควบคุมความดันไอน้ำ เป็นการควบคุม เพื่อปรับเชื้อเพลิงเพื่อให้ไอน้ำมีความดันคงที่ รวมทั้งทำการควบคุมการป้อนอากาศที่ต้องใช้ในการเผาไหม้เข้าไปในหม้อไอน้ำด้วยอัตราส่วนอากาศที่เหมาะสมไปพร้อมกันอีกด้วย หากอากาศสำหรับเผาไหม้มีปริมาณน้อยเกินไปเทียบกับปริมาณเชื้อเพลิงแล้ว จะเกิดความสูญเสียไปกับเชื้อเพลิงที่ไม่เผาไหม้เนื่องจากการเผาไหม้ กระทำได้ไม่ดี และอาจเกิดปัญหาไฟดับได้ นอกจากนี้ หากอากาศสำหรับเผาไหม้มีปริมาณมากเกินไป ความสูญเสียในก๊าซเผาไหม้จะเพิ่มขึ้นทำให้ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำลดลง ดังนั้น จึงจำเป็นต้องควบคุมอัตราส่วน อากาศให้เหมาะสม

1.1.5 การควบคุมคุณภาพน้ำของหม้อไอน้ำ

1.1.5.1 การบำบัดน้ำของหม้อไอน้ำ

การควบคุมคุณภาพน้ำของหม้อไอน้ำ จะควบคุมคุณภาพน้ำเลี้ยง และคุณภาพน้ำของน้ำ ในหม้อให้เหมาะสม เพื่อป้องกันไม่ให้หม้อไอน้ำเสียหายเนื่องจากคุณภาพน้ำ และเพื่อให้หม้อไอน้ำมีความ ปลอดภัยและประสิทธิภาพสูง หากไม่มีการควบคุมคุณภาพน้ำอย่างเหมาะสม จะเกิดความเสียหายต่างๆ และ เกิดความสูญเสียในแง่การอนุรักษ์พลังงาน ดังนั้น จึงต้องควบคุมคุณภาพน้ำอย่างเหมาะสมโดยคำนึงถึง โครงสร้าง ขนาด (Capacity) และสภาพการเดินเครื่องของหม้อไอน้ำ

(1) การบำบัดน้ำนอกหม้อไอน้ำ

การบำบัดน้ำนอกหม้อไอน้ำ จะทำการกำจัดสิ่งเจือปนในน้ำที่ไหลเข้าหม้อไอน้ำ (น้ำดิบ) ให้เหลือต่ำกว่าค่าที่กำหนด เป็นกระบวนการบำบัดเพื่อผลิตน้ำที่มีคุณภาพตามที่กำหนดแล้วส่งให้หม้อ ไอน้ำ การบำบัดน้ำจะทำโดยการแยกสารแขวนลอย โดยการกรอง และการเติมสารทำให้จับตัวเป็นตะกอน ร่วมกันเพื่อกำจัดสิ่งเจือปนออก แล้วนำไปผ่านกรรมวิธีแลกเปลี่ยนไอออนเพื่อกำจัดสารที่ทำให้น้ำกระด้าง เช่น แคลเซียม แมกนีเซียม ฯลฯ เพื่อทำเป็นน้ำอ่อน และทำเป็นน้ำบริสุทธิ์ซึ่งเกือบไม่มีประจุไฟฟ้าเหลืออยู่เลย ขึ้นอยู่กับคุณภาพของน้ำดิบ

คุณภาพที่ต้องการของน้ำเลี้ยง จะขึ้นอยู่กับประเภท ความดัน ฯลฯ ของหม้อไอน้ำ อย่างไรก็ตามโดยทั่วไป หม้อไอน้ำ Cylindrical boiler จะใช้น้ำอ่อน หม้อไอน้ำ Water tube boiler ที่มีความ

ดันไม่เกิน 1 MPa จะใช้น้ำอ่อน หากความดันสูงกวานั้นจะต้องใช้น้ำบริสุทธิ์ และหม้อไอน้ำ Once-through boiler จะใช้น้ำบริสุทธิ์

(2) การบำบัดน้ำภายในหม้อไอน้ำ

การบำบัดน้ำภายในหม้อไอน้ำ เป็นการบำบัดเพื่อรักษา และควบคุมคุณภาพน้ำในหม้อไอน้ำ เพื่อป้องกันการผุกร่อนของพื้นผิวถ่ายเทความร้อน ป้องกันประสิทธิภาพทางความร้อนลดลง เนื่องจากการเกิดตะกรัน และป้องกันความเสียหาย จากปรากฏการณ์อื่นๆ เช่น Carry over เป็นต้น

น้ำยาที่ใช้ในการปรับคุณภาพน้ำในหม้อไอน้ำ โดยทั่วไปจะนำไปใส่ในระบบจ่ายน้ำหรือใน Drum สารบำบัดที่ใช้กันเป็นหลักได้แก่ สารกำจัดออกซิเจน และสารปรับ pH สารกำจัดออกซิเจนจะทำหน้าที่ลดออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำเลี้ยงและน้ำในหม้อ เป็นสารบำบัดที่ช่วยป้องกันการผุกร่อน ส่วนสารปรับ pH เป็นสารบำบัดที่ช่วยปรับ pH ของน้ำในหม้อไอน้ำ ค่า pH ของน้ำในหม้อไอน้ำจะขึ้นอยู่กับประเภท และความดัน แต่หากเพิ่มค่า pH ให้สูงประมาณ 8.5-9.5 จะสามารถลดการผุกร่อนได้ จึงต้องเติมสารปรับ pH ลงไปด้วย

การ Blow down น้ำในหม้อไอน้ำ เป็นการลดความเข้มข้นของสิ่งเจือปนในน้ำในหม้อไอน้ำ และเพื่อถ่ายโคลนหรือเลน (Sludge) ออกไป วิธีการ Blow down แบ่งออกเป็น Continuous blow down กับ Periodic blow down แต่ในแง่ของการป้องกันไม่ให้น้ำในหม้อไอน้ำมีความเข้มข้นสูงเกินไป และในแง่ของการนำความร้อนกลับมาใช้ Continuous blow down จะมีข้อได้เปรียบมากกว่า

1.1.5.2 ความเสียหายที่เกิดจากคุณภาพน้ำและมาตรการป้องกัน

หากไม่มีการควบคุมคุณภาพน้ำของหม้อไอน้ำอย่างเหมาะสม จะเกิดความเสียหายต่างๆ ได้แก่ การผุกร่อน การเกิดตะกรัน และ Carry over

(1) การผุกร่อน

การผุกร่อนของหม้อไอน้ำมีหลายแบบ ได้แก่ การผุกร่อนทั่วไป การผุกร่อนเฉพาะแห่ง และ Caustic embrittlement เป็นต้น

การผุกร่อนทั่วไป เป็นการผุกร่อนที่เกิดขึ้นกับพื้นผิวโลหะด้านหนึ่งเมื่อค่า pH ต่ำเกินไป หรือมีออกซิเจนละลายอยู่มากเกินไป การผุกร่อนเฉพาะแห่ง หมายถึงการที่ผิวหน้าของโลหะซึ่งปกคลุมด้วยชั้นของออกไซด์เกิดการผุกร่อนลึกเป็นแห่งๆ ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อชั้นออกไซด์ถูกทำลายด้วยสาเหตุใดๆ ทำให้เกิดแบคทีเรียทางเคมีขึ้นที่จุดนั้น โดยเหล็กซึ่งกลายเป็นขี้ขี้วจะละลายออกมาทำให้เกิดการผุกร่อน ส่วน Caustic embrittlement หมายถึงการแตกที่รอยต่ออุณหภูมิของเหล็ก ซึ่งเกิดขึ้นจากการที่องค์ประกอบที่เป็นต่าง เช่น โซดาไฟ ฯลฯ มีความเข้มข้นสูง มักเกิดขึ้นตามช่องเล็กๆ ของเหล็กบริเวณที่ได้รับแสงเค้นสูง

(2) การเกิดตะกรัน

ปรากฏการณ์ที่สารละลายน้ำภายในหม้อไอน้ำที่ให้น้ำกระด้าง เช่น แคลเซียม ฯลฯ หรือของแข็งที่ละลายอยู่ในน้ำ มาเกาะติดอยู่ที่พื้นผิวถ่ายเทความร้อน เช่น ผนังท่อด้านใน ฯลฯ เรียกว่า การเกิดตะกรัน เนื่องจากตะกรันมีสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเพียง 0.2-2 [W/m²K] ซึ่งต่ำกว่าเหล็กมาก ดังนั้น หากมีตะกรันเกาะอยู่ที่พื้นผิวถ่ายเทความร้อน จะทำให้ถ่ายเทความร้อนได้ไม่ดี ทำให้ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำลดลง และหากมีตะกรันมาสะสมมากขึ้น จะทำให้น้ำหมุนเวียนภายในท่อได้ไม่ดี หรือเกิดการขยายตัวและแตกร้าวเนื่องจากการได้รับความร้อนเฉพาะที่ได้

มาตรการป้องกันสามารถทำได้โดยการบำบัดน้ำนอกหม้อไอน้ำ เพื่อกำจัดสารแขวนลอยและของแข็งที่ละลายอยู่ในน้ำ ซึ่งจะกลายเป็นตะกรัน แล้วจ่ายน้ำนั้นให้หม้อไอน้ำ ส่วนภายในหม้อไอน้ำต้องทำการ Blow down อย่างเหมาะสม

(3) Carry over

ไอน้ำที่ได้จากหม้อไอน้ำ บางครั้งจะมีสิ่งแปลกปลอมซึ่งไม่ควรมีปนอยู่ด้วย ปรากฏการณ์เรียกว่า Carry over ซึ่งเกิดจากการที่น้ำในหม้อไอน้ำกลายเป็นละอองน้ำหรือฟอง แล้วถูกพาออกมานอกหม้อไอน้ำพร้อมๆ กับไอน้ำ เมื่อเกิด Carry over จะมีของแข็ง เช่น ซิลิกา ฯลฯ ไปเกาะติดที่ Superheater หรือใบพัดของกังหันไอน้ำ ทำให้ประสิทธิภาพลดลงเนื่องจากการถ่ายเทความร้อนลดลง หรือทำให้สมรรถนะของกังหันไอน้ำลดลง Carry over แบ่งออกได้เป็น Priming (ไอน้ำและน้ำออกมาพร้อมกัน) Foaming (การเกิดฟองก๊าซ) และ Silica carry over

Priming เกิดขึ้นจากการที่ไอน้ำเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และรุนแรงเนื่องจากภาวะของหม้อไอน้ำเปลี่ยนแปลงหรือสาเหตุอื่นๆ จนฟองก๊าซ และละอองน้ำที่เกิดขึ้นใน Drum ไม่ถูกแยกออกจากไอน้ำ แต่ถูกพาออกมาข้างนอก ส่วน Foaming เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจากการที่มีชั้นของฟองก๊าซเกิดขึ้นที่ผิวน้ำ เนื่องจากน้ำในหม้อไอน้ำมีความเข้มข้นสูงหรือมีสารอินทรีย์ปนอยู่ บางครั้งปรากฏการณ์นี้ทำให้เกิด Priming ได้อีกด้วย และ Silica carry over หมายถึงการละลายออกมากับไอน้ำนอกเหนือจากการถูกพาออกมาภายนอกเนื่องจาก Priming หรือ Foaming การละลายในไอน้ำจะละลายได้ดีขึ้นเมื่อความดันสูงขึ้น ในหม้อไอน้ำ Water tube boiler ควรควบคุมความเข้มข้นของซิลิกาของน้ำในหม้อให้ต่ำกว่า 2 ppm ที่ความดันไอน้ำ 7.5-10 MPa และให้ต่ำกว่า 0.2 ppm ที่ความดันไอน้ำ 10-15 MPa

1.1.6 การบำรุงรักษาหม้อไอน้ำ

การบำรุงรักษาหม้อไอน้ำ นอกจากต้องดูแลเรื่องความปลอดภัยแล้ว ในแง่ของการอนุรักษ์พลังงาน ยังต้องบำรุงรักษาหม้อไอน้ำให้มีประสิทธิภาพสูงอยู่เสมอ ไม่ใช่เชื้อเพลิงมากโดยไม่จำเป็น และไม่เกิดความสูญเสียมากในการผลิตไอน้ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในแง่ของการอนุรักษ์พลังงาน ควรตรวจสอบล่วงหน้าก่อนว่า หากมีการควบคุมการเผาไหม้ และคุณภาพน้ำอย่างเหมาะสมแล้ว ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำจะเป็นเท่าใด และทำการตรวจหาแนวโน้มของประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำเป็นประจำ เพื่อวิเคราะห์ว่ามีความร้อนสูญเสียเพิ่มขึ้นหรือไม่ นอกจากนี้ หากมีการเปลี่ยนแปลงสภาพการเดินเครื่องหรือรูปแบบการเดินเครื่อง ควรทำการตรวจวิเคราะห์สมดุลความร้อนต่างๆ เพื่อตรวจสอบว่ามีความร้อนสูญเสียเพิ่มขึ้นหรือไม่อีกด้วย

1.1.6.1 การควบคุมภาวะของหม้อไอน้ำ

กรณีที่ใช้ไอน้ำในการให้ความร้อนหรือปรับอากาศร้อนในโรงงานหรือสำนักงานต่างๆ ปริมาณการใช้ไอน้ำจะไม่คงที่แต่จะขึ้นอยู่กัฤดูกาลหรือช่วงเวลาใน 1 วัน อย่างไรก็ตาม ควรหลีกเลี่ยงการเดินเครื่องหม้อไอน้ำที่ภาวะของหม้อไอน้ำสูงหรือต่ำมากเกินไป การเดินเครื่องที่ภาวะสูงเกินไป จะทำให้ไม่สามารถนำความร้อนของก๊าซเผาไหม้ที่เผาไหม้ในหม้อไอน้ำมาใช้ได้หมด ทำให้ก๊าซไอเสียมีอุณหภูมิสูงขึ้นและประสิทธิภาพต่ำลง ในหม้อไอน้ำที่ภาวะมีการเปลี่ยนแปลงสูงมาก การตอบสนองของการควบคุมการเผาไหม้จะไล่ตามไม่ทัน ทำให้เดินเครื่องด้วยอัตราส่วนเชื้อเพลิง-อากาศที่เหมาะสมได้ลำบาก ความสูญเสียในก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเผาไหม้ได้ไม่ดีจึงเพิ่มสูงขึ้น และน้ำในหม้อไอน้ำในรูปของละอองน้ำจะไหลออกมาจาก Drum พร้อมกับไอน้ำเนื่องจาก Priming ได้ง่าย เป็นผลให้ใช้เชื้อเพลิงโดยสูญเปล่า และประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนลดลง ส่วนการเดินเครื่องที่ภาวะต่ำเกินไป เชื้อเพลิงที่ป้อนให้เตาจะมีปริมาณน้อยเทียบกับเมื่อเดินเครื่องที่ปกติ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับเชื้อเพลิงเหลวและเชื้อเพลิงแข็ง จะทำให้มีความสูญเสียจากการไม่

เผาไหม้เนื่องจากเผาไหม้ได้ไม่ดีเพิ่มสูงขึ้น และหากเพิ่มอัตราส่วนอากาศเพื่อป้องกันปรากฏการณ์ดังกล่าว จะมีการสูญเสียในก๊าซเสียเนื่องจากมีอากาศมากเกินไปเพิ่มขึ้น

มาตรการป้องกันปัญหาเหล่านี้ ทำได้จากด้านผู้ใช้น้ำ โดยการปรับเฉลี่ยปริมาณการใช้งานไอน้ำให้สม่ำเสมอ และจากด้านหม้อไอน้ำด้วยการเดินเครื่องหม้อไอน้ำด้วยจำนวนเครื่องที่เหมาะสม

1.1.6.2 การควบคุมการเผาไหม้อย่างเหมาะสม

เราจำเป็นต้องควบคุมการเผาไหม้เพื่อลดความสูญเสียในก๊าซไอเสียให้เหลือน้อยที่สุดด้วยการเผาไหม้เชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ด้วยอัตราส่วนอากาศที่เหมาะสม ความสูญเสียในก๊าซไอเสียแบ่งเป็นความสูญเสียในเชื้อเพลิงที่ไม่เผาไหม้ซึ่งถูกปล่อยออกมาพร้อมกับก๊าซไอเสียซึ่งเกิดจากการเผาไหม้ได้ไม่ดีและความร้อนสูญเสียที่ปล่อยออกในรูปของความร้อนสัมผัสของก๊าซไอเสีย เมื่อลดอัตราส่วนอากาศให้ต่ำลงจะทำให้อากาศไม่เพียงพอ ทำให้การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ความสูญเสียในเชื้อเพลิงที่ไม่เผาไหม้จึงเพิ่มขึ้นในขณะเดียวกันก็ยังส่งผลเสียอย่างอื่นด้วยคือเกิดมลพิษทางอากาศอีกด้วย เมื่อเพิ่มอัตราส่วนอากาศให้สูงขึ้นอากาศที่ไม่เกี่ยวข้องกับการเผาไหม้จะเพิ่มขึ้น ทำให้ก๊าซไอเสียมีอัตราไหลเพิ่มขึ้น ความร้อนสัมผัสของก๊าซเผาไหม้จะถูกปล่อยทิ้งไปโดยสูญเปล่า ในหม้อไอน้ำที่ก๊าซไอเสียมีอุณหภูมิ 200 °C หากเดินเครื่องโดยเพิ่มอัตราส่วนอากาศขึ้น 0.1 ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำจะลดลงประมาณ 0.5%

เราควรตรวจสอบว่ามีการเผาไหม้อย่างเหมาะสมหรือไม่ โดยการวิเคราะห์ก๊าซไอเสียเป็นประจำเพื่อตรวจสอบว่าหม้อไอน้ำได้รับการบำรุงรักษาให้สามารถเผาไหม้ได้อย่างเหมาะสมหรือไม่

1.1.6.3 การควบคุมความสกปรกที่พื้นผิวถ่ายเทความร้อนของหม้อไอน้ำ

ก๊าซเผาไหม้ที่ถูกเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ จะถ่ายเทความร้อนให้แก่ น้ำในหม้อ แต่ถ้าพื้นผิวถ่ายเทความร้อนสกปรก การถ่ายเทความร้อนจะไม่ดี ทำให้ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำลดลง มาตรการป้องกันเกี่ยวกับน้ำ (น้ำในหม้อ) ที่สำคัญคือการควบคุมคุณภาพน้ำที่อธิบายไปในหัวข้อที่แล้ว เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดตะกอน และมาตรการป้องกันเกี่ยวกับห้องเผาไหม้ ก็ต้องมีการควบคุมดำเนินการเช่นเดียวกันด้วย

ในการเผาไหม้น้ำมันหนัก เมื่อสารประกอบของโลหะที่มีอยู่เล็กน้อยในน้ำมันหนักเกิดการเผาไหม้ จะกลายเป็นซีเถ้าเกาะอยู่ที่พื้นผิวถ่ายเทความร้อน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ซีเถ้าของสารประกอบพวกวาเนเดียมจะมีจุดหลอมเหลวต่ำ เมื่อเกาะ และสะสมอยู่ที่พื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่มีอุณหภูมิสูง เช่น Superheater หรือ Reheater จะเกิดการกัดกร่อน การกัดกร่อนนี้เรียกว่า High temperature corrosion ในขณะที่ Low temperature corrosion จะเกิดจากการที่ SO_3 ในก๊าซไอเสียเกิดการควบแน่น (Acid dew point)

ในการเผาไหม้ถ่านหิน เนื่องจากในถ่านหินจะมีซีเถ้ารวมอยู่ด้วยประมาณ 10-20% ดังนั้นจึงเกิดซีเถ้าจากการเผาไหม้ขึ้นจำนวนมาก ซีเถ้าที่ฟุ้งกระจายอยู่ในก๊าซไอเสีย เรียกว่า Fly ash ซึ่งซีเถ้านี้จะไปเกาะสะสมอยู่ที่ท่อถ่ายเทความร้อน จึงไปขัดขวางการถ่ายเทความร้อนทำให้เป็นไปโดยไม่สะดวกและทำให้เกิดการกัดกร่อน

มาตรการป้องกันความสกปรกของพื้นผิวถ่ายเทความร้อนเหล่านี้ ส่วนมากจะใช้ Soot blower ระหว่างเดินเครื่องเพื่อกำจัดสิ่งแปลกปลอมที่เกาะติดอยู่ โดยพ่นไอน้ำหรืออากาศความดันสูงออกมาจาก Nozzle เพื่อใช้พลังงานจลน์นั้นเป่าเข้ามา และซีเถ้าที่เกาะติดอยู่ที่พื้นผิวถ่ายเทความร้อนให้ปลิวหลุดออกไป ควรทำเป็นประจำเพื่อป้องกันการสะสมของสิ่งสกปรก

1.2 หลักการส่งจ่ายและกักเก็บไอน้ำ

1.2.1 การส่งไอน้ำ

1.2.1.1 ประเภทและสมบัติของของไหลส่งความร้อน

เราต้องเลือกของไหลส่งความร้อนให้เหมาะกับวัตถุประสงค์ในการใช้งาน และพยายามส่งความร้อนให้มีการสูญเสียน้อยที่สุดอย่างปลอดภัย และไม่ให้เกิดคุณภาพชนิดของไหลส่งความร้อนสามารถแบ่งได้ดังต่อไปนี้

- (1) ไอดง (Superheated steam)
- (2) ไอน้ำอิ่มตัว (Saturated steam)
- (3) น้ำอิ่มตัว (รวมทั้ง Condensate)
- (4) น้ำอัดความดัน (Compressed liquid)
- (5) ของเหลว-ก๊าซทั้งสองสถานะ (ของไหลสองสถานะ)

นอกจากนี้ ในกรณีของการใช้งานพิเศษ นอกจากใช้น้ำแล้ว ยังใช้ของไหลที่มีจุดเดือดสูง (ในสถานะของเหลวสถานะเดียว) เช่น น้ำมัน ฯลฯ ในการส่ง หรือใช้ป้อนความร้อน หรือส่งความร้อนด้วยปฏิกิริยาเคมี (ป้อนความร้อนเคมี) เป็นต้น

การเลือกใช้ตัวกลางการส่งความร้อน และสถานะของตัวกลาง จะต้องให้สอดคล้องกับความต้องการของภาระความร้อน ไอน้ำสำหรับให้ความร้อนซึ่งมีสัดส่วนการใช้ที่สูงที่สุดในบรรดาความต้องการในอุตสาหกรรม ควรส่งไอน้ำให้มีสภาพอิ่มตัวที่ด้านอุปสงค์ การกำหนดเงื่อนไขที่ด้านอุปทานจะต้องพิจารณาอย่างบูรณาการโดยคำนึงถึงระยะทาง และเส้นทางในการส่ง (ความดันสูญเสีย ความร้อนสูญเสียจากการคายความร้อนและ Condensate ต้นทุนค่าอุปกรณ์ และค่าใช้จ่ายในการเดินเครื่อง)

ในการส่งไอน้ำอิ่มตัว การคายความร้อนเกิดเป็น Condensate จะทำให้เกิดกระแสของไหลสองสถานะได้ง่าย ดังนั้น จึงต้องระมัดระวังในการจัดการกับ Condensate ด้วย กระแสของไหลสองสถานะจะมีรูปแบบการไหลที่ซับซ้อนขึ้นอยู่กับเงื่อนไขต่างๆ เช่น รูปร่างลักษณะของเส้นทางการไหล ความเร็ว กระแส อัตราส่วนระหว่างปริมาตรของไอต่อของเหลว (Void ratio) เป็นต้น รวมทั้งมีความดันสูญเสียสูง เกิดการไหลที่ไม่มีเสถียรภาพ และ Choke (การอุดตันท่อ) ได้ง่าย บางกรณียังทำให้ท่อและวาล์วเกิดการสั่นอย่างรุนแรง และเกิดการผุกร่อนได้ง่าย จึงเป็นสิ่งที่ควรหลีกเลี่ยง การตั้งใจส่งด้วยของไหลสองสถานะ มักจะต้องการใช้ในกรณีพิเศษเท่านั้น เช่นการส่งน้ำร้อนและไอน้ำจากบ่อความร้อนใต้ดิน เป็นต้น ดังนั้น ในอุดมคติแล้วหากสภาพของแหล่งกำเนิดไอน้ำสามารถยอมให้ทำได้แล้ว ควรทำให้ไอน้ำที่ส่งออกมา มี Degree of superheat ต่ำที่สุดเท่าที่จะทำได้ เพื่อให้ไอน้ำที่ได้รับเป็นไอน้ำอิ่มตัวพอดี ค่า Degree of superheat ที่เหมาะสมในกรณีดังกล่าว จะขึ้นอยู่กับระยะทางที่ส่งไอน้ำ ลักษณะของท่อส่ง และกรณีที่ใช้อุปกรณ์ลดความดันและลดอุณหภูมิ จะขึ้นอยู่กับขีดความสามารถในการควบคุมของอุปกรณ์นั้นด้วย แต่โดยทั่วไปจะอยู่ในช่วง 5-10 °C

การส่งน้ำร้อน (น้ำอัดความดัน) นิยมใช้กันมาแต่อดีตในการปรับอากาศร้อน น้ำร้อนมีสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูง สามารถใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีพื้นที่ถ่ายเทความร้อนขนาดเล็กได้ นอกจากนั้นในกรณีของเครื่องกำเนิดน้ำร้อน ยังไม่มีข้อจำกัดในการแลกเปลี่ยนความร้อนเนื่องจากผลต่างอุณหภูมิ Pinch point (ผลต่างของอุณหภูมิที่มีค่าน้อยที่สุดระหว่างของไหลรับความร้อนกับของไหลให้ความร้อน) จึงมีข้อได้เปรียบที่สามารถให้ความร้อนแก่ของเหลวรับความร้อนได้จนเข้าใกล้อุณหภูมิขาออกของของเหลวให้ความร้อน นอกจากนี้ ในการส่งระยะไกล เช่น การปรับอากาศร้อน-เย็นในการส่งความร้อนปริมาณเดียวกันแทนที่จะส่งไอน้ำ การส่งน้ำร้อนโดยมากจะได้เปรียบกว่า ทั้งนี้ การส่งน้ำร้อนจะใช้ได้แต่การส่งอุณหภูมิเท่านั้น และต้องใช้กำลังขับเคลื่อนในการส่ง ดังนั้น ในการเลือกใช้ของไหลส่งความร้อนสำหรับการปรับอากาศ

ร้อน-เย็น จึงต้องพิจารณาอย่างบูรณาการโดยคำนึงถึงสภาพการติดตั้งท่อส่ง และลักษณะการใช้งานความร้อนที่ด้านผู้ใช้อย่าง

การส่งความร้อนด้วยของไหลจุดเดือดสูง เช่น น้ำมันร้อน ฯลฯ จะสามารถส่งที่อุณหภูมิสูงกว่า 100°C ด้วยของเหลวได้ อย่างไรก็ตาม เราต้องพิจารณาเรื่องมลพิษสิ่งแวดล้อมในกรณีที่เกิดการรั่วด้วย นอกจากนี้ ตัวกลางความร้อนเช่นนี้ โดยมากจะมีราคาค่อนข้างสูง จึงมีการนำมาใช้ในกรณีพิเศษเท่านั้น

1.2.1.2 การส่งไอน้ำกับคุณภาพของไอน้ำ

คุณภาพของไอน้ำที่ใช้ในการให้ความร้อน จะต้องเหมาะสมกับวัตถุประสงค์การใช้งานนั้น และต้องช่วยรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้คงที่รวมทั้งต้องช่วยอนุรักษ์พลังงานในอุปกรณ์ที่ใช้ความร้อน และเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตอีกด้วย สมบัติ และเงื่อนไขที่พึงปรารถนาของไอน้ำสำหรับให้ความร้อนมีดังต่อไปนี้

- (1) Degree of superheat ไม่สูงเกินไป
- (2) เป็นไอน้ำอิ่มตัวที่มีความแห้งสูงที่สุดเท่าที่จะทำได้
- (3) มีความดันต่ำที่สุดเท่าที่จะทำได้
- (4) มีความดันและอุณหภูมิที่จ่ายให้คงที่

ไอน้ำสำหรับให้ความร้อนโดยมากจะต้องมีอุณหภูมิตามที่กำหนด ดังนั้น การใช้ไอน้ำอิ่มตัวจะเป็นวิธีที่เหมาะสม ในกรณีนี้ เนื่องจากยิ่งความดันไอน้ำต่ำลง ความร้อนแฝงของการควบแน่นจะยิ่งมีค่าสูงขึ้น ดังนั้น หากปริมาณความร้อนที่ต้องการให้มีค่าคงที่ ยิ่งใช้ไอน้ำที่ความดันต่ำเท่าใด จะยิ่งต้องการปริมาณไอน้ำน้อยลงเท่านั้น

นอกจากนั้น การส่งไอน้ำความดันต่ำยังทำให้สามารถลดความดันใช้งานของหม้อไอน้ำซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดไอน้ำ หรือลดความดันของไอน้ำที่ออกจาก Back pressure ของกังหันไอน้ำลงได้ มองในแง่ของการอนุรักษ์พลังงาน จึงควรลดความดันของการส่งไอน้ำให้ต่ำที่สุดเท่าที่จะทำได้

นอกจากนั้น การจ่ายไอน้ำที่มีความดัน และอุณหภูมิสูงเกินความจำเป็น จะทำให้อุปกรณ์รับความร้อนได้รับความเค้นความร้อน (Thermal stress) อย่างมาก นอกจากนี้ เนื่องจากไอน้ำที่ใช้เป็นแหล่งความร้อนจะมีสัมประสิทธิ์การพาความร้อนต่ำ ดังนั้น นอกจากจะต้องเพิ่มพื้นที่ถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแล้ว ยังมีจุดอ่อนคือ อุณหภูมิของพื้นผิวรับความร้อนยังไม่ค่อยคงที่อีกด้วย ในขณะที่เมื่อไอน้ำอิ่มตัวสัมผัสกับพื้นผิวรับความร้อนจะเริ่มควบแน่นทันทีและปลดปล่อยความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอซึ่งมีค่าสูงออกมา ระหว่างนั้นอุณหภูมิจะมีค่าคงที่ จึงเป็นแหล่งความร้อนในอุดมคติ จากเหตุผลดังกล่าวคุณภาพของไอน้ำในอุดมคติ เมื่อส่งไปถึงอุปกรณ์รับความร้อน จึงควรมีสภาพเป็นไอน้ำอิ่มตัวความดันต่ำที่มีความแห้งสูงที่สุดเท่าที่จะทำได้

อนึ่ง การใช้วาล์วลดความดันหรืออุปกรณ์อื่นๆ ปรับปรุงคุณภาพไอน้ำเปียกด้วยการทำให้เป็นไอน้ำแห้ง หากไม่ใช่กรณีพิเศษแล้วจะไม่เป็นที่แนะนำเท่าใดนัก เนื่องจากตามทฤษฎีแล้วแม้ว่าเอนทัลปีจะไม่มีเปลี่ยนแปลง แต่กระบวนการดังกล่าวจะทำให้ไอน้ำมีค่าเอนโทรปีเพิ่มขึ้น ค่าพลังงาน Effective (หรือ Exergy) จึงเกิดการสูญเสีย นอกจากนี้ การรีดไอน้ำเปียกให้เป็นไอน้ำแห้งจะมีประสิทธิภาพในกรณีของไอน้ำอิ่มตัวความดันต่ำไม่เกิน 3.2 MPa เท่านั้น หากใช้กับไอน้ำที่มีความดันสูงกว่านี้จะกลายเป็นไอน้ำเปียก จึงต้องใช้ความระมัดระวัง

1.2.1.3 การวางแผนเดินท่อส่งไอน้ำ

ท่อส่งไอน้ำนอกจากจะต้องรักษาคุณภาพของไอน้ำให้ดีแล้วยังต้องสามารถอนุรักษ์พลังงานได้ดีอีกด้วย เงื่อนไขของการวางแผน และออกแบบท่อส่งไอน้ำในอุดมคติมีดังต่อไปนี้

(1) มีระยะทางสั้น เส้นผ่านศูนย์กลางเล็ก และไม่โค้งงอโดยไม่จำเป็น

(2) มีความร้อนสูญเสียจากการแผ่รังสี และความดันสูญเสียน้อยที่สุด

อย่างไรก็ตาม เงื่อนไขต่างๆ เหล่านี้มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน บางปัจจัยก็ขัดแย้งกัน นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงของภาระในการเดินเครื่องที่ภาระต่ำอีกด้วย ตัวอย่างเช่น หากขยายขนาดท่อไม่เพียงแต่ต้นทุนจะสูงขึ้นเท่านั้น แต่ความร้อนสูญเสียจากการแผ่รังสียังเพิ่มขึ้นอีกด้วย ไม่เพียงแต่ค่าใช้จ่ายในการเดินเครื่องปั๊มต่างๆ จะสูงขึ้นเท่านั้น แต่บางครั้งยังไม่สามารถจ่ายไอน้ำที่ความดันและอุณหภูมิตามที่กำหนดให้แก่อุปกรณ์ที่ใช้ไอน้ำได้อีกด้วย และเนื่องจากความดันสูญเสียจะแปรผันตามความยาวของท่อ และกำลังสองของความเร็วกระแส แต่แปรผกผันกับเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ ดังนั้น หากระยะทางสั้น บางครั้งถ้าตัดสินใจใช้ท่อเล็กไปเลยก็จะมีประสิทธิภาพดีกว่า

ในการกำหนดขนาดของท่อ เราต้องกำหนด

(1) ความดันออกแบบ (ความดันใช้งานสูงสุด)

(2) อัตราไหล

(3) ความยาวสมมูลจากจุดอุปทานไปยังอุปกรณ์ใช้ไอน้ำ

(4) ความดันสูญเสียที่ยอมรับได้

ในที่นี้ “ความยาวสมมูล” ในข้อ (3) หมายถึง ความยาวของท่อบวกด้วยความยาวสมมูลท่อตรงของวาล์ว ข้อต่อ และท่อโค้งต่างๆ ขณะที่เริ่มคำนวณเนื่องจากยังไม่รู้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อจึงต้องใช้วิธีสมมติ ความเร็วกระแสในท่อที่คำนวณได้เป็นผลลัพธ์ จะถูกจำกัดด้วยการกัดกร่อน ฟลัชและ Water hammer การสั่นสะเทือน เสียงรบกวน ฯลฯ ดังนั้น จึงต้องทำการตรวจสอบซ้ำอีกครั้งก่อนกำหนดแน่นอน ตารางที่ 1.1 แสดงตัวอย่างช่วงความเร็วกระแสที่เหมาะสมในการส่งไอน้ำ

ตารางที่ 1.1 ตัวอย่างช่วงความเร็วกระแสที่เหมาะสมของไอน้ำ

ช่วงความดันของไอน้ำ		ความเร็วกระแส [m/s]
ไอน้ำอิ่มตัวความดันต่ำ	0.2-0.5 MPa	15- 20
ไอน้ำความดันปานกลาง	0.5-4.0 MPa	20- 50
ไอน้ำความดันสูง ไม่น้อยกว่า	4.0 MPa	50-120

ความดันออกแบบจะกำหนดโดยคำนึงถึงความเหมาะสมกับความดันที่ตั้งไว้ของวาล์ว นิรภัยและวาล์วระบายที่ต้องใช้ สูตรการคำนวณความหนาของท่อมีอยู่หลายชนิด แต่ถ้าจำเป็นต้องปฏิบัติตามกฎหมายหรือมาตรฐานทางวิศวกรรมต่างๆ ให้ยึดตามข้อกำหนดนั้นๆ

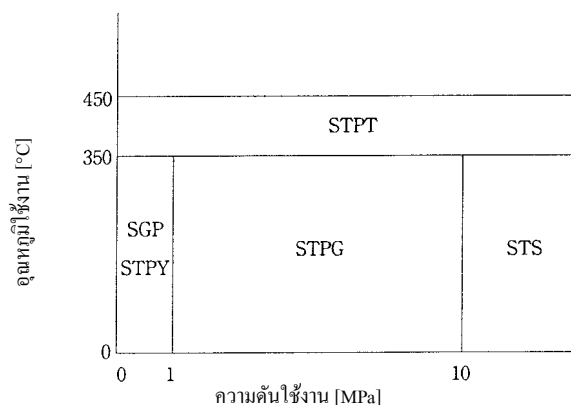
เส้นทางการวางท่อควรสั้นที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ อย่างไรก็ตาม เพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายจากความร้อนทำให้เกิดความเค้นมากเกินไปต่อตัวท่อเอง และต่ออุปกรณ์ที่ต่ออยู่ นอกจากควรใช้ Expansion joint ได้แล้ว จะต้องกำหนดเส้นทางโดยทำการวิเคราะห์อย่างถี่ถ้วน ในท่อส่งไอน้ำอิ่มตัวโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อส่งไอน้ำเปียก เนื่องจากความร้อนที่แผ่รังสีออกไปจะทำให้ไอน้ำกลายเป็น Condensate จึงต้องกำหนดความชันและรูปร่างของท่อ เตรียมกับดัก และเลือกใช้ความเร็วกระแสให้เหมาะสม นอกจากนี้ ยังต้องพิจารณาวิธีอุ่นเครื่องอุปกรณ์ที่ใช้งาน และการระบาย Condensate ออกด้วย

ปัจจัยต่างๆ เหล่านี้จะต้องวางแผน และออกแบบอย่างบูรณาการในฐานะที่เป็นระบบหนึ่ง ที่ประกอบด้วยหน้าที่การทำงานต่างๆ โดยคำนึงถึงการเดินเครื่องไม่เพียงแต่ที่พิกัดเท่านั้น แต่ต้องพิจารณาเมื่อ ภาระไม่เต็มพิกัดหรือเมื่อภาระมีการเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงความยืดหยุ่น ความ เชื่อถือได้ ความคุ้มค่า ฯลฯ อีกด้วย

1.2.1.4 วัสดุทำท่อ วาล์วและ Expansion joint

(1) วัสดุทำท่อ

วัสดุทำท่อที่ใช้ในระบบท่อไอน้ำ โดยทั่วไป กรณีที่อุณหภูมิไม่เกิน 350 °C และความดันไม่เกิน 1 MPa จะใช้ท่อเหล็กกล้า SGP หรือท่อเหล็กกล้าอ็อก STPY กรณีความดันสูงกว่า 1 MPa แต่ไม่เกิน 10 MPa จะใช้ท่อเหล็กกล้าทนความดัน STPG กรณีที่ความดันสูงกว่า 10 MPa จะใช้ท่อเหล็กกล้าทนความดันสูง STS กรณีที่อุณหภูมิสูงกว่า 350°C จะใช้ท่อเหล็กกล้าทนอุณหภูมิสูง STPT รูปที่ 1.8 แสดงตัวอย่างเกณฑ์การเลือกใช้วัสดุทำท่อ



รูปที่ 1.8 ตัวอย่างเกณฑ์การเลือกวัสดุทำท่อจากอุณหภูมิและความดัน

(2) วาล์ว

วาล์วที่ใช้ในระบบท่อไอน้ำ แบ่งเป็นวาล์วกัน (Gate valve, Sluice valve) วาล์ว ทรงกลม (Globe valve) วาล์วกันย้อน (Check valve) Ball valve และ Butterfly valve

รูปร่างและวัสดุของวาล์วควรเลือกใช้ให้เหมาะสมกับวัตถุประสงค์รวมทั้งความดัน และอุณหภูมิใช้งาน ที่ความดันไม่เกิน 1 MPa จะใช้วาล์วทองเหลืองและวาล์วเหล็กหล่อ ที่ความดันตั้งแต่ 1 MPa ถึง 2 MPa จะใช้วาล์วเหล็กหล่อและวาล์วเหล็กเหนียว

วาล์วกันโดยทั่วไปจะใช้ในสภาพปิดสุดหรือปิดสุด วาล์วทรงกลมจะมีความดันสูญเสีย สูงกว่าวาล์วกัน แต่จะใช้เมื่อต้องการปรับอัตราไหลเป็นหลัก วาล์วกันย้อนจะใช้เพื่อป้องกันของไหล ไหลย้อนกลับ แบ่งเป็นแบบสปริงกับแบบลิฟต์ ในวาล์วแบบลิฟต์ตัววาล์วจะเปิดเมื่อถูกดันขึ้นด้วยความดันของ ของไหล และต้องติดตั้งในแนวระดับ

(3) Expansion joint

เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป ท่อจะมีการยืดหด ระยะยืดหดจะแปรผันตามความยาว ของท่อกับผลต่างอุณหภูมิโดยไม่ขึ้นกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ หากยึดปลายทั้งสองของท่อ (ท่อตรง) ไว้โดยไม่ให้ท่อยืด (หด) ได้โดยอิสระ ท่อจะได้รับความเค้นอัด (ดึง) เมื่อระยะยืดหดเพิ่มขึ้นความเค้นจะเพิ่มขึ้น จนทำให้ตัวท่อแตกเสียหายหรือข้อต่อ และอุปกรณ์ยึดได้รับความเสียหาย ดังนั้น ในระบบท่อที่มีการ

ตอนที่ 3 บทที่ 1 ระบบความร้อนและอุปกรณ์ที่ใช้ไอน้ำ

เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะต้องใช้ Expansion joint หรือใช้ชิ้นส่วนท่อที่มีความอ่อนตัวเหมาะสม เพื่อรองรับความเค้นที่เกิดจากการยืดหดตัวของท่อ

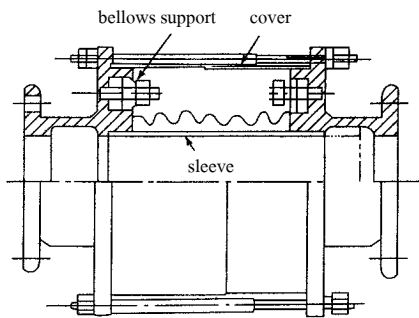
Expansion joint แบ่งเป็น Bellows expansion joint, Sleeve expansion joint, Ball expansion joint และ Expansion loop

(ก) Bellows expansion joint

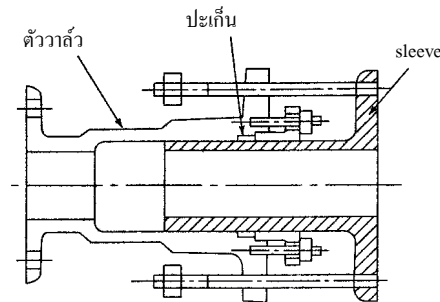
ข้อต่อแบบนี้จะรองรับการยืดหดของท่อด้วยการเปลี่ยนรูปของ Bellows เทียบกับข้อต่อชนิดอื่นแล้วจะรองรับระยะยืดหดได้มากกว่า โดยมาก Bellows จะทำจากสแตนเลส และไม่ใช้ปะเก็นจึงไม่เกิดการรั่ว อย่างไรก็ตาม ในการติดตั้งหากไม่ Guide ให้ถูกต้องอาจเกิด Back ring ขึ้นได้ รูปที่ 1.9 แสดง Single bellows expansion joint

(ข) Sleeve expansion joint

แสดงไว้ในรูปที่ 1.10 ที่ตัววาล์วจะมี Sleeve ซึ่งสามารถเลื่อนไปมาได้ การเคลื่อนที่ของ Sleeve นี้จะรองรับการยืดหดของท่อ การซีลจะใช้ปะเก็นของ Stuffing box เพื่อป้องกันการรั่ว โดยโครงสร้างแล้วจะใช้กับความดันไม่เกิน 1 MPa



รูปที่ 1.9 Bellows expansion joint



รูปที่ 1.10 Sleeve expansion joint

(ค) Ball expansion joint

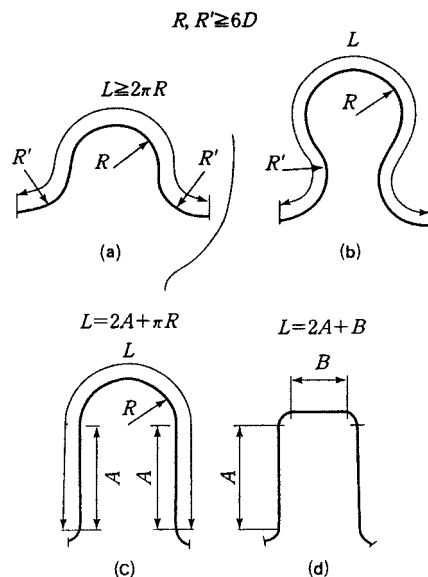
แสดงไว้ในรูปที่ 1.11 โดยใช้ Universal ball joint จำนวน 2 หรือ 3 ตัว มีข้อดีคือสามารถรองรับระยะยืดหดได้มากโดยใช้พื้นที่ค่อนข้างน้อย บางครั้งก็เรียกว่าการเดินท่อแบบ Offset

(ง) Expansion loop

ท่อออกแบบนี้จะใช้ความอ่อนตัวของตัวท่อเอง งามเป็นวง หรือใช้ Bend ในการงอเป็นรูปตัว U ดังรูปที่ 1.12 เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากที่สุดเนื่องจากไม่ต้องมีการบำรุงรักษา อย่างไรก็ตาม เนื่องจากต้องใช้พื้นที่มากในการติดตั้ง จึงมีข้อจำกัดในการติดตั้ง

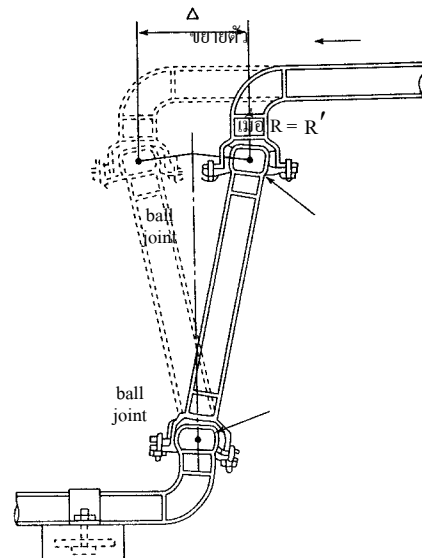
(4) การติดตั้งและเดินท่อ

ในการติดตั้งเดินท่อที่มีการยืดหดเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป เช่น ท่อไอน้ำหรือท่อ Condensate จะต้องใช้ความระมัดระวังเป็นพิเศษ วิธียืดท่อไอน้ำแบ่งเป็นการยืดตายตัวกับการยืดอิสระ และกลางเส้นทางจะติดตั้ง Expansion joint ไว้ ณ ตำแหน่งที่เหมาะสม กรณีที่จะติดตั้ง Expansion joint ต้องพิจารณาอุณหภูมิของอากาศในขณะติดตั้ง และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิด้วย



ยึดตายตัว

รูปที่ 1.11 Ball expansion joint



รูปที่ 1.12 Expansion loop

ในช่วงระยะเวลาก่อสร้าง ควรปรับระยะเพื่อยึดหดเทียบกับระยะยึดหดสูงสุดของ Expansion joint แล้วกำหนดระยะยึดหดที่ใช้งานปกติ ที่ก่อนและหลัง Expansion joint จะต้องติดตั้งตัวยึด โดยทั่วไปที่ด้านหนึ่งจะยึดตายตัว (Anchor) และที่ด้านตรงข้ามจะยึดอิสระ (Guide) โดยติดตั้งข้อต่อหลายตัว โดยให้ระหว่าง Anchor สองตัว จะมี Expansion joint ตัวหนึ่งที่สามารถรองรับระยะยึดหดได้ทั้งหมด กรณีที่ใช้ Bellows expansion joint หรือ Sleeve expansion joint ส่วนที่เป็นท่อโค้งจะต้องติดตั้ง Anchor ทั้งหมด เนื่องจากจุดยึดตายตัวจะมีความเค้นสูงกระทำต่อ Expansion joint และท่อจึงต้องมีความแข็งแรงเพียงพอ

ความร้อนที่แผ่รังสีออกจากท่อไอน้ำและท่อ Condensate จะไม่ก่อให้เกิดประโยชน์แต่อย่างใด กล่าวคือเป็นความสิ้นเปลืองพลังงานโดยสูญเปล่าอย่างสิ้นเชิง จึงต้องพยายามป้องกันให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ ดังนั้น ข้อกำหนดจำเพาะของฉนวนความร้อนของท่อไอน้ำและท่อ Condensate จะต้องทำการคำนวณความสูญเสียจากการแผ่รังสีจากท่อ และกำหนดให้ผลรวมของค่าติดตั้งฉนวนกับค่าพลังงานที่สูญเสียมีค่าน้อยที่สุด

1.2.2 การเก็บไอน้ำ

1.2.2.1 การเปลี่ยนแปลงของอุปสงค์อุปทานไอน้ำและมาตรการบรรเทา

การเปลี่ยนแปลงปริมาณทางด้านอุปสงค์ และอุปทานไอน้ำ สุดท้ายแล้วจะทำให้คุณภาพของไอน้ำต่ำลง กล่าวคือความดัน และอุณหภูมิของไอน้ำจะเปลี่ยนไป และส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของกระบวนการผลิต และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ดังนั้น กรณีที่มีความเป็นไปได้ดังกล่าว จะต้องพิจารณาใช้อุปกรณ์ปรับอุปสงค์อุปทานอย่างใดอย่างหนึ่ง

โดยทั่วไปการเปลี่ยนแปลงภาระไอน้ำที่เกิดขึ้นที่ด้านอุปสงค์ ด้านอุปทานไอน้ำจะเป็นผู้ปรับตาม ผลคือต้องเปลี่ยนปริมาณไอน้ำที่กำเนิดจากหม้อไอน้ำ หากเป็นกังหันแบบ Back pressure จะทำให้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตขึ้นเปลี่ยนไป อย่างไรก็ตาม อุปกรณ์ความร้อนเหล่านี้ไม่เหมาะกับการเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหัน นอกจากนี้ ในระบบจ่ายไอน้ำที่ใช้ความร้อนทิ้งที่นำกลับมาหรือใช้พลังงานธรรมชาติ โดยมากมักจะปรับปริมาณกำเนิดไอน้ำอย่างอิสระได้ยาก ในกรณีเช่นนี้หากติดตั้งอุปกรณ์บัฟเฟอร์อย่างใดอย่างหนึ่งเพื่อช่วย

เกลี่ยภาระให้สม่ำเสมอขึ้น ทำให้สามารถลดภาระสูงสุดของหม้อไอน้ำหรือการเปลี่ยนแปลงกำลังขาออกของกังหันแบบ Back pressure ได้แล้ว ไม่เพียงแต่การเดินเครื่องจะมีประสิทธิภาพดีขึ้นเท่านั้น แต่ในแง่ของการลงทุนยังคุ้มค่ายิ่งขึ้น มีอัตราการใช้งานและประสิทธิภาพสูงขึ้น รวมทั้งสามารถคาดหวังประสิทธิภาพในการลดการเกิด NO_x และ CO_2 ได้อีกด้วย

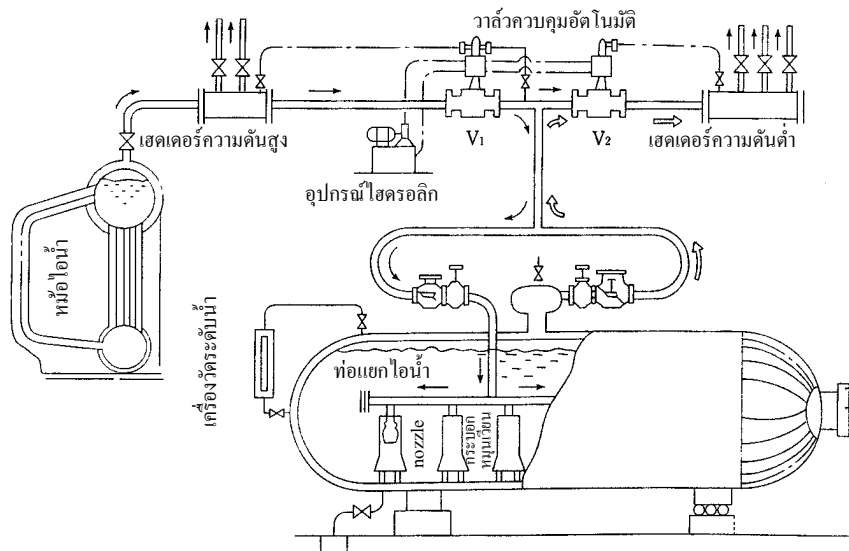
1.2.2.2 Steam accumulator

กรณีที่มีปริมาณการใช้ไอน้ำเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อโรงงานเริ่มทำงาน หรือกรณีที่มีความต้องการไอน้ำปริมาณมากเป็นครั้งคราว หรือในกระบวนการผลิตที่ความต้องการไอน้ำไม่สม่ำเสมอๆ ทั้งในแง่ปริมาณ และเวลา เพื่อเกลี่ยการเปลี่ยนแปลงเหล่านี้ให้สม่ำเสมอ มักจะมีการติดตั้ง Steam accumulator

Steam accumulator แบ่งตามวัตถุประสงค์การใช้งาน และสถานที่ที่ใช้งานได้เป็นแบบความดันไม่คงที่ และแบบความดันคงที่ โดย Steam accumulator ขนาดใหญ่โดยทั่วไปมักจะเป็นแบบแรก ขณะที่แบบหลังจะใช้กับวัตถุประสงค์ค่อนข้างเฉพาะ เช่น น้ำจ่ายให้หม้อไอน้ำ เป็นต้น

Steam accumulator แบบความดันไม่คงที่จะติดตั้งไว้ระหว่างอุปกรณ์จ่ายไอน้ำกับภาระไอน้ำ เมื่อภาระไอน้ำเพิ่มขึ้นและความดันของระบบไอน้ำลดต่ำลง น้ำร้อนอิ่มตัวในภาชนะความดันสูงจะกลายเป็นไอน้ำด้วยตัวเอง ปลดปล่อยความร้อนที่เทียบเท่ากับผลต่างจากอุณหภูมิอิ่มตัวที่ความดันที่ลดต่ำลงนั้น ทำให้มีความดันลดลงขณะที่จ่ายไอน้ำอิ่มตัวให้ ในทางกลับกันเมื่อภาระไอน้ำลดลงและความดันของระบบไอน้ำเพิ่มขึ้น ไอน้ำความดันสูงจะจ่ายออกมาจากหม้อไอน้ำ ไอน้ำจะถูกพ่นเข้าไปหาน้ำร้อนในภาชนะ น้ำร้อนอิ่มตัวจะดูดกลืนความร้อนนั้นทำให้มีความดัน และอุณหภูมิเพิ่มขึ้น กล่าวคือ เป็นการเก็บสะสมความร้อนนั่นเอง ใน Steam accumulator แบบความดันไม่คงที่นี้ ความดันในภาชนะจะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการสะสมและคายความร้อน การที่จะทำงานเช่นนี้ได้ความดันที่สามารถจ่ายได้กับความดันต่ำสุดที่ผู้ใช้ต้องการจะต้องมีผลต่างความดันสูงเพียงพอ ยังมีผลต่างความดันสูง Steam accumulator ตัวเดียวกันจะยังกำเนิดไอน้ำได้มากขึ้น กล่าวคือ การทำให้ Steam accumulator มีขนาดเล็ก และความจุ (Capacity) สูง ความดันของ Steam accumulator กับความดันไอน้ำใช้งานจะต้องมีผลต่างความดันสูง

รูปที่ 1.13 แสดงตัวอย่างโครงสร้างของ Roots steam accumulator ซึ่งเป็น Steam accumulator แบบความดันไม่คงที่ที่สำคัญคือ ด้านบนจะมี Nozzle ทางเข้าออกไอน้ำ และมีกลไกหลายอย่างช่วยรักษาอุณหภูมิให้สม่ำเสมอที่อุณหภูมิอิ่มตัวที่ความดันภายในภาชนะโดยไม่เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิไอน้ำร้อนในภาชนะ การกลายเป็นไอน้ำด้วยตัวเองจาก Steam accumulator จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงความดันอย่างรุนแรงเหมือน Flash tank ดังนั้น ปริมาณความร้อนของไอน้ำที่เกิดขึ้นจึงไม่คงที่ อย่างไรก็ตามในการคำนวณโดยประมาณ เราสามารถถือว่าไอน้ำที่เกิดขึ้นจะเทียบเท่ากับความร้อนเฉลี่ยระหว่างความร้อนของไอน้ำในสถานะเมื่อเริ่มกลายเป็นไอน้ำด้วยตัวเองกับเมื่อกลายเป็นไอแห้งสิ้น จึงสามารถพิจารณาได้ด้วยสูตรคำนวณปริมาณไอน้ำ Flash ของ Condensate ที่จะอธิบายต่อไป



รูปที่ 1.13 ตัวอย่างโครงสร้างของ Steam accumulator แบบความดันไม่คงที่ (แบบ Roots)

Steam accumulator ที่ติดตั้งร่วมกับหม้อไอน้ำที่ทำงานด้วยอุปกรณ์ควบคุมการเผาไหม้อัตโนมัติ (Automatic Combustion Control System) โดยทั่วไปจะมีระบบเกี่ยภาระไอน้ำโดย Steam accumulator จะเกี่ยการเปลี่ยนแปลงไอน้ำทางด้านผู้ใช้ไอน้ำ ทำให้หม้อไอน้ำไม่ได้รับผลของการเปลี่ยนแปลงภาระรุนแรงเกินไป และสามารถเดินเครื่องต่อเนื่องได้โดยมีประสิทธิภาพสูง และหม้อไอน้ำจะปรับการทำงานให้สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงภาระไอน้ำอย่างนุ่มนวล

ดังนั้น หากใช้งาน Steam accumulator อย่างชาญฉลาด จะสามารถคาดหวังผลลัพธ์ได้ดังต่อไปนี้

- (1) การเดินเครื่องหม้อไอน้ำจะมีเสถียรภาพ ด้วยการปรับอัตราส่วนอากาศอย่างละเอียดจะสามารถเผาไหม้ด้วย O_2 ต่ำได้ ซึ่งทำให้สามารถประหยัดค่าเชื้อเพลิงและลด NO_x ได้
- (2) สามารถรองรับภาระที่พุ่งสูงเกินกว่าพิกัดของหม้อไอน้ำไปชั่วขณะได้
- (3) สามารถจ่ายไอน้ำได้แม้หม้อไอน้ำจะหยุดทำงานชั่วขณะ
- (4) ลดจำนวนครั้งในการเริ่มเดินเครื่องและหยุดเครื่องหม้อไอน้ำ ทำให้ลดความร้อนสูญเสียจากการกระทำได้

1.3 การปรับปรุงประสิทธิภาพหม้อไอน้ำ

1.3.1 การควบคุมการเผาไหม้

หม้อไอน้ำทำงานโดยอาศัยการเผาไหม้เชื้อเพลิง ดังนั้นจึงต้องปรับอัตราส่วนอากาศให้เหมาะสมเพื่อเผาไหม้เชื้อเพลิงให้มีประสิทธิภาพสูงที่สุดเท่าที่จะทำได้ เมื่ออากาศที่ป้อนให้มีไม่เพียงพอ จะเกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ทำให้เกิดก๊าซที่ยังเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ และเขม่าซึ่งจะกลายเป็นความสูญเสีย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในหม้อไอน้ำ หากเกิดเขม่าขึ้นมันจะไปเกาะที่พื้นผิวถ่ายเทความร้อน ทำให้ปริมาณการถ่ายเทความร้อนลดลง จึงต้องระมัดระวังไม่ให้อากาศน้อยเกินไปซึ่งจะเกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์

ในทางกลับกัน หากมีอากาศมากเกินไป ก๊าซไอเสียจะมีปริมาณมากขึ้นต่อเชื้อเพลิงปริมาณเท่ากัน ดังนั้น สัดส่วนของความร้อนที่ใช้ในการกำเนิดไอน้ำจึงมีค่าลดลง จากเหตุผลข้างต้น จึงต้องทำการเผาไหม้ด้วยอัตราส่วนอากาศต่ำที่สุดที่ไม่ให้เกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ กล่าวคือ อัตราส่วนอากาศที่เหมาะสมที่สุดสำหรับหม้อไอน้ำนั้นๆ การตรวจสอบว่าอากาศมีปริมาณเหมาะสมหรือไม่ โดยทั่วไปจะเก็บตัวอย่างก๊าซไอเสียจาก

ใกล้ๆ ทางออกหม้อไอน้ำ นำมาวิเคราะห์ก๊าซเพื่อคำนวณอัตราส่วนอากาศ ทำการวิเคราะห์ก๊าซพร้อมกับปรับปริมาณอากาศเพื่อให้อัตราส่วนอากาศมีค่าที่เหมาะสมที่สุดกับหม้อไอน้ำนั้น

อนึ่ง การปรับปริมาณอากาศจะใช้แอมเปอร์ระหว่างพัดลมกับ Burner แต่เนื่องจากปริมาตรอากาศจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ดังนั้นจึงต้องระมัดระวังว่าในฤดูร้อนกับฤดูหนาว หากไม่เปลี่ยนระดับการเปิดแอมเปอร์ จะทำให้อัตราส่วนอากาศมีค่าไม่เท่ากัน

1.3.2 การพิจารณาวิธีเดินเครื่อง

เมื่อเดินเครื่องหม้อไอน้ำอย่างต่อเนื่อง ประสิทธิภาพความร้อนจะมีค่าค่อนข้างสูง แต่หากการใช้งานไอน้ำมีปริมาณต่ำ ทำให้ต้องเดินเครื่องหม้อไอน้ำเป็นช่วงๆ แล้ว ประสิทธิภาพความร้อนจะลดลงอย่างมาก เนื่องจากขณะที่หยุดการเผาไหม้ของหม้อไอน้ำ หม้อไอน้ำจะเย็นลงทั้งจากภายนอก และภายใน ดังนั้น หากสัดส่วนระยะเวลาหยุดเผาไหม้ต่อระยะเวลาเดินเครื่องทั้งหมดยังมีค่าสูงขึ้น ประสิทธิภาพความร้อนจะยิ่งลดลง นอกจากนั้น เนื่องจากเมื่อหยุดการเผาไหม้กับเมื่อเริ่มทำการเผาไหม้ใหม่จะมีการป้อนอากาศปริมาณมากเข้าไปภายในเพื่อหมุนเวียนอากาศ ความสูญเสียจากการแผ่ความร้อนจึงมีค่าสูงมาก เพื่อลดความสูญเสียเช่นนี้ จึงต้องเลือกหม้อไอน้ำให้เหมาะสมกับปริมาณการใช้ไอน้ำ รวมทั้งทางด้านผู้ใช้ไอน้ำก็ต้องใส่ใจการใช้ไอน้ำให้มีความสม่ำเสมอ เพื่อให้สามารถเดินเครื่องหม้อไอน้ำอย่างต่อเนื่องให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ กรณีที่ทราบอยู่แล้วว่าปริมาณการใช้ไอน้ำจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากตามช่วงเวลา ให้เตรียมหม้อไอน้ำขนาดเล็กหลายๆ เครื่อง แล้วเดินเครื่องด้วยจำนวนเครื่องที่เหมาะสม ทั้งนี้ แม้ในกรณีเช่นนี้หากเดินเครื่องหม้อไอน้ำเป็นระยะเวลานานๆ เท่านั้น สัดส่วนของความร้อนที่ต้องใช้ในการให้ความร้อนตัวหม้อไอน้ำเองก็จะมีค่าสูงขึ้น จึงต้องพิจารณาหาวิธีเลือกหม้อไอน้ำที่จะเดินเครื่องไม่ให้ระยะเวลาเดินเครื่องสั้นเกินไป

1.3.3 การทบทวนความดันที่กำหนดไว้

กรณีของไอน้ำอิ่มตัว อุณหภูมิของไอน้ำจะขึ้นอยู่กับความดัน แต่กรณีที่ใช้ไอน้ำในการให้ความร้อน หากความดันยังมีค่าสูง ผลต่างของอุณหภูมิกับวัตถุดิบก็จะมีค่าสูง จึงสามารถให้ความร้อนเป็นระยะเวลานานๆ ได้ และพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ต้องใช้ในการให้ความร้อนก็มีขนาดเล็กได้ อย่างไรก็ตาม ยิ่งไอน้ำมีความดันสูง ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอก็ยังมีค่าน้อยลง ดังนั้นเพื่อให้ได้ปริมาณความร้อนเดียวกัน ยิ่งความดันมีค่าสูงเท่าใด จะต้องใช้ไอน้ำปริมาณมากขึ้นเท่านั้น ด้วยเหตุผลเช่นนี้ นอกจากกรณีที่อุณหภูมิที่ต้องการให้ความร้อนมีค่าสูง จนต้องใช้ความดันสูงอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ แล้ว ควรลดความดันของไอน้ำให้มีค่าต่ำที่สุดเท่าที่จะทำได้

ความดันที่กำหนดไว้ของหม้อไอน้ำ ให้กำหนดค่าที่เหมาะสมโดยพิจารณาถึงช่วงการปรับความดันของหม้อไอน้ำและความดันสูญเสียในท่อไอน้ำ หากไอน้ำที่จ่ายออกจากหม้อไอน้ำมีความดันต่ำ อุณหภูมิของไอน้ำจะต่ำลงด้วย จึงสามารถลดการแผ่ความร้อนออกจากท่อส่งไอน้ำได้มากขึ้น อย่างไรก็ตาม กรณีที่ใช้เชื้อเพลิงที่มีกำมะถันสูง หากลดความดันที่กำหนดไว้ลงต่ำเกินไป อาจทำให้เกิดการกัดกร่อนอุณหภูมิต่ำที่พื้นผิวถ่ายเทความร้อนได้ จึงต้องใช้ความระมัดระวัง ในกรณีเช่นนี้ ควรติดตั้งวาล์วลดความดันไว้ที่ใกล้ๆ ทางออกหม้อไอน้ำ เมื่อออกมาจากหม้อไอน้ำแล้วจึงลดความดันไอน้ำลงเมื่อส่งไอน้ำต่อไป

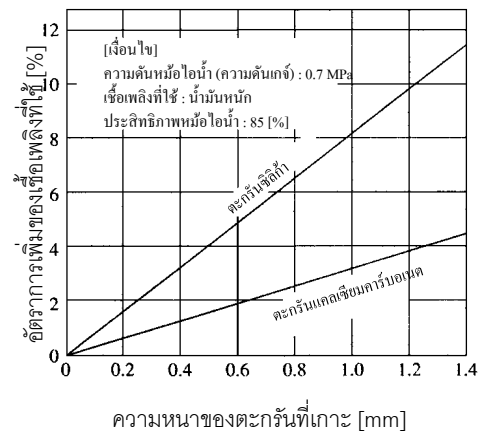
1.3.4 การควบคุมน้ำเลี้ยง

ในน้ำเลี้ยงที่จ่ายให้แก่หม้อไอน้ำจะมีสารเจือปนหลายชนิด เมื่อเดินเครื่องหม้อไอน้ำ สารเจือปนเหล่านี้จะมีความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้น เมื่อมีความเข้มข้นสูงเกินจุดหนึ่ง จะเกิดตะกอนมาเกาะภายในท่อกำเนิดไอน้ำ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของตะกอนมีค่าค่อนข้างต่ำเทียบกับท่อเหล็ก ดังนั้นแม้จะมีตะกอนมาเกาะเพียงเล็กน้อย ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงก็จะเพิ่มสูงขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของตะกอนที่เกาะกับอัตราการเพิ่มของเชื้อเพลิงแสดงไว้ในรูปที่ 1.14 เมื่อมีตะกอนมาเกาะ ไม่เพียงแต่จะทำให้ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นเท่านั้น แต่พื้นที่ช่องทางไหลของกระแสน้ำก็จะแคบลงด้วย ความต้านทานต่อการไหลจึงมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้น้ำไหลเวียนไม่เพียงพอ บางครั้งจึงทำให้ท่อกำเนิดไอน้ำแตกเสียหายได้ ดังนั้น จึงจำเป็นต้องจำกัดสารเจือปนในน้ำเลี้ยงที่จ่ายให้หม้อไอน้ำ สำหรับหม้อไอน้ำขนาดเล็กจะใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนในการปรุงแต่งน้ำเลี้ยง หรือใช้วิธีเติมสารเคมีลงไป

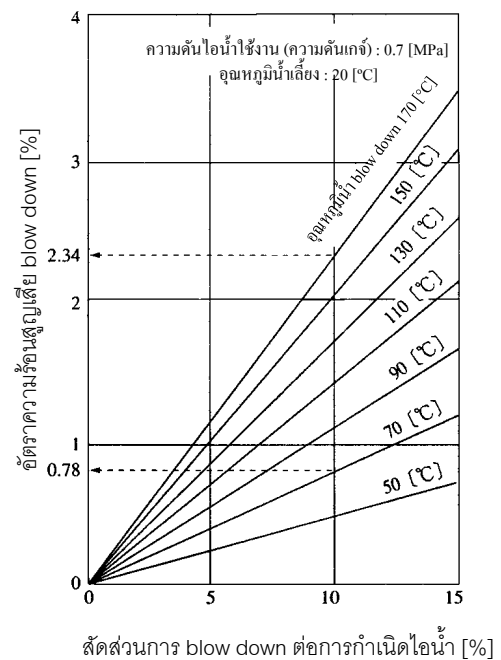
(จ) การ Blow down ให้เหมาะสม

แม้จะมีการปรุงแต่งน้ำเลี้ยงอย่างเพียงพอแล้ว ก็ยังมีสารเจือปนหลงเหลือเข้าไปในหม้อไอน้ำอีกเล็กน้อย ความเข้มข้นของสารเจือปนจึงเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้น จึงจำเป็นต้องมีการระบายน้ำในหม้อไอน้ำออกบางส่วนทุกระยะเวลาหนึ่ง การทำเช่นนี้เรียกว่า Blow down น้ำในหม้อไอน้ำที่ระบายออกไปเป็นน้ำอุณหภูมิสูง หากมีการ Blow down ในปริมาณมากจะทำให้ความร้อนสูญเสียเพิ่มมากขึ้นด้วย เมื่อคำนวณความร้อนสูญเสียเทียบกับปริมาณ Blow down แล้วจะได้รูปที่ 1.15 ดังนั้น จึงต้องกำหนดสัดส่วนของ Blow down ให้เหมาะสมโดยพิจารณาสารเจือปนในน้ำเลี้ยง

นอกจากนั้น หากนำความร้อนในน้ำ Blow down มาใช้ในการอุ่นน้ำเลี้ยงหม้อไอน้ำ จะช่วยให้สามารถลดความร้อนสูญเสียลงได้มาก ตัวอย่างเช่น ถ้าสัดส่วนการ Blow down ต่อการกำเนิดไอน้ำมีค่าเท่ากับ 10 % หากปล่อยทิ้งไปเฉยๆ จะมีความสูญเสีย 2.4% แต่ถ้านำไปอุ่นน้ำเลี้ยงจนมีอุณหภูมิถึง 70°C แล้ว ความสูญเสียจะเหลือเพียง 0.78 %



รูปที่ 1.14 การเกาะของตะกอนกับอัตราการเพิ่ม



รูปที่ 1.15 อัตราความร้อนสูญเสีย blow down

1.3.5 การจัดการการซ่อมบำรุง

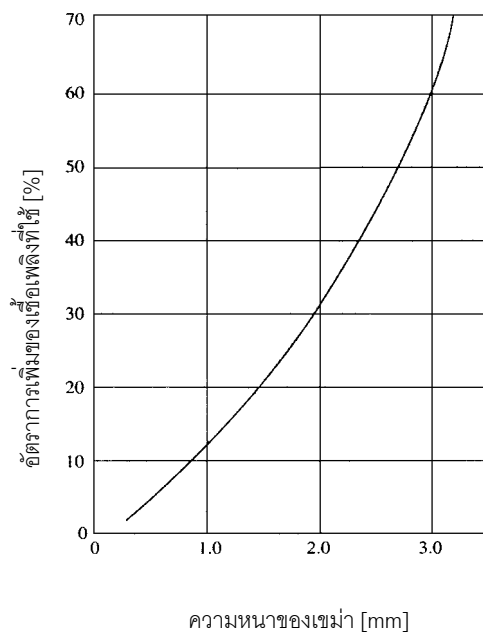
เมื่อมีเขม่ามาเกาะที่ท่อกำเนิดไอน้ำ จะทำให้การถ่ายเทความร้อนจากก๊าซเผาไหม้ไปยังน้ำเกิดขึ้นได้ไม่ดี ประสิทธิภาพความร้อนจึงต่ำลง เนื่องจากสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของเขม่ามีค่าน้อยพอกับฉนวนความร้อน ดังนั้น แม้จะมีเขม่าเกาะเพียงเล็กน้อย ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงก็จะเพิ่มขึ้นมากดังรูปที่ 1.16 เนื่องจากเขม่าจะเกิดขึ้นจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ดังนั้น จึงต้องปรับปริมาณอากาศอย่างละเอียดรอบคอบไม่ให้เกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์

อย่างไรก็ตาม กรณีที่ระดับการเผาไหม้มีการเปลี่ยนแปลงมากหรือเมื่อจุดไฟจะมีเขม่าเกิดขึ้นเล็กน้อย เขม่าเหล่านี้จะค่อยสะสมทีละน้อย จึงต้องทำความสะอาดพื้นผิวท่อกำเนิดไอน้ำเป็นระยะ ช่วยในการทำความสะอาดจะขึ้นอยู่กับประเภทของหม้อไอน้ำ เชื้อเพลิงที่ใช้ ฯลฯ แต่เมื่อเขม่าเกาะหนาขึ้น ก๊าซไอเสียจะมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น จึงสามารถกำหนดช่วงเวลาสำหรับตรวจวัดอุณหภูมิของก๊าซไอเสีย หากอุณหภูมิสูงกว่าค่าหนึ่งให้ทำความสะอาดก็ได้

1.3.6 การควบคุมท่อส่งไอน้ำ

(1) ปริมาณการส่งไอน้ำกับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ หากท่อส่งไอน้ำมีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กเทียบกับปริมาณการส่งไอน้ำแล้ว ความดันสูญเสียจะมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นหม้อไอน้ำจะต้องผลิตไอน้ำที่มีความดันสูงกว่าความดันที่ใช้จริงค่อนข้างมาก ในทางกลับกัน หากท่อส่งไอน้ำมีเส้นผ่านศูนย์กลางมากขึ้น ความดันสูญเสียจะลดลง แต่มวลของท่อและพื้นที่พื้นผิวจะเพิ่มขึ้น ความร้อนที่ต้องใช้ในการให้ความร้อนท่อขณะที่เริ่มส่งไอน้ำและการแผ่ความร้อนระหว่างการส่งไอน้ำจะเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน นอกจากนี้ ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งท่อยังเพิ่มขึ้นอีกด้วย ด้วยเหตุผลข้างต้น จึงต้องเลือกใช้เส้นผ่านศูนย์กลางท่อส่งไอน้ำที่เหมาะสมกับปริมาณการส่งไอน้ำ การกำหนดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เหมาะสม จะใช้ความเร็วกระแสมาตรฐานให้สอดคล้องกับชนิดของของไหล ตัวอย่างของความเร็วกระแสน้ำมาตรฐานแสดงไว้ในตารางที่ 1.2

เมื่อกำหนดความเร็วกระแสน้ำมาตรฐานได้แล้ว จะหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางท่อที่ต้องใช้ได้จากความดันและอัตราไหลของไอน้ำที่ต้องการส่ง โดยเลือกใช้ท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในจากตารางที่ 1.3 ใกล้เคียงกับเส้นผ่านศูนย์กลางที่คำนวณได้



รูปที่ 1.16 ตัวอย่างความสูญเสียเชื้อเพลิงเนื่องจากเขม่า

ตารางที่ 1.2 ตัวอย่างความเร็วกระแสมาตรฐาน

ประเภทของของไหล	วัตถุประสงค์การใช้งาน	ความดัน [MPa] (ความดันเกจ)	ความเร็วกระแสมาตรฐาน [m/s]
น้ำ	น้ำประปา	0.18-0.30	0.6-1.5
	ทั่วไป	0.30-1.0	1.5-3.0
	น้ำเลี้ยงหม้อไอน้ำ	1.0 ขึ้นไป	3.0-4.0
ไอน้ำอิ่มตัว	ปรับอากาศร้อน	0.00-0.10	10-20
	ทั่วไป	0.30 ขึ้นไป	20-40
ไอดง	กำเนิดไฟฟ้า	1.5 ขึ้นไป	50-80
อากาศ	เครื่องจักรที่ทำงานด้วยอากาศ	0.18-0.30	8-15

ตารางที่ 1.3 มาตรฐานท่อก๊าซ

ชื่อเรียก		เส้นผ่านศูนย์กลาง [mm]	ความหนา [mm]	เส้นผ่านศูนย์กลางภายในที่ ใกล้เคียง [mm]
A	B			
6	1/8	10.5	2.0	6.5
8	1/4	13.8	2.3	9.2
10	3/8	17.3	2.3	12.7
15	1/2	21.7	2.8	16.1
20	3/4	27.2	2.8	21.6
25	1	34.0	3.2	27.6
32	1 1/4	42.7	3.5	35.7
40	1 1/2	48.6	3.5	41.6
50	2	60.5	3.8	52.9
65	2 1/2	76.3	4.2	67.9
80	3	89.1	4.2	80.7
90	3 1/2	101.6	4.2	93.2
100	4	114.3	4.5	105.3
125	5	139.8	4.5	130.8
150	6	165.2	5.0	155.2
175	7	190.7	5.3	180.1
200	8	216.3	5.8	204.7
225	9	241.8	6.2	229.4
250	10	267.4	6.6	254.2
300	12	318.5	6.9	304.7

1.3.6.1 การป้องกันไอน้ำรั่ว

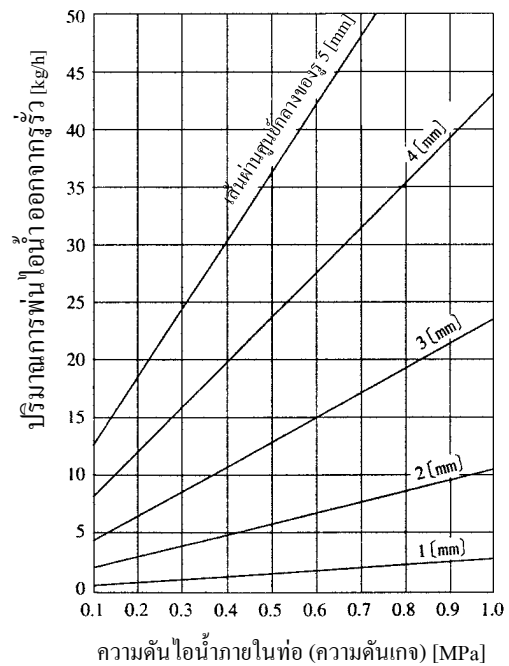
ท่อส่งไอน้ำจะมีวาล์วและข้อต่อเป็นจำนวนมาก บ่อยครั้งจะมีไอน้ำรั่วออกมาจากบริเวณเหล่านี้ ไอน้ำรั่วแม้ว่าดูด้วยตาอาจเห็นว่ารั่วไม่มาก แต่เมื่อลองคำนวณดูพบว่าได้ผลดังรูปที่ 1.17 กล่าวคือมี ไอน้ำสูญเสียไปโดยสูญเปล่าเป็นปริมาณมาก ดังนั้นหากพบไอน้ำรั่ว จะต้องทำการซ่อมเพื่อหยุดการรั่วทันที นอกจากนั้น ปริมาณไอน้ำรั่วยังขึ้นอยู่กับความดันและเส้นผ่านศูนย์กลางของรูรั่วอีกด้วย ดังนั้นจึงควรลดความดันส่งไอน้ำให้ต่ำที่สุดเท่าที่จะทำได้

หากปล่อยให้ไอน้ำรั่วไปนานๆ รูรั่วจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ขึ้นเรื่อยๆ ทำให้เกิดการรั่วมากยิ่งขึ้น นอกจากนั้น ยังมีหลายกรณีที่ทั้งๆ ที่หากรีบซ่อมจะยุติปัญหาอย่างรวดเร็ว แต่กลับปล่อยปละละเลย ทำให้ต้องการการซ่อมใหญ่ จึงต้องปล่อยไว้อย่างนั้นโดยไม่มีโอกาสซ่อม ดังนั้นเพื่อไม่ให้เกิดปัญหาดังกล่าว เมื่อพบไอน้ำรั่วจะต้องรีบทำการซ่อมทันที นอกจากนั้น หากไอน้ำที่รั่วออกมาไปสัมผัสกับฉนวนความร้อน ไอน้ำจะไปควบแน่นในเนื้อฉนวนความร้อนทำให้ความสามารถของฉนวนความร้อนลดลงจึงต้องระมัดระวัง หากฉนวนความร้อนเปียกขึ้น ยังทำให้ท่อผุกร่อนและฉนวนความร้อนเสื่อมเร็วขึ้นอีกด้วย

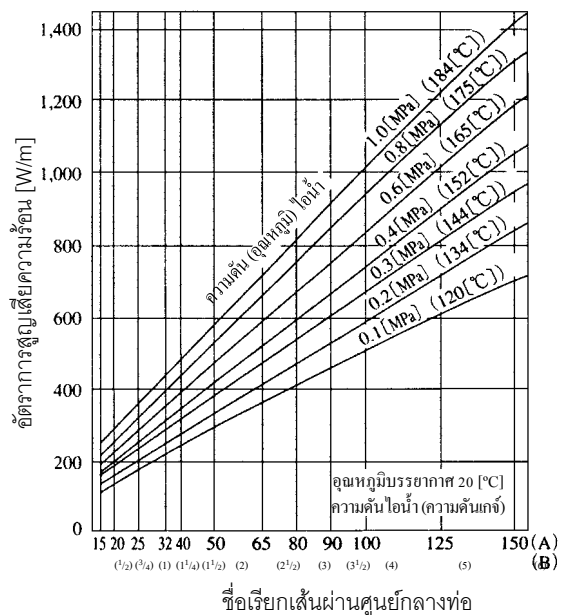
1.3.6.2 การจัดระเบียบท่อที่ไม่

จำเป็น

ในโรงงานเก่า บางครั้งจะมีท่อไอน้ำที่เคยใช้มาก่อน แต่ปัจจุบันไม่ได้ใช้แล้วติดตั้งอยู่ในสภาพเดิม ท่อเหล่านี้ไม่เพียงแต่จะเป็นสาเหตุของการสูญเสียความร้อนเท่านั้น แต่ยังมีอันตรายจากการที่พนักงานจะบังคับควบคุมผิดพลาดอีกด้วย ดังนั้น หากทราบแน่นอนแล้วว่าไม่ใช่ควรรื้อถอนออกทันที หรือหากในอนาคตมีโอกาสที่จะกลับมาใช้ ควรติดตั้งวาล์วกันส่วนต่อเชื่อมกับท่อหลักเพื่อไม่ให้ไอน้ำไหลผ่าน



รูปที่ 1.17 ปริมาณไอน้ำที่พ่นออกจากรูขนาดเล็ก



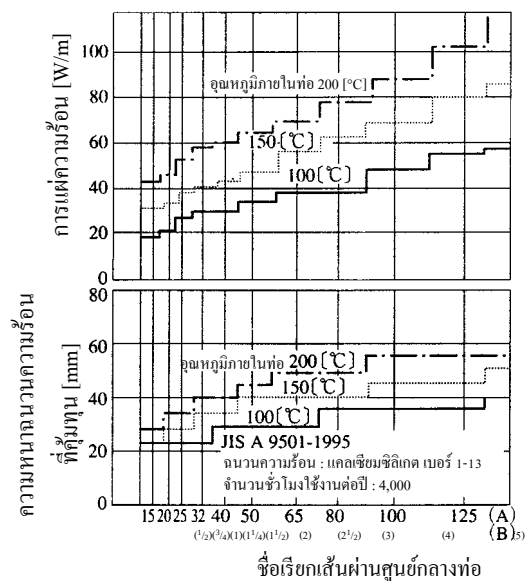
รูปที่ 1.18 การสูญเสียโดยการความร้อนจากท่อเปลือย

1.3.7 การติดตั้งฉนวนความร้อนให้เหมาะสม

หากปล่อยท่อไอน้ำเปลือยไว้เฉยๆ การแผ่ความร้อนจะมีปริมาณสูงมาก เนื่องจากไอน้ำที่เทียบเท่ากับความร้อนที่สูญเสียออกไปจะเกิดการควบแน่นภายในท่อ ความร้อนที่ใช้งานได้จริงจึงลดลงเท่ากับปริมาณนั้นด้วยเช่นกัน นอกจากนี้ ในบริเวณใกล้เคียงกับท่อไอน้ำที่ติดตั้งอยู่ภายในห้อง จะทำให้อุณหภูมิรอบๆ ข้างสูงขึ้น ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่พึงประสงค์ในแง่สภาพแวดล้อมในการทำงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในห้องที่มีการปรับอากาศเย็นในฤดูร้อน ท่อนี้จะทำให้ภาระการปรับอากาศเย็นเพิ่มสูงขึ้น ทำให้เกิดความสูญเสียอย่างมาก ด้วยเหตุผลข้างต้น ท่อไอน้ำทั้งหมดจึงต้องหุ้มฉนวนความร้อน เช่น Glass wool ฯลฯ ให้มิดชิด การแผ่ความร้อนจากท่อเปลือยแสดงไว้ในรูปที่ 1.18 ในการหุ้มฉนวนความร้อนท่อไอน้ำ ไม่เพียงแต่ตัวท่อเท่านั้น แต่ควรหุ้มวาล์วและ Flange ต่างๆ ด้วย เนื่องจากวาล์วและ Flange จะมีรูปร่างที่ซับซ้อน จึงเป็นการยากที่จะคำนวณการแผ่ความร้อนอย่างถูกต้อง แต่สามารถคำนวณได้จากผลการตรวจวัดว่าพื้นที่ผิวจะเป็นกี่เท่าของท่อตรง โดยทั่วไปพื้นที่ผิวของวาล์วจะเทียบเท่ากับท่อตรงที่มีขนาดเท่ากันยาว 1.1-1.3 [m] และ Flange จะเทียบเท่ากับ 0.3-0.4 [m] ซึ่งแสดงว่าจำเป็นต้องหุ้มฉนวนความร้อนด้วย

ในการหุ้มฉนวนในทางปฏิบัติ จะเกิดปัญหาว่าจะหุ้มฉนวนความร้อนหนาเท่าใด ถ้าเพิ่มความหนาของฉนวนความร้อน การแผ่ความร้อนจะลดลง แต่เมื่อฉนวนความร้อนหนาขึ้นถึงระดับหนึ่ง แม้ว่าจะเพิ่มฉนวนความร้อนให้หนาขึ้นอีก การแผ่ความร้อนก็จะไม่ค่อยเปลี่ยนแปลง ดังนั้น จึงต้องคำนวณความหนาที่พิจารณาว่าเหมาะสมโดยดูถึงความคุ้มทุนด้วย ดังตัวอย่างในรูป ที่ 1.19 ด้านล่างของรูปจะแสดงความหนาของฉนวนความร้อนที่คุ้มทุน ส่วนด้านบนจะแสดงการแผ่ความร้อนที่หุ้มฉนวนด้วยความหนานั้น กล่าวคือ ค่าการแผ่ความร้อนในรูปที่ 1.18 ลบด้วยการแผ่ความร้อนในรูปที่ 1.19 จะเป็นประสิทธิผลของการหุ้มฉนวนความร้อน

เมื่อหุ้มฉนวนท่อไอน้ำ ไม่เพียงแต่การแผ่ความร้อนจะลดลงเท่านั้น แต่อุณหภูมิด้านนอกของท่อยังลดลงอย่างมากด้วย ดังนั้น แม้ผู้ปฏิบัติงานจะสัมผัสกับท่อไอน้ำก็จะมีอันตราย จึงเป็นสิ่งที่พึงประสงค์ในแง่ของสภาพแวดล้อมในการทำงาน



รูปที่ 1.19 การแผ่ความร้อนจากท่อหุ้มฉนวนความร้อน

1.3.8 การใช้ประโยชน์ไอน้ำอย่างมีประสิทธิภาพ

1.3.8.1 วิธีปรับไอน้ำ

ในการใช้ไอน้ำ ต้องสร้างความชัดเจนว่าจะนำไอน้ำมาใช้ทำอะไร โดยทั่วไปไอน้ำมักจะใช้ในการให้ความร้อน แต่บางครั้งก็ใช้ในการให้ความดัน ใช้เพิ่มความชื้น หรือใช้กวน เมื่อทราบวัตถุประสงค์การใช้งานชัดเจนแล้ว ให้พิจารณาว่าอุณหภูมิ และความดันที่ต่ำที่สุดที่เพียงพอในการทำให้บรรลุวัตถุประสงค์นั้นเป็นเท่าใด

การรักษาอุณหภูมิและความดันให้ได้ตามเป้าหมาย จะปรับเพิ่มหรือลดปริมาณไอน้ำด้วยวาล์วปรับ แต่ในกรณีที่ต้องปรับด้วยมือ โดยมากนอกจากอัตราไหลจะคลาดเคลื่อนไปมากจนเกิดอุปสรรคแก่การทำงานแล้ว มักจะไม่มี การปรับอย่างอื่นด้วย ดังนั้น จึงเกิดความสูญเสียของไอน้ำมากขึ้น ทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์มีความไม่สม่ำเสมอด้วย ดังนั้นจึงควรทำการปรับอัตราไหลของไอน้ำโดยอัตโนมัติโดยการติดตั้งวาล์วปรับอัตโนมัติและรักษาอุณหภูมิ และความดันให้คงที่ ทั้งนี้ ในกรณีนี้จะต้องระวังไม่เพิ่มความดันก่อนเข้าวาล์วปรับให้สูงเกินไป ถ้าความดันมีค่าสูง อัตราไหลจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วต่อการทำงานของวาล์วปรับ จึงปรับให้มีอัตราไหลคงที่ได้ยาก จากสาเหตุข้างต้นจึงควรลดความดันส่งไอน้ำให้ต่ำที่สุดเท่าที่จะทำได้

1.3.8.2 การพิจารณาการให้ความร้อน

โดยมากไอน้ำมักถูกใช้เป็นแหล่งความร้อนในการให้ความร้อนแก่ น้ำ วิธีให้ความร้อนในกรณีนี้แบ่งได้เป็น 2 แบบ ได้แก่ การให้ความร้อนโดยตรง กับการให้ความร้อนทางอ้อม ถ้าพิจารณาในแง่ของปริมาณความร้อนแล้ว ปริมาณไอน้ำที่ต้องใช้ในการให้ความร้อนแก่ น้ำให้มีอุณหภูมิหนึ่งๆ จะมีค่าเท่ากันไม่ว่าจะให้ความร้อนด้วยวิธีใด แต่ปริมาณการใช้ไอน้ำในทางปฏิบัติของทั้งสองวิธีจะมีความแตกต่างกันมาก

การให้ความร้อนทางอ้อม เป็นการติดตั้งคอยล์ไว้ในน้ำร้อน แล้วใช้ไอน้ำไหลผ่านคอยล์นั้นเพื่อให้ความร้อนแก่ น้ำ หากน้ำนั้นควบแน่นที่เกิดขึ้นไปเติมให้น้ำร้อนด้วย ก็จะสามารถใช้ความร้อนทั้งหมดได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ส่วนการพ่นไอน้ำลงไปในน้ำร้อนเพื่อให้ความร้อนโดยตรง จะมีโครงสร้างง่ายกว่าเนื่องจากไม่ต้องติดตั้งคอยล์ไว้ในน้ำร้อน แต่ความสูญเสียที่เกิดจากการที่ไอน้ำที่พ่นลงไปในน้ำไม่เกิดการควบแน่นทั้งหมด แต่มีส่วนหนึ่งที่ลอยขึ้นมาถึงผิวน้ำและสูญเสียไปในบรรยากาศส่วนนี้จะมีค่าสูง ถ้าน้ำมีอุณหภูมิต่ำ หรือความลึกจากผิวน้ำถึงช่องพ่นไอน้ำมีระยะทางเพียงพอ ไอน้ำส่วนใหญ่ที่พ่นลงจะไปควบแน่นในน้ำ ความร้อนที่มีอยู่ในไอน้ำจึงถูกถ่ายเทให้แก่น้ำทั้งหมด อย่างไรก็ตาม เมื่อน้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้น ความเร็วในการควบแน่นของน้ำจะลดลง ไอน้ำจึงไม่ควบแน่นในน้ำทั้งหมด และบางส่วนจะสูญเสียไปในบรรยากาศ

นอกจากนั้น ในการพ่นไอน้ำโดยตรง เมื่อน้ำร้อนมีอุณหภูมิสูงขึ้น ผิวน้ำจะเกิดการกะเพื่อม ทำให้ละอองน้ำร้อนกระเด็นออกมานอกถังน้ำ สภาวะเช่นนี้ไม่เพียงแต่จะทำให้เกิดความสูญเสียอย่างมากในเชิงความร้อนเท่านั้น แต่ยังมีความอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานอีกด้วย จากเหตุผลข้างต้น จึงควรใช้วิธีให้ความร้อนทางอ้อมเท่าที่จะทำได้

(ค) การรักษาระดับความแห้ง

แม้จะมีการหุ้มฉนวนความร้อนท่อส่งไอน้ำเป็นอย่างดีแล้ว ก็ยังมีการแผ่ความร้อนจากท่อส่งไอน้ำ ไอน้ำในปริมาณที่เทียบเท่ากับการแผ่ความร้อนดังกล่าวจึงเกิดการควบแน่นภายในท่อส่งไอน้ำ จึงทำให้ความแห้งของไอน้ำลดต่ำลง เมื่อส่งไอน้ำที่มีความแห้งต่ำไปให้อุปกรณ์ที่ใช้ไอน้ำ จะมีหยดน้ำควบแน่นเกาะที่พื้นผิวถ่ายเทความร้อน ซึ่งจะขัดขวางการถ่ายเทความร้อน หรือหยดน้ำควบแน่นอาจไปเกาะที่ผลิตภัณฑ์ ทำให้เสียคุณภาพไปได้ ดังนั้น ที่ทางเข้าอุปกรณ์ที่ใช้ไอน้ำจึงต้องติดตั้ง Condensate separator เพื่อกำจัดหยดน้ำที่รวมอยู่ในไอน้ำ เพิ่มระดับความแห้งให้สูงขึ้นแล้วจึงจ่ายให้อุปกรณ์ อนึ่ง หากการหุ้มฉนวนความร้อนท่อส่งไอน้ำอยู่ในสภาพดี หยดน้ำควบแน่นที่เกิดขึ้นจะน้อยลง ปริมาณของ Condensate ที่แยกได้ที่ Condensate separator ก็จะลดลงด้วย

1.3.9 การควบคุมกับดักไอน้ำ

ไอน้ำที่ออกจากหม้อไอน้ำจะมีความชื้นรวมอยู่ในในระดับหนึ่ง โดยระหว่างที่ไอน้ำไหลผ่านท่อไอน้ำ การแผ่ความร้อนจากท่อจะทำให้ไอน้ำควบแน่นกลายเป็น Condensate ความชื้นที่รวมอยู่ในไอน้ำจึงมีสัดส่วนสูงขึ้น เมื่อมีน้ำไหลอยู่ในท่อไอน้ำไปพร้อมๆ กับไอน้ำด้วยความเร็วสูง จะทำให้ท่อเกิดการสั่นหรือทำให้ข้อต่อท่อได้รับความเสียหายได้ การป้องกันปัญหาเช่นนี้ จะต้องพยายามกำจัด Condensate ออกให้เร็วที่สุดเท่าที่จะทำได้

ส่วนในอุปกรณ์ที่ใช้ไอน้ำ ไอน้ำที่ให้ความร้อนเสร็จแล้วจะกลายเป็น Condensate แต่ถ้าทิ้งไว้เฉยๆ โดยไม่ระบายออกไปจากอุปกรณ์ ไอน้ำใหม่จะไม่ไหลเข้ามาในอุปกรณ์ ทำให้อุณหภูมิภายในอุปกรณ์ลดต่ำลง ในการจ่ายไอน้ำที่ต้องใช้ให้อุปกรณ์อย่างต่อเนื่องตลอดเวลา จะต้องมีการระบาย Condensate ที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว อุปกรณ์ที่ใช้ในการระบาย Condensate ออกจากท่อไอน้ำและอุปกรณ์ที่ใช้ไอน้ำ ได้แก่ กับดักไอน้ำ

กับดักไอน้ำควรมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

- (1) ระบาย Condensate ที่เกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว
- (2) กำจัดก๊าซไม่ควบแน่น เช่น อากาศ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ฯลฯ
- (3) ไม่ทำให้ไอน้ำรั่ว

เพื่อทำให้เกิดคุณสมบัติดังกล่าวข้างต้น จึงมีการผลิตกับดักไอน้ำหลายประเภทดังตารางที่ 1.4

ในจำนวนกับดักไอน้ำเหล่านี้ จะต้องเลือกใช้กับดักไอน้ำที่เหมาะสมที่สุดกับวัตถุประสงค์การใช้งาน ดังนั้นจึงต้องพิจารณาจากความดันไอน้ำ อุณหภูมิ ปริมาณ Condensate เกิดขึ้น ตำแหน่งติดตั้ง ฯลฯ โดยทั่วไป

เฮดเดอร์ไอน้ำ ท่อไอน้ำหลัก ท่อแยก ฯลฯ มักจะใช้กับดักไอน้ำแบบจาน

อุปกรณ์ที่ใช้ไอน้ำ เช่น เครื่องให้ความร้อน เครื่องระเหย เครื่องอบแห้ง ฯลฯ มักจะใช้กับดักไอน้ำเชิงกล เช่น แบบถ้วยหรือแบบลูกลอย

นอกจากนั้น หลังจากติดตั้งกับดักไอน้ำแล้ว หากไม่ควบคุมให้ดีจะเกิดความสูญเสียอย่างมาก จึงต้องใช้ความระมัดระวัง อาการชำรุดของกับดักไอน้ำ ได้แก่

เปิดค้าง — ไอน้ำผ่านได้พร้อมๆ กับ Condensate

ปิดค้าง — วาล์วปิดไม่ยอมเปิด ไม่สามารถระบาย Condensate ออกได้

ไอน้ำรั่ว — มีไอน้ำรั่วจากตัวกับดักไอน้ำ

ซึ่งควรจะตรวจหาอาการชำรุดเหล่านี้ให้พบแต่เนิ่นๆ พร้อมทั้งทำการตรวจสอบบำรุงประจำวันให้ดี เพื่อป้องกันการชำรุด ในจำนวนการชำรุดเหล่านี้ กรณีที่ปิดค้าง อุณหภูมิของอุปกรณ์ที่ใช้ไอน้ำจะไม่เพิ่มขึ้น

ตอนที่ 3 บทที่ 1 ระบบความร้อนและอุปกรณ์ที่ใช้ไอน้ำ

จึงสามารถตรวจพบได้ทันที แต่กรณีที่เปิดค้าง อุณหภูมิของอุปกรณ์ที่ใช้ไอน้ำจะไม่ลดต่ำลง จึงมักจะถูกปล่อยไว้โดยไม่มีใครรู้ ดังนั้น จึงควรมีวิธีตรวจสอบว่ากับดักไอน้ำทำงานปกติหรือไม่ เช่น ติดตั้งท่อไสหลังจากกับดักไอน้ำ เพื่อเฝ้าติดตามว่ามี Condensate ไหลอยู่ หรือใช้ Probe และที่ตัวเครื่องเพื่อฟังเสียงการไหลภายใน เป็นต้น วิธีการใช้ Probe จะพิจารณาได้ยากกว่าจะสามารถตัดสินได้ถูกต้องจะต้องใช้ความชำนาญค่อนข้างมาก แต่ปัจจุบันมี Trap checker รุ่นปรับปรุงที่ใครๆ ก็สามารถใช้งานได้โดยสะดวกออกมาจำหน่ายแล้ว หากนำอุปกรณ์นี้มาใช้จะสามารถตัดสินผลได้ค่อนข้างแม่นยำ แต่ต้องระมัดระวังว่า เกณฑ์การตัดสินของกับดักไอน้ำแต่ละชนิดจะไม่เหมือนกัน

นอกจากนั้น ในขณะที่ใช้งานกับดักไอน้ำไป สมรรถนะต่างๆ จะค่อยๆ ลดลง ดังนั้น จึงควรมีการยืดระยะเวลาการเสื่อมสมรรถนะเหล่านี้

ตารางที่ 1.4 ชนิดและคุณสมบัติของกับดักไอน้ำ

ประเภท		ข้อดี	ข้อเสีย
กับดักไอน้ำเชิงกล	แบบถ้วยหงาย	1.การทำงานแน่นอน 2.มีไอน้ำรั่วเนื่องจาก water seal น้อย	1.ติดตั้งในแนวระดับ 2.ขนาดใหญ่ 3.ระบายอากาศได้น้อยกว่า 4.อาจเกิดการเยือกแข็ง
	แบบถ้วยคว่ำ	1.การทำงานแน่นอน 2.สมรรถนะการระบายดีมาก 3.ทน water hammer ได้ดี 4.อายุการใช้งานยาวนาน	1.ติดตั้งในแนวระดับ 2.อาจเกิดการเยือกแข็ง
	แบบลูกลอยติดคาน	1.ระบายได้ต่อเนื่อง	1.ทน water hammer ได้ไม่ดี 2.อาจเกิดการเยือกแข็ง
	แบบลูกลอยอิสระ	1.มีขนาดเล็ก 2.โครงสร้างเรียบง่าย 3.ระบายได้ต่อเนื่อง 4.การทำงานเงียบ	1.ทน water hammer ได้ไม่ดี 2.อาจเกิดการเยือกแข็ง
กับดักไอน้ำแบบเทอร์โมสแตติก	แบบไอน้ำขยายตัว (เบลโลวส์)	1.ควบคุมอุณหภูมิของ Condensate ได้ 2.ระบายอากาศได้ดี	1.ทน water hammer ได้ไม่ดี 2.ไม่เหมาะกับไอน้ำความดันสูง 3.ใช้กับไอน้ำไม่ได้
	แบบโลหะสองชนิด	1.ใช้กับไอน้ำได้ 2.ไม่ต้องกังวลเรื่องการเยือกแข็ง 3.ไม่มีการชำรุดเนื่องจากวาล์วปิดค้าง 4.ระบายอากาศได้ดี 5.ทน water hammer ได้ดี 6.ปรับอุณหภูมิที่กำหนดไว้ได้	1.มีผลต่างอุณหภูมิของวาล์วปิดค้าง
กับดักไอน้ำแบบเทอร์โมไดนามิกส์	แบบ orifice	1.ขนาดเล็ก น้ำหนักเบา 2.ใช้กับไอน้ำได้	1.ชำรุดบ่อย 2.มีไอน้ำรั่ว 3.มีขีดจำกัด back pressure (< 30%)
	แบบจาน	1.ขนาดเล็ก น้ำหนักเบา 2.โครงสร้างเรียบง่าย 3.ใช้กับไอน้ำได้ 4.ทน water hammer ได้ดี 6.ระบาย Condensate ที่อุณหภูมิอิ่มตัว	1.มีขีดจำกัด back pressure (< 50%) 2.ขีดจำกัดความดันต่ำ (30 [kPa]) 3.มีไอน้ำรั่ว

ด้วยการทำความสะอาด Strainer การระมัดระวังการเสียดสีของวาล์ว ฯลฯ จึงควรทำมาตรฐานการตรวจซ่อมบำรุงกับดักไอน้ำแล้ว แล้วดำเนินการทุกๆ ระยะเวลาที่กำหนดไว้ ยิ่งไปกว่านั้น กับดักไอน้ำถือเป็นของสิ้นเปลือง หากซ่อมแล้วไม่สามารถคาดหวังว่าสมรรถนะจะเพิ่มขึ้นก็ควรเปลี่ยนตัวใหม่

จะเห็นว่าการซ่อมบำรุงกับดักไอน้ำเป็นสิ่งที่มีความสำคัญมาก จึงต้องจัดเตรียมเครื่องมือที่จำเป็นในการซ่อมบำรุงและกับดักไอน้ำสำรองไว้ตลอดเวลา หากมีการใช้กับดักไอน้ำหลายชนิดจะเป็นการยุ่งยากในการซ่อมบำรุง และการจัดการชิ้นส่วนสำรอง ดังนั้นจึงควรใช้กับดักไอน้ำชนิดเดียวกันของผู้ผลิตเดียวกันให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ นอกจากนั้น ควรเลือกใช้กับดักไอน้ำที่สามารถตรวจซ่อม และซ่อมบำรุงได้ง่ายอีกด้วย

1.3.10 การนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้

1.3.10.1 การนำความร้อนทิ้งใน

ก๊าซไอเสียจากการเผาไหม้กลับมาใช้

เนื่องจากก๊าซไอเสียจากเตาให้ความร้อนมีอุณหภูมิสูง ดังนั้นแม้จะมีการควบคุมการเผาไหม้อย่างดี ความสูญเสียในก๊าซไอเสียก็ยังมีค่าสูงมาก ดังนั้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพความร้อนของเตาให้ความร้อน จึงควรนำความร้อนสัมผัสของก๊าซไอเสียกลับมาใช้ประโยชน์อย่างมีประสิทธิภาพ

วิธีใช้ประโยชน์จากความร้อนสัมผัสของก๊าซไอเสียมีหลายวิธี วิธีที่ใช้ได้ผลในทุกกรณีและมีประสิทธิภาพสูง ได้แก่ การนำกลับมาใช้งานกับตัวอุปกรณ์นั่นเอง กล่าวคือ ใช้ก๊าซไอเสียในการให้ความร้อนแก่วัตถุดิบที่จะป้อนให้เตาให้ความร้อน หรือให้ความร้อนแก่อากาศสำหรับเผาไหม้

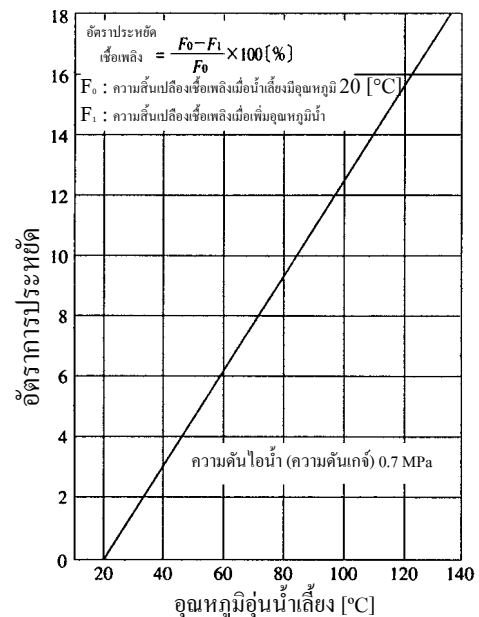
วิธีการใช้งานอื่นๆ ได้แก่ การใช้เป็นแหล่งความร้อนสำหรับอุปกรณ์อื่นโดยตรง หรือใช้ทำน้ำร้อนหรือไอน้ำโดยการติดตั้งหม้อไอน้ำความร้อนทิ้ง ทั้งนี้ ในกรณีเช่นนี้จะต้องพิจารณาปริมาณความร้อนที่อุปกรณ์นั้นต้องการ ช่วงอุณหภูมิ ช่วงเวลาเดินเครื่อง ความสัมพันธ์เชิงตำแหน่ง ฯลฯ อย่างถี่ถ้วนแล้วจึงตัดสินใจ

(1) การอุ่นน้ำเลี้ยง

เป็นการใช้เครื่อง Economizer

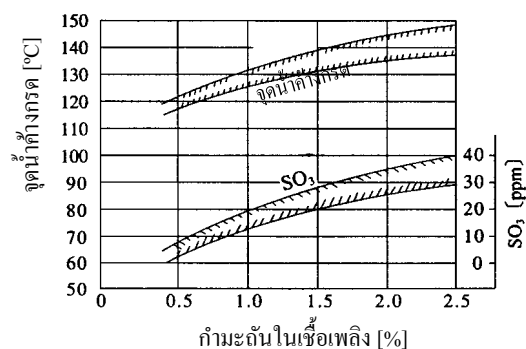
ในการนำความร้อนที่มีในก๊าซไอเสียมาอุ่นน้ำเลี้ยงหม้อไอน้ำ เนื่องจากเครื่อง Economizer เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ก๊าซไอเสียในการให้ความร้อนแก่ของเหลว จึงต้องมีพื้นที่ถ่ายเทความร้อนมากเท่ากับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับให้ความร้อนแก่อากาศ ทั้งนี้ เนื่องจากน้ำเลี้ยงที่จ่ายให้เครื่อง Economizer จะถูกอัดความดันมาก (c) ดังนั้นท่อและข้อต่อต่างๆ จึงต้องสามารถทนความดันสูงได้ ดังนั้นค่าอุปกรณ์จึงมีราคาสูงกว่าเครื่องอุ่นอากาศ

เมื่อใช้เครื่อง Economizer ในการอุ่นน้ำเลี้ยง อุณหภูมิน้ำเลี้ยงที่ไหลเข้าหม้อไอน้ำจะมีอุณหภูมิสูงขึ้น ปริมาณความร้อนที่หม้อไอน้ำต้องใช้ในการผลิตไอน้ำจึงลดลง



รูปที่ 1.20 อัตราการประหยัดเชื้อเพลิงด้วยการอุ่นน้ำเลี้ยง

(ในก๊าซเผาไหม้ H₂O=10-15 [%], O₂=3-4[%])



รูปที่ 1.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของก๊าะถันในเชื้อเพลิง กับความเข้มข้น SO₃ และจุดน้ำค้างกรด

ประสิทธิภาพของการอุ่นน้ำเลี้ยงแสดงได้ด้วยอัตรา

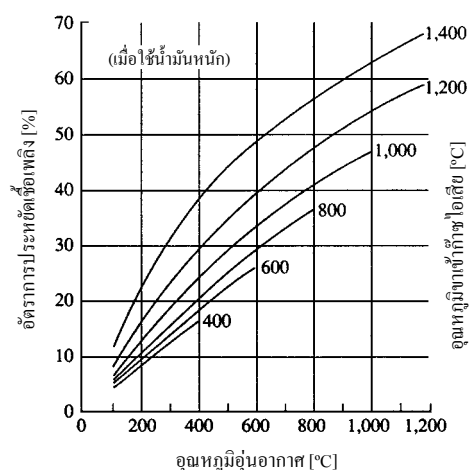
ประหยัดเชื้อเพลิง ดังรูปที่ 1.20 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการเพิ่มอุณหภูมิน้ำเลี้ยงจาก 20 °C เป็น 80 °C จะสามารถประหยัดปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ได้ประมาณ 9%

ในหม้อไอน้ำที่ใช้เชื้อเพลิงที่มีกำมะถันรวมอยู่ด้วย จะต้องระมัดระวังการกัดกร่อนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนของเครื่อง Economizer กำมะถันในเชื้อเพลิงเมื่อถูกเผาไหม้จะกลายเป็นซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ส่วนหนึ่งจะถูกออกซิไดซ์ต่อไปอีกกลายเป็นซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ซึ่งซัลเฟอร์ไตรออกไซด์นี้จะทำปฏิกิริยากับไอน้ำในก๊าซเผาไหม้กลายเป็นไอกรดกำมะถัน เมื่อก๊าซเผาไหม้ที่มีไอกรดกำมะถันรวมอยู่ด้วยนี้ไปสัมผัสกับพื้นผิวถ่ายเทความร้อนอุณหภูมิต่ำจะเกิดการควบแน่นกลายเป็นหยดกรดกำมะถัน ซึ่งจะกัดกร่อนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนอย่างรุนแรง การกัดกร่อนที่เกิดจากไอกรดกำมะถันในเชื้อเพลิงที่ควบแน่นเช่นนี้ เรียกว่าการกัดกร่อนอุณหภูมิต่ำ (Low temperature corrosion) อุณหภูมิที่ไอกรดกำมะถันเริ่มควบแน่นเทียบกับกรณีของก๊าซเผาไหม้ที่มีแต่ไอน้ำอย่างเดียวแล้วจะมีค่าสูงขึ้นมาก อุณหภูมิควบแน่นเมื่อก๊าซไอเสียมีไอกรดกำมะถันรวมอยู่ด้วย เรียกว่า จุดน้ำค้างกรด (Acid dew point) จุดน้ำค้าง (Dew point) ในกรณีที่ไม่มีไอกรดกำมะถันรวมอยู่ด้วยจะมีค่าเพียง 50-60 °C ในขณะที่จุดน้ำค้างกรดจะมีค่าสูงขึ้นเป็นประมาณ 120 °C รูปที่ 1.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกำมะถันในเชื้อเพลิงกับความเข้มข้นของซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO₃) และจุดน้ำค้างกรด โดยทั่วไปอุณหภูมิพื้นผิวถ่ายเทความร้อนของเครื่อง Economizer จะมีค่าเกือบเท่ากับกับอุณหภูมิของน้ำภายใน แต่เมื่อใช้เครื่อง Economizer เป็นอุปกรณ์นำความร้อนกลับมาใช้จะต้องระมัดระวังให้อุณหภูมิของพื้นผิวถ่ายเทความร้อนมีค่าสูงกว่าจุดน้ำค้างกรด ในบางกรณีจะต้องให้ความร้อนแก่น้ำเลี้ยงก่อนเข้าเครื่อง Economizer ด้วยวิธีการอย่างใดอย่างหนึ่งเพื่อให้มีอุณหภูมิสูงกว่าค่าหนึ่งด้วย

(2) การอุ่นอากาศ

เป็นการอุ่นอากาศสำหรับเผาไหม้ด้วยก๊าซไอเสีย แล้วป้อนเข้าไปในห้องเผาไหม้เนื่องจากอากาศที่ป้อนเข้ามีอุณหภูมิสูงขึ้น จะทำให้ก๊าซเผาไหม้มีอุณหภูมิสูงขึ้น เป็นผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนจากก๊าซไอเสียไปยังน้ำเพิ่มขึ้น นอกจากนั้น เนื่องจากกระบวนการเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาเคมี ดังนั้นความเร็วของปฏิกิริยาจึงขึ้นอย่างมากกับอุณหภูมิ การป้อนอากาศที่อุ่นแล้ว จะทำให้ลดระยะเวลาเผาไหม้ลงได้ ทำให้สามารถเผาไหม้เชื้อเพลิงได้เพิ่มขึ้นในห้องเผาไหม้เดียวกัน นอกจากนั้น ปริมาตรของอากาศสำหรับเผาไหม้ที่ป้อนให้ยังเพิ่มขึ้นอีกด้วย ดังนั้นเชื้อเพลิงกับอากาศจะผสมกันได้ดีขึ้น เทียบกับการไม่อุ่นอากาศแล้ว จะสามารถทำให้เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ได้โดยใช้อากาศส่วนเกินปริมาณน้อยกว่า ด้วยเหตุผลเช่นนี้ การใช้ก๊าซไอเสียในการอุ่นอากาศไม่เพียงแต่จะทำให้ก๊าซไอเสียมีอุณหภูมิต่ำลงเท่านั้น แต่ยังลดปริมาณก๊าซไอเสียลงได้ด้วย ความร้อนสูญเสียไปกับก๊าซไอเสียจึงลดลงอย่างมาก ประสิทธิภาพในกรณีที่อุ่นอากาศด้วยก๊าซไอเสียจะขึ้นกับอุณหภูมิก๊าซไอเสีย อุณหภูมิอากาศหลังจากอุ่นแล้ว และอัตราส่วนอากาศซึ่งถ้าคำนวณที่อัตราส่วนอากาศเท่ากับ 1.20 จะได้ผลดังรูปที่ 1.22

อย่างไรก็ตาม เครื่องอุ่นอากาศเป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ก๊าซในการอุ่นก๊าซ ดังนั้นเทียบกับเครื่อง Economizer แล้วจะมีขนาดใหญ่กว่าถ้ามีปริมาณการแลกเปลี่ยนความร้อนเท่ากัน นอกจากนั้น เนื่องจากเครื่องอุ่นอากาศจะติดตั้งคร่อมระหว่างเส้นทางไหลของก๊าซไอเสียกับเส้นทางไหลของอากาศสำหรับเผาไหม้ ดังนั้นไม่เพียงด้านก๊าซไอเสียเท่านั้น แต่ความต้านทานการไหลทางด้านอากาศสำหรับเผาไหม้ก็จะเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้น บางครั้งจึงต้องเปลี่ยนพัดลมของอากาศสำหรับเผาไหม้หรือต้องดัดแปลงเส้นทางไหลของอากาศ

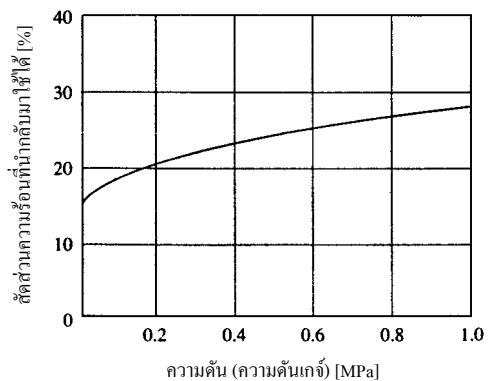


รูปที่ 1.22 อัตราการประหยัดเชื้อเพลิง

นอกจากนั้น โดยทั่วไปเมื่ออุณหภูมิสูงสุดของก๊าซเผาไหม้เพิ่มสูงขึ้น สารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจนจะมีแนวโน้มเกิดมากขึ้นด้วย การอุ่นอากาศสำหรับเผาไหม้บางครั้งจึงทำให้ปริมาณการปล่อยสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจนเพิ่มมากขึ้นด้วย ในภูมิภาคที่มีกฎหมายเข้มงวดเรื่องการปล่อยสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจน จะต้องพิจารณาก่อนว่าการอุ่นอากาศจะทำให้สารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจนเพิ่มขึ้นเท่าใด กรณีที่คาดว่าจะเกินค่าที่กำหนด จะต้องพิจารณาวิธีแก้ไข เช่น ใช้ low NO_x burner การเผาไหม้โดยการนำก๊าซไอเสียบางส่วนมาหมุนเวียนเข้าเผาไหม้ด้วย หรือการฉีดพ่นน้ำหรือไอน้ำในการเผาไหม้ เป็นต้น

1.3.10.2 การนำ Condensate กลับมาใช้

หลังจากนำไอน้ำไปใช้ให้ความร้อนแล้ว ไอน้ำจะควบแน่นกลายเป็นของเหลวอิมตัว โดยทั่วไปของเหลวนี้จะเรียกว่า Condensate ซึ่งไม่สามารถนำไปใช้ให้ความร้อนในอุปกรณ์ที่ใช้ไอน้ำได้อีกแล้ว จึงต้องระบายออกมภายนอกด้วยกับดักไอน้ำ แต่ Condensate ยังมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิอิมตัว จึงมีความร้อนอยู่มาก ปริมาณความร้อนนี้จะขึ้นอยู่กับความดันไอน้ำด้วย แต่เมื่อคำนวณสัดส่วนปริมาณความร้อนของของเหลวอิมตัวต่อปริมาณความร้อนในไอน้ำอิมตัวแล้วจะได้ดังแสดงในรูปที่ 1.23 เนื่องจากปริมาณความร้อนของไอน้ำอิมตัวจะเกือบเท่ากับ



รูปที่ 1.23 ปริมาณความร้อนใน Condensate ที่

ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการผลิตไอน้ำในหม้อไอน้ำ เมื่อความดันมีค่าสูง ปริมาณความร้อนเกือบ 30% ของความร้อนที่ให้แก่ม้อไอน้ำจะถูกระบายออกไปพร้อมกับ Condensate เนื่องจาก Condensate ความดันสูงจะมีความร้อนอยู่ปริมาณมาก และยังมีอุณหภูมิสูง จึงสามารถใช้เป็นแหล่งความร้อนในการให้ความร้อนได้นอกจากนั้น หากระบาย Condensate ความดันสูงไปที่สู่ความดันต่ำ Condensate ส่วนหนึ่งจะ Flash เกิดเป็นไอน้ำความดันต่ำ ที่เหลือจะเป็นน้ำอิมตัว ไอน้ำที่เกิดขึ้นแบบนี้เรียกว่า Flash steam ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในสถานที่ที่ใช้ไอน้ำความดันต่ำ และนำไอน้ำจากหม้อไอน้ำมาลดความดันแล้วนำไปใช้งาน สามารถใช้ Flash steam ที่เกิดจาก Condensate ความดันสูงในการประหยัดไอน้ำจากหม้อไอน้ำได้ ปริมาณ Flash steam ที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับความดันของ Condensate และความดันหลังจาก Flash แล้ว ยิ่งผลต่างความดันมีค่าสูงเท่าใด ปริมาณไอน้ำที่เกิดขึ้นก็จะมีค่ามากเท่านั้น อย่างไรก็ตาม ปริมาณที่เกิดขึ้นนี้จะมีขีดจำกัด กล่าวคือประมาณ 10 % ของมวลของ Condensate เท่านั้น สถานที่ที่สามารถใช้งาน Flash steam ได้จึงถูกจำกัดไปด้วย

ตัว Condensate เองเป็นน้ำที่ไม่มีสารเจือปนรวมอยู่ด้วย จึงสามารถใช้เป็นน้ำเลี้ยงได้ทันที หากนำ Condensate มาใช้เป็นน้ำเลี้ยงแล้ว ในเชิงความร้อนแล้วจะมีผลเท่ากับการอุ่นน้ำเลี้ยงด้วยก๊าซไอเสีย นอกจากนี้หากสามารถใช้เป็นน้ำเลี้ยงได้โดยตรงทันที จะสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายคือ ค่าน้ำเลี้ยง และค่าเติมสารเคมีบำบัดน้ำได้ กรณีที่ใน Condensate มีสารเจือปนรวมอยู่ด้วย หากใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในการอุ่นน้ำเลี้ยงแล้ว จะมีประสิทธิภาพในการอุ่นน้ำเลี้ยงเท่านั้น

1.3.10.3 การนำความร้อนในน้ำทิ้งอุณหภูมิสูงกลับมาใช้

กรณีที่เกิดน้ำร้อนขึ้นในปริมาณมากแม้จะมีอุณหภูมิต่ำ ควรพิจารณาวิธีนำไปใช้ประโยชน์โดยตรงหรือแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อนำไปใช้ ในสถานที่ที่ใช้น้ำที่มีอุณหภูมิค่อนข้างต่ำในปริมาณมาก หากเพิ่มอุณหภูมิน้ำเลี้ยงก่อนให้ความร้อนแม้เพียงเล็กน้อย จะสามารถลดความร้อนที่ต้องใช้ในการให้ความร้อนลงได้อย่างมาก ดังนั้น จึงต้องนำความร้อนที่มีในน้ำร้อนกลับมาใช้ประโยชน์อย่างมีประสิทธิภาพด้วยวิธีการอย่างใดอย่างหนึ่ง กรณีที่น้ำร้อนที่ปล่อยออกมาค่อนข้างสะอาด จะสามารถใช้เป็นน้ำร้อนได้ทันที แต่กรณีที่น้ำทิ้งสกปรก จะใช้งานด้วยการแลกเปลี่ยนความร้อน ในการใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ความสกปรกของพื้นผิวถ่ายเทความร้อนด้วยน้ำทิ้งอุณหภูมิสูงจะกลายเป็นปัญหา แต่สามารถแก้ปัญหาได้ด้วยการใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่สามารถทำความสะอาดได้ง่าย เช่น เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเพลต ในอุตสาหกรรมแม้ว่าจะมีน้ำร้อนทิ้งอุณหภูมิค่อนข้างต่ำเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก แต่มักจะถูกทิ้งไปเฉยๆ เนื่องจากไม่รู้ว่าจะเอาไปทำอะไร อย่างไรก็ตาม อุณหภูมินี้สามารถใช้ในการปรับอากาศร้อนและจ่ายอากาศร้อนได้ จึงควรพยายามนำน้ำทิ้งอุณหภูมิสูงมาใช้ประโยชน์อย่างจริงจัง

แม้ในกรณีที่น้ำทิ้งมีอุณหภูมิต่ำจะไม่สามารถใช้งานได้ทันที หากใช้ปั๊มความร้อนเพิ่มอุณหภูมิก็สามารถใช้ในการปรับอากาศร้อนและจ่ายน้ำร้อนได้ ปั๊มความร้อนเป็นอุปกรณ์ที่เมื่อป้อนงานหรือความร้อนจากภายนอกเข้าไปแล้ว จะทำหน้าที่ดูดความร้อนจากแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ แล้วจ่ายความร้อนอุณหภูมิสูงออกมา และยิ่งช่วงอุณหภูมิที่การเพิ่มให้สูงขึ้นมีค่าน้อยเท่าใด ความร้อนหรืองานที่ต้องป้อนให้ก็จะมีค่าต่ำเท่านั้น ดังนั้น หากใช้น้ำทิ้งเป็นแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ แม้จะป้อนงานหรือความร้อนจากภายนอกเข้าไปเพียงเล็กน้อย ก็เพียงพอที่จะผลิตน้ำร้อนที่มีอุณหภูมิเพียงพอที่จะใช้ในการปรับอากาศร้อน และจ่ายน้ำร้อนได้ เมื่อทำเช่นนี้แล้วจะใช้เชื้อเพลิงน้อยกว่าการเผาไหม้เชื้อเพลิงเพื่อกำเนิดน้ำร้อนโดยตรง นอกจากนั้น หากใช้น้ำทิ้งเป็นแหล่งความร้อนขับเครื่องทำความเย็นแบบดูดกลืนแล้ว จะสามารถผลิตน้ำเย็นและน้ำร้อนได้พร้อมกัน จึงสามารถใช้ปรับอากาศเย็นได้อีกด้วย

ในหม้อไอน้ำจะมีการ Blow down เพื่อลดความเข้มข้นของสารเจือปน แต่เนื่องจากน้ำ Blow down เป็นน้ำที่มีอุณหภูมิสูง จึงสามารถแลกเปลี่ยนความร้อนไปอุ่นน้ำเลี้ยงได้ วิธีการ Blow down แบ่งเป็นการ Blow down เป็นช่วงๆ กับ Blow down ต่อเนื่อง การ Blow down เป็นช่วงๆ จะมีจำนวนครั้งของการ Blow down จำกัด ในการนำความร้อนในน้ำ Blow down กลับมาใช้จะต้องเก็บน้ำ Blow down ไว้ในถังก่อน แล้วจึงนำความร้อนนั้นไปให้ความร้อนน้ำเลี้ยงต่อไป ในขณะที่การ Blow down ต่อเนื่องจะมีการ Blow down อย่างต่อเนื่องสอดคล้องกับการเติมน้ำเลี้ยง จึงสามารถอุ่นน้ำเลี้ยงได้ด้วยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนง่ายๆ

1.4 การควบคุมความดันไอน้ำให้เหมาะสมกับภาระ

กรณีของไอน้ำอิ่มตัว อุณหภูมิของไอน้ำจะขึ้นอยู่กับความดัน แต่กรณีที่ไอน้ำในการให้ความร้อนหากความดันยังมีค่าสูง ผลต่างของอุณหภูมิการให้ความร้อนกับวัตถุที่ถูกให้ความร้อนก็จะมีค่าสูง จึงสามารถลดระยะเวลาให้ความร้อนได้ และพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ต้องใช้ในการให้ความร้อนก็มีขนาดเล็กได้ อย่างไรก็ตาม ยิ่งไอน้ำมีความดันสูง ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอก็ยังมีค่าน้อยลง ดังนั้นเพื่อให้ได้ปริมาณความร้อนเดียวกัน ยิ่งความดันมีค่าสูงเท่าใด จะต้องใช้ไอน้ำปริมาณมากขึ้นเท่านั้น ด้วยเหตุผลเช่นนี้ นอกจากกรณีที่อุณหภูมิที่ต้องการให้ความร้อนมีค่าสูง จนต้องใช้ความดันสูงอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้แล้ว ควรลดความดันของไอน้ำให้มีค่าต่ำที่สุดเท่าที่จะทำได้

ความดันของหม้อไอน้ำ ให้กำหนดค่าที่เหมาะสมโดยพิจารณาถึงช่วงการปรับความดันของหม้อไอน้ำและความดันสูญเสียในท่อไอน้ำ หากไอน้ำที่จ่ายออกจากหม้อไอน้ำมีความดันต่ำ อุณหภูมิของไอน้ำจะต่ำลง

ด้วย จึงสามารถลดการสูญเสียความร้อนออกจากท่อส่งไอน้ำได้มากขึ้น อย่างไรก็ตาม กรณีที่ใช้เชื้อเพลิงที่มีกำมะถันสูง หากลดความดันที่กำหนดไว้ลงต่ำเกินไป อาจทำให้เกิดการกัดกร่อนอุณหภูมิต่ำที่พื้นผิวถ่ายเทความร้อนได้ จึงต้องใช้ความระมัดระวัง ในกรณีเช่นนี้ ควรติดตั้งวาล์วลดความดันไว้ที่ใกล้ๆ ทางออกหม้อไอน้ำ เมื่อออกมาจากหม้อไอน้ำแล้วจึงลดความดันไอน้ำลงเมื่อส่งไอน้ำต่อไป

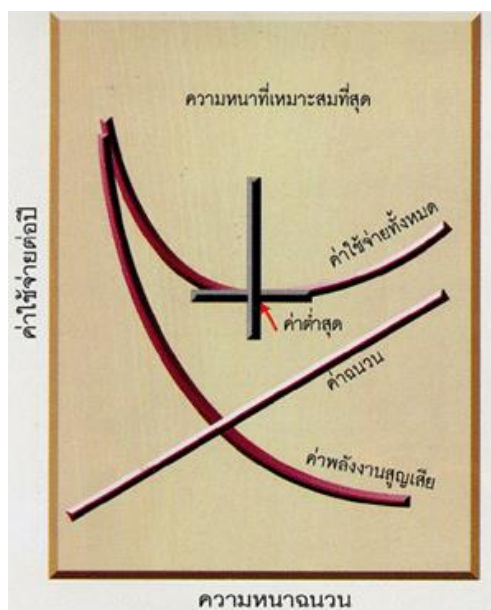
1.5 การหุ้มฉนวนกันความร้อน

ฉนวนเป็นตัวนำความร้อนที่เลว และมีค่าการนำความร้อนต่ำ ฉนวนทำหน้าที่ในการป้องกันหรือหน่วงการถ่ายเทความร้อนจากที่มีอุณหภูมิสูงกว่าไปสู่ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า

วัสดุที่เป็นฉนวน มักจะเป็นวัสดุที่พรุน มีเซลล์อากาศอยู่มาก ความต้านทานต่อการถ่ายเทความร้อนขึ้นอยู่กับเซลล์อากาศจำนวนมากที่มีอากาศอยู่หนึ่งหรือค่อนข้างหนึ่งบรรจุอยู่ เซลล์อากาศนี้ต้องมีขนาดเล็ก เพราะถ้าใหญ่ไปอากาศจะไม่อยู่นิ่งเกิดการพาความร้อนได้

ฉนวนที่ใช้หุ้มพื้นผิวอุปกรณ์ในระบบไอน้ำ เช่น ท่อไอน้ำ อุปกรณ์ต่าง ๆ หน้าจาน วาล์ว ควรเลือกชนิดให้เหมาะสม โดยเป็นฉนวนที่ทนต่ออุณหภูมิของไอน้ำได้ ดังเช่นฉนวนใยแก้ว ฉนวนใยหิน เป็นต้น ฉนวนที่กล่าวนี้ทำหน้าที่ลดการสูญเสียความร้อนจากการแผ่รังสีได้มาก ปริมาณการสูญเสียความร้อนจากผิวท่อเปลือยจะมากกว่าท่อที่หุ้มฉนวนมาก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับผลต่างของอุณหภูมิระหว่างผิวนอกของท่อหรือฉนวนกับอากาศภายนอก โดยทั่วไปจะมีค่าประมาณ 5-10 % ต้องหมั่นตรวจสอบว่าฉนวนอยู่ในสภาพที่ดี คือไม่ยุบตัว ทำให้ความหนาลดลง หรือมีน้ำขังอยู่ในฉนวน เป็นต้น

ในการหุ้มฉนวนนั้นควรพิจารณาใช้ความหนาที่เหมาะสมในเชิงเศรษฐศาสตร์ ซึ่งมาจากแนวความคิดที่ว่า ไม่มีฉนวนใดสามารถป้องกันการสูญเสียความร้อนได้สมบูรณ์ 100% ดังนั้นความหนาของฉนวน และชนิดของฉนวนที่ใช้จะถูกกำหนดจากต้นทุนการผลิตความร้อน และต้นทุนในการใช้ฉนวนความร้อน ในการป้องกันการสูญเสียความร้อนของฉนวน เป็นไปตามกฎที่มีชื่อว่า “กฎของการได้ผลตอบแทนถดถอย” กล่าวคือถ้าใช้ความหนาฉนวนต่ำกว่าค่าๆ หนึ่ง แล้วจะเกิดการสูญเสียความร้อนมาก นั่นคือ หนาไม่พอ แต่ถ้าใช้ความหนาฉนวนสูงกว่าค่าๆ หนึ่งแล้ว ต้นทุนฉนวนที่สูงขึ้น จะไม่คุ้มกับพลังงานที่ประหยัดเพิ่มขึ้นได้ ดังนั้นจะมีความหนาฉนวนอยู่ค่าหนึ่งที่เหมาะสมในเชิงเศรษฐศาสตร์ที่ผลรวมของราคาฉนวนกับราคาพลังงานที่สูญเสียมีค่าต่ำที่สุด



รูปที่ 1.24 ความหนาที่เหมาะสมที่สุดของฉนวน

1.6 การเลือกใช้และการติดตั้งกับดักไอน้ำ

1.6.1 หน้าที่การทำงานของกับดักไอน้ำ

การเดินเครื่องอุปกรณ์ใช้ไอน้ำชนิดต่างๆ เช่น เครื่องให้ความร้อน เครื่องอบแห้ง ถึงให้ความร้อน เครื่องปั๊มด้วยความร้อน เครื่องปรับอากาศร้อน ฯลฯ อย่างมีประสิทธิภาพสูงเพื่อให้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูง จะต้องจ่ายไอน้ำที่มีคุณภาพสูง กล่าวคือ ไอน้ำที่มีความดัน (อุณหภูมิ) คงที่ และมีความแห้งสูง ให้แก่อุปกรณ์เหล่านั้น พร้อมกับระบาย Condensate ที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์อย่างรวดเร็ว เพื่อรักษาอุณหภูมิอิมตัวที่ความดันไอน้ำอิมตัวภายในอุปกรณ์ให้คงที่ นอกจากนี้จะต้องพยายามรวบรวม Condensate ในท่อซึ่งกลายเป็นกระแสของไหลสองสถานะให้รวมอยู่ที่จุดเดียวเท่าที่จะทำได้ และระบายออกอย่างรวดเร็วโดยอัตโนมัติโดยไม่ให้อิทธิพลกับกับดักไอน้ำเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ดังกล่าวนี้ กล่าวคือ เป็นวาล์วอัตโนมัติชนิดหนึ่งนั่นเอง

หน้าที่การทำงานที่ต้องการของกับดักไอน้ำมีดังต่อไปนี้

- (1) ระบาย Condensate ที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์ไอน้ำต่างๆ และในท่อออกอย่างรวดเร็ว
- (2) กำจัดก๊าซที่ไม่ควมแน่น เช่น อากาศ ออกให้หมด
- (3) ต้องไม่มีไอน้ำรั่ว

ความเหมาะสมของกับดักไอน้ำที่เลือกใช้ จะส่งผลต่อสมรรถนะของอุปกรณ์ไอน้ำ และท่อส่งไอน้ำ หากเลือกใช้ผิดจะมีพลังงานสูญเสียสูงมาก จึงต้องเลือกใช้อย่างระมัดระวัง

1.6.2 สมบัติของกับดักไอน้ำประเภทต่างๆ

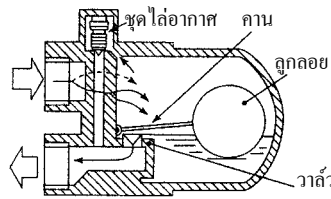
กับดักไอน้ำที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันแบ่งตามหลักการทำงานได้เป็น กับดักไอน้ำเชิงกล กับดักแบบเทอร์โมสเตติก และกับดักแบบเทอร์โมไดนามิกส์ ต่อไปนี้จะยกตัวอย่างกับดักไอน้ำแบบต่างๆ และอธิบายสมบัติของมัน

(ก) กับดักไอน้ำเชิงกล

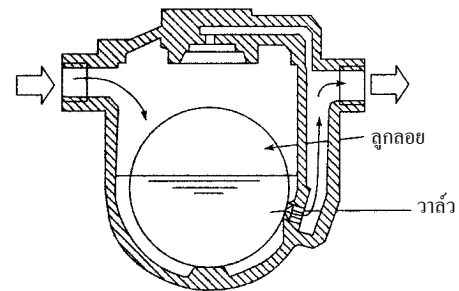
กับดักไอน้ำเชิงกลจะใช้แรงลอยตัวของถ้วยหรือลูกลอย เช่น ทรงกลมกลวง ที่เกิดจากผลต่างความหนาแน่นระหว่างไอน้ำกับ Condensate ในการเปิดปิดวาล์วโดยตรง เนื่องจากหลักการทำงานจะขึ้นอยู่กับ Condensate โดยตรง จึงมีความเชื่อถือได้สูงที่สุด เหมาะกับ Condensate recovery line ที่มี Back pressure ค่อนข้างสูง กับดักแบบนี้แบ่งเป็นแบบถ้วยกับแบบลูกลอย แต่แบบลูกลอย (แบบปิดสนิท แบบหงาย) จะมีจุดอ่อนคือ ไม่สามารถไล่อากาศออกได้ ดังนั้น กับดักลูกลอยแบบปิดสนิทและแบบหงายจะต้องติดตั้งวาล์วไล่อากาศอัตโนมัติเสริมด้วย

รูปที่ 1.25 แสดงกับดักไอน้ำแบบลูกลอยติดคาน ซึ่งใช้แรงลอยตัวของลูกลอยแบบปิดสนิท คานจะไปขยับวาล์วเพื่อเปิดปิด Valve seat กับดักแบบนี้โดยโครงสร้างแล้วอาจมีการสึกหรอของกลไกคาน หรือเกิดการเปลี่ยนรูปหรือความเสียหายเนื่องจากแรงกระแทกของ Water hammer หรือ Valve seat ไม่ตรง เป็นต้น แต่โดยทั่วไปจะมีอายุการใช้งานยืนยาว มีความเชื่อถือได้สูง และนิยมใช้กันทั่วไป

รูปที่ 1.26 แสดงกับดักไอน้ำแบบลูกลอยอิสระ ซึ่งไม่มีกลไกคาน ตัวลูกลอยซึ่งปิดสนิทจะทำหน้าที่เป็นวาล์วในการเปิดปิด Valve seat กับดักไอน้ำแบบนี้โดยโครงสร้างแล้วจะเกิดความเสียหายทางกลได้น้อย และมีความเชื่อถือได้สูง จุดที่ต้องระมัดระวังได้แก่ ต้องไม่ให้พื้นผิวของลูกลอยสกปรกหรือมีสิ่งแปลกปลอมเกาะอยู่ นอกจากนี้ กับดักแบบนี้ยังสามารถระบาย Condensate ออกอย่างต่อเนื่องได้อีกด้วย



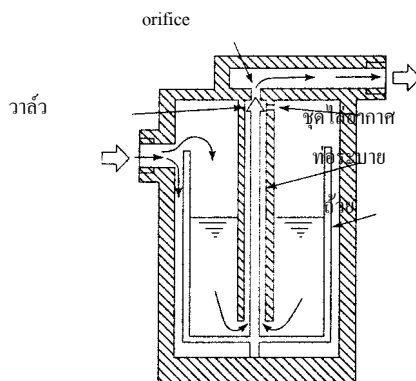
รูปที่ 1.25 กับดักไอน้ำแบบลูกลอยติดคาน



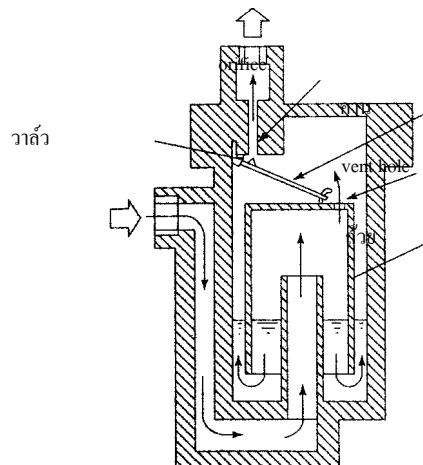
รูปที่ 1.26 กับดักไอน้ำแบบลูกลอยอิสระ

รูปที่ 1.27 แสดงกับดักไอน้ำแบบถ้วย ซึ่งมีถ้วยหงายที่เปิดด้านบน และรูปที่ 1.28 แสดงกับดักไอน้ำแบบถ้วยคว่ำที่เปิดด้านล่าง กับดักไอน้ำแบบถ้วยคว่ำยังมีแบบถ้วยลูกลอยอิสระซึ่งไม่มีคานอีกด้วย

กับดักไอน้ำแบบถ้วยหงาย จะมีวาล์วอยู่ที่ปลายก้านวาล์วซึ่งยึดตายตัวกับกลางถ้วย ถ้วยจะเคลื่อนที่ขึ้นลงด้วยแรงลอยตัวที่ขึ้นอยู่กับปริมาณของ Condensate ที่ไหลเข้ามาในถ้วย และทำการเปิดปิด Valve seat กับดักไอน้ำแบบนี้โดยโครงสร้างจะมีข้อดี



รูปที่ 1.27 กับดักไอน้ำแบบถ้วยหงาย



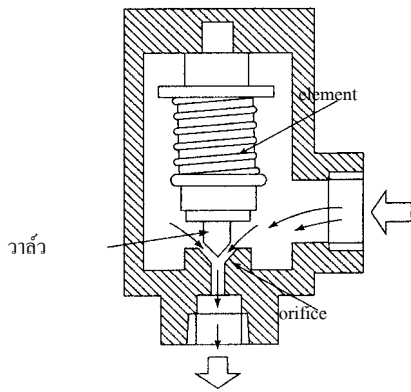
รูปที่ 1.28 กับดักไอน้ำแบบถ้วยคว่ำ

คือ มีไอน้ำร่วนน้อย แต่บางครั้งแม้จะมีอากาศอยู่วาล์วก็ปิดได้ จึงต้องติดตั้งร่วมกับชุดไล่อากาศ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การไล่อากาศขณะที่เริ่มเดินเครื่องเป็นเรื่องที่สำคัญ

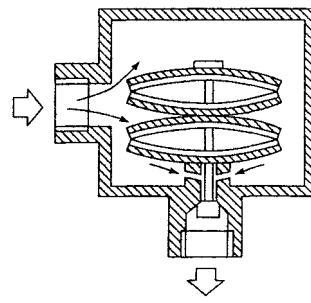
กับดักไอน้ำแบบถ้วยคว่ำ โดยมากจะมีโครงสร้างที่ไม่ยึดวาล์วตายตัวกับถ้วย แต่จะห้อยด้วยคานแบบ Overhang วาล์วจะติดตั้งกับคาน ไอน้ำในถ้วยจะระบายออกทางรู Vent hole เล็กๆ ที่ส่วนบนสุดแล้วไปควบแน่น กับดักไอน้ำแบบนี้มีข้อดีคือ ไม่ต้องมีวาล์วไล่อากาศขณะที่เริ่มเดินเครื่องเหมือนกับกับดักไอน้ำแบบถ้วยหงาย

(ข) กับดักไอน้ำแบบเทอร์โมสแตติก

กับดักไอน้ำแบบเทอร์โมสแตติกแบ่งเป็นแบบไอน้ำขยายตัว (เบลโลว์ส) แบบของเหลวขยายตัว และแบบโลหะสองชนิด ทุกแบบใช้หลักการทำงานด้วยการขยายตัวของก๊าซหรือของเหลวหรือการเปลี่ยนรูปร่างของโลหะเนื่องจากการเปลี่ยนอุณหภูมิ ดังนั้นการทำงานจึงขึ้นอยู่กับวัสดุประสงค์การใช้งานหลักได้แก่ใช้ในอุปกรณ์ที่มีความดัน และอุณหภูมิค่อนข้างต่ำ เช่น ระบบปรับอากาศร้อนหรือ Steam trace line เป็นต้น โดยทั่วไปไม่ค่อยใช้ในอุปกรณ์ไอน้ำอุตสาหกรรม รูปที่ 1.29 แสดงกับดักไอน้ำแบบไอน้ำขยายตัว รูปที่ 1.30 แสดงกับดักไอน้ำแบบโลหะสองชนิด



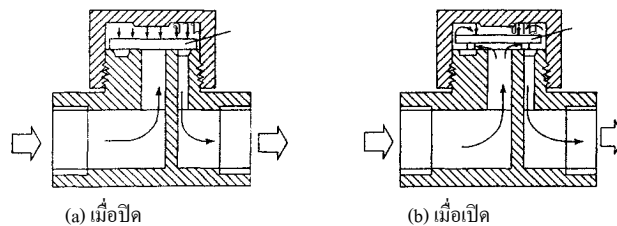
รูปที่ 1.29 กักตักไอน้ำแบบไอน้ำขยายตัว



รูปที่ 1.30 กักตักไอน้ำแบบโลหะสองชนิด (Bimetal)

(ค) กักตักไอน้ำแบบเทอร์โมไดนามิกส์

กักตักไอน้ำแบบนี้ ใช้ความแตกต่างของสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ระหว่างไอน้ำและ Condensate ทำการเปิดปิดวาล์วด้วยการเปลี่ยนแปลงความดันของกระแสของไหล ตัวอย่างที่สำคัญได้แก่ กักตักไอน้ำแบบจานและแบบ Impulse กักตักไอน้ำแบบจานจะใช้ตัวจานเป็นวาล์ว เมื่อมี Condensate ไหลเข้ามาความดันจะยกจานขึ้นให้ระบายออกไป รูปที่ 1.31 แสดงกักตักไอน้ำแบบจาน



รูปที่ 1.31 กักตักไอน้ำแบบจาน

1.6.3 การเลือกใช้กักตักไอน้ำ

ในการเลือกใช้กักตักไอน้ำ ก่อนอื่นต้องตรวจสอบคุณลักษณะภาระไอน้ำ และปริมาณภาระของ อุปกรณ์ที่จะติดตั้งกักตักไอน้ำ แล้วเลือกประเภท และขนาดของกักตักไอน้ำที่เหมาะสม โดยทั่วไปอุปกรณ์ของ กระบวนการที่ใช้งานต่อเนื่องจะมีการเปลี่ยนแปลงของภาระน้อย แต่ในอุปกรณ์ของกระบวนการแบบ Batch นั้น ทุกครั้งที่เริ่มเดินเครื่องจะต้องไล่อากาศ และระบาย Condensate ออกจำนวนมากอย่างรวดเร็ว ดังนั้น จึงต้องเลือกประเภท และขนาดของกักตักไอน้ำให้มีความสามารถในการระบายสอดคล้องกับเงื่อนไขดังกล่าว ในทำนองเดียวกัน เมื่อท่อส่งไอน้ำหยุดทำงานอยู่แล้วต้องการจะเริ่มเดินเครื่องต่อ จะเกิด Condensate ขึ้นจำนวนมากเพื่อให้ความร้อนท่อให้ถึงอุณหภูมิใช้งาน ดังนั้น จึงต้องเลือกใช้กักตักไอน้ำที่เหมาะสมเพื่อ ระบาย Condensate ออกอย่างรวดเร็วและไม่ให้เกิดความเสียหายจากค้อนน้ำ (Water hammer)

นอกจากนี้ กักตักไอน้ำแต่ละประเภทยังมีช่วง Back pressure tolerance แตกต่างกัน ในการ เลือกใช้กักตักไอน้ำ จึงต้องระมัดระวังเรื่อง Back pressure tolerance นี้เป็นพิเศษ ค่า Back pressure tolerance หมายถึงอัตราส่วนของความดันขาออก (Back pressure) ต่อความดันขาเข้าของ Steam trap (กักตักไอน้ำ) ซึ่งแสดงได้ดังสูตรต่อไปนี้

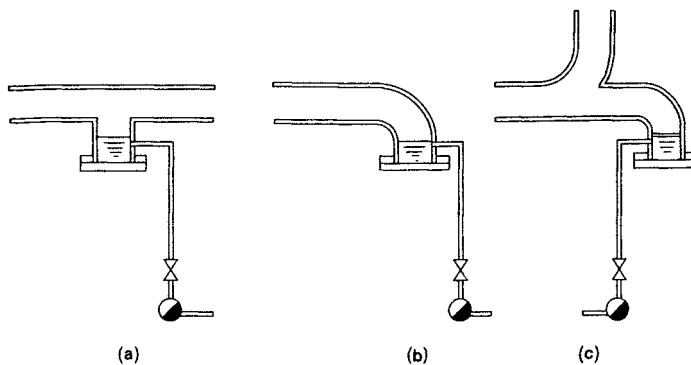
$$\text{back pressure tolerance} = (\text{ความดันขาออก} / \text{ความดันขาเข้า}) \times 100 \quad (1.3)$$

ค่า Back pressure tolerance ของก๊าดักไอน้ำเชิงกลจะมีค่าประมาณ 90% ของก๊าดักไอน้ำแบบเทอร์โมสแตติก และก๊าดักไอน้ำแบบเทอร์โมไดนามิกส์จะมีค่าประมาณ 30-50% ดังนั้น ก๊าดักไอน้ำเชิงกลจึงเหมาะจะใช้กับ Condensate recovery line ที่มี Back pressure ค่อนข้างสูง

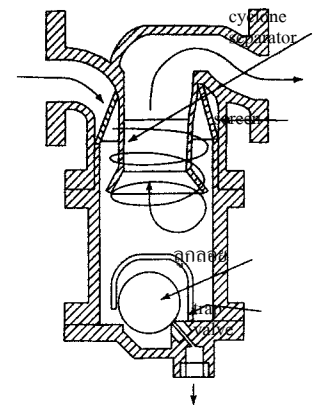
1.6.4 การติดตั้งก๊าดักไอน้ำ

ก๊าดักไอน้ำเป็นอุปกรณ์ที่ทำงานด้วยการที่ Condensate ไหลมาตามธรรมชาติเข้ามาในก๊าดักไอน้ำ ดังนั้น หลักการพื้นฐานในการติดตั้งก๊าดักไอน้ำคือ จะต้องไม่ให้เกิดอุปสรรคกับกระบวนการดังกล่าว ซึ่งมีข้อควรระวังดังต่อไปนี้

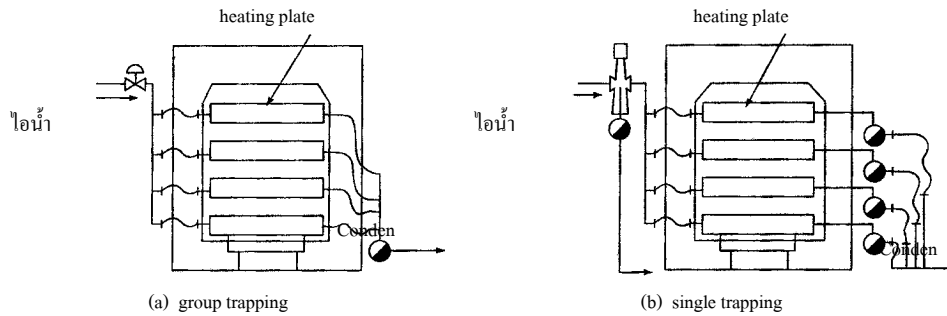
- (1) ท่อไหลเข้าก๊าดักไอน้ำต้องหลีกเลี่ยงท่อเอียงขึ้น ให้ใช้ท่อเอียงลง
- (2) ท่อไหลเข้าต้องมีขนาดใหญ่ มีระยะทางสั้น มีโค้งน้อย เพื่อลดความดันสูญเสีย
- (3) ในกระบวนการแบบ Batch ต้องติดตั้ง Bypass valve เพื่อไล่อากาศที่เหลือในอุปกรณ์ และท่อขณะที่เริ่มเดินเครื่องออกไปอย่างรวดเร็ว ช่วยป้องกัน Steam locking และ Air locking โดย Steam locking หมายถึงสภาพที่แม้ว่าจะมี Condensate จำนวนมากอยู่ในเครื่องจักร แต่เมื่อไอน้ำมาสะสมในก๊าดักไอน้ำและในท่อไหลเข้า ก๊าดักไอน้ำจะปิดค้างไม่ยอมเปิด ส่วน Air locking หมายถึงสภาพที่ก๊าดักไอน้ำถูกปิดตายด้วยอากาศคล้ายๆ กับ Steam locking ซึ่งเกิดขึ้นได้ง่ายเมื่อเริ่มเดินเครื่อง
- (4) ติดตั้ง Condensate separator ที่ท่อส่งไอน้ำ และทางเข้าอุปกรณ์ไอน้ำดังรูปที่ 1.32 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกไอน้ำกับน้ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในการส่งไอน้ำคุณภาพสูงไปยังอุปกรณ์ใช้ไอน้ำ โดยทั่วไปจะต้องไม่พา Condensate เข้าไปยังอุปกรณ์ไอน้ำด้วย ที่ทางเข้าอุปกรณ์ไอน้ำจึงต้องติดตั้ง Condensate separator ดังรูปที่ 1.33 (ในตัวอย่างนี้จะอยู่ในก๊าดักไอน้ำ)
- (5) กรณีที่มีอุปกรณ์ไอน้ำรุ่นเดียวกันหลายๆ ตัวอยู่ด้วยกัน หรือกรณีที่มีอุปกรณ์ให้ความร้อนหลายตัวอยู่ในระบบเดียวกัน จะต้องหลีกเลี่ยง Group trapping ดังรูปที่ 1.34 โดยติดตั้งเป็น Single trapping เพื่อให้มั่นใจว่าสามารถระบาย Condensate อย่างแน่นอน



รูปที่ 1.32 ตัวอย่างการติดตั้ง Condensate separator



รูปที่ 1.33 ตัวอย่าง Condensate separator



รูปที่ 1.34 ตัวอย่างการติดตั้ง Trapping

1.7 การอนุรักษ์พลังงานโดยการนำคอนเดนเสดกลับมาใช้ใหม่

1.7.1 ความสำคัญของการนำ Condensate กลับมาใช้

ไอน้ำเป็นพลังงานที่มีประโยชน์มาก อย่างไรก็ตาม โดยมากปริมาณความร้อนที่มีอยู่ในไอน้ำที่อุปกรณ์ไอน้ำทั่วไปนำมาใช้งานจะมีเพียงความร้อนแฝงของการควบแน่นเท่านั้น ส่วนความร้อนสัมผัสคือ ความร้อนที่มีอยู่ใน Condensate มักจะถูกปล่อยทิ้งไปในบรรยากาศ

หากนำความร้อนใน Condensate นี้กลับไปใช้ถ่ายเทให้น้ำสำหรับหม้อไอน้ำหรือทำ Flash steam ความดันต่ำแล้ว ปริมาณไอน้ำ Effective ที่ผลิตจากหม้อไอน้ำจะเพิ่มขึ้น จึงสามารถลดปริมาณไอน้ำที่สูญเสียได้ เท่ากับลดการใช้เชื้อเพลิงต่อหน่วย ประสิทธิภาพที่ปรากฏของหม้อไอน้ำจึงสูงขึ้น ผลลัพธ์คือสามารถเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมของหม้อไอน้ำ สมมติว่าเราสามารถนำความร้อนใน Condensate กลับมาใช้ประโยชน์ได้ 100% แล้ว อัตราส่วนของความร้อนที่นำกลับมาใช้ต่อความร้อนทั้งหมดในไอน้ำจะมีค่าสูงถึง 20-30% นอกจากนั้น ความดันยิ่งสูงเท่าใดอัตราส่วนนี้จะยิ่งสูงขึ้นเท่านั้น ดังนั้น จึงต้องพยายามเท่าที่จะทำได้ที่จะไม่ปล่อย Condensate ทิ้งไปในบรรยากาศ แต่ควรนำกลับมาใช้ในสภาวะความดันสูง

การนำ Condensate กลับมาใช้ หรือการนำตัวน้ำกลับมาใช้ เป็นสิ่งที่มีความสำคัญ โดยวิธีนำ Condensate กลับมาใช้ที่นิยมกันมากที่สุด และมีประโยชน์มาก ได้แก่ การนำกลับมาเป็นน้ำป้อนให้หม้อไอน้ำ แม้ว่าคุณภาพของน้ำป้อนหม้อไอน้ำจะขึ้นอยู่กับประเภท และความดันของหม้อไอน้ำ แต่ก็มีต้นทุนอย่างใดอย่างหนึ่งในการผลิต โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การผลิตน้ำบริสุทธิ์จะมีต้นทุนสูง ดังนั้น การนำ Condensate กลับมาใช้เพื่อลดปริมาณน้ำบริสุทธิ์ที่ต้องผลิตจึงมีประสิทธิผลทางเศรษฐศาสตร์อย่างมาก ในการทำเช่นนั้นเราต้องระมัดระวังในการนำกลับมาใช้ไม่ให้มีสิ่งแปลกปลอมปะปน เช่น อากาศละลายในน้ำ น้ำมัน และสนิมเหล็กต่างๆ หรือของเหลวในกระบวนการผลิตเข้ามาปะปน เป็นต้น กรณีที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงสิ่งแปลกปลอมเข้ามาปะปนได้ ให้นำกลับมาใช้แต่ความร้อนอย่างเดียว โดยยอมที่จะไม่นำตัวน้ำกลับมาใช้

1.7.2 วิธีนำ Condensate กลับมาใช้

การนำ Condensate กลับมาใช้อย่างมีประสิทธิภาพ จะต้องออกแบบท่อ Condensate recovery อย่างเหมาะสม กล่าวคือ สมบัติของของไหลในท่อ Condensate recovery เป็นของไหลสองสถานะ ได้แก่ Flash steam กับ Condensate

ในการออกแบบท่อ Condensate recovery หากกำหนดขนาดของท่อโดยถือว่าเป็นท่อร้อนที่มีแต่ Condensate ซึ่งเกิดจากไอน้ำควบแน่นเพียงอย่างเดียว ในทางปฏิบัติแล้วท่อจะมีขนาดเล็กไป ทำให้ความเร็วกระแสในท่อสูงเกินไปมาก มีความดันสูญเสียเพิ่มขึ้น ทำให้ Back pressure ของก๊อบดักไอน้ำเพิ่มสูงขึ้น ผลลัพธ์คือเป็นสาเหตุทำให้ก๊อบดักไอน้ำมีความจุ (Capacity) ไม่เพียงพอได้ จึงต้องใช้ความระมัดระวังโดยทั่วไปท่อ Condensate recovery จะเป็นกระแสน้ำสองสถานะ ดังนั้น ช่วงความเร็วกระแสในท่อที่เหมาะสม

จะเท่ากับ 5-15 m/s นอกจากนี้ Flash steam ที่เกิดขึ้นในท่อไม่เพียงแต่จะขัดขวางการไหลตามปกติของ Condensate เท่านั้น แต่ยังทำให้กับดักไอน้ำมีความสามารถในการระบายลดลงอีกด้วย จึงต้องพยายามเท่าที่จะทำได้ในการออกแบบท่อไม่ให้เกิดกระแสองสถานะขึ้น

วิธีนำ Condensate กลับมาใช้แบ่งเป็นวิธีส่งกลับด้วยความดันของตัวเองกับวิธีสูบลวดยปั๊ม

วิธีแรกจะใช้ Back pressure ของ Condensate ส่งกลับด้วยท่อ Recovery ไปยังถังจ่ายน้ำเลี้ยงหม้อไอน้ำ วิธีนี้มีประสิทธิภาพในกรณีที่ความดันใช้งานของอุปกรณ์ไอน้ำต่างๆ มีค่าค่อนข้างสูง และระยะทางไปยังถังจ่ายน้ำเลี้ยงหม้อไอน้ำมีระยะทางไม่ไกลมาก

วิธีหลังยังแบ่งเป็นแบบเปิดกับแบบปิด แบบเปิดจะรวบรวม Condensate ใส่ถังเปิด (Recovery tank) ก่อน แล้วใช้ปั๊มสูบไปยังถังจ่ายน้ำเลี้ยงหม้อไอน้ำ อย่างไรก็ตาม เนื่องจาก Condensate มีอุณหภูมิสูง จึงต้องระมัดระวังในการเลือกประเภท และกำหนดตำแหน่งของปั๊ม ในกรณีของปั๊มทั่วไป จะรองรับ Condensate ที่มีอุณหภูมิสูงสุดไม่เกิน 70-80°C เพื่อป้องกัน Cavitation ส่วนแบบปิดจะใช้ปั๊มซึ่งออกแบบมาสำหรับ Condensate recovery โดยเฉพาะ ปั๊มนี้จะสามารถติดตั้งไว้กลางทางท่อ Condensate recovery ได้ และสูบน้ำส่งไปยังถังจ่ายน้ำเลี้ยงหม้อไอน้ำ หรือส่งไปยังหม้อไอน้ำโดยตรงก็ได้

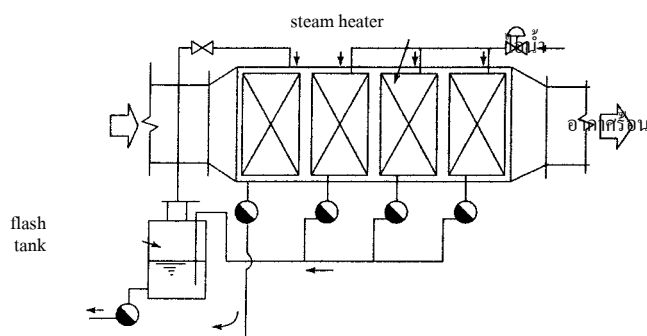
1.7.3 การใช้ประโยชน์จาก Flash steam

เมื่อไอน้ำกลายเป็น Condensate ภายในท่อหรืออุปกรณ์ไอน้ำ และถูกระบายผ่านกับดักไอน้ำออกมา ในเวลาเดียวกันที่ถูกระบายออกมา Condensate ส่วนหนึ่งจะระเหยกลายเป็นไอน้ำความดันต่ำ ไอน้ำนี้เรียกว่า Flash steam ซึ่งสามารถใช้เป็นแหล่งไอน้ำความดันต่ำได้

การเกิด Flash steam ไม่จำเป็นต้องในกับดักไอน้ำเท่านั้น โดยทั่วไปเมื่อน้ำอุณหภูมิสูงภายใต้ความดันค่าหนึ่งถูกระบายออกสู่ความดันต่ำอย่างรวดเร็ว จะเกิด Flash steam ขึ้นทันที ปริมาณของ Flash steam (g) ที่เกิดขึ้นจากน้ำอิมตัว 1 kg จะขึ้นอยู่กับความดันก่อนและหลังจาก Flash และสามารถคำนวณได้จากสูตรต่อไปนี้

$$g = \frac{h'_1 - h'_2}{r_2} \quad (1.4)$$

ในที่นี้ h'_1 และ h'_2 เป็นเอนทัลปีจำเพาะของน้ำอิมตัวที่ความดันก่อนและหลังการ Flash ส่วน r_2 เป็นความร้อนแฝงของการระเหยของน้ำอิมตัวที่ความดันหลังการ Flash ($r_2 = h''_2 - h'_2$ โดย h''_2 เป็นเอนทัลปีจำเพาะของไอน้ำอิมตัวที่ความดันหลังการ Flash) ตัวอย่างเช่น กรณีที่ระบายน้ำ Condensate อิมตัว 1 kg ที่มีความดัน 1 MPa ออกสู่ความดันบรรยากาศ จะเกิด Flash steam ขึ้นประมาณ 0.16 kg นอกจากนี้ ยิ่ง Condensate มีอุณหภูมิ (ความดัน) สูงขึ้นเท่าใด และยิ่งลดความดันลงมากขึ้นเท่าใด ปริมาณ Flash steam ที่เกิดขึ้นก็จะมากขึ้นเท่านั้น เราจึงต้องพยายามนำ Flash steam กลับมาใช้ประโยชน์ให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้เพื่ออนุรักษ์พลังงาน รูปที่ 1.35 แสดงตัวอย่างการนำ Flash steam กลับมาใช้



รูปที่ 1.35 ตัวอย่างการนำ Flash steam กลับมาใช้

1.7.4 การควบคุมการนำ Condensate กลับมาใช้

Condensate ควรจะเป็นน้ำอ่อนหรือน้ำบริสุทธิ์ที่แทบไม่มีของแข็งต่างๆ ละลายอยู่เลย แต่โดยทั่วไปเราไม่สามารถหลีกเลี่ยงสิ่งแปลกปลอมในระดับหนึ่งได้ เช่น อากาศละลายในน้ำ หรือเหล็กจากอุปกรณ์ไอน้ำ ท่อไอน้ำและท่อ Condensate รวมทั้งสิ่งสกปรกต่างๆ นอกจากนี้ ยังมีน้ำยาทำความสะอาด เช่น สารกำจัดออกซิเจนที่ใช้ในการบำบัดน้ำใน Drum หม้อไอน้ำ และน้ำเลี้ยงหม้อไอน้ำ และบางครั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่เสียหายหรือมีปัญหาอาจทำให้ของเหลวที่ใช้ในกระบวนการผลิตเข้ามาปะปนอีกด้วย ดังนั้น กรณีที่จะนำ Condensate กลับมาใช้เป็นน้ำจ่ายให้หม้อไอน้ำโดยตรง จะต้องทำการควบคุมคุณภาพน้ำเป็นประจำทุกวันหรือทำการเฝ้าติดตามคุณภาพน้ำของ Condensate อยู่ตลอดเวลา เครื่องวัดคุณภาพน้ำที่ใช้ในทางปฏิบัติ ได้แก่ เครื่องวัด pH และเครื่องวัดสัมประสิทธิ์การนำไฟฟ้า

นอกจากนี้ ใน Condensate ที่นำกลับมาใช้ไม่ว่าทำอย่างไร โดยมากจะมีเหล็กต่างๆ ในรูปไอออน และ ออกไซด์ของเหล็กปะปนอยู่ด้วย ดังนั้น จึงควรนำไปบำบัดก่อน สิ่งแปลกปลอมพวกไอออนจะต้องบำบัดด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออน แต่ออกไซด์ของเหล็กทั่วไปที่เป็นสารแขวนลอยจะสามารถกำจัดได้ด้วยอุปกรณ์กรองแบบ Filter แบบ Cartridge หรือแบบ Precoat

1.8 โรงไฟฟ้าพลังไอน้ำ หลักการทำงานของโรงไฟฟ้าพลังไอน้ำ

1.8.1 สมบัติ

เครื่องจักรไอน้ำเป็นอุปกรณ์สำหรับแปลงพลังงานความร้อนในไอน้ำให้เป็นกำลังขับเคลื่อน นอกจากกังหันไอน้ำที่ใช้ใบพัดและเครื่องยนต์ไอน้ำที่ใช้ลูกสูบแล้ว ยังมีเครื่อง Steam ejector ซึ่งใช้กับงานเฉพาะด้านอีกด้วย อย่างไรก็ตาม โดยส่วนใหญ่แล้วจะใช้กังหันไอน้ำกันมากที่สุด ดังนั้น ในที่นี้จะอธิบายเฉพาะกังหันไอน้ำ

กังหันไอน้ำเป็นเครื่องจักรที่ทำงานด้วยการหมุน โดยแปลงพลังงานความร้อนในไอน้ำเป็นพลังงานจลน์ ใช้กำลังของไอน้ำซึ่งพ่นออกมาด้วยความเร็วสูงในการหมุนใบพัดติดเพลลา (Rotor) มีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงาน 75-90% ซึ่งถือว่ามีประสิทธิภาพสูง สามารถทำให้มีขนาดใหญ่ได้สะดวก และมีความเชื่อถือได้สูงมาก ทำให้กังหันไอน้ำเป็นที่นิยมใช้เรื่อยมาจนถึงปัจจุบัน

นอกจากนี้ กังหันไอน้ำยังสามารถปรับความเร็วรอบเป็นเท่าใดก็ได้ สามารถไล่ตามการเปลี่ยนแปลงของภาระได้ดี และมีสมบัติที่ไม่พบในเครื่องจักรไอน้ำประเภทอื่น คือ มีความยืดหยุ่นของระบบสูงมาก โดยสามารถระบายไอน้ำที่มีความดัน (หรืออุณหภูมิ) ตามที่ต้องการจากจุดที่เหมาะสมได้อีกด้วย

วัตถุประสงค์การใช้งานทั่วไปของกังหันไอน้ำ ได้แก่ การผลิตไฟฟ้า และการขับเคลื่อนเครื่องจักรอื่น โดยใช้ขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า บิ๊ม พัดลม ใบจักรเรือ เป็นต้น นอกจากนี้ กังหันไอน้ำยังสามารถใช้งานภายใต้บรรยากาศที่ติดไฟได้อีกด้วย เช่น งานปิโตรเคมี เป็นต้น กังหันไอน้ำโดยทั่วไปยังสามารถใช้ประโยชน์จากปริมาณไอน้ำในระบบไอน้ำที่ตกค้างอยู่เป็นจำนวนมาก สามารถเดินเครื่องได้อย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลาหนึ่ง แม้ว่าไฟจะดับ (Black out) บางครั้งจึงใช้เป็นแรงขับเคลื่อนสำรองของมอเตอร์หรือใช้เป็นอุปกรณ์ฉุกเฉินอีกด้วย

ความสามารถในการเปลี่ยนความเร็วรอบเป็นปัจจัยที่สำคัญในแง่การอนุรักษ์พลังงาน เนื่องจากสามารถควบคุมการเดินเครื่องให้มีความเร็วที่เหมาะสมที่สุดกับคุณลักษณะของภาระแรงขับได้สะดวก

ไม่ว่าอย่างไรก็ตาม โดยทั่วไปกระบวนการผลิตที่ใช้ความร้อนส่วนใหญ่มักใช้ไอน้ำ และส่วนใหญ่ยังมีความร้อนทิ้งในรูปของไอน้ำทิ้ง ซึ่งหากนำไอน้ำเหล่านี้มาขับกังหันไอน้ำ เพื่อให้ได้ทั้งกำลังขับเคลื่อนและไอน้ำสำหรับกระบวนการผลิต จะเป็นการใช้พลังงานอย่างเป็นขั้นๆ (Cascade) ทำให้มีประสิทธิภาพในการอนุรักษ์พลังงานสูงมาก

1.8.2 ประเภท

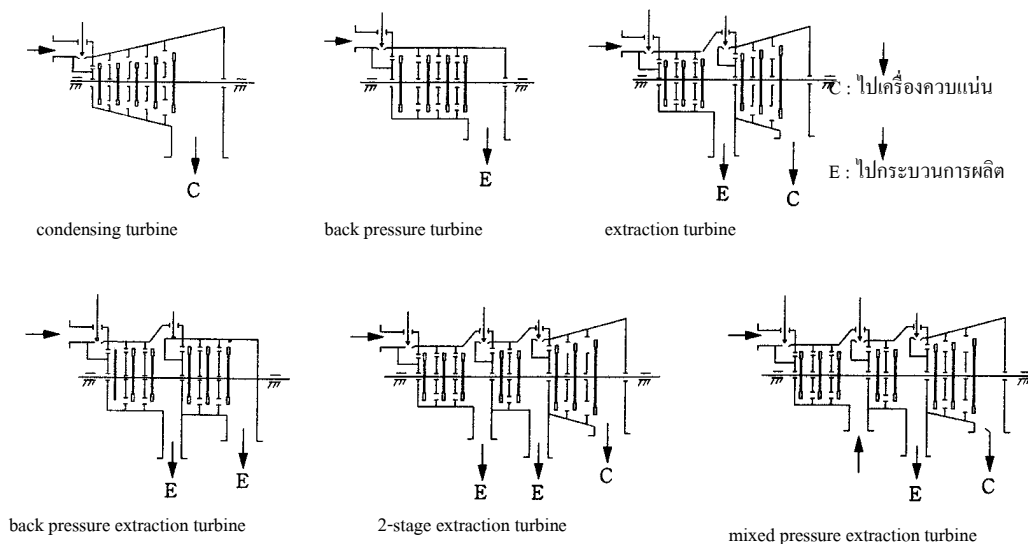
กังหันไอน้ำมีเกณฑ์ในการจำแนกประเภทได้หลายอย่าง กล่าวคือสามารถ แบ่งตามวิธีการใช้ไอน้ำได้เป็น Condensing turbine กับ Extraction turbine แบ่งตามลักษณะการทำงานของไอน้ำได้เป็น Impulse turbine กับ Reaction turbine แบ่งตามทิศทางการไหลของไอน้ำได้เป็น Axial flow turbine กับ Radial turbine แบ่งตามกระบวนการขยายตัวได้เป็นกังหันความดันสูงกับกังหันความดันต่ำ แบ่งตามวัฏจักรความร้อนได้เป็น Regenerative turbine กับ Reheat turbine นอกจากนี้ยังแบ่งตามโครงสร้าง เช่น จำนวนของ Compartment หรือ Split แบ่งตามประเภทหรือวิธีการเชื่อมต่อกับภาระแรงขับ หรือแบ่งตามความเร็วรอบอีกด้วย

Condensing turbine ประกอบด้วยเครื่องควบแน่น โดยไอน้ำที่ผ่านกังหันแล้วจะขยายตัวจนมีความดันต่ำมาก (เป็นสุญญากาศสูง) และมีผลต่างความร้อนสูง จึงมีแรงขับเคลื่อนต่อปริมาณไอน้ำหนึ่งหน่วยสูง อย่างไรก็ตาม ด้วยเหตุผลดังกล่าวเครื่องควบแน่นจะต้องใช้ตัวกลางระบายความร้อน (น้ำหรืออากาศ) จำนวนมาก ความร้อนแฝงของการควบแน่นจำนวนมากจึงถูกนำทิ้งไปจากระบบ ประสิทธิภาพของวัฏจักรความร้อนจึงต่ำ กังหันแบบนี้มักจะใช้เพื่อให้ได้พลังงานไฟฟ้าหรือแรงขับเคลื่อนเท่านั้น อย่างไรก็ตาม เนื่องจากต้องมีเครื่องควบแน่นและระบบระบายความร้อน จึงทำให้ต้นทุนการก่อสร้างสูง จึงใช้กับกังหันขนาดค่อนข้างใหญ่เป็นหลัก

Back pressure turbine ใช้กันมากในอุตสาหกรรมที่ต้องใช้ไอน้ำจำนวนมากในกระบวนการผลิต ไม่จำเป็นต้องมีเครื่องควบแน่น และระบบระบายความร้อนของเครื่องควบแน่น จึงมีต้นทุนการก่อสร้างต่ำ นอกจากนี้ ไอน้ำที่ออกจากกังหัน ยังสามารถใช้เป็นไอน้ำสำหรับกระบวนการผลิต ในระบบที่เรียกว่า Cogeneration จึงมีประสิทธิภาพความร้อนของระบบสูงมาก อย่างไรก็ตาม เนื่องจากไม่มีเครื่องควบแน่น ผลต่างของค่าความร้อนที่สามารถใช้งานได้ในกังหันจึงมีค่าน้อย ทำให้มีแรงขับเคลื่อนต่อปริมาณไอน้ำหนึ่งหน่วยต่ำ จึงใช้กับกังหันที่มีกำลังขาออกค่อนข้างต่ำ แรงขับเคลื่อนที่ได้จะขึ้นอยู่กับปริมาณไอน้ำสำหรับกระบวนการผลิตเท่านั้น ถ้าต้องการรักษาความดันไอน้ำให้คงที่แล้ว จะสามารถผลิตแรงขับเคลื่อนได้ด้วยค่าที่สอดคล้องกับภาระไอน้ำเท่านั้น ในจำนวนปริมาณทางฟิสิกส์ต่างๆ ได้แก่ แรงขับเคลื่อน ปริมาณไอน้ำสำหรับกระบวนการผลิต ความดันไอเสีย ความเร็วรอบ เราไม่สามารถควบคุมค่าของปริมาณเหล่านี้ตั้งแต่ 3 ตัวขึ้นไปพร้อมๆ กันโดยอิสระ ดังนั้น สำหรับภาระไอน้ำจะต้องมีระบบส่งไอน้ำบายพาสกังหันพร้อมเครื่องลดความดัน-อุณหภูมิ และสำหรับภาระไฟฟ้าจะต้องเดินเครื่องร่วมกับแหล่งจ่ายไฟอื่นๆ เพื่อให้มีความเร็วรอบตามที่กำหนด

Extraction turbine (ในที่นี้หากไม่ระบุไว้เป็นอย่างอื่นจะหมายถึง Condensing extraction turbine) เป็นกังหันที่สามารถระบายไอน้ำสำหรับใช้ในกระบวนการผลิตออกมาจากตำแหน่งกลางๆ ของกังหัน ซึ่งจะแตกต่างจากการระบายไอน้ำออกมาโดยไม่มีการควบคุมเพื่อให้ความร้อนแก่น้ำเลี้ยงซึ่งใช้ใน Regenerative cycle เนื่องจากการนำไอน้ำออกมาในที่นี้จะทำการควบคุมความดันด้วย กังหันแบบนี้สามารถพิจารณาได้ว่าเป็น Back pressure turbine ต่อกับ Condensing turbine บนเพลาดียวกัน เราสามารถติดตั้งจำนวนชั้น (Stage) เพื่อนำไอน้ำออกมาเท่ากับจำนวนระดับความดันต่างๆ ของไอน้ำที่ต้องการใช้ในกระบวนการผลิตได้ กังหันแต่ละตัวจะเรียกว่า Extraction turbine ชั้นที่ 1 ตามด้วย Extraction turbine ชั้นที่ 2 เป็นต้น กังหันแบบนี้มีสมบัติของ Condensing turbine อยู่ในตัว จึงสามารถควบคุมแรงขับเคลื่อน ปริมาณและความดันของไอน้ำที่นำออกมา และความเร็วยรอบของเพลาก็ทำได้

Back pressure extraction turbine เป็นการนำ Back pressure turbine หลายตัวมาต่อกันบนเพลาดียวกัน ทำให้สามารถเตรียมไอน้ำสำหรับใช้ในกระบวนการผลิตหลายประเภทตามจำนวนของ Back pressure turbine แต่คุณลักษณะในการเดินเครื่องจะเหมือนกับ Back pressure turbine



รูปที่1.36 หลักการของกังหันไอน้ำประเภทต่างๆ

นอกจากนี้ ยังมี Mixed pressure turbine ซึ่งสามารถป้อนไอน้ำจากแหล่งไอน้ำอื่นเข้าไปที่ชั้นตรงกลางของกังหันได้ และ Mixed pressure extraction turbine ซึ่งสามารถนำไอน้ำออกมาใช้ได้อีกด้วย รูปที่ 1.36 แสดงหลักการของกังหันไอน้ำประเภทต่างๆ

1.8.3 สมรรถนะ

สมรรถนะของตัวกังหันไอน้ำเอง โดยทั่วไปจะแสดงด้วยค่าประสิทธิภาพของกังหัน ประสิทธิภาพภายในของกังหัน หรืออัตราความสิ้นเปลืองไอน้ำ นอกจากนี้ กรณีที่จะแสดงสมรรถนะของระบบ Turbine cycle (บางครั้งก็เรียกว่า Turbine room) ซึ่งรวมกับเครื่องควบแน่น เครื่องให้ความร้อนน้ำเลี้ยง และไอน้ำสำหรับกระบวนการผลิตเข้าไว้ด้วย จะใช้ค่าอัตราความสิ้นเปลืองความร้อน หรือประสิทธิภาพความร้อน ฯลฯ

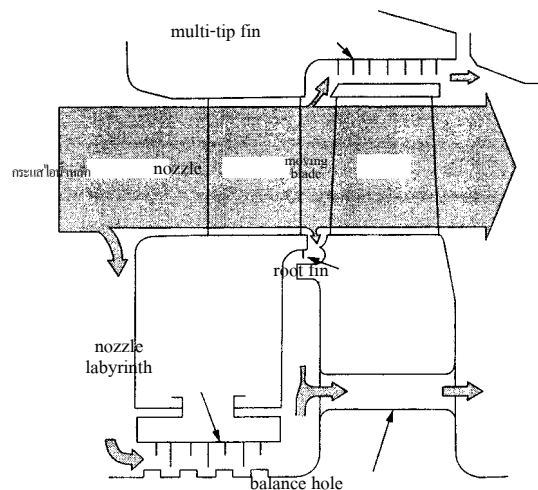
1. ความสูญเสียของกังหันไอน้ำ

ความสูญเสียที่เกิดขึ้นที่ตัวกังหันไอน้ำ แบ่งออกเป็นความสูญเสียภายในกับความสูญเสียภายนอก

(ก) ความสูญเสียภายใน

(1) ความสูญเสียเชิงอากาศพลศาสตร์ของใบพัด

- ความสูญเสียจาก Profile ของใบพัดที่เกิดจากรูปร่างของ Nozzle และตัวใบพัดเอง
- ความสูญเสียจากไอน้ำเปียกเมื่อไอน้ำขยายตัวเข้าไปในเขตไอน้ำเปียก
- ความสูญเสียจากการที่ใบพัดกว่นไอน้ำรอบๆ
- ความสูญเสียจากการรั่วภายในที่ Nozzle และรอบๆ ใบพัด



รูปที่ 1.37 ความสูญเสียจากการรั่วภายในกังหันไอน้ำ

(2) ความสูญเสียในไอเสีย

- ความสูญเสียความเร็วที่ไอน้ำพุ่งออกจากใบพัดชั้นสุดท้ายโดยยังมีพลังงานจลน์อยู่ (ความสูญเสียขาออกของไอน้ำ)
- ความสูญเสียของไอเสียที่เกิดขึ้นระหว่างจากทางออกใบพัดชั้นสุดท้ายไปยังเครื่องควบแน่น เป็นต้น

(ข) ความสูญเสียภายนอก

(1) ความสูญเสียจากการรั่วออกภายนอกขณะที่ไอน้ำรั่วออกข้างนอกจากจุดที่ Rotor เคลื่อนที่ผ่าน Casing

(2) ความสูญเสียเชิงกล

- ความสูญเสียจากแรงเสียดทานที่เพลลา
- ความสูญเสียแรงขับเคลื่อนในอุปกรณ์เสริมที่ต้องไปขับเคลื่อนไฮดรอลิกที่ต่อตรงกับ Rotor หรือเครื่องปรับความเร็ว

- ความสูญเสียที่เกียร์ (เฟือง)

(3) ความสูญเสียความดันที่วาล์วต่างๆ

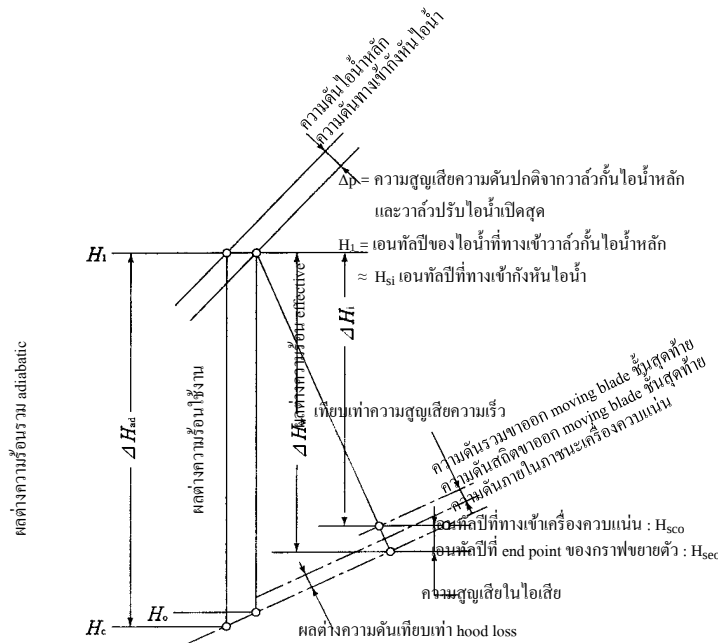
- ความสูญเสียที่วาล์วกั้นไอน้ำและวาล์วปรับไอน้ำ
- ความสูญเสียความดันในเส้นทางไอน้ำ เช่น ท่อไอน้ำ

(4) ความสูญเสียจากการแผ่รังสีความร้อน เป็นต้น

ความสูญเสียต่างๆ เหล่านี้ ที่สูญเสียมากที่สุด ได้แก่ “ความสูญเสียเชิงอากาศพลศาสตร์ของใบพัด” ในตัวอย่างรายหนึ่ง ความสูญเสียนี้นับเป็น 70% ของความสูญเสียทั้งหมด รองลงมาคือ “ความสูญเสียในไอเสีย” 15% และ “ความสูญเสียความดันที่วาล์วต่างๆ” 10%

2. ประสิทธิภาพของกังหันไอน้ำ (รูปที่ 1.38)

โดยทั่วไป หากกล่าวว่า ประสิทธิภาพของกังหันเฉยๆ (η_t : Turbine efficiency) จะหมายถึง อัตราส่วนระหว่างกำลังขาออกสุทธิที่เกิดขึ้นที่ปลายเพลากังหัน L_{sh} [kW] ต่อผลต่างความร้อน Adiabatic ของไอน้ำตั้งแต่ทางเข้าวาล์วกังหันไอน้ำหลักจนถึงเครื่องควบแน่น



รูปที่ 1.38 กราฟการขยายตัวของกังหันไอน้ำ (เส้นกราฟ h-s)

$$\eta_t = \frac{L_{sh} \times 3600}{\Delta H_{ad} \times W_1} \times 100 \quad [\%] \quad (1.5)$$

ทั้งนี้

W_1 : ปริมาณไอน้ำที่ผ่านกังหัน [kg/h]

$$\Delta H_{ad} = H_1 - H_4 \quad [\text{kJ/kg}] \quad (1.6)$$

กล่าวคือ ประสิทธิภาพของกังหัน จะแสดงค่าที่รวมถึงความสูญเสียทั้งหมดที่เกิดขึ้นทั้งภายใน และภายนอกตัวกังหันไอน้ำ กังหันไอน้ำขนาด 1.5-5.0 MW โดยทั่วไปจะมีประสิทธิภาพ 70-80% ขนาดตั้งแต่ 10 MW ขึ้นไปจะเท่ากับ 80-85% ส่วนกังหันไอน้ำขนาดใหญ่ตั้งแต่ 300 MW ขึ้นไปจะเท่ากับ 82-93%

กรณีที่ต้องการอัตราส่วนของงานที่กระทำไปในเส้นทางของไอน้ำ จะใช้ประสิทธิภาพภายในของกังหันไอน้ำ (Internal efficiency) ถ้าให้เท่ากับ η_i แล้ว ในรูปที่ 1.38 จะได้ความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$\eta_i = \frac{\Delta H_i}{H_{si} - H_o} \times 100 \quad [\%] \quad (1.7)$$

ทั้งนี้

$$\Delta H_i = H_{si} - H_{sco} \quad [\text{kJ/kg}] \quad (1.8)$$

$$H_{si} \cong H_i \quad [\text{kJ/kg}] \quad (1.9)$$

กล่าวคือ ประสิทธิภาพภายในของกังหันไอน้ำ เป็นค่าที่แสดงขนาดของงานภายในที่กังหันไอน้ำตั้งแต่ทางเข้าใบพัดแถวแรก จนถึงทางเข้าเครื่องควบแน่นซึ่งรวมถึงความสูญเสียในไอน้ำออกด้วย กรณีของงานผลต่างทั้งหมดที่ไม่รวมความสูญเสียในไอน้ำออก บางครั้งจะเรียกให้ชัดเจนว่า Wheel efficiency

3. อัตราความสิ้นเปลืองไอน้ำ

อัตราความสิ้นเปลืองไอน้ำ R_t เป็นค่าที่แสดงสมรรถนะของกังหันไอน้ำด้วยอัตราความสิ้นเปลืองไอน้ำต่อหน่วย หมายถึง ปริมาณไอน้ำที่ต้องป้อนให้เทอร์ไบน์เพื่อกำเนิดกำลังขาออกหนึ่งหน่วย

$$R_t = \frac{\text{ปริมาณไอน้ำที่จ่ายให้กังหันไอน้ำ } W_i \text{ (kg/h)}}{\text{กำลังขาออกของกังหันไอน้ำ } L_g \text{ (kW)}} \quad [\text{kg/(kW}\cdot\text{h)}] \quad (1.10)$$

อัตราความสิ้นเปลืองไอน้ำนี้ โดยทั่วไปจะไม่รวม Steam ejector และ Gland steam ที่ป้อนจากภายนอกให้แก่กังหันไอน้ำ ใน Condensing turbine จะมีค่า 3-4 [kg/(kW·h)] ใน Back pressure turbine จะมีค่าเกิน 10 [kg/(kW·h)]

4. ประสิทธิภาพความร้อนกับอัตราความสิ้นเปลืองความร้อนของเทอร์ไบน์

ค่าที่ใช้ชีวิตว่าปริมาณความร้อนทั้งหมด Q_r [kJ/h] ที่ถูกใช้ไปในเทอร์ไบน์ตั้งแต่ทางเข้ากังหันไอน้ำ (โดยทั่วไปหมายถึงทางเข้าวาล์วกันไอน้ำหลัก) จนถึงทางออกอุปกรณ์ให้ความร้อนตัวสุดท้าย ถูกแปลงไปเป็นกำลังขาออก L_g [kW] ของกังหันไอน้ำเท่าใด เรียกว่า ประสิทธิภาพความร้อนของห้องเทอร์ไบน์ η_R ในทางกลับกันปริมาณที่แสดงว่าเพื่อให้ได้กำลังขาออก L_g จะสิ้นเปลืองปริมาณความร้อน Q_r ไปเท่าใด เรียกว่า อัตราความสิ้นเปลืองความร้อนของเทอร์ไบน์ H_R ปริมาณเหล่านี้สามารถนิยามได้ดังต่อไปนี้

$$\eta_R = \frac{3600}{H_R} \times 100 \quad [\%] \quad (1.11)$$

$$H_R = \frac{Q_r}{L_g} \quad [\text{kJ/kW} \cdot \text{h}] \quad (1.12)$$

$$Q_T = Q_i - Q_o \quad [\text{kJ/h}] \quad (1.13)$$

ในที่นี้ Q_i เป็นปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทเข้าไปในเทอร์ไบน์ ซึ่งเท่ากับผลบวกของความร้อนในไอน้ำหลัก ไอน้ำ Reheat อุณหภูมิสูง น้ำที่จ่ายให้ น้ำ Condensate และน้ำไหลกลับอื่นๆ ส่วน Q_o เป็นปริมาณ

ตอนที่ 3 บทที่ 1 ระบบความร้อนและอุปกรณ์ที่ใช้ไอน้ำ

ความร้อนที่ถูกนำออกมาจากเทอร์ไบน์ซึ่งเท่ากับผลบวกของความร้อนในน้ำเลี้ยงขาออกจากเครื่องให้ความร้อนน้ำเลี้ยงขั้นสุดท้าย ไอน้ำ Reheat อุณหภูมิต่ำ ไอน้ำสำหรับกระบวนการผลิต และไอน้ำและน้ำสเปรย์อื่นๆ

เนื่องจากกำลังขับปั๊มน้ำเลี้ยง L_p มีค่าสูง ดังนั้น การคำนวณอัตราความสิ้นเปลืองความร้อนโดยคิดกับไม่คิดกำลังขับปั๊มน้ำนี้จะได้ตัวเลขที่แตกต่างกัน กรณีที่ไม่คิด L_p จะเรียกว่าอัตราความสิ้นเปลืองความร้อนสุทธิ (Net) กรณีที่คิด L_p ด้วยจะเรียกว่า อัตราความสิ้นเปลืองรวม (Gross) บางครั้งจะต้องระบุความแตกต่างระหว่างทั้งสองให้ชัดเจนด้วย

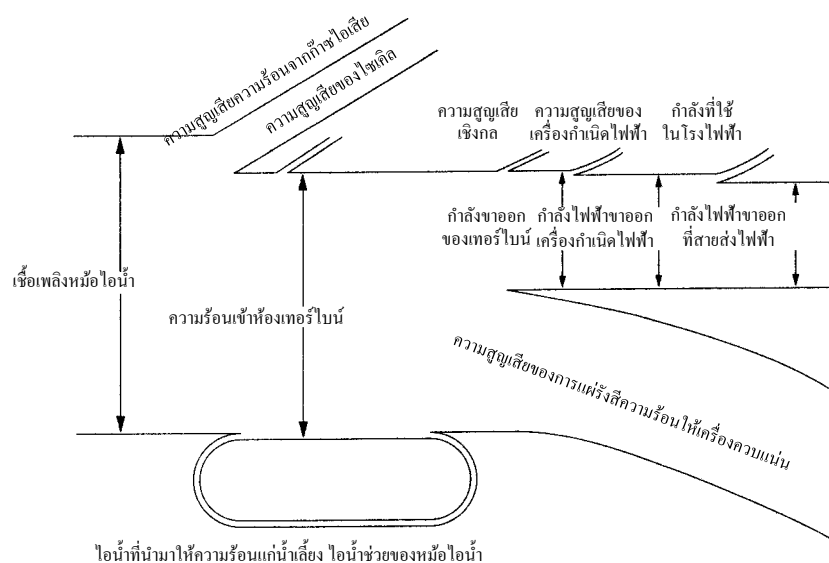
ประสิทธิภาพความร้อนทั้งหมดของโรงไฟฟ้าโดยคำนวณทั้งหม้อไอน้ำและกังหันไอน้ำจะเท่ากับ

$$\text{ประสิทธิภาพความร้อนของโรงไฟฟ้า} = \frac{L_g}{\text{ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง} \times \text{ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง}} \times 100 \quad (1.14)$$

ถ้าไม่พิจารณาการสูญเสียความดันและความสูญเสียในการแผ่รังสีความร้อนของท่อระหว่างหม้อไอน้ำกับกังหันไอน้ำ ประสิทธิภาพความร้อนของโรงไฟฟ้าจะเท่ากับผลคูณของประสิทธิภาพความร้อนของเทอร์ไบน์กับประสิทธิภาพความร้อนของหม้อไอน้ำ

ในระบบผลิตไฟฟ้า จะมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขับปั๊มต่างๆ และอุปกรณ์ควบคุมทำงานอื่น อุปกรณ์เหล่านี้จะต้องใช้กำลังไฟฟ้า (เรียกว่า กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในโรงไฟฟ้า) ดังนั้น กำลังไฟฟ้าสุทธิที่ส่งออกได้จึงลดลงเป็นปริมาณเท่ากับกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในโรงไฟฟ้า ดังนั้น ประสิทธิภาพความร้อนของโรงไฟฟ้าเมื่อคิดที่สายส่งไฟฟ้าจึงต่ำกว่าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าอยู่หลาย %

รูปที่ 1.39 แสดงตัวอย่างการใช้ความร้อนที่ป้อนให้หม้อไอน้ำ ความร้อนที่น้ำระบายความร้อนพาออกไปจากเครื่องควบแน่นจะมีสัดส่วนสูงมาก ตัวอย่างนี้ทำให้เราเข้าใจได้ว่าทำไมประสิทธิภาพความร้อนของโรงไฟฟ้าที่ใช้ Condensing turbine จึงมีค่าเพียง 35-40% เท่านั้น



รูปที่ 1.39 ตัวอย่างสมดุลความร้อนในโรงไฟฟ้า

5. สมรรถนะที่ภาระไม่เต็มพิกัด

หากเดินเครื่องกังหันไอน้ำที่สภาวะอื่นนอกเหนือจากจุดที่ออกแบบไว้ (โดยทั่วไปคือที่พิกัด) ประสิทธิภาพจะลดต่ำลง สาเหตุประการหนึ่งก็คือ เมื่อมีภาระไม่เต็มพิกัด อัตราส่วนความเร็วของใบพัด u/c (u เป็นความเร็วของปลายใบพัด $[m/s]$, c เป็นความเร็วสัมบูรณ์ของไอน้ำที่ออกมาจาก Nozzle $[m/s]$) ซึ่งเป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพจะไม่อยู่ที่จุดที่เหมาะสมที่สุด ทำให้ประสิทธิภาพลดต่ำลง และความสูญเสียของวาล์วปรับไอน้ำจะเพิ่มขึ้น

นอกจากนี้ ในสภาวะที่ภาระไม่เต็มพิกัด แม้ความสูญเสียเชิงกลจะแทบไม่เปลี่ยนแปลง แต่สัดส่วนของความสูญเสียต่อกำลังขาออกของกังหันไอน้ำจะมีค่าเพิ่มขึ้น ใน Condensing turbine ความสูญเสียในไอเสียจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

ใน Extraction turbine การเพิ่มหรือลดปริมาณไอน้ำที่นำออกมาจาก Turbine จะทำให้ปริมาณไอน้ำที่ไหลผ่านกังหันช่วงก่อนนำไอน้ำออกมา (ส่วนความดันสูง) กับผ่านกังหันหลังนำไอน้ำออกมา (ส่วนความดันต่ำ) มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมาก กล่าวคือ Extraction turbine เป็นกังหันไอน้ำที่จะมีกังหันบางส่วนที่มีภาระไม่เต็มพิกัด หรือบางส่วนมีภาระเกินพิกัดอยู่เสมอ ดังนั้น ในการวางแผน Extraction turbine ควรจะพิจารณาช่วงการแกว่งของปริมาณไอน้ำที่นำมาออกมาใช้อย่างถี่ถ้วน หากจัดซื้อ Extraction turbine ที่ออกแบบมาสำหรับช่วงการแกว่งกว้างมากซึ่งแทบไม่ได้ใช้งานเลย กังหันไอน้ำจะทำงานด้วยประสิทธิภาพต่ำอยู่เสมอ ไม่เพียงแต่จะเป็นการไม่ประหยัดเท่านั้น แต่ยังมีพลังงานสูญเสียจำนวนมากอีกด้วย

1.8.1.4 การควบคุมการเดินเครื่องกับมาตรการอนุรักษ์พลังงาน

ไม่ว่าอุปกรณ์จะออกแบบมาดีเพียงใด หากในทางปฏิบัติไม่ได้ควบคุมการเดินเครื่องอย่างเหมาะสม สมรรถนะของอุปกรณ์จะลดลง หากการใช้งานอุปกรณ์ในทางปฏิบัติมีการเบี่ยงเบนจากที่วางแผนไว้ ตอนแรกเป็นระยะเวลานาน จะต้องคิดหามาตรการแก้ไขเพื่ออนุรักษ์พลังงาน

(1) การป้องกันการเสื่อมสมรรถนะ

เมื่อเดินเครื่องกังหันไอน้ำไปเป็นเวลานาน สมรรถนะจะลดลงตามเวลา จึงต้องตรวจสอบและประเมินสภาพการณ์อย่างถูกต้อง ทำการซ่อมแซมและบำรุงอย่างเป็นระบบ และอย่างคุ้มค่า มีการสับเปลี่ยนชิ้นส่วนสึกหรอเพื่อป้องกันสมรรถนะเสื่อมลง เพื่อรักษาความคุ้มค่าและความเชื่อถือได้ให้อยู่ในระดับสูงอย่างต่อเนื่อง สาเหตุของการเสื่อมมีทั้งที่เกิดจากตัวกังหันไอน้ำเอง และเกิดจากที่อื่น การเกิดแต่ละสาเหตุจะขึ้นอยู่กับการควบคุมการเดินเครื่องว่าทำได้ดีหรือไม่

สาเหตุของการเสื่อมสมรรถนะมีดังต่อไปนี้

(1) การมีตะกอนเกาะที่ใบพัด

เมื่อมีสารประกอบออกไซด์ของ Fe, Si, Cu ฯลฯ หรือสารประกอบของ Na, Ni ฯลฯ กระเด็นมาที่กังหันไอน้ำเนื่องจาก Carry over ในไอน้ำ แล้วไปเกาะที่ Moving blade หรือ Fixed blade จะทำให้ผิวหน้าของใบพัดมีความหยาบเพิ่มขึ้น ทำให้ความสูญเสียจากแรงเสียดทานของใบพัดมีค่าสูงขึ้น หากตะกอนมีขนาดใหญ่ขึ้น จะทำให้ Profile ของใบพัดเบี่ยงเบนไปจากเดิม ทำให้สมรรถนะของใบพัดต่ำลง ยิ่งกังหันไอน้ำมีกำลังขาออกต่ำผลกระทบจะยิ่งสูง

(2) การผุกร่อนของใบพัด

การผุกร่อนนี้จะเกิดขึ้นได้ง่ายกับ Fixed blade ของใบพัดแถวแรก โดยทั่วไปจะเกิดจากตะกอนสารประกอบออกไซด์ (โดยมากเป็น Fe_3O_4) ซึ่งเป็นของแข็งหลุดออกจาก Boiler tube กระเด็นมา ทำให้ผิวหน้าของ Fixed blade มีความหยาบเพิ่มขึ้น มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของ Trailing edge

มีพื้นที่ที่ ไอน้ำไหลผ่านมากขึ้น มีการเปลี่ยนแปลงอัตราไหล และความดันที่ตำแหน่งต่างๆ ทำให้ประสิทธิภาพภายในลดลง นอกจากนี้การผุกร่อนอาจเป็นผลจาก Condensate erosion ซึ่งเกิดจากไอน้ำเปียก (หยดน้ำ) ที่ Moving blade แฉกสุดท้ายของ Condensing turbine ซึ่งทำให้เกิดผลลัพธ์เช่นเดียวกับข้างต้น

(3) ช่องว่างมีขนาดใหญ่ขึ้น

การที่ช่องว่างต่างๆ มีขนาดใหญ่ขึ้นเนื่องจากการสึกหรอ ซึ่งเป็นผลจากการเสียดสีระหว่างชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่กับชิ้นส่วนที่อยู่นิ่ง เช่น Gland labyrinth, Nozzle labyrinth, Tip fin ฯลฯ จะทำให้เกิดความสูญเสียจากการรั่วเพิ่มขึ้น สาเหตุหลักเกิดจากเปลี่ยนค่าความร้อน เช่น การหยุดเครื่อง-เดินเครื่องบ่อยๆ การเปลี่ยนแปลงของภาระที่สูงกว่าค่าที่ยอมรับได้ การไหลย้อนกลับของ Condensate จากเครื่องอุ่นน้ำเลี้ยง การบิดงอของ Rotor ที่เกิดจากอากาศรั่วเข้ามา เป็นต้น

(4) อื่นๆ

เช่น การรั่วเนื่องจากการเปลี่ยนรูปตามอายุของชิ้นส่วนต่างๆ ของกังหันไอน้ำ การรั่วจากการสึกหรอของ Valve seat ต่างๆ และ Spindle seal ฯลฯ การที่สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนลดลงเนื่องจากพื้นผิวถ่ายเทความร้อนสกปรก การรั่วของอากาศเข้าไปในเครื่องควบแน่น การเสื่อมสมรรถนะของปั๊ม การเสื่อมสภาพของฉนวนความร้อนทำให้มีความสูญเสียจากการแผ่รังสีความร้อนเพิ่มขึ้น เป็นต้น

เพื่อป้องกันการเสื่อมสมรรถนะเหล่านี้ และเพื่ออนุรักษ์พลังงาน การบำรุงรักษาเป็นประจำทุกวันจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง หากมีการบันทึกกำลังขาออกของกังหันไอน้ำ อัตราไหลของน้ำเลี้ยง (หรือคอนเดนเสท) ปริมาณน้ำเลี้ยงที่ต้องเติมเพิ่ม ความดัน และอุณหภูมิของจุดต่างๆ เป็นประจำทุกวันแล้ว

เมื่อปริมาณเหล่านี้มีการเปลี่ยนแปลง จะสามารถพยากรณ์แนวโน้มของการเสื่อมสมรรถนะของทั้งระบบได้ทันที หลังจากนั้น เมื่อทำการตรวจสอบสมรรถนะของส่วนต่างๆ จะสามารถหาสาเหตุของการเสื่อมสมรรถนะและดำเนินการมาตรการแก้ไขได้

การทำเช่นนั้นเราต้องทำการบำรุงรักษาเครื่องตรวจวัดต่างๆ รวมทั้งอุปกรณ์แปลงต่างๆ อย่างเหมาะสม ทำการบำบัดน้ำเลี้ยงและน้ำใน Drum ของหม้อไอน้ำ รวมทั้งควบคุมคุณภาพน้ำเลี้ยงหม้อไอน้ำ และทำการ Flash น้ำในระบบ และล้างทำความสะอาดด้วยกรดเป็นระยะตามที่กำหนดอย่างเหมาะสม

นอกจากนี้ เมื่อเทคโนโลยีมีความก้าวหน้ามากขึ้น และมีเทคโนโลยีใหม่ซึ่งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้ เช่น ใบพัดรูปทรงใหม่ ฯลฯ ก็ควรมีการนำมาใช้ทดแทนของเดิมเพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น อีกทั้งยังเป็นการอนุรักษ์พลังงานและเพิ่มความคุ้มค่าอีกด้วย

(2) การปรับปรุงอัตราความสิ้นเปลืองความร้อนด้วยการควบคุมการเดินเครื่อง

การนำไอน้ำจากกังหันไอน้ำออกมาใช้เพิ่มขึ้น เช่น การเพิ่มจำนวนเครื่องให้ความร้อนน้ำเลี้ยง การขับเคลื่อนอุปกรณ์เสริมต่างๆ เช่น ปั๊มน้ำเลี้ยง ฯลฯ ด้วยกังหันไอน้ำ หรือการนำไอน้ำจากกังหันไอน้ำไปใช้เป็นไอน้ำเสริมสำหรับหม้อไอน้ำ เช่น ใช้อุ่นอากาศใน Air preheater หรืออุ่นน้ำมันในเครื่องให้ความร้อนน้ำมัน ฯลฯ แม้ว่าจะมีข้อจำกัดด้านการออกแบบ แต่จะทำให้มีอัตราการใช้ความร้อนมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบ Condensing turbine จะทำให้ความสูญเสียที่ทิ้งไปจากเครื่องควบแน่นลดลง จึงมีประสิทธิภาพสูง หากไม่มีข้อจำกัดเรื่องปริมาณไอน้ำที่สามารถผลิตได้แล้ว เราควรเพิ่มปริมาณไอน้ำที่ไหลผ่านกังหันไอน้ำ และใช้ไอน้ำที่นำออกมาจากกังหันไอน้ำไปใช้เป็นไอน้ำสำหรับกระบวนการผลิตและไอน้ำสำหรับอุปกรณ์เสริมอื่นๆ ให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ การทำเช่นนี้จะมีผลโดยตรงในการปรับปรุงอัตราความสิ้นเปลืองความร้อนจำเพาะ

นอกจากนี้ เราควรใช้ไอน้ำเพื่อวัตถุประสงค์หลายๆ ประการให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ เนื่องจากจะทำให้สามารถใช้พลังงานแบบ Cascade ได้ทำให้ช่วยอนุรักษ์พลังงาน อย่างไรก็ตาม จะต้องให้ความสำคัญมากที่สุดกับความคุ้มทุนและเสถียรภาพในการเดินเครื่องเสมอ

นอกจากนี้ เนื่องจากประสิทธิภาพภายในของกังหันไอน้ำมีอิทธิพลต่ออัตราความสิ้นเปลืองความร้อน จึงควรเดินเครื่องที่ Load ratio สูงที่สุดเท่าที่จะทำได้ เนื่องจากจะช่วยป้องกันการเสื่อมสมรรถนะดังที่ได้อธิบายไปแล้วด้วย กรณีที่ต้องเดินเครื่องที่ภาระไม่เต็มพิกัดอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ หากเดินเครื่องแบบ Sliding pressure operation จะสามารถปรับปรุงอัตราความสิ้นเปลืองความร้อนในการเดินเครื่องที่ภาระไม่เต็มพิกัดได้ การเดินเครื่องแบบ Sliding pressure operation หมายถึง การควบคุมกำลังขาออกของกังหันไอน้ำด้วยการปรับความดันไอน้ำหลักโดยให้รักษาระดับการเปิดวาล์วปรับไอน้ำของกังหันไอน้ำให้คงที่ ระดับการเปิดวาล์วปรับไอน้ำโดยทั่วไปจะให้อยู่ที่ 85-95%

เมื่อเดินเครื่องเช่นนี้ ประสิทธิภาพความร้อนทางเทอร์โมไดนามิกส์จะลดลงบ้างเนื่องจากความดันของไอน้ำหลักลดลง อย่างไรก็ตาม

- ประสิทธิภาพภายในของกังหันไอน้ำจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากความสูญเสียที่วาล์วปรับไอน้ำลดลง
- ลดกำลังขับของปั๊มน้ำเลี้ยงได้ (โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรณีที่สามารปรับความเร็วได้)
- อุณหภูมิของไอน้ำ Reheat จะเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากไอน้ำที่ออกจากกังหันไอน้ำความดันสูงเพิ่มขึ้น

■ ช่วยลดผลกระทบจากอุณหภูมิตกในกังหันไอน้ำความดันสูงเนื่องจากเปิดวาล์วน้อย และลดผลกระทบจากความเค้นเนื่องจากความร้อน

ด้วยเหตุผลข้างต้น ประสิทธิภาพความร้อนของโรงไฟฟ้าทั้งโรงจะสูงกว่าเมื่อไม่เดินเครื่องแบบ Sliding pressure operation ดังนั้น หากในช่วงภาระสูงทำการเดินเครื่องแบบความดันคงที่และปรับความเร็วด้วยการปรับวาล์ว และในช่วงภาระต่ำทำการเดินเครื่องแบบ Sliding pressure operation แล้วจะสามารถรักษาประสิทธิภาพให้อยู่ในระดับสูงได้ไม่ว่าจะเดินเครื่องที่ภาระเท่าใด รวมทั้งการตอบสนองต่อภาระยังดีขึ้นอีกด้วย

ดังที่อธิบายไปแล้วข้างต้น การอนุรักษ์พลังงานด้วยการลดอัตราความสิ้นเปลืองความร้อน สิ่งที่สำคัญคือการเพิ่ม Load ratio ของเครื่องจักรให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ การนำไอน้ำออกมาใช้ให้มากที่สุด และการบำรุงรักษาไม่ให้เสื่อมสมรรถนะ อย่างไรก็ตาม ในกรณีของระบบขนาดใหญ่ สิ่งที่มีความสำคัญเช่นกันก็คือ การจัดการให้อุปกรณ์ต่างๆ ที่เป็นส่วนหนึ่งของระบบทำงานได้สอดคล้องกัน และเดินเครื่องทั้งระบบอย่างเหมาะสมที่สุด

ตัวอย่างเช่น กรณีที่ในสถานประกอบการแห่งหนึ่งมีการใช้กังหันไอน้ำหลายตัว โดยทั่วไปจะใช้กังหันไอน้ำรุ่นใหม่สุดซึ่งมีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการรองรับ Base load ส่วนกังหันไอน้ำขนาดเล็กซึ่งมีประสิทธิภาพต่ำจะใช้ปรับกำลังขาออกเพื่อรองรับภาระไม่เต็มพิกัด อย่างไรก็ตาม เนื่องจากกังหันไอน้ำซึ่งเป็นอุปกรณ์ความร้อนไม่สามารถเดินเครื่อง-หยุดเครื่องได้ง่ายๆ เหมือนกับอุปกรณ์ไฟฟ้าซึ่งมีข้อจำกัดน้อยกว่าในการเดินเครื่อง-หยุดเครื่อง ดังนั้น หากต้องเดินเครื่องกังหันไอน้ำที่มีประสิทธิภาพต่ำเป็นเวลานานเพื่อรองรับอุปสงค์ที่คาดว่าจะเพิ่มขึ้น สุดท้ายแล้ว จะไปถ่วงกังหันไอน้ำประสิทธิภาพสูงตัวที่รองรับ Base load ทำให้ประสิทธิภาพรวมของทั้งระบบต่ำลงได้

สถานการณ์เช่นเดียวกันนี้พบมากในสถานประกอบการที่มีการขยายโรงงานหลายครั้ง ทำให้ระบบมีกังหันไอน้ำหลายชนิดอยู่ด้วยกัน เช่น Back pressure turbine, Condensing turbine ซึ่งมีวิธีการควบคุมและคุณลักษณะแตกต่างกัน ในสถานประกอบการเช่นนี้ระบบไฟฟ้าก็มักจะมีข้อขัดข้องบ่อยเช่นกัน เนื่องจากมีข้อจำกัดมากมายเช่นนี้ จึงเป็นการยากที่จะกระจายภาระและเดินเครื่องอย่างเหมาะสมที่สุด

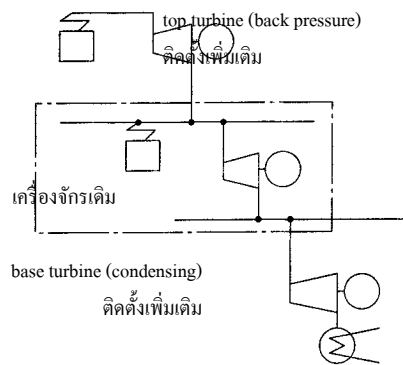
หากสามารถตัดสินใจปลดระวางและซื้อใหม่ (Scrap & Build) ได้ก็ยิ่งดี แต่หากไม่สามารถทำเช่นนั้นได้บางกรณีอาจจำเป็นต้องติดตั้งระบบคอมพิวเตอร์ควบคุมขนาดใหญ่ เพื่อทำการควบคุมด้วยวิธีที่เรียกว่า Energy centre

(3) การปรับปรุงอัตราความสิ้นเปลืองความร้อนด้วยการปรับปรุงสมบัติของไอน้ำ

การเพิ่มความดันหรืออุณหภูมิขาเข้าของกังหันไอน้ำที่ติดตั้งอยู่แล้วนั้น หากไม่ได้ออกแบบไว้ตั้งแต่แรกแล้ว เกือบทุกกรณีจะไม่สามารถทำได้ ในกรณีนี้จะใช้วิธีติดตั้งหม้อไอน้ำและ Back pressure turbine ที่มีอุณหภูมิและความดันสูงกว่าระบบเดิมเพิ่มเติมขึ้นมา โดยนำไอน้ำจากกังหันไอน้ำตัวใหม่มาป้อนเข้าระบบเดิม สุดท้ายแล้วจะทำให้สมบัติของไอน้ำทั้งระบบดีขึ้น โดย Back pressure turbine ในกรณีนี้เรียกว่า Top turbine ซึ่งสามารถปรับปรุงอัตราความสิ้นเปลืองความร้อนได้ด้วยการใช้พลังงานแบบ Cascade

ในทางกลับกัน ยังมีวิธีที่เรียกว่า Base turbine โดยนำไอน้ำออกของระบบเดิมป้อนให้ Condensing turbine ผลลัพธ์คือทำให้ทั้งระบบใช้ความร้อนได้มากขึ้น และมีอัตราความสิ้นเปลืองความร้อนดีขึ้น ตัวอย่างโครงสร้างของทั้งสองวิธีแสดงไว้ในรูปที่ 1.40

อนึ่ง Repowering ซึ่งเป็นวิธีติดตั้งก๊าซเทอร์ไบน์เพิ่มเติม โปรดดูหัวข้อ 1.12.2 “Repowering”



รูปที่ 1.40 ตัวอย่างโครงสร้างของ Top/base turbine plant

(4) การปรับปรุงอัตราความสิ้นเปลืองความร้อนด้วยการใช้ Regenerative cycle และการนำ Condensate กลับมาใช้

การติดตั้งเครื่องให้ความร้อนน้ำเลี้ยงความดันสูง เพื่อปรับปรุงไซเคิลความร้อนเป็นวิธีที่ดี ปัจจุบันเนื่องจากกระบวนการผลิตมีแนวโน้มที่จะต้องการปริมาณไอน้ำลดลงเนื่องจากการปรับปรุงเพิ่มประสิทธิภาพ จึงสามารถนำไอน้ำที่เหลือมาให้ความร้อนน้ำเลี้ยงได้ อย่างไรก็ตาม กรณีที่ไม่มีไอน้ำเหลือ ไอน้ำสำหรับให้ความร้อนจะเพิ่มขึ้น ทำให้กำลังขาออกของกังหันไอน้ำลดต่ำลง จึงต้องพิจารณาว่าสถานะเช่นนี้สามารถยอมรับได้หรือไม่ได้ด้วย

สำหรับ Condensate ควรพยายามนำกลับมาใช้ในสภาพอุณหภูมิและความดันสูงให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ โดยไม่ต้องไล่อากาศหรือบำบัดคุณภาพน้ำ และควรนำกลับมาใช้ในระบบจ่ายน้ำเลี้ยงที่มีอุณหภูมิเท่ากันหรือสูงกว่าเล็กน้อย ทั้งนี้หากมีปริมาณมากเกินไปจะเกิดปัญหาในการบำบัดคุณภาพน้ำได้

การลดความดันของไอน้ำที่นำออกมาใช้หรือลดความดัน Back pressure ก็เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม วิธีนี้จะทำให้ความเค้นดัดที่กระทำต่อใบพัดของกังหันไอน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น หากไม่ปรึกษากับผู้ผลิตก่อนจะเป็นอันตรายได้ การเพิ่มปริมาณไอน้ำจนสูงเกินกว่าที่ออกแบบไว้ก็เช่นเดียวกัน

นอกจากนี้ยังมีปัญหาที่เกี่ยวข้องอีกมาก แต่การเปลี่ยน Extraction turbine เป็น Mixed pressure turbine ก็เป็นเรื่องที่ควรลองพิจารณาดู

ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม การติดตั้งเพิ่มเติมหรือดัดแปลงเครื่องจักรที่มีอยู่แล้ว จะต้องคำนึงถึงอายุการใช้งานของเครื่องจักรเดิม พื้นที่ที่ต้องใช้เพิ่มเติม เงินลงทุนและระยะเวลาคุ้มทุน โดยต้องพิจารณาอย่างรอบด้านรวมทั้งด้านความคุ้มค่าด้วย

1.9 เครื่องยนต์สันดาปภายในหลักการทำงานของเครื่องยนต์สันดาปภายใน

1.9.1 ประเภทและสมบัติ

เครื่องยนต์สันดาปภายในเป็นเครื่องต้นกำลังที่ทำการเผาไหม้เชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ ได้ก๊าซอุณหภูมิและความดันสูง แล้วนำก๊าซนี้ไปใช้เป็นสารทำงาน โดยทำให้ขยายตัว เพื่อแปลงพลังงานความร้อนในก๊าซเป็นพลังงานกล โดยทั่วไปมันจะทำงานเป็น Open cycle โดย สารทำงาน ใน Cycle จะมีสภาพเป็นก๊าซตลอดเวลาไม่มีการเปลี่ยนสถานะ

วิธีแปลงพลังงานความร้อนเป็นพลังงานกลสามารถแบ่งได้เป็นแบบปริมาตรโดยใช้การเคลื่อนที่ของลูกสูบซึ่งเกิดจากการขยายตัวของก๊าซเผาไหม้ในกระบอกสูบไปหมุนข้อเหวี่ยง กับแบบความเร็วโดยปล่อยให้ Working fluid ขยายตัวในเทอร์โบเพื่อให้เกิดความดัน เครื่องยนต์แบบปริมาตรยังแบ่งตามวิธีจุดระเบิด เชื้อเพลิงได้เป็นเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยหัวเทียน (เครื่องยนต์เบนซิน เครื่องยนต์แก๊ส) ซึ่งเป็นเครื่องยนต์แบบ Otto cycle และเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยตัวเอง (เครื่องยนต์ดีเซล) ซึ่งเป็นเครื่องยนต์แบบ Diesel cycle ส่วนตัวอย่างของเครื่องยนต์แบบความเร็วได้แก่ ก๊าซเทอร์โบ

เครื่องยนต์สันดาปภายในมีอุปกรณ์เสริมต่างๆ ค่อนข้างน้อย จึงมีขนาดกะทัดรัด สามารถติดเครื่อง-ดับเครื่องได้โดยใช้ระยะเวลาไม่นาน นอกจากนี้ ยังสามารถไล่ตามภาระได้ดี จึงเป็นเครื่องต้นกำลังที่มีประวัติการใช้งานยาวนาน ในคำอธิบายต่อไปนี้ หากไม่ได้ระบุไว้เป็นอย่างอื่น เมื่อกล่าวถึงเครื่องยนต์สันดาปภายในใดๆ จะหมายถึง เครื่องยนต์สันดาปภายในแบบปริมาตร เพื่อให้เห็นความแตกต่างจากก๊าซเทอร์โบ

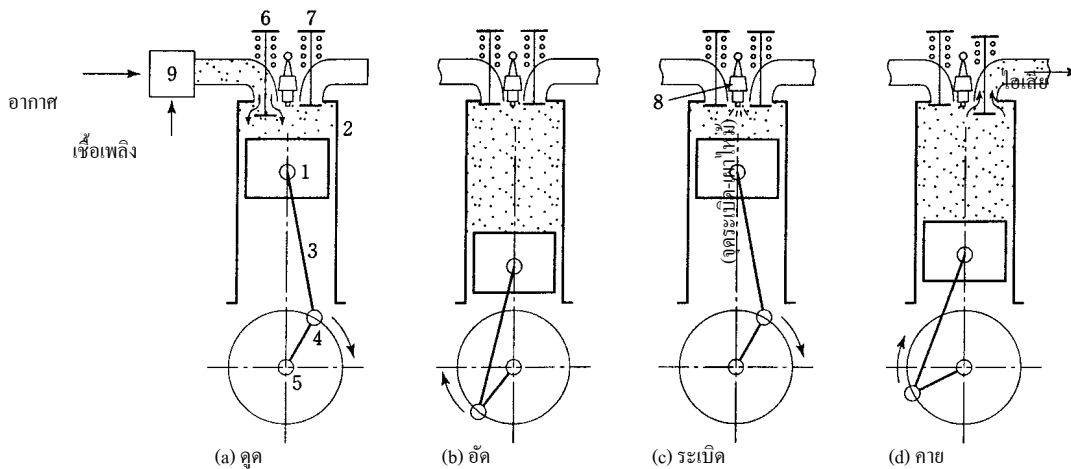
เครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยหัวเทียน เป็นเครื่องยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงเหลวที่เบาและระเหยเป็นไอได้ง่าย เช่น น้ำมันเบนซิน น้ำมันก๊าด น้ำมันเบา ฯลฯ หรือใช้เชื้อเพลิงก๊าซ เช่น ก๊าซธรรมชาติ ก๊าซถ่านหิน ก๊าซหุงต้ม (Town gas) เป็นต้น โดยจะผสมเชื้อเพลิงกับอากาศให้เข้ากันก่อนแล้วจึงดูดเข้าไปอัดในกระบอกสูบ แล้วใช้พลังงานจากภายนอกในการจุดระเบิด เครื่องยนต์แบบนี้มีใช้อย่างแพร่หลายในรถยนต์ เครื่องบินขนาดเล็ก เครื่องยนต์ขนาดกลางและขนาดค่อนข้างเล็กที่มีกำลังไม่เกินหลาย kW สำหรับงานทั่วไปหรือสำหรับกำเนิดไฟฟ้า

ส่วนเครื่องยนต์ดีเซล จะดูดอากาศอย่างเดียวเข้าไปอัดในกระบอกสูบให้มีความดันและอุณหภูมิสูงก่อน หลังจากนั้นจึงฉีดละอองเชื้อเพลิงเข้าไปในกระบอกสูบให้จุดระเบิดด้วยตัวเองโดยไม่ต้องใช้พลังงานจากภายนอก ดังนั้น ในเครื่องยนต์ดีเซล เนื่องจากต้องอัดอากาศให้มีความดันสูงถึงอุณหภูมิจุดระเบิดด้วยตัวเอง โดยหลักการแล้วจึงมีอัตราส่วนกำลังอัดสูง และมีประสิทธิภาพความร้อนสูง สามารถใช้น้ำมันปิโตรเลียม และน้ำมันหนักที่มีจุดเดือดสูง และราคาถูกได้ แต่เดิมเคยใช้เป็นเครื่องยนต์ขนาดค่อนข้างใหญ่ที่มีความเร็วต่ำสำหรับเรือ กำเนิดไฟฟ้า รถยนต์ขนาดใหญ่ เครื่องจักรก่อสร้าง ฯลฯ แต่ในปัจจุบัน มีการผลิตเครื่องยนต์ขนาดเล็กที่มีความเร็วสูงออกมาใช้แล้ว

ในเครื่องยนต์สันดาปภายใน เมื่อลูกสูบเคลื่อนที่ไปกลับระหว่างจุดสูงสุด-จุดต่ำสุดภายในกระบอกสูบ จะเกิดการทำงาน 4 จังหวะ ได้แก่ ดูด อัด ระเบิด คาย การทำงานทั้งหมดนี้เรียกว่า 1 รอบ ในเครื่องยนต์ 4 จังหวะ เมื่อเพลาคือข้อเหวี่ยงหมุนไป 2 รอบ จะทำงานข้างต้นได้ 1 รอบ ในจำนวนการทำงานทั้ง 4 จังหวะนี้ ก๊าซเผาไหม้จะทำงานจริงๆ ต่อลูกสูบเฉพาะจังหวะระเบิดเท่านั้น อีก 3 จังหวะที่เหลือจะเป็นการใช้พลังงานที่

ตอนที่ 3 บทที่ 1 ระบบความร้อนและอุปกรณ์ที่ใช้ไอน้ำ

ข้อเหวี่ยงสะสมไว้จากส่วนหนึ่งของพลังงานจากจังหวะระเบิด รูปที่ 1.41 แสดงขั้นตอนการทำงานของเครื่องยนต์ 4 จังหวะ



1 : ลูกสูบ 2 : กระบอกสูบ 3 : ก้านสูบ 4 : ข้อเหวี่ยง 5 : เพลาข้อเหวี่ยง
6 : วาล์วไอดี 7 : วาล์วไอเสีย 8 : หัวเทียน 9 : คาบูเรเตอร์

รูปที่ 1.41 ขั้นตอนการทำงานของเครื่องยนต์ 4 จังหวะ

นอกจากนี้ยังมีเครื่องยนต์ 2 จังหวะซึ่งเมื่อเพลาข้อเหวี่ยงหมุนไป 1 รอบ เครื่องยนต์จะทำงาน 1 รอบมี 2 จังหวะได้แก่ ดูด-อัด และระเบิด-คาย เครื่องยนต์แบบนี้ใช้ในเครื่องยนต์ดีเซลสำหรับเรือขนาดใหญ่ และเครื่องยนต์เบนซินขนาดเล็ก เช่น เครื่องยนต์ทั่วไปขนาดเล็ก และจักรยานยนต์ขนาดเล็ก เป็นต้น

สำหรับงานกำเนิดไฟฟ้า โดยทั่วไปจะใช้เครื่องยนต์ดีเซลความเร็วปานกลาง (500-1000 rpm) 4 จังหวะซึ่งเทียบกับเครื่องยนต์ 2 จังหวะแล้วจะสามารถไล่ตามภาระได้ดีกว่า และเมื่อเดินเครื่องที่ภาระไม่เต็ม พิกัดแล้วประสิทธิภาพความร้อนจะลดลงไม่มาก

1.9.2 สมรรถนะ

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนตามทฤษฎีของ Otto cycle ซึ่งเป็นไซเคิลตามทฤษฎีของเครื่องยนต์เบนซินและเครื่องยนต์แก๊ส ซึ่งประกอบด้วย การเปลี่ยนแปลงแบบ Adiabatic จำนวน 2 ครั้งกับการเปลี่ยนแปลงปริมาตร 2 ครั้ง ถ้าให้อัตราส่วนของความร้อนจำเพาะเท่ากับ K แล้ว ประสิทธิภาพความร้อนจะเท่ากับ

$$\eta = 1 - \frac{1}{\epsilon^{K-1}} \quad (1.15)$$

ดังนั้น หากอัตราส่วนกำลังอัด ϵ มีค่าสูง ประสิทธิภาพความร้อนจะเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ถ้าอัตราส่วนกำลังอัดมีค่าสูงเกินไป จะเกิดเสียงระเบิด (Detonation) ขึ้นทำให้ไม่สามารถเดินเครื่องได้ ดังนั้น ในเครื่องยนต์ในทางปฏิบัติ แม้แต่เครื่องยนต์ที่ใช้ก๊าซหุงต้ม (Town gas) เป็นเชื้อเพลิงก็มีอัตราส่วนกำลังอัดสูงสุดประมาณ 13 เท่าเท่านั้น ดังนั้นในแง่ของประสิทธิภาพความร้อนจึงต่ำกว่าเครื่องยนต์ดีเซลมาก ในขณะที่

เครื่องยนต์ดีเซลจะมีสมบัติที่ดีคือ การเผาไหม้ที่ความดันคงที่และมีอัตราส่วนกำลังอัดสูง เครื่องยนต์ดีเซลหมุนเร็ว (1000-1800 rpm) จำนวนมากมีอัตราส่วนกำลังอัดถึง 23 เท่า

ปริมาณงานที่ก๊าซเผาไหม้หนึ่งหน่วยมวลกระทำออกไป เป็นปริมาณที่สำคัญตัวหนึ่งในการประเมินสมรรถนะของเครื่องยนต์สันดาปภายใน ปริมาณงาน Effective work ต่อ 1 จังหวะของลูกสูบหารด้วยปริมาตรจังหวะของเครื่องยนต์แล้วแสดงด้วยความดันเฉลี่ย เรียกว่า Mean effective pressure มีสัญลักษณ์ว่า P_m ค่านี้เป็นเกณฑ์ของกำลังขาออกของเครื่องยนต์ซึ่งไม่ขึ้นกับขนาดของลูกสูบและความเร็วรอบ หากใช้ Supercharger ป้อนอากาศจำนวนมากเข้าไปในกระบอกสูบ ปริมาณการเผาไหม้จะเพิ่มขึ้นภายในกระบอกสูบ ปริมาตรเท่าเดิม ทำให้ Mean effective pressure สูงขึ้น จึงสามารถเพิ่มกำลังขาออกต่อกระบอกสูบให้สูงขึ้นได้

สมรรถนะอีกประการหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับข้างต้น ได้แก่ Output factor ซึ่งมีนิยามดังต่อไปนี้

$$(\text{output factor}) = (\text{net mean effective pressure}) \times (\text{ความเร็วเฉลี่ยของลูกสูบ}) \quad (1.16)$$

ในเครื่องยนต์สันดาปภายใน ความร้อนจากการเผาไหม้ส่วนใหญ่จะถูกทิ้งไปเป็นก๊าซไอเสีย และในน้ำระบายความร้อน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในเครื่องยนต์ดีเซลจะเดินเครื่องด้วยอัตราอากาศส่วนเกินสูงมาก ในเครื่องยนต์ปกติจะมีอัตราอากาศส่วนเกินประมาณ 1.4-1.6 ที่กำลังขาออกที่พิกัด และเครื่องยนต์ Supercharge จะมีอัตราอากาศส่วนเกินสูงถึง 1.7-2.3 ยิ่งเครื่องยนต์ขนาดใหญ่ยิ่งมีแนวโน้มมีค่าสูงขึ้น ดังนั้น ไอเสียเครื่องยนต์ดีเซลจึงมีอุณหภูมิค่อนข้างต่ำแต่มีปริมาณไอเสียมาก ในเครื่องยนต์ Supercharge ถึงแม้จะสามารถนำพลังงานความร้อนในไอเสียกลับมาใช้ได้ถึง 30% แต่โดยรวมๆ แล้วความสูญเสียในก๊าซไอเสียก็ยังมีค่าสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในเครื่องยนต์สำหรับผลิตไฟฟ้าซึ่งเดินเครื่องด้วยความเร็วคงที่ แม้จะมีภาระไม่เต็มพิกัด แต่ปริมาณอากาศก็จะคงที่ ดังนั้น ประสิทธิภาพที่ภาระไม่เต็มพิกัดจึงมีค่าต่ำ

ในทางกลับกัน ในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยหัวเทียน จะเดินเครื่องด้วยอัตราส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศคงที่ตลอดเวลา ปริมาณไอเสียไม่ว่าในเครื่องยนต์ปกติ หรือ Supercharge ก็มีการเปลี่ยนแปลงไปตามภาระ โดยเกือบจะแปรผันตรงตามปริมาณเชื้อเพลิง สำหรับอัตราอากาศส่วนเกินจะมีค่าประมาณ 1.1-1.3 เท่าของอัตราส่วนผสมกับอากาศตามทฤษฎี (ตารางที่ 1.5) แต่ในกรณีที่ใช้ Three-way catalytic converter ในการบำบัดไอเสีย จะต้องควบคุมให้มีค่าใกล้เคียงกับ 1.0 เพื่อให้เกิดสมดุลระหว่างก๊าซที่มีสมบัติติดชั้นกับออกซิเดชั่น

ตารางที่ 1.5 คุณสมบัติของก๊าซเชื้อเพลิง

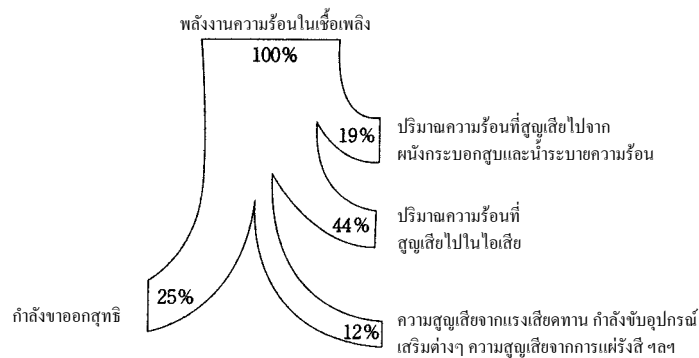
ประเภทของก๊าซ	จำนวนโมเลกุล	ค่าความร้อนต่ำ [kcal / m ³ _N]	อัตราส่วนผสมตามทฤษฎี [m ³ _N / m ³ _N]	ค่าความร้อนของก๊าซผสมที่อัตราส่วนสมมูล [kcal / m ³ _N]	explosion limit		อัตราส่วนกำลังอัดสูงสุด (เครื่องทดสอบมาตรฐาน) C.C.R.	ค่ามีเทน M.N.	ค่าออกเทน (MON)
					ower	pper			
ไฮโดรเจน	H ₂	2570	2.38	760	4.0	74.2	8.5	0	66
คาร์บอนมอนอกไซด์	CO	3020	2.38	893	2.5	74	13.0	73	100
มีเทน	CH ₄	8550	9.52	813	5.0	15	15.4	100	103
อีเทน	C ₂ H ₆	15370	16.7	868	3.0	12.5	12.4	43.5	101
โพรเพน	C ₃ H ₈	22100	23.8	901	2.2	9.5	12.2	35	97
i-บิวเทน	i-C ₄ H ₁₀	28240	31.0	908	1.9	8.5	5.5		98
n-บิวเทน	n-C ₄ H ₁₀	28330	31.0	922	1.9	8.8	8.0	10.5	89
town gas 6C	H ₂ : 45% CH ₄ , CO ฯลฯ	4050	4.2	779				33	
town gas 13A	CH ₄ : 88% C _n H _m	9940	10.95	832				66	
digestion gas	CH ₄ , CO ₂ , N ₂ ฯลฯ	4700-6500	5.2-7.2	750-790				90-130	

ระบบระบายความร้อนของเครื่องยนต์สันดาปภายใน ประกอบด้วยระบบอุณหภูมิสูงซึ่งใช้ระบายความร้อนของเสื้อสูบ และฝาสูบ กับระบบอุณหภูมิต่ำซึ่งใช้ระบายความร้อนน้ำมันหล่อลื่น และอากาศ ระบบอุณหภูมิสูงจะรักษาอุณหภูมิขาออกของน้ำระบายความร้อนไว้ที่ประมาณ 80-90°C ผลจากการที่มีอุณหภูมิสูงคือ

- ลดความสูญเสียจากการระบายความร้อน
- ประหยัดน้ำมันเพราะเผาไหม้ได้ดีเนื่องจากห้องเผาไหม้มีอุณหภูมิสูงขึ้น
- ลดการกัดกร่อนของกรดไนตริกต่อปลอกสูบ แหวนลูกสูบ ฯลฯ และเพิ่มความทนทานต่อการเสียดสีเนื่องจากอุณหภูมิรอบๆ ห้องเผาไหม้สูงขึ้น
- ไอเสียมีอุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้สามารถนำความร้อนในไอเสียกลับมาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเพิ่มประสิทธิภาพในการนำกลับมาใช้

ในระยะหลัง เริ่มมีเครื่องยนต์แก๊สที่ระบายความร้อนแบบ Vapor cooling ซึ่งทำให้กระบอกสูบมีอุณหภูมิสูงถึงประมาณ 120°C นอกจากนี้ ในเครื่องยนต์ดีเซลก็เริ่มมีการใช้น้ำมันที่มีจุดเดือดสูงเป็นตัวกลางระบายความร้อนแทนน้ำ ทำให้อุณหภูมิขาออกของของเหลวระบายความร้อนมีค่าสูงกว่า 100°C เพื่อให้ประหยัดน้ำมันและลดการผุกร่อน อย่างไรก็ตาม เนื่องจากผนังห้องเผาไหม้จะมีอุณหภูมิสูงขึ้น จึงต้องใช้เชื้อเพลิงที่มีค่าออกเทนสูงขึ้น และควรหลีกเลี่ยงการเดินเครื่องที่ภาระไม่เต็มพิกัดอีกด้วย

ในทางกลับกัน ระบบอุณหภูมิต่ำควรมีอุณหภูมิไม่เกิน 50°C เพื่อไม่ให้น้ำมันหล่อลื่นเสื่อมสภาพยิ่งเครื่องยนต์ที่ Supercharge มาก ปริมาณความร้อนของน้ำระบายความร้อนจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในเครื่องยนต์ดีเซล บางครั้งปริมาณความร้อนของระบบอุณหภูมิต่ำจะมีค่าถึง 30-40% ของปริมาณความร้อนของน้ำระบายความร้อนทั้งหมด รูปที่ 1.42 แสดงตัวอย่างสมดุลความร้อนของเครื่องยนต์เบนซิน



รูปที่ 1.42 ตัวอย่างสมดุลความร้อนของเครื่องยนต์ดีเซล

1.9.3 เชื้อเพลิงกับการเผาไหม้

(1) เชื้อเพลิง

เชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์สันดาปภายใน จะมีค่าความร้อนของก๊าซผสมสูงดังตารางที่ 1.5 รวมทั้งมีอัตราส่วนกำลังอัดสูงสุดสูง กล่าวคือ เชื้อเพลิงที่มีค่าออกเทนสูงจะให้กำลังขาออกสูงและประสิทธิภาพสูงจึงเป็นเชื้อเพลิงที่ดี

เชื้อเพลิงก๊าซที่มีก๊าซมีเทนและโพรเพนเป็นองค์ประกอบหลักจะมีค่าออกเทนสูง สามารถใช้กับเครื่องยนต์ Supercharge ที่มีอัตราส่วนกำลังอัดสูงได้ ส่วนบิวเทนแม้ว่าจะมีค่าความร้อนของก๊าซผสมสูงแต่มีค่าออกเทนต่ำ นอกจากนี้ก๊าซที่มีไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบหลักก็จะมีค่าออกเทนต่ำอีกด้วย ในกรณีที่ใช้ก๊าซทั้งสองนี้จะต้องใช้เครื่องยนต์ปกติที่มีอัตราส่วนกำลังอัดต่ำลง กำลังขาออกจึงลดลงอย่างมาก และกรณีที่ต้องการกำลังขาออกเท่าเดิมจะต้องเพิ่มจำนวนลูกสูบ

สำหรับเมทานอล และเอเทนอล จะมีค่าออกเทนสูงและมีการคาดหวังว่าจะนำมาใช้ได้ในอนาคต นอกจากนี้ กรณีที่ใช้ก๊าซ Regenerative และก๊าซผลพลอยได้ จะต้องพิจารณาถึงอัตราส่วนระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ และการน็อคของเครื่องยนต์ เพื่อตัดสินว่าเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงหรือไม่

เครื่องยนต์ดีเซลมีข้อดีคือมีประสิทธิภาพสูง และสามารถใช้น้ำมันเชื้อเพลิงคุณภาพต่ำซึ่งมีราคาถูกได้ จึงสามารถลดค่าใช้จ่ายในการเดินเครื่อง และเพิ่มความคุ้มค่า โดยมากจะใช้น้ำมันหนักชนิด A ส่วนน้ำมันหนักชนิด C ก็ใช้ได้ แต่ Acid dew point ของไอเสียจะมีค่าสูงขึ้น ดังนั้น กรณีที่จะนำความร้อนในไอเสียกลับมาใช้จะต้องคำนึงถึงการกัดกร่อนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วย นอกจากนี้ การเดินเครื่องด้วยน้ำมันเชื้อเพลิงชนิดหนัก เช่น น้ำมันหนัก C ซึ่งมีองค์ประกอบที่ติดไฟยาก เช่น ไฮโดรคาร์บอนหนักเป็นจำนวนมาก รวมทั้งยังมีองค์ประกอบเบ็ดเตล็ดอื่นๆ จะทำอันตรายต่อเครื่องยนต์ นอกจากนี้ น้ำมันเชื้อเพลิงที่มีความหนืดสูงมาก มักจะทำให้ละอองเชื้อเพลิงจากหัวฉีดเชื้อเพลิงมีขนาดใหญ่ และมีการกระจายตัวไม่ดี คุณลักษณะการฉีดพ่นเชื้อเพลิงจึงไม่ค่อยดี ในทางกลับกันหากมีความหนืดน้อยเกินไป จะเร่งให้ปั๊มรั่วและสึกหรอเร็วขึ้น ปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการเผาไหม้ประกอบด้วยความละเอียดของการฉีดพ่นเชื้อเพลิง การกระจายตัว การทะลุทะลวง เป็นต้น ดังนั้น จึงต้องบำรุงรักษาและควบคุม Burner tip รวมทั้งความดันของปั๊มหัวฉีด ฯลฯ อย่างเข้มงวด

โดยทั่วไป ปัญหาที่เกิดขึ้นในการเผาไหม้น้ำมันเชื้อเพลิงชนิดหนักจะมีดังต่อไปนี้

- * แหวนลูกสูบและปลอกสูบมีการสึกหรอเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเพิ่มปริมาณและการสะสมของสารที่เกิดจากการเผาไหม้

- * ภาวะความร้อนรอบๆ ห้องเผาไหม้เพิ่มสูงขึ้น

- * อุณหภูมิไอเสียมีค่าสูงขึ้นจากเหตุผลข้างต้น
- * เเผาไหม้ได้ไม่ดีเมื่อเดินเครื่องที่ภาระต่ำ และความดันสูงสุดในลูกสูบสูงเกินไปเนื่องจากค่าซีเทนต่ำ
- * สมรรถนะต่ำลงและเกิด Surging เนื่องจากใบพัด (เทอร์ไบน์) ของ Supercharger สกปรกมาก
- * ไส้กรองเสียหายเนื่องจากเกิดโคลนหรือเลน (Sludge) ในน้ำมันเชื้อเพลิงมากกว่าปกติ
- * Plunger ของปั๊มหัวฉีดสึกหรอมากกว่าปกติเนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยา FCC (Fluid catalytic cracking) เป็นต้น

ด้วยเหตุผลข้างต้น เนื่องจากการเลือกใช้เชื้อเพลิงจะมีผลกระทบอย่างมากต่อการเดินเครื่องของระบบ ความคุ้มค่า สิ่งแวดล้อม ฯลฯ จึงต้องพิจารณาไม่เพียงแต่ราคาเท่านั้น แต่ต้องตัดสินใจอย่างบูรณาการโดยคำนึงถึงความสะดวกในการจัดซื้อ การใช้งานและจัดเก็บ ความปลอดภัย การบำรุงรักษา และสิ่งแวดล้อม

(2) วิธี Supercharge

วิธีเพิ่มปริมาณอากาศสำหรับการเผาไหม้ของเครื่องยนต์สันดาปภายในเพื่อเพิ่มกำลังขาออกวิธีหนึ่ง ได้แก่ Supercharge ซึ่งสามารถทำให้เครื่องยนต์ที่มีความจุสามารถผลิตกำลังขาออกสูงได้ จึงทำให้เครื่องยนต์มีขนาดเล็ก และที่ กำลังขาออกเท่ากันจะมีความเร็วรอบต่ำกว่า จึงช่วยประหยัดน้ำมัน

วิธี Supercharge แบ่งได้เป็นวิธีเชิงกลโดยขับ Supercharger ด้วยเพลาคอเหวี่ยง และวิธีขับใบพัด (เทอร์ไบน์) ของ Supercharger ด้วยไอเสีย โดยทั่วไปจะเรียกว่า Turbocharge โดยเฉพาะอย่างยิ่งวิธี Turbocharge จะมีขนาดเล็กและน้ำหนักเบา รวมทั้งเมื่อภาระของเครื่องยนต์เพิ่มขึ้นปริมาณลมจะเพิ่มขึ้น จึงมีประสิทธิภาพเชิงกลสูงขึ้น สามารถเพิ่ม Mean effective pressure ได้ อย่างไรก็ตาม เมื่อเครื่องยนต์มีภาระต่ำหรือเมื่อมีความเร็วรอบต่ำซึ่งเมื่อไอเสียมีปริมาณลดลง จะไม่สามารถเพิ่มอากาศได้สูง รวมทั้งความเฉื่อยในการหมุนของ Turbocharger ยังทำให้เกิดการหน่วงเวลา ทำให้เครื่องยนต์ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงภาระได้ช้าลง รวมทั้งยังมีข้อจำกัดด้านวัสดุเนื่องจากอุณหภูมิของไอเสียอีกด้วย จึงต้องทำความเข้าใจไว้ล่วงหน้า

นอกจากนี้ เมื่อเพิ่มระดับการ Supercharge จะทำให้อุณหภูมิของผนังห้องเผาไหม้เพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิไอเสีย อุณหภูมิของก๊าซผสมหลังอัดแล้ว และภาระความร้อนเพิ่มสูงขึ้น นอกจากจะจุดระเบิดเอง (น็อค) ได้ง่ายแล้ว ยังทำให้มีความเค้นจากความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างมากเนื่องจากความดันสูงสุดของการเผาไหม้เพิ่มขึ้นอีกด้วย ดังนั้น จึงต้องพิจารณาเรื่องความทนทานทั้งเชิงความร้อน และเชิงกลของวัสดุ เช่น การไหม้หรือแตกร้าวของฝาสูบ เป็นต้น รวมทั้งปลอกสูบ แหวนปะเก็น และร่องวงแหวนจะมีการสึกหรองรุนแรงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการใช้น้ำมันหนักจะต้องใช้ความระมัดระวัง

(3) การน็อค

ได้อธิบายไปแล้วว่าหากสามารถทำให้เครื่องยนต์ Otto cycle มีอัตราส่วนกำลังอัดสูงได้ ประสิทธิภาพความร้อนตามทฤษฎีจะสูงขึ้นโดยไม่ขึ้นกับขนาดความจุของเครื่องยนต์ ภาระ ความเร็วรอบ หรืออัตราส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ ฯลฯ อย่างไรก็ตามสำหรับเชื้อเพลิงที่มีจำหน่ายในท้องตลาดเมื่อเครื่องยนต์มีภาระสูงจะเกิดการเผาไหม้อย่างรวดเร็วกว่าปกติภายในกระบอกสูบที่อัตราส่วนกำลังอัดต่ำกว่าค่าในอุดมคติมาก เกิดเป็นเสียงทำให้กำลังขาออกรวมทั้งประสิทธิภาพความร้อนลดลง เราจึงไม่สามารถเพิ่มอัตราส่วนกำลังอัดให้สูงเกินกว่าค่าหนึ่งได้ ชัดจำกัดนี้เรียกว่า ค่า Maximum effective compression ratio

ในการลามของเปลวไฟของก๊าซผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ ส่วนที่เผาไหม้เป็นส่วนใหญ่ (End gas) จะเผาไหม้อย่างรวดเร็ว ทำให้ความดันเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วด้วย ดังนั้น ความดันภายในกระบอกสูบจึงไม่สมดุล เกิดเป็นคลื่นความดันหรือคลื่นกระแทกที่มีการสั่นสะเทือนสูงมาก เสียงน็อคเป็น

ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจากการที่คลื่นนี้สะท้อนไปมาในห้องเผาไหม้ และกระแทกห้องเผาไหม้หลายๆ ครั้ง เรียกว่า Knock หรือ Knocking

End gas จะได้รับแรงอัดจากลูกสูบและการลามของเปลวไฟจนมีอุณหภูมิและความดันสูง ผลคือจะไปเร่งการถ่ายเทความร้อนให้แก่ผนังห้องเผาไหม้ ทำให้มีความร้อนสูญเสียมากขึ้น และรอบๆ ลูกสูบมีความร้อนสูงเกินไป ไม่เพียงแต่จะชักนำให้เกิดการเผาไหม้ผิดปกติอื่นๆ ทำให้แหวนลูกสูบไหม้หรือลูกสูบเสียหาย แต่ในกรณีที่แรงกระแทกมีความรุนแรง อาจทำให้เกิดความเสียหายเชิงกล เช่น กระบอกสูบแตกหักเสียหายได้ เป็นต้น

เชื้อเพลิงแต่ละชนิดมีสมบัติในการต้านทานการน็อกเมื่ออัตราส่วนกำลังอัดมีค่าต่ำและสูงแตกต่างกัน สมบัติของเชื้อเพลิงที่ไม่เกิดการน็อกที่อัตราส่วนกำลังอัดสูง เรียกว่าสมบัติ Anti-knock (ความต้านทานการน็อก) ซึ่งดัชนีชี้วัดตัวหนึ่งได้แก่ ค่าออกเทน ค่านี้ใช้ระบุแทนซึ่งเป็นองค์ประกอบที่เกิดการน็อกง่ายที่สุดน้ำมันเบนซิน และไอโซออกเทนซึ่งเกิดการน็อกได้ยากที่สุดเป็นมาตรฐาน โดยค่าออกเทนของเชื้อเพลิงจะเท่ากับสัดส่วนโดยปริมาตรเทียบเป็นร้อยละของไอโซออกเทนในเชื้อเพลิงมาตรฐานที่เป็นส่วนผสมของสารทั้งสองตัวซึ่งมีความต้านทานการน็อกเท่ากับเชื้อเพลิงนั้นๆ

เงื่อนไขของเชื้อเพลิงที่ทำให้ไม่เกิดการน็อก จะต้องมีความดันสูง ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการน็อก เช่น อุณหภูมิติดไฟด้วยตัวเอง ระยะเวลาติดไฟ (Ignition delay) ความเร็วของเปลวไฟ ฯลฯ จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบในเชื้อเพลิง โดยทั่วไปองค์ประกอบที่มีโครงสร้างโมเลกุลเรียบง่าย มีจำนวนอะตอมคาร์บอนมากเป็นโซ่ยาว และมีจุดเดือดยิ่งต่ำจะยิ่งน็อกยาก

ในเครื่องยนต์ดีเซล หากระยะเวลาติดไฟ (ระยะเวลาตั้งแต่ฉีดพ่นเชื้อเพลิงจนถึงติดไฟ) มีระยะเวลานานเกินไป ปริมาณก๊าซผสมที่ติดไฟได้ซึ่งเกิดขึ้นในระหว่างนั้นจะมีเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการกระแทกเนื่องจากการเผาไหม้อย่างรวดเร็ว ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า ดีเซลน็อก ตัวชี้วัดตัวหนึ่งเกี่ยวกับความสามารถในการติดไฟของเชื้อเพลิงดีเซล เรียกว่า ค่าซีเทน (Cetane number) และสำหรับเชื้อเพลิงก๊าซ จะใช้ค่ามิเทน (ตารางที่ 1.5)

ในการระบุค่าซีเทน จะให้ Cetane ซึ่งมีสมบัติการติดไฟดี มีค่าซีเทนเท่ากับ 100 และให้ Heptamethylnonane ซึ่งมีสมบัติการติดไฟไม่ดี มีค่าซีเทนเท่ากับ 15 แล้ววัดโดยใช้สมบัติการติดไฟของเชื้อเพลิงมาตรฐานซึ่งมีส่วนผสมของสารทั้งสอง และทราบค่าซีเทนอยู่แล้วเป็นเกณฑ์ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากมีความยุ่งยากในการวัด โดยทั่วไปจึงระบุด้วยค่า Cetane index ซึ่งหาได้จากการคำนวณจากสมบัติของเชื้อเพลิง ค่า Cetane index มีความสอดคล้องดีกับค่าที่วัดจริง และแม้แต่มาตรฐาน JIS ก็ยอมรับให้ใช้ในการติดไฟให้ได้ดีภายใต้อุณหภูมิต่ำ จะต้องเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีค่าซีเทนสูงและระเหยง่าย น้ำมันเชื้อเพลิงที่มีค่าซีเทนต่ำจะมีระยะเวลาติดไฟสูง และมีเปลวไฟยาว ทำให้ความสามารถในการเผาไหม้ต่ำลง และผลกระทบนั้นจะเห็นชัดเจนโดยเฉพาะอย่างยิ่งในเครื่องยนต์ความเร็วปานกลาง

ปัจจัยที่ช่วยลดการน็อกของก๊าซผสม ได้แก่ การลดระยะเวลาการลามของเปลวไฟ การลดความไม่สม่ำเสมอของเชื้อเพลิง การลดอุณหภูมิและความดันของก๊าซผสม การใช้ก๊าซผสมที่เข้มข้น (Rich) หรือเบาบาง (Lean) เป็นต้น สำหรับอุณหภูมิของไอ้ อุณหภูมิต่ำจะทำให้เกิดการน็อกได้ยากกว่า แม้แต่ในเครื่องยนต์ Supercharge ก็ควรทำให้มีอุณหภูมิไม่เกิน 30°C การเดินเครื่องโดยให้ความร้อนแก่ไอ้เพื่อเร่งการกลายเป็นไอของเชื้อเพลิง เป็นสิ่งที่ไม่ควรทำในแง่ของการป้องกันการน็อก อย่างไรก็ตาม ในเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้ น้ำมันหนัก C หากอุณหภูมิไอ้ต่ำเกินไป จะเกิดการกัดกร่อนด้วยกรดไนตริกเนื่องจากเกิดน้ำควบแน่นขึ้น จึงต้องระมัดระวัง

ด้วยเหตุผลข้างต้น หากต้องการหลีกเลี่ยงการน็อก จะมีข้อจำกัดเรื่อง Net mean effective pressure โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยหัวเทียนเทียบกับเครื่องยนต์ดีเซลแล้ว จะมีช่วงที่

สามารถเผาไหม้ได้แคบกว่า เนื่องจากถ้าอัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศหากเข้มข้นไปเครื่องยนต์จะน็อค หากเบาบางไปเครื่องยนต์จะสั่นได้ง่าย

1.9.4 การเดินเครื่องและบำรุงรักษา

ชิ้นส่วนที่มีปัญหาเรื่องอายุการใช้งานในเครื่องจักรพลังความร้อน ส่วนใหญ่จะเป็นชิ้นส่วนที่ได้รับความร้อนสูง ซึ่งจะได้รับผลกระทบจากเชื้อเพลิงที่ใช้ ความดัน อุณหภูมิ ความเร็วรอบ และสภาพการเดินเครื่อง (Load ratio) และวิธีและจำนวนครั้งที่ติดเครื่อง-ดับเครื่อง เป็นต้น) ในการเผาไหม้ของเครื่องยนต์สันดาปภายใน ระยะเวลาการเผาไหม้ต่อ 1 รอบจะมีเวลาสั้นมาก จึงต้องใช้ความระมัดระวังในการคงไว้ซึ่งสมรรถนะของระบบหัวฉีดเชื้อเพลิง

พื้นฐานการเดินเครื่องของเครื่องจักรพลังความร้อน จะต้องพยายามให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ในการเดินเครื่องต่อเนื่องด้วยภาระคงที่โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางความร้อน การเปลี่ยนแปลงภาระและการติดเครื่อง-ดับเครื่องซ้ำๆ กันจะมีอิทธิพลอย่างมากต่ออายุการใช้งาน นอกจากนี้ การเดินเครื่องด้วยภาระต่ำหรือเดินเบาเป็นระยะเวลานาน ไม่เพียงแต่จะมีประสิทธิภาพต่ำเท่านั้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเครื่องยนต์ดีเซลจะเกิดปัญหาในกระบอกสูบ เช่น จะเกิดโคลนหรือเลน (Sludge) เพิ่มขึ้น การผูกร้อน ฯลฯ เพิ่มขึ้น จึงต้องใช้ความระมัดระวัง

ปัญหาที่สำคัญอีกประการหนึ่งในการเพิ่มสมรรถนะของเครื่องยนต์สันดาปภายในด้วยการเพิ่มอัตราส่วนกำลังอัดหรือวิธีอื่นๆ ได้แก่ การที่ก๊าซเผาไหม้รั่วออกมาระหว่างปลอกสูบกับแหวนลูกสูบ ซึ่งไม่เพียงแต่จะมีผลกระทบอย่างมากต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์เท่านั้น แต่ยังทำให้น้ำมันหล่อลื่นที่ผนังปลอกสูบแห้ง น้ำมันหล่อลื่นเสื่อมคุณภาพ อุณหภูมิของแบริงสูงขึ้น ฯลฯ และเป็นสาเหตุให้เครื่องยนต์มีความทนทานลดลงอีกด้วย จึงต้องมีการบำรุงรักษาและควบคุมอย่างถี่ถ้วน

ค่าเชื้อเพลิงและค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาเป็นหัวข้อสำคัญข้อหนึ่งที่มีผลต่อดัชนีชี้วัดความคุ้มค่าเมื่อค่าแรงสูงขึ้น ค่าบำรุงรักษาจะมีแนวโน้มสูงขึ้นด้วย ในจำนวนนั้น หากสามารถยืดอายุของน้ำมันหล่อลื่นซึ่งมีระยะเวลาการเปลี่ยนถ่ายค่อนข้างสั้นออกไปได้ จะสามารถยืดระยะเวลาที่ต้องหยุดเครื่องเพื่อซ่อมบำรุงเป็นระยะได้ จึงช่วยเพิ่มอัตราการผลิตของระบบ

นอกจากนี้ ในการคงไว้ซึ่งสมรรถนะเป็นระยะเวลานานอย่างได้สมดุล ด้วยการหล่อลื่นและระบายความร้อนลูกสูบ แหวนลูกสูบ ปลอกสูบซึ่งเป็นชิ้นส่วนที่มีอุณหภูมิสูง โดยไม่ให้ร้อน สึกหรอ หรือไหม้ ฯลฯ จะต้องใช้น้ำมันหล่อลื่นซึ่งมีระดับคุณภาพ และความหนืดเหมาะสมที่สุดกับเครื่องยนต์รุ่นนั้นๆ และเหมาะสมกับวัตถุประสงค์การใช้งาน ไม่ว่าจะทำอย่างไรก็ตาม น้ำมันหล่อลื่นจะต้องรั่วเข้าไปในกระบอกสูบและเกิดการเผาไหม้ ดังนั้น หากใช้น้ำมันที่ Base number สูงเกินไป ในเครื่องยนต์ดีเซลต่างๆ ที่ใช้น้ำมันหนัก จะเกิดโคลนหรือเลน (Sludge) จำนวนมากขึ้นที่ส่วนต่างๆ ในห้องเผาไหม้ ทำให้แหวนลูกสูบกับปลอกสูบมีความเสียดทานสูง หรือกลายเป็นศูนย์กลางของการเผาไหม้ผิดปกติ ปัญหาเรื่องความเหมาะสมระหว่างเชื้อเพลิงกับน้ำมันหล่อลื่น ในกรณีที่มีการสับเปลี่ยนใช้เชื้อเพลิงหลายชนิด จะเกิดปัญหาเช่นเดียวกันขึ้นระหว่างเชื้อเพลิงต่างชนิดกันด้วย จึงต้องใช้ความระมัดระวัง

การหล่อลื่นของระบบวาล์วโดยสร้างฟิล์มน้ำมันในชิ้นส่วน ก็เป็นจุดขับเคลื่อนที่สมบุกสมบันเช่นกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเครื่องยนต์แก๊ส เนื่องจากเชื้อเพลิงสามารถเผาไหม้ได้ดี จึงมีสารตกค้างน้อย ห้องเผาไหม้จะไม่ค่อยสกปรก อย่างไรก็ตาม เทียบกับเครื่องยนต์เบนซิน และเครื่องยนต์ดีเซลแล้ว อุณหภูมิการเผาไหม้จะสูงกว่า และอุณหภูมิของน้ำมันในอ่างน้ำมันหล่อลื่นจะสูงถึง 90-100°C ซึ่งเป็นสภาพที่เข้มงวดสำหรับน้ำมันหล่อลื่น

สำหรับการสึกหรอ โดยทั่วไปเพียงแค่เพิ่มสารป้องกันการเสียดสีพวกฟอสฟอรัส (P) ในน้ำมันหล่อลื่นก็เพียงพอ และสำหรับสารทำความสะอาดโลหะ หากมีแคลเซียม (Ca) ในปริมาณสูงขึ้น การทนการเสียดสีจะมีแนวโน้มดีขึ้น อย่างไรก็ตาม P, Ca และสังกะสี (Zn) ต่างๆ เหล่านี้ในน้ำมันหล่อลื่น เป็นธาตุที่ทำลายตัวเร่งปฏิกิริยาใน Three-way catalytic converter ซึ่งเป็นวิธีหลักในการลดปริมาณ NO_x ในประเทศญี่ปุ่น ทำให้ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาลดลง และอายุการใช้งานสั้นลง จึงต้องพยายามให้มีปริมาณน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ เป็นที่ทราบกันว่า P ทำให้เกิดสารที่มีลักษณะคล้ายแก้ว ซึ่งจะไปอุดตันรูเล็กของตัวเร่งปฏิกิริยา นอกจากนี้ เมื่อมี Zn ไปเกาะที่ตัวเร่งปฏิกิริยา จะทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาดูดซับ CO ได้น้อยลง เป็นปัญหาทำให้ความสามารถในการเลือกกรีดวซ์ NO ลดลง เป็นต้น การเลือกใช้น้ำมันหล่อลื่นที่เหมาะสม รวมทั้งการเลือกสารเติมแต่ง จึงต้องระวังไม่ให้ไปทำลายตัวเร่งปฏิกิริยาด้วย

น้ำมันหล่อลื่นจะสัมผัสกับ NO_x ใน blow-by gas ด้วย จึงต้องมี Base number ที่เหมาะสมเพื่อทำให้กรดไนตริกที่เกิดจาก NO_x รวมตัวกับน้ำมีสภาพเป็นกลางเพื่อป้องกันชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ไม่ให้ผุกร่อนจากกรด นอกจากนี้ น้ำมันหล่อลื่นยังต้องมีความสามารถในการทำให้กรดเป็นกลางเพื่อป้องกันการเกิดสนิมที่ชิ้นส่วนของเครื่องยนต์เนื่องจากสารกัดกร่อน รวมทั้งความสามารถในการทำความสะอาดและกระจายตะกอนที่เกิดขึ้นและสะสมในร่องแหวนลูกสูบต่างๆ ให้กระจายออกไปในน้ำมัน เพื่อรักษาการทำงานอย่างราบรื่นของชิ้นส่วนต่างๆ และป้องกันการเสียดสีอีกด้วย ยิ่งไปกว่านั้น เรายังใช้น้ำมันหล่อลื่นที่มีความเป็นด่างสูงซึ่งมีเสถียรภาพดี ไม่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนที่อุณหภูมิสูง เพื่อป้องกันการผุกร่อน การเสียดสี และการสะสมของสารที่เกิดจากการเผาไหม้ ดังนั้น สิ่งที่สำคัญในการให้น้ำมันหล่อลื่นมีอายุการใช้งานยาวนาน ได้แก่ การใช้ Base oil ที่มีเสถียรภาพดีต่อความร้อน และปฏิกิริยากับออกซิเจน โดยไม่ให้มีสารพวก Naphthobenzene กำมะถัน ไนโตรเจน ฯลฯ ซึ่งจะให้น้ำมันหล่อลื่นสูญเสียความเฉื่อยต่อปฏิกิริยากับออกซิเจน รวมทั้งต้องเพิ่มดัชนีความหนืด และทำให้ระเหยได้ยาก จึงจะไม่กินน้ำมันหล่อลื่น สำหรับความหนืดยังต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับอุณหภูมิของน้ำระบายความร้อนอีกด้วย

การเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่น ตามหลักการในอุดมคติแล้วควรทำการเผ้าติดตาม และควบคุมการเปลี่ยนแปลงของ Base number และความหนืด รวมทั้งโคลนหรือเลน (Sludge) ต่างๆ และหากทำได้ควรทำการจัดระบบในการเปลี่ยนถ่ายด้วย

เราต้องระมัดระวังไม่ให้น้ำระบายความร้อนเย็นจนเป็นน้ำแข็ง และต้องตรวจสอบคุณภาพน้ำด้วย ในเครื่องยนต์สันดาปภายใน น้ำระบายความร้อนจะมีอุณหภูมิสูง ดังนั้น กรณีที่น้ำระบายความร้อนมีคุณภาพไม่เหมาะสมจะทำให้ผนังด้านในเสื้อสูบผุกร่อน และมีแร่ธาตุต่างๆ มาสะสมอยู่ ทำให้เครื่องยนต์ร้อนเกินไป บางครั้งอาจเกิดอุบัติเหตุร้ายแรงได้ รวมทั้งต้องระมัดระวังการแห้งงวดของน้ำระบายความร้อนด้วย Cooling tower ด้วย

ด้วยเหตุผลข้างต้น เนื่องจากเราไม่สามารถหลีกเลี่ยงความสกปรกและการสึกหรอของชิ้นส่วนต่างๆ ในการเดินเครื่องยนต์สันดาปภายในได้ เพื่อให้สามารถเดินเครื่องอย่างต่อเนื่องโดยมีสมรรถนะสูงสม่ำเสมอ จึงต้องมีการใช้งาน ซ่อมบำรุง และควบคุมอย่างเป็นระบบ ในการทำเช่นนี้ต้องกำหนดระยะเวลาในการซ่อมบำรุง กำหนดเกณฑ์เกี่ยวกับขอบเขตในการ Overhaul และการเปลี่ยนชิ้นส่วนต่างๆ เพื่อให้เกิดการอนุรักษ์พลังงานและความคุ้มค่าสูงสุด

1.9.5 ปัญหาสิ่งแวดล้อม

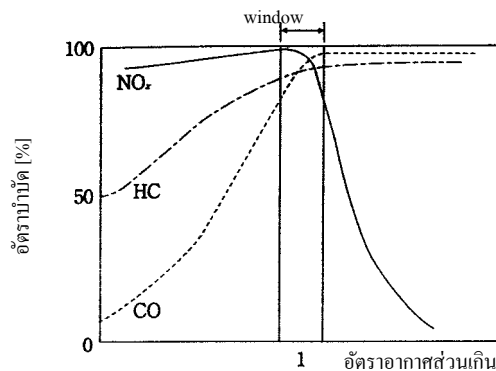
ปัญหาสิ่งแวดล้อมของเครื่องยนต์สันดาปภายใน ได้แก่ เสียง การสั่นสะเทือน มลพิษทางอากาศ เป็นต้น

แหล่งกำเนิดเสียงหลักๆ มีอยู่ 3 แห่ง ได้แก่ ตัวเครื่องยนต์ เครื่อง Supercharger และท่อไอเสีย สำหรับ Supercharger สามารถป้องกันได้ด้วยการติดตั้งห้องดูดไอดี และใช้เครื่องเก็บเสียงไอดีกับวัสดุดูดซับเสียงบุผนังภายในห้อง สำหรับเสียงท่อไอเสียเนื่องจากมีเสียงความถี่ต่ำรวมอยู่ด้วย จึงต้องป้องกันให้ครอบคลุมถึงความดันอากาศของเสียงความถี่ต่ำในช่วงที่หูไม่ได้ยินอีกด้วย

สำหรับการสั่นสะเทือนเราสามารถแก้ไขได้ดี โดยทั่วไปการสั่นสะเทือนจะไม่ค่อยเป็นปัญหา

สารก่อมลพิษทางอากาศที่มีอยู่ในก๊าซไอเสีย ประกอบด้วย ไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) ออกไซด์ของกำมะถัน (SO_x) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ไฮโดรคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้ (HC) ฝุ่นละออง เป็นต้น สำหรับ SO_x สามารถแก้ไขได้ด้วยการเลือกเชื้อเพลิงที่ใช้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเครื่องยนต์แก๊สซึ่งใช้เชื้อเพลิงที่สะอาด จึงเผาไหม้ได้ดี มีความสกปรกและการสึกหรอจากสารที่เหลือจากการเผาไหม้ต่างๆ น้อย รวมทั้งสามารถลดและกำจัด NO_x , CO, HC ฯลฯ ได้ง่ายกว่าอีกด้วย

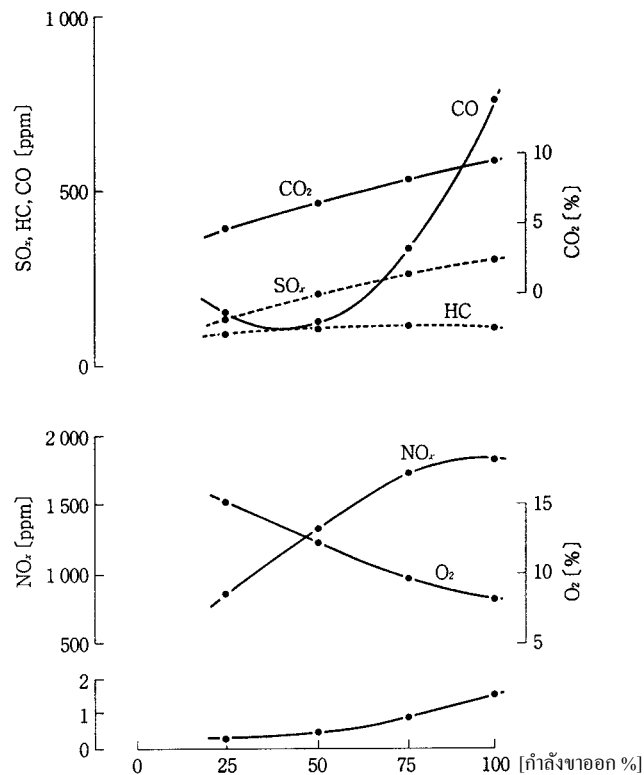
เทคโนโลยีการลด NO_x มีดังต่อไปนี้ กล่าวคือ มาตรการด้านโครงสร้างภายในของเครื่องยนต์ ได้แก่ (1) วิธีหมุนเวียนก๊าซไอเสีย (EGR) (2) วิธีเผาไหม้เบาบาง (Lean burn) และ (3) วิธี Three-way catalytic converter (ตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งสามารถบำบัด HC, CO, NO_x ทั้งสามตัวได้พร้อมๆ กัน) ซึ่งจะนำไอเสียมาบำบัดภายนอกเครื่องยนต์ หรือนำวิธีการข้างต้นมาใช้ร่วมกัน วิธี Three-way catalytic converter มีสมรรถนะสูงในการบำบัดก๊าซไอเสีย แต่จำเป็นต้องเดินเครื่องยนต์ด้วยอัตราอากาศส่วนเกินใกล้เคียงกับ 1.0 ดังรูปที่ 1.43 นอกจากนี้บางครั้งยังเกิดปัญหาจากสารทำลายตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นองค์ประกอบการสารเติมแต่งเชื้อเพลิงและน้ำมันหล่อลื่นอีกด้วย



รูปที่ 1.43 คุณลักษณะการบำบัดก๊าซไอเสียของ Three-way catalytic converter

สำหรับองค์ประกอบไนโอเสียของเครื่องยนต์ดีเซล องค์ประกอบ HC และ CO จะน้อยกว่าเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยหัวเทียน อย่างไรก็ตาม ปัญหาคือ SO_x , NO_x และเขม่า (รูปที่ 1.44) โดย SO_x สามารถแก้ไขได้ด้วยการเลือกเชื้อเพลิงที่ใช้ แต่สำหรับ NO_x จะมีความสัมพันธ์ตรงข้ามกับประสิทธิภาพความร้อนและการเกิดเขม่า นอกจากนี้ ยังไม่สะดวกในการใช้ Three-way catalytic converter ที่อธิบายข้างต้น จึงมีการพัฒนาวิธี EGR และ Three-way catalytic converter สำหรับเครื่องยนต์ดีเซลขึ้น ปัจจุบันแม้ว่าจะพัฒนาดีขึ้นมาก แต่ก็ยังมีปัญหาอยู่

การใช้เครื่องยนต์ Supercharge เทียบกับเครื่องยนต์ปกติ ที่กำลังขาออกเท่ากันแล้วจะเกิดฝุ่นละอองน้อยกว่า แต่จะมี NO_x เพิ่มขึ้น



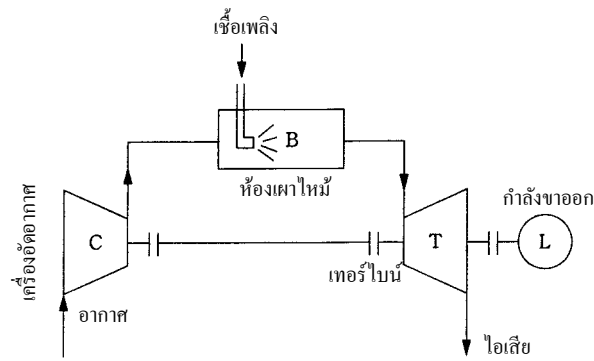
รูปที่ 1.44 ก๊าซไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซลที่ช่วงโหลดค่าต่างๆ

1.10 กังหันก๊าซ หลักการทำงานของกังหันก๊าซ

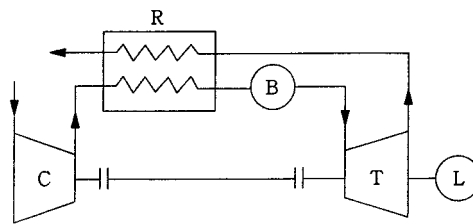
1.10.1 ประเภทและสมบัติ

ก๊าซเทอร์ไบน์เป็นเครื่องยนต์ที่ทำงานด้วยการให้ความร้อนแก่ Working fluid เช่น อากาศความดันสูงที่ผลิตจากเครื่องอัดอากาศ ฯลฯ ในห้องเผาไหม้จนมีอุณหภูมิสูง แล้วนำไปขยายตัวที่เทอร์ไบน์เพื่อหมุนเพลาลูกสูบ และแปลงเป็นแรงขับเคลื่อน ก๊าซเทอร์ไบน์มีความแตกต่างจากเครื่องยนต์สันดาปภายในแบบลูกสูบ (แบบปริมาตรแทนที่) ข้างต้นตรงที่ กระแสของ Working fluid มีความต่อเนื่อง และสามารถทำให้ความเร็วกระแสเฉลี่ยภายในเครื่องยนต์มีความเร็วสูงได้ จึงมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา และเหมาะกับการผลิตเครื่องยนต์ที่มีขนาดใหญ่ นอกจากนี้ยังไม่จำเป็นต้องใช้น้ำระบายความร้อนจำนวนมากในการระบายความร้อนของลูกสูบเหมือนกับเครื่องยนต์สันดาปภายในแบบปริมาตรแทนที่ แต่ต้องใช้ระบายความร้อนในแบร์ริงเท่านั้น จึงแทบไม่มีความสูญเสียจากการระบายความร้อน

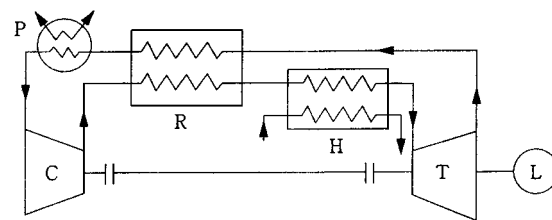
ก๊าซเทอร์ไบน์แบ่งเป็นแบบไซเคิลเปิดกับไซเคิลปิด แบบแรกยังแบ่งเป็นแบบ Heavy duty (สำหรับใช้งานหนัก) สำหรับกำเนิดไฟฟ้าเป็นหลัก กับแบบที่ใช้เป็นเครื่องยนต์เจ็ทสำหรับเครื่องบินเป็นหลัก แบบไซเคิลเปิดจะใช้ตัวก๊าซเผาไหม้เองเป็น Working fluid ของเทอร์ไบน์ ในขณะที่แบบไซเคิลปิดจะใช้ของไหลจุดเดือดต่ำ เช่น ไนโตรเจน ฮีเลียม คาร์บอนไดออกไซด์ ฯลฯ ในไซเคิลปิด ทั้งสองแบบ Working fluid จะอยู่ในสถานะก๊าซเท่านั้น ไม่มีการเปลี่ยนสถานะ (รูปที่ 1.45)



(a) simple open gas turbine cycle



(b) regenerative open gas turbine cycle



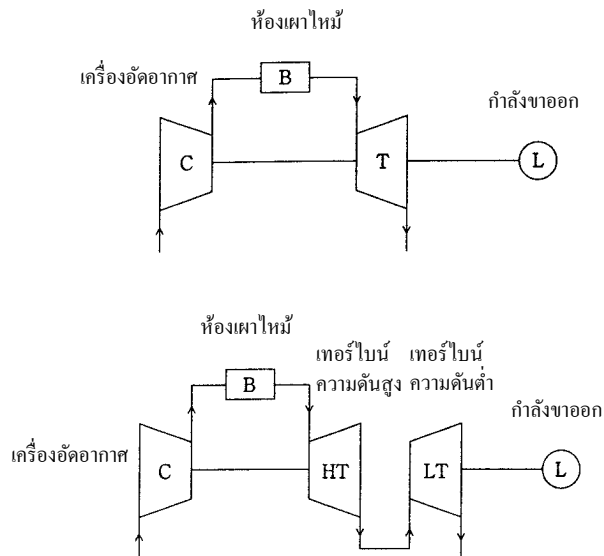
(c) closed gas turbine cycle

B : ห้องเผาไหม้
C : เครื่องอัดอากาศ
T : เทอร์ไบน์
L : กำลังขาออก (ภาระ)
R : regenerative heat exchanger
H : เครื่องให้ความร้อน
P : อุปกรณ์ระบายความร้อน

รูปที่ 1.45 แผนภาพของ Gas turbine cycle

ก๊าซเทอร์ไบน์ส่วนใหญ่ในทางปฏิบัติแล้วจะเป็นแบบ Simple open gas turbine โดยในก๊าซเทอร์ไบน์ขนาดเล็ก เครื่องยนต์เดี่ยวๆ จะมีประสิทธิภาพความร้อนต่ำ อย่างไรก็ตาม ในก๊าซเทอร์ไบน์ขนาดใหญ่ซึ่งมีอุณหภูมิสูงขึ้นจะมีประสิทธิภาพสูงถึง 40% แม้ว่าจะไม่สามารถใช้เชื้อเพลิงชนิดหนักมากได้ แต่ก็สามารถรองรับเชื้อเพลิงได้หลายชนิด นอกจากนี้ ยังมีการกำเนิดไฟฟ้าด้วยคอมไบน์ไซเคิลโดยนำมาใช้ร่วมกับกังหันไอน้ำ และการทำ Repowering ซึ่งได้รับความนิยมเนื่องจากอนุรักษ์พลังงานและติดตั้งได้รวดเร็ว

ส่วนประกอบสำคัญของก๊าซเทอร์ไบน์มี 3 ส่วน ได้แก่ เครื่องอัดอากาศ ห้องเผาไหม้ และเทอร์ไบน์



รูปที่ 1.46 หลักการของก๊าซเทอร์ไบน์แบบเพลลาเดี่ยวและเพลลาคู่

แบ่งออกเป็นแบบเพลลาเดี่ยวและเพลลาคู่ดังรูปที่ 1.46 โดยแบบเพลลาเดี่ยวจะมีเพลลาของเครื่องปรับอากาศกับเทอร์ไบน์ขาออกร่วมกันเป็นชิ้นเดียว ส่วนแบบเพลลาคู่จะมีเพลลาของเครื่องอัดอากาศ และเทอร์ไบน์ขับเคลื่อนเครื่องอัดอากาศร่วมกันเป็นชิ้นเดียว แต่จะเป็นคนละเพลลา กับเพลลาเทอร์ไบน์ขาออก ดังนั้น แบบแรกจะมีโครงสร้างไม่ซับซ้อน มีความเฉื่อยของเพลลาสูง เหมาะกับการเดินเครื่องด้วยความเร็วคงที่ เช่น ในการกำเนิดไฟฟ้า เป็นต้น ส่วนแบบหลังจะมีโครงสร้างซับซ้อนกว่าบ้าง แต่เนื่องจากสามารถหมุนเพลลาของเครื่องอัดอากาศด้วยความเร็วเท่าใดก็ได้เพื่อรองรับภาระ ดังนั้น จึงเหมาะกับการเดินเครื่องที่ต้องเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบเป็นช่วงกว้าง เช่น เครื่องบิน เป็นต้น เทอร์ไบน์แบบนี้จะมีคุณลักษณะที่ภาระไม่เต็มพิกัดดีมาก เทอร์ไบน์ทั้งสองแบบจะมี Effective output ของเพลลาขาออกเท่ากับกำลังขับที่เกิดจากเทอร์ไบน์ลบด้วยกำลังขับที่สิ้นเปลืองไปในเครื่องอัดอากาศ หากมีประสิทธิภาพความร้อนเท่ากับ 35% อัตราส่วนระหว่างกำลังขับเครื่องอัดอากาศต่อ Effective output ประมาณ 2 ต่อ 1

เนื่องจากเครื่องอัดอากาศต้องรองรับอัตราไหลของอากาศสูง ดังนั้น โดยมากจึงมักใช้เครื่องอัดอากาศแบบ Axial flow สมบัติของเครื่องอัดอากาศแบบ Axial flow มีดังต่อไปนี้

- * มีอัตราไหลต่อพื้นที่ด้านหน้าสูง สามารถอัดอากาศที่มีอัตราไหลสูงได้สะดวก
- * มีประสิทธิภาพสูงแม้จะติดตั้งหลายชั้นหรือเมื่อมีอัตราส่วนอัดความดันสูง
- * มีโครงสร้างซับซ้อน มีใบพัดจำนวนมาก ต้องใช้วิศวกรรมละเอียดในการผลิตใบพัดจึงมี

ราคาแพง เป็นต้น

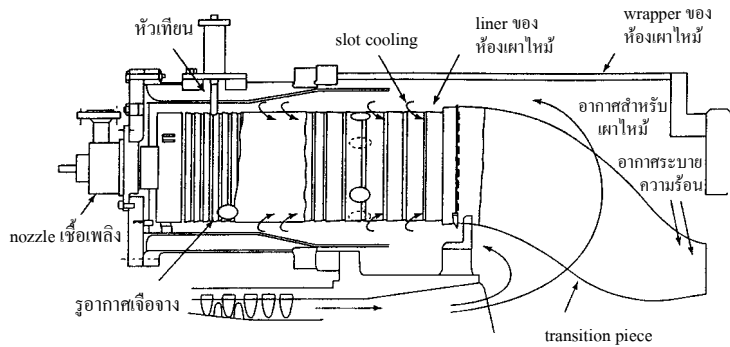
บริเวณที่เกิดการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ จะเกิดการเผาไหม้ที่ภาระสูง จึงมีอุณหภูมิสูงถึง 1,500-2,000°C เนื่องจากความร้อนของการแผ่รังสีความร้อนจากเปลวไฟจะมีค่าสูง ทำให้ภายในห้องเผาไหม้เสียหายได้ง่าย ดังนั้น โดยทั่วไปจะทำการระบายความร้อนแบบ Film cooling ด้วยอากาศ รูปที่ 1.47 แสดงตัวอย่างโครงสร้างของห้องเผาไหม้

รูปกระบอก อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ออกแบบไว้ของห้องเผาไหม้จะมีค่าประมาณ 40-90 ซึ่งสำหรับก๊าซผสมสมมาตรจะเป็นขีดจำกัดที่สามารถเผาไหม้แบบ Lean burn ได้ ดังนั้น จึงแบ่งอากาศทั้งหมดเป็นอากาศสำหรับเผาไหม้กับอากาศสำหรับเจือจาง เพื่อรักษาบริเวณเผาไหม้ให้อยู่ในช่วงที่เผาไหม้ได้ ในแง่ของสมรรถนะ จำเป็นต้องควบคุมความเข้มข้นของ NO_x ให้ได้ตามที่กำหนดโดยที่ตรงการ

ตอนที่ 3 บทที่ 1 ระบบความร้อนและอุปกรณ์ที่ใช้ไอน้ำ

เผาไหม้ที่มีเสถียรภาพให้เหมาะสมกับประเภทของเชื้อเพลิงตั้งแต่เริ่มติดเครื่องจนถึงช่วงภาระสูง ดังนั้น จึงใช้วิธีเผาไหม้แบบ Lean mixed combustion หรือ 2-stage combustion

เทคโนโลยีที่เป็นพื้นฐานของความก้าวหน้าของก๊าซเทอร์ไบน์สำหรับงานพาณิชย์ ในแง่วัสดุศาสตร์ได้แก่ วัสดุทนความร้อนซึ่งมีความแข็งแรงสูงที่อุณหภูมิสูง เช่น โลหะผสมนิกเกิล โลหะผสมโคบอลต์ การเพิ่มความทนทานต่อการผุกร่อน และกัดกร่อนโดยกรด และการเคลือบสารป้องกันความร้อน ในแง่การระบายความร้อน ได้แก่ เทคโนโลยีการระบาย



รูปที่ 1.47 ตัวอย่างโครงสร้างของห้องเผาไหม้ของก๊าซเทอร์ไบน์

ความร้อนใบพัดเทอร์ไบน์และห้องเผาไหม้ อุณหภูมิขาเข้าของก๊าซเทอร์ไบน์จะถูกจำกัดด้วยความสามารถในการทนความร้อนของวัสดุ และวิธีการระบายความร้อนของใบพัดเหล่านี้ อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันสามารถทำได้ถึง 1350°C และกำลังมีการพัฒนาระดับ 1500°C อยู่ ตัวกลางระบายความร้อนที่นำมาใช้ในทางปฏิบัติได้แก่อากาศ เกือบทั้งหมดจะใช้วิธีระบายความร้อนด้วยการพาความร้อน (ภายใน) อย่างไรก็ตาม ยังมีวิธีระบายความร้อนแบบ Impingement cooling, Film cooling และ Effusion cooling อีกด้วย

ปัจจุบันมีการพัฒนาเพื่อนำน้ำ ไอน้ำ ฯลฯ มาใช้เป็นตัวกลางระบายความร้อน นอกจากนี้ ในแง่ของวัสดุศาสตร์ ยังมีการวิจัยค้นคว้าเกี่ยวกับโลหะผสมแบบ One-way solidification โลหะผสมผลึกเดี่ยว และเซรามิกอีกด้วย

1.10.2 สมรรถนะ

หากไม่คิดถึงความดันสูญเสีย ความสูญเสียจากการรั่ว ความร้อนสูญเสีย และความสูญเสียเชิงกลแล้ว สมรรถนะของ Simple gas turbine cycle (Brayton cycle) ซึ่งประกอบด้วยการอัด ให้ความร้อน ระเบิด คายความร้อน จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนอุณหภูมิ (อัตราส่วนระหว่างอุณหภูมิสูงสุดกับอุณหภูมิต่ำสุดของไซเคิล) อัตราส่วนความดัน (อัตราส่วนระหว่างความดันขาออกต่อขาเข้าเครื่องอัดอากาศ) ประสิทธิภาพของเทอร์ไบน์ และประสิทธิภาพของเครื่องอัดอากาศ โดยประสิทธิภาพความร้อน η_{th} ตามทฤษฎีจะคำนวณได้จากสูตรต่อไปนี้

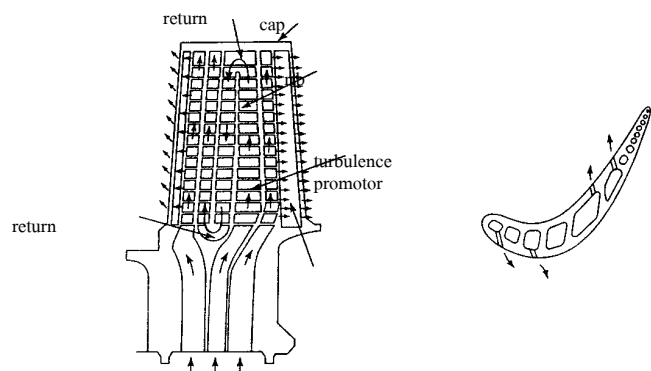
$$\eta_{th} = 1 - (1/\xi)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (1.17)$$

ซึ่งเป็นฟังก์ชันของอัตราส่วนความดัน (ξ) เท่านั้น อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติกระบวนการในการอัด และระเบิดจะไม่ใช้การเปลี่ยนแปลงที่มีเอนโทรปีคงที่ และต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพฉนวนความร้อนของเครื่องอัดอากาศ และเทอร์ไบน์ด้วย รวมทั้งความดันสูญเสีย ความร้อนจำเพาะของก๊าซ และอัตราส่วนความร้อนจำเพาะของก๊าซ ยังขึ้นอยู่กับการอุณหภูมิ และองค์ประกอบของก๊าซ ทำให้ประสิทธิภาพขึ้นกับอัตราส่วนอุณหภูมิด้วย ในทางปฏิบัติ

จึงมีอัตราส่วนความดันที่เหมาะสมที่สุดค่าหนึ่งซึ่งทำให้ประสิทธิภาพความร้อนหรือกำลังขาออกจำเพาะ (กำลังขาออกต่ออัตราไหลของอากาศหนึ่งหน่วย $[kW/kg/s]$) มีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิเข้าเทอร์ไบน์หนึ่งๆ กล่าวคือ หากเลือกใช้อัตราส่วนอากาศที่เหมาะสมค่าหนึ่งแล้ว ประสิทธิภาพเชิงความร้อนและกำลังขาออกจำเพาะจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเข้าเทอร์ไบน์สูงขึ้น

ด้วยความเป็นมาข้างต้น ก๊าซเทอร์ไบน์จึงมีประสิทธิภาพสูงขึ้นและมีกำลังขาออกเพิ่มขึ้น ด้วยการเพิ่มอุณหภูมิของก๊าซเข้าเทอร์ไบน์เป็นหลัก ซึ่งเป็นไปได้ด้วยการพัฒนาเทคโนโลยีด้านวัสดุศาสตร์ สำหรับชิ้นส่วนอุณหภูมิสูง เช่น Moving blade, Fixed blade และห้องเผาไหม้ และเทคโนโลยีการระบายความร้อน ปัจจุบันมีประสิทธิภาพความร้อนถึง 40% และมีกำลังขาออกถึง 350 MW

การเพิ่มสมรรถนะของการระบายความร้อนใบพัด และจำกัดอัตราไหลของอากาศระบายความร้อนให้น้อยที่สุดในเวลาเดียวกัน จะต้องมียังช่องทางเดินอากาศระบายความร้อนที่มีรูปร่างซับซ้อนและละเอียดอ่อน ความก้าวหน้าของเทคโนโลยีการหล่อและการขึ้นรูปโลหะละเอียดมีส่วนสนับสนุนการผลิตช่องทางเดินอากาศนี้ รูปที่ 1.48 แสดงตัวอย่าง Moving blade ทำงานที่อุณหภูมิ $1 < 300^{\circ}C$ ซึ่งระบายความร้อนภายในด้วยอากาศ



รูปที่ 1.48 ตัวอย่างใบพัดที่มีการระบายความร้อนสำหรับก๊าซเทอร์ไบน์ $1300^{\circ}C$

นอกจากนี้ หากสามารถกักความร้อนของชิ้นส่วนโลหะได้แล้ว จะมีผลให้

- เพิ่มประสิทธิภาพความร้อนเนื่องจากอุณหภูมิเข้าเทอร์ไบน์สูงขึ้น
- เพิ่มประสิทธิภาพความร้อนเนื่องจากปริมาณอากาศระบายความร้อนลดลง
- ไม่ต้องมีรูระบายอากาศและยึดอายุการใช้งานเนื่องจากโลหะมีอุณหภูมิต่ำลง

การทำ Regeneration หรือ Reheating ก็ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพความร้อนเช่นกัน แต่เนื่องจาก Working fluid ใน Brayton cycle จะมีสถานะเป็นก๊าซสถานะเดียวเท่านั้น ถ้าต้องการทำ Regeneration หรือ Reheating เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะต้องมีพื้นที่ถ่ายเทความร้อนมาก ทำให้มีความดันสูญเสียเพิ่มขึ้น อาจทำให้ไม่คุ้มทุนได้ ดังนั้น ก๊าซเทอร์ไบน์ที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบันจึงเป็น Simple open cycle ไม่มีเครื่องใดที่ทำ Reheating และไม่มีก๊าซเทอร์ไบน์ขนาดใหญ่เครื่องใดที่มี Regenerator ใดๆก็ตาม ปัจจุบันมีการพัฒนาก๊าซเทอร์ไบน์ขนาดหลายสิบล kW จนถึงหลายพัน kW ซึ่งมี Regenerator เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ และมีการนำมาใช้ในการ Cogeneration มากขึ้น

ในก๊าซเทอร์ไบน์แบบเพลาดียวซึ่งมีความเร็วรอบคงที่ เช่น ก๊าซเทอร์ไบน์สำหรับกำเนิดไฟฟ้า เนื่องจากอัตราไหลโดยปริมาตรของอากาศที่ไหลผ่านเครื่องอัดอากาศจะมีค่าคงที่เสมอ อัตราไหลโดยมวลจึงขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และความดันของบรรยากาศ เมื่ออัตราไหลโดยมวลเพิ่มขึ้น ไม่เพียงแต่เทอร์ไบน์จะมีกำลังขาออกสูงขึ้นเท่านั้น อัตราส่วนความดันยังเพิ่มขึ้นเกือบจะแปรผันตามกัน ทำให้มีประสิทธิภาพความร้อน

สูงขึ้นด้วย มาตรฐาน JIS B 0128 ได้กำหนดพิกัดกำลังขาออกมาตรฐานตามมาตรฐาน ISO ให้ใช้ค่าเมื่ออากาศที่หน้าแปลน (Flange) ขาเข้าเครื่องอัดอากาศมีอุณหภูมิ 15°C ความดันรวม 101.3 kPa ความชื้นสัมพัทธ์ 60% เป็นค่ามาตรฐาน แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 30°C กำลังขาออกจะเปลี่ยนค่อนข้างมาก ตัวอย่างเช่น ลดลง 10% เป็นต้น ดังนั้น ในการออกแบบจึงต้องระมัดระวังไม่ให้ออกกำลังขาออกไม่เพียงพอในหน้าร้อน

1.10.3 เชื้อเพลิงและการเผาไหม้

เนื่องจากก๊าซเทอร์โบไบนมีความยืดหยุ่นสูงในการเลือกใช้เชื้อเพลิง ดังนั้น จึงเป็นที่คาดได้ว่า มันจะสามารถรองรับเชื้อเพลิงชนิดใหม่ๆ เช่น เชื้อเพลิงที่แปลงมาจากถ่านหินซึ่งจะเกิดขึ้นในอนาคตอันใกล้ เมทanol ก๊าซผลพลอยได้ที่มีค่าความร้อนต่ำ ไฮโดรเจน เป็นต้น แต่ประสิทธิภาพจะขึ้นอยู่กับประเภทของเชื้อเพลิงด้วย รวมทั้งการใช้น้ำมันคุณภาพต่ำจะต้องมีมาตรการป้องกันการผูกมัดที่ดี

โซเดียม (Na) และวาเนเดียม (V) ในเชื้อเพลิงเป็นสารหลักที่ทำให้มีขี้เถ้าไปเกาะและเกิดการผูกมัด เมื่อก๊าซเทอร์โบไบนมีอุณหภูมิสูงขึ้น ปัญหาเรื่อง High temperature corrosion จากสารเหล่านี้จะมีความรุนแรงยิ่งขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้น้ำมันชนิดหนักแล้ว สารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ โลหะ โดยเฉพาะอย่างยิ่งองค์ประกอบพวกโลหะต่าง เช่น Na และโปแตสเซียม (K) ที่อยู่ในน้ำมันเมื่อเผาไหม้แล้ว จะทำปฏิกิริยากับกำมะถัน (S) เกิดเป็นสารประกอบออกไซด์และซัลไฟด์ต่างๆ เช่น โซเดียมซัลเฟต หรือ Vanadium pentoxide เป็นต้น ขี้เถ้าเหล่านี้ทุกตัวมีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าอุณหภูมิของก๊าซเผาไหม้ ขี้เถ้า Eutectic (โลหะผสมที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ) ซึ่งมีสารเหล่านี้ผสมอยู่จะยิ่งมีจุดหลอมเหลวต่ำกว่านั้นอีก และจะกระเด็นไปเกาะที่ Moving blade และ Fixed blade ของเทอร์โบไบนในสภาพหลอมเหลวหรือกึ่งหลอมเหลว จึงไปทำลายชั้นออกไซด์ที่ผิวหน้า สารประกอบของวาเนเดียมที่สัมผัสกับผิวหน้าของโลหะจะดูดซับออกซิเจนจากบรรยากาศรอบข้างตลอดเวลา แล้วใช้ออกซิเจนเป็นพาหะ ด้วยออกซิเจนนี้จะทำให้เกิดการออกซิเดชันอย่างรวดเร็วเข้าไปถึงภายใน Moving blade และ Fixed blade จึงเกิดการผูกมัดอย่างรุนแรง ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า High temperature corrosion

ดังนั้น กรณีที่จะใช้น้ำมันชนิดหนัก จะต้องติดตั้งเครื่องปรับสภาพเชื้อเพลิง เช่น เครื่องทำความสะอาด ฯลฯ เติมน้ำมันเติมแต่ง และควบคุมอุณหภูมิขาเข้าเทอร์โบไบนไม่ให้สูงกว่า 650°C แต่จะทำให้กำลังขาออกและประสิทธิภาพลดต่ำลงด้วย นอกจากนี้ยังสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงอีกด้วย เนื่องจากเหตุผลที่ใช้น้ำมันชนิดหนักก็เพราะคาดหวังความคุ้มค่าโดยใช้เชื้อเพลิงราคาถูก แต่หากต้องเสียค่าใช้จ่ายจำนวนมากเพื่อปรับสภาพเชื้อเพลิงหรือทำให้ประสิทธิภาพต่ำลงก็ไม่ค่อยมีประโยชน์

อุณหภูมิขาเข้าเทอร์โบไบนยังมีค่าสูง ปริมาณสารเหล่านี้ที่ยอมให้มีได้ในเชื้อเพลิงก็ยิ่งต่ำลง ในก๊าซเทอร์โบไบนสำหรับเรือจะมีเกลือในบรรยากาศเหนือผิวทะเลรวมทั้งโซเดียมซัลเฟตในขี้เถ้าจากการเผาไหม้ เมื่ออุณหภูมิสูงถึง 845°C หรือสูงกว่า จะเกิด High temperature corrosion อย่างรวดเร็ว ปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นในก๊าซเทอร์โบไบนที่ใช้น้ำมันแต่ติดตั้งรีมทะเลหรือในทะเลทรายที่มีเกลือเป็นจำนวนมากด้วย จึงต้องใช้ความระมัดระวัง

1.10.4 การเดินเครื่องและการบำรุงรักษา

ปรากฏการณ์ Surging ที่เกิดในเครื่องอัดอากาศ เป็นสิ่งที่มีอิทธิพลสูงที่สุดในการจำกัดขอบเขตการเดินเครื่องของก๊าซเทอร์โบไบน ปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนความดัน เมื่ออัตราไหลต่ำๆ จนถึงจุดหนึ่ง จะทำให้เกิดเสียงดัง และความดันในท่อเปลี่ยนแปลงไป จึงไม่สามารถเดินเครื่องอัดอากาศอย่างมีประสิทธิภาพ ในขณะที่เดียวกันที่ตัวเครื่องอัดอากาศเอง

- ชิ้นส่วนเคลื่อนที่ (Rotor, Moving blade ฯลฯ) อาจจะชนกับชิ้นส่วนอยู่นิ่ง (Shaft seal, fixed blade ฯลฯ) เนื่องจากการสั่นสะเทือนอย่างรุนแรงของตัวเครื่องอัดอากาศ
- ความเค้นที่กระทำต่อ Moving blade และ Fixed blade เพิ่มขึ้นเนื่องจาก Aerodynamic damping force ลดลงอย่างมาก
- ใบพัดเกิดความเสียหายเนื่องจากอุณหภูมิของกระแสอากาศเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการหมุนเวียนของกระแสอากาศในเครื่องอัดอากาศ

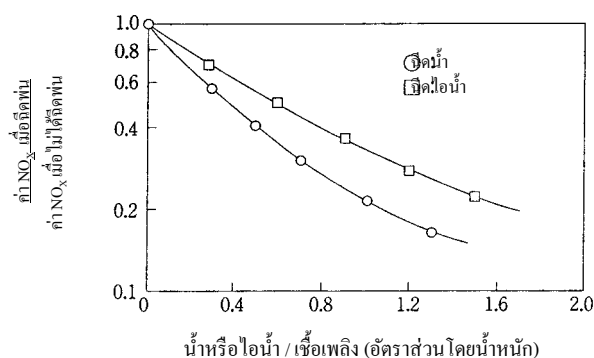
1.10.5 ปัญหาสิ่งแวดล้อม

ปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากก๊าซเทอร์ไบน์ หลักๆ แล้วจะมีเรื่องเสียงดังกับมลพิษทางอากาศเสียงดังที่เกิดจากท่อไอเสีย เกิดจากการเพิ่มความดัน และการปั่นป่วนของกระแสอากาศที่ไหลผ่าน Moving blade และ Fixed blade ในเครื่องอัดอากาศ โดยมากจะเป็นเสียงความถี่สูง ในจำนวนเสียงดังจากก๊าซเทอร์ไบน์ โดยทั่วไปเสียงนี้จะดังที่สุด ความดังของเสียงจะขึ้นกับปริมาณไอเสียของเครื่องอัดอากาศ อัตราส่วนความดัน ความเร็วรอบ เส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัด จำนวนชิ้น การเรียงตัวของ Moving blade และ Fixed blade เป็นต้น วิธีแก้ไขสามารถใช้เครื่องเก็บเสียงในการดูดซับเสียงได้ อย่างไรก็ตาม เครื่องเก็บเสียงทำให้เกิดความดันตก ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่พึงปรารถนาในแง่ของประสิทธิภาพ เสียงดังจากท่อไอเสียจะเกิดจากเสียงเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ และจากการขยายตัวและการปั่นป่วนของก๊าซเผาไหม้ เทียบกันแล้วจะค่อยกว่าเสียจากท่อไอเสีย แต่เนื่องจากไอเสียมีอุณหภูมิสูง วัสดุเก็บเสียงจะต้องทนความร้อนและต้องใช้วัสดุที่ทนต่อกระแสก๊าซความเร็วสูงได้ เนื่องจากเป็นเสียงความถี่ต่ำ มาตรการแก้ไขจึงค่อนข้างยากกว่า วิธีที่มีประสิทธิภาพได้แก่การใช้ปล่องไอเสียสูงๆ

ส่วนเสียงที่ทะลุผ่าน Casing มา โดยทั่วไปจะแก้ไขด้วยการหุ้มวัสดุเก็บเสียง

ตามที่กล่าวไปแล้วข้างต้น เสียงโลหะความถี่สูงสามารถลดได้ระดับหนึ่ง ด้วยการใช้ที่ครอบเก็บเสียง และเครื่องเก็บเสียง แต่เสียงไอเสียที่มีความถี่ต่ำ และเสียงการเผาไหม้ที่หูไม่สามารถได้ยินสามารถทำให้กระจกหน้าต่างที่ห่างออกไปหลาย km เกิดการสั่นสะเทือนได้ จึงต้องใช้ความระมัดระวัง

สำหรับมลพิษทางอากาศ ปัจจุบันเนื่องจากก๊าซเทอร์ไบน์มีอุณหภูมิสูงขึ้นทำให้เชื้อเพลิงที่ใช้ต้องเปลี่ยนเป็นชนิดเบา จึงไม่มีปัญหาเรื่องข้อกำหนด SO_x ส่วนการเกิด NO_x หลักๆ แล้วจะเป็น Thermal NO_x โดยมี Fuel NO_x น้อยมาก วิธีแก้ไขทางหนึ่งได้แก่ การฉีดพ่นน้ำหรือไอน้ำเข้าไปในก๊าซเผาไหม้ ทำให้อุณหภูมิสูงสุดของการเผาไหม้ลดต่ำลง รูปที่ 1.49 แสดงตัวอย่างประสิทธิภาพของวิธีดังกล่าว ในกรณีนี้ อัตราการไหลเชิงมวลของกระแสก๊าซจะเพิ่มขึ้นเท่ากับน้ำ/ไอน้ำที่ฉีดพ่นเข้าไป จึงมีผลทำให้กำลังขาออกเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามในกรณีที่ใช้น้ำ แม้ว่าในแง่การลด NO_x จะมีประสิทธิภาพสูง แต่จะสูญเสียความร้อนแฝงทำให้ความสูญเสียในก๊าซไอเสียเพิ่มขึ้น และประสิทธิภาพความร้อนลดลง จึงมีการนำ Burner แบบแห้งที่ให้ NO_x ต่ำ เช่น การเผาไหม้โดยใช้ Lean burn เป็นต้น



รูปที่ 1.49 ตัวอย่างประสิทธิภาพของการลด NO_x ด้วยการฉีดพ่นน้ำหรือไอน้ำ

1.11 ระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนร่วม (Cogeneration)

1.11.1 หลักการทำงาน

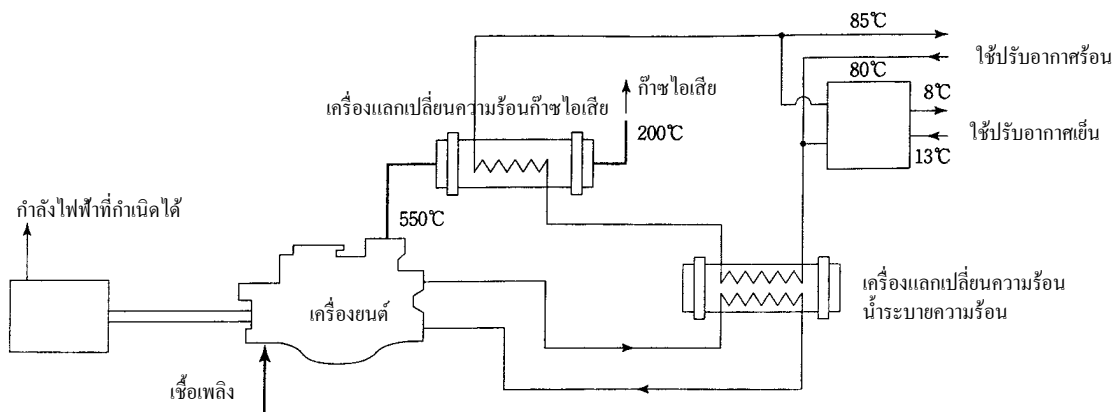
ระบบโคเจเนอเรชัน เป็น Hybrid system ที่สามารถผลิตและจ่ายพลังงานทุติยภูมิตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปจากแหล่งพลังงานปฐมภูมิชนิดเดียว โดยทั่วไปจะเป็นระบบที่ผลิตพลังงานทุติยภูมิที่เป็นแรงขับเคลื่อน (รวมถึงพลังงานไฟฟ้า) และความร้อนพร้อมๆ กัน เรียกว่า “Dual-purpose electricity and steam generation”

เครื่องต้นกำลังจะใช้เครื่องยนต์แก๊ส เครื่องยนต์ดีเซล ก๊าซเทอร์ไบน์ กังหันไอน้ำ ฯลฯ แต่โดยทั่วไปจะไม่รวมถึงการจ่ายความร้อนร่วมจากกังหันไอน้ำ (ตัวอย่างเช่น Extraction turbine หรือ Back pressure turbine ฯลฯ) ดังนั้นจึงต้องระมัดระวังในกรณีที่จะเปรียบเทียบกับระบบของทางตะวันตก ในอนาคตเซลล์เชื้อเพลิงและ Stirling engine อาจสามารถนำมาใช้เป็นเครื่องต้นกำลังสำหรับโคเจเนอเรชันได้ ในที่นี้จะเรียกระบบที่มีพื้นฐานบนเครื่องยนต์สันดาปภายในและก๊าซเทอร์ไบน์ ฯลฯ โดยไม่คิดถึงกังหันไอน้ำว่า “ระบบโคเจเนอเรชันในความหมายแคบ” และหากไม่ระบุไว้เป็นพิเศษจะหมายถึงกรณีนี้เท่านั้น

โครงสร้างหลักของระบบโคเจเนอเรชัน ประกอบด้วยเครื่องต้นกำลัง (รวมทั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ฯลฯ) เพื่อผลิตแรงขับเคลื่อน และเครื่องนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ (เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เครื่องกำเนิดไอน้ำ หม้อต้มน้ำร้อน ฯลฯ) ซึ่งมีหน้าที่นำความร้อนทิ้งกลับมาใช้โดยแปลงเป็นพลังงานทุติยภูมิ เครื่องนำความร้อนไปใช้ประโยชน์ (เครื่องทำความเย็นแบบดูดกลืน ปั๊มความร้อน ฯลฯ) เครื่องส่งความร้อน (ปั๊ม ท่อ ฯลฯ) เครื่องสะสมความร้อน (ถังน้ำเย็น น้ำร้อน ฯลฯ) เป็นต้น

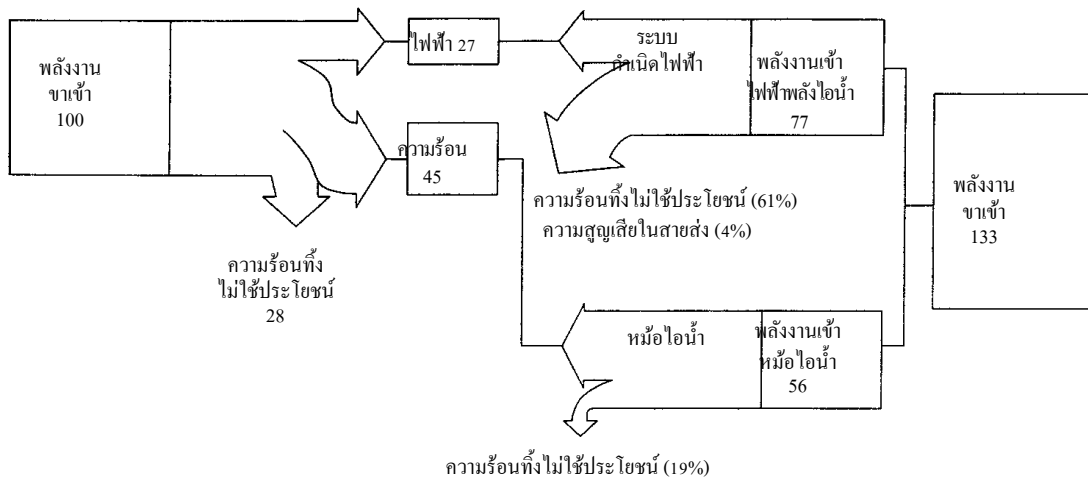
การนำความร้อนกลับมาใช้ นอกจากนำมาจากก๊าซไอเสียอุณหภูมิสูงแล้ว ในเครื่องยนต์แก๊สและเครื่องยนต์ดีเซลยังสามารถนำมาจากน้ำระบายความร้อนเสื่อสุบได้อีกด้วย ความร้อนเหล่านี้เป็นความร้อนสูญเสียส่วนใหญ่จากเครื่องต้นกำลัง ซึ่งมีสัดส่วนถึงประมาณ 30% การนำกลับมาใช้จึงมีประสิทธิผลสูง การนำความร้อนกลับมาจากน้ำมันหล่อลื่นก็สามารถทำได้ แต่โดยทั่วไปจะไม่ทำเนื่องจากไม่คุ้มทุน การนำความร้อนกลับมาใช้โดยทั่วไปจะนำกลับมาในรูปน้ำร้อนหรือไอน้ำ

ด้วยวิธีการที่กล่าวมาแล้ว ระบบโคเจเนอเรชันจึงเป็นระบบที่นำความร้อนทิ้งที่แต่เดิมเครื่องต้นกำลังสำหรับกำเนิดไฟฟ้า ปลอยทิ้งไปในบรรยากาศและในน้ำระบายความร้อนกลับมาใช้ประโยชน์ กล่าวได้ว่าเป็นการใช้งานพลังงานแบบ Cascade



รูปที่ 1.50 ตัวอย่างโครงสร้างของระบบโคเจเนอเรชัน

ซึ่งสามารถช่วยอนุรักษ์ทรัพยากรด้วยการนำพลังงานที่มีอยู่แล้วมาใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพ หากวางแผนอย่างรัดกุมโดยนำความร้อนทิ้งมาใช้ประโยชน์ได้มาก ประสิทธิภาพความร้อนรวมแม้แต่ในระบบขนาดเล็กก็อาจสูงถึง 80% รวมทั้งสามารถใช้เป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเฉพาะที่ ซึ่งตั้งอยู่ใกล้กับความต้องการใช้ โดยไม่มีการสูญเสียในการส่งไฟฟ้า ดังนั้น นอกจากจะเป็นการอนุรักษ์พลังงานแล้วยังสามารถลดต้นทุนพลังงานได้มากด้วยรูปที่ 1.50 แสดงตัวอย่างโครงสร้างของระบบโคเจเนอเรชัน รูปที่ 1.51 แสดงตัวอย่างเปรียบเทียบปริมาณพลังงานปฏิกิริยาของระบบโคเจเนอเรชันกับระบบดั้งเดิม รูปที่ 1.52 แสดงตัวอย่างสมดุลความร้อนของระบบโคเจเนอเรชัน

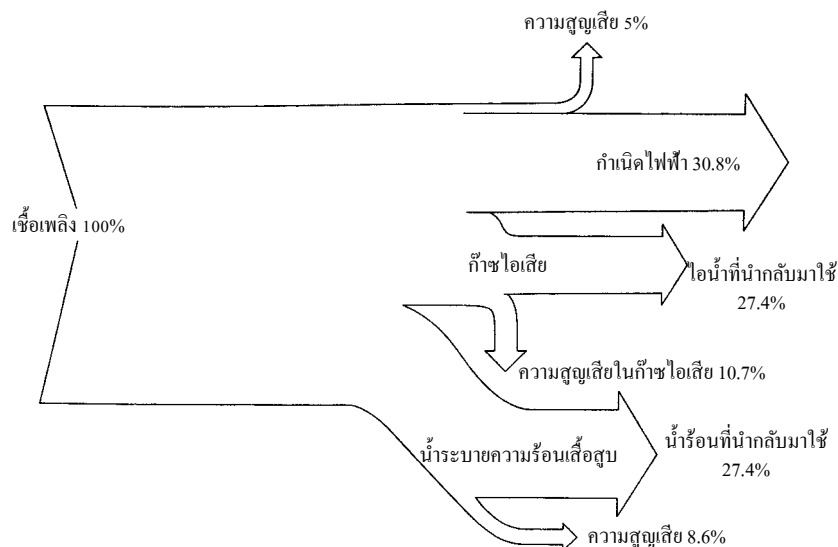


รูปที่ 1.51 ตัวอย่างเปรียบเทียบประสิทธิภาพพลังงานของระบบโคเจเนอเรชันกับระบบดั้งเดิม

1.11.2 ข้อควรระวังในการวางแผน

ในการเพิ่มอัตราการใช้งาน ทำให้เกิดความคุ้มทุน และรักษาความเชื่อถือได้ของระบบโคเจเนอเรชัน เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ มีข้อควรระวังในการวางแผนหลายประการ ประสิทธิภาพในการนำระบบมาใช้จะขึ้นอยู่กับสิ่งต่อไปนี้

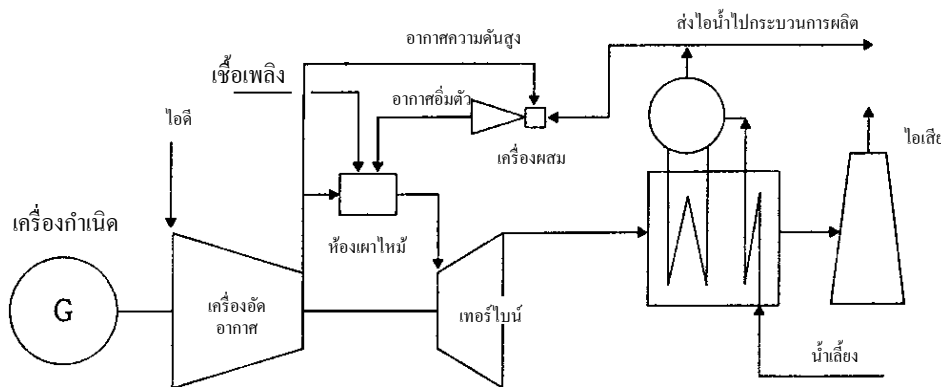
- * สภาพของภาระ (ทั้งไฟฟ้าและความร้อน)
- * มีการซื้อ-ขายไฟฟ้าจากการไฟฟ้าหรือไม่



รูปที่ 1.52 ตัวอย่างสมดุลความร้อนของระบบโคเจเนอเรชัน

* ประเภทของเครื่องต้นกำลังและเชื้อเพลิงที่ใช้

สิ่งที่สำคัญที่สุดในการทำให้ระบบมีประสิทธิภาพสูงสุด ได้แก่ การต้องสามารถเดินเครื่อง โดยให้เกิดสมดุลระหว่างภาระไฟฟ้า และภาระความร้อน หากอุปสงค์และอุปทานของไฟฟ้าหรือความร้อน อย่างใดอย่างหนึ่งมีมากหรือน้อยเกินไปมากๆ ระบบจะมีประสิทธิภาพต่ำลง แม้จะมีการพัฒนาระบบที่สามารถ ปรับสัดส่วนระหว่างไฟฟ้า และความร้อนได้อย่างอิสระ แต่ก็มีขีดจำกัด ดังนั้น ในการวางแผนนำระบบโคเจนเนอ เรชั่นมาใช้ จะต้องตรวจสอบสภาพของภาระไฟฟ้าและความร้อน (การเปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลาและฤดูกาล รูปแบบของภาระ เป็นต้น) อย่างถูกต้อง คำนึงถึงการบำรุงรักษาและซ่อมแซม ความเชื่อถือได้ ฯลฯ และเพื่อให้ มีอัตราการใช้งานสูงสุด สิ่งสำคัญคือต้องทำการคัดเลือกโดยทำการจำลองทั้งประเภท ขนาดความจุ (Capacity) และจำนวนของเครื่องต้นกำลัง และทำการประเมินความคุ้มค่าอย่างถี่ถ้วน รูปที่ 1.53 แสดงตัวอย่างระบบที่ สามารถปรับสัดส่วนไฟฟ้ากับความร้อนได้



รูปที่ 1.53 ตัวอย่างโครงสร้างของระบบที่สามารถปรับสัดส่วนไฟฟ้ากับความร้อนได้

โดยทั่วไประบบโคเจนเนอเรชั่นจะมีโอกาสน้อยที่จะสามารถเดินเครื่องอย่างต่อเนื่องที่พิกัดกำลังขาออกตลอดเวลา ดังนั้น ในการวางแผนจึงต้องเข้าใจคุณลักษณะต่างๆ ของเครื่องต้นกำลังรวมทั้งเรื่องภาระไม่เต็มพิกัดเป็นอย่างดี เครื่องต้นกำลังทุกชนิดเมื่อมี Load ratio ลดลงจะทำให้มีประสิทธิภาพ และอัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงแย่ลง และมีปริมาณไอเสีย อุณหภูมิไอเสีย ปริมาณความร้อนในน้ำระบายความร้อนต่ำลง ตัวอย่างเช่น เครื่องยนต์ดีเซลเทียบกับเครื่องยนต์สันดาปภายในชนิดอื่นหรือก๊าซเทอร์ไบน์แล้วจะมีอุณหภูมิไอเสียต่ำกว่า และเมื่อมีภาระไม่เต็มพิกัดจะยิ่งลดลงอย่างมาก

นอกจากนี้ ในการนำความร้อนกลับมาใช้จากไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซล เพื่อป้องกันการผุกร่อนจากกรดกำมะถันที่เกิดจากกำมะถันในเชื้อเพลิง จะต้องรักษาอุณหภูมิผนังท่อที่สัมผัสกับไอเสียไม่ให้ต่ำกว่าประมาณ 140°C ดังนั้น อุณหภูมิสุดท้ายที่ออกจากอุปกรณ์นำความร้อนกลับมาใช้สู่บรรยากาศจะสูงประมาณ 200°C อุณหภูมิไอเสียนี้ยังใช้เชื้อเพลิงที่สะอาดเท่าใดก็สามารถทำให้ลดลงได้เท่านั้น ในเครื่องยนต์ที่เผาไหม้ก๊าซหุงต้ม (Town gas) เช่น เครื่องยนต์แก๊ส จะสามารถนำความร้อนกลับมาใช้ โดยทำให้อุณหภูมิไอเสียเหลือประมาณ 150°C ได้ จึงสามารถเพิ่มอัตราการนำกลับมาใช้ให้สูงขึ้นได้

ด้วยเหตุผลที่กล่าวมาแล้ว การเลือกประเภทของเครื่องต้นกำลัง และเชื้อเพลิงที่ใช้จะมีผลต่อปริมาณความร้อนที่สามารถนำกลับมาใช้ได้ และระดับอุณหภูมิ อีกทั้งยังส่งผลกระทบต่อความคุ้มค่าของระบบอีกด้วย ดังนั้น จึงต้องทำความเข้าใจสมบัติของเครื่องต้นกำลัง และเชื้อเพลิงต่างๆ อย่างถ่องแท้ เพื่อก่อสร้างระบบที่เหมาะสมกับวัตถุประสงค์การใช้งาน และคุณลักษณะของภาระด้านอุปสงค์ ยิ่งไปกว่านั้น เนื่องจาก

อุปกรณ์นำความร้อนทั้งกลับมาใช้และเครื่องจักรการะก็มีคุณลักษณะต่างๆ กัน ในการเลือกเครื่องต้นกำลังจึงต้องคำนึงให้สอดคล้องกันด้วย

ตารางที่ 1.6 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติของเครื่องต้นกำลังชนิดต่างๆ ที่มีขนาดทั่วไปที่ใช้ในระบบโคเจนเนอเรชั่น ตารางนี้เป็นเพียงหลักการคร่าวๆ เท่านั้น ในการเลือกใช้เนื่องจากขนาดกำลังขาออกและเงื่อนไขต่างๆ จะแตกต่างกัน จึงต้องศึกษาอย่างเป็นรูปธรรมเป็นกรณีๆ ไป

ตารางที่ 1.6 เปรียบเทียบสมบัติของเครื่องต้นกำลังชนิดต่างๆ

เครื่องต้นกำลัง	เครื่องยนต์ดีเซล	เครื่องยนต์แก๊ส	ก๊าซเทอร์ไบน์
ขนาดที่ใช้	กลาง (ถึง 10000 kW)	เล็ก-กลาง (ถึง 5000 kW)	กลาง-ใหญ่ (ถึง 15000 kW)
เชื้อเพลิง	น้ำมันก๊าด น้ำมันเบา น้ำมันหนัก A ฯลฯ	ก๊าซ	ก๊าซ น้ำมันก๊าด น้ำมันเบา ฯลฯ
ประสิทธิภาพการกำเนิดไฟฟ้า	30-45%	25-40%	20-35%
วิธีนำความร้อนทั้งกลับมาใช้	น้ำร้อนเป็นหลัก	น้ำร้อนเป็นหลัก	ไอน้ำเป็นหลัก
ประสิทธิภาพรวม	70-85%	70-85%	70-85%
มาตรการป้องกันเสียงดัง	ต้องมี	ต้องมี	ต้องมี
มาตรการป้องกัน NO _x	หน่วยจังหวะเวลาฉีดพ่น เชื้อเพลิง นำก๊าซไอเสียไปหมุนเวียน ใหม่ กำจัดไนโตรเจนด้วย แอมโมเนีย ฯลฯ	lean burn three-way catalytic converter กำจัดไนโตรเจนด้วย แอมโมเนีย ฯลฯ	ฉีดพ่นน้ำหรือไอน้ำ premix lean burn กำจัดไนโตรเจนด้วย แอมโมเนีย ฯลฯ

1.12 ระบบ Combined Cycle

1.12.1 หลักการทำงาน

ก๊าซไอเสียของก๊าซเทอร์ไบน์แบบ Simple open cycle จะมีอุณหภูมิสูง และมีออกซิเจนอยู่มาก จึงมีพลังงานความร้อนที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ เมื่อนำความร้อนกลับมาใช้โดยนำไปคายความร้อนให้หม้อไอน้ำแบบ Waste-heat boiler หรือใช้เป็นอากาศสำหรับเผาไหม้ในหม้อไอน้ำโดยเป่าพ่นเชื้อเพลิงเข้าไปเผาไหม้ในก๊าซไอเสียนี้ เพื่อผลิตไอน้ำแล้ว จะทำให้ระบบมีประสิทธิภาพรวมสูงขึ้นมาก กรณีที่นำไอน้ำนี้ไปใช้ในกระบวนการผลิตจะเรียกระบบนี้ว่า Cogeneration ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อ 3.5 และหากนำไปขับกังหันไอน้ำจะเรียกว่า คอมไบน์ไซเคิล

คอมไบน์ไซเคิลในความหมายกว้างมีหลายประเภท เช่น เครื่องต้นกำลังที่ใช้เป็น Topping อาจใช้การกำเนิดไฟฟ้าแบบ Magnetohydrodynamic (MHD) power generation ซึ่งจะปล่อยก๊าซอุณหภูมิสูง และเครื่องจักรขับเคลื่อนที่ใช้เป็น Base ก็ไม่จำเป็นต้องเป็นกังหันไอน้ำเสมอไป แต่ในที่นี้จะอธิบายเฉพาะที่ใช้กังหันไอน้ำเป็น Bottoming เท่านั้น

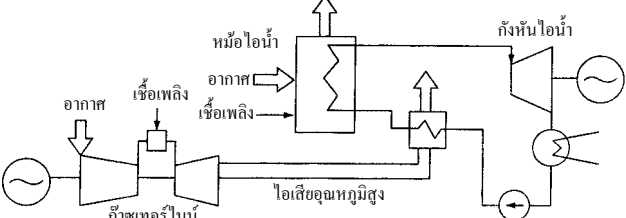
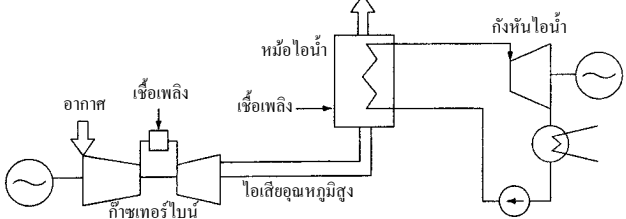
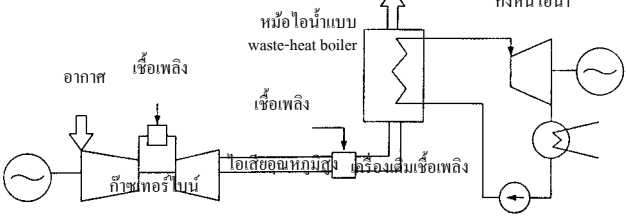
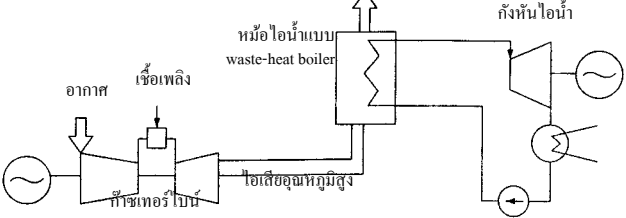
แนวคิดเรื่องการกำเนิดไฟฟ้าแบบคอมไบน์ไซเคิลโดยใช้ก๊าซเทอร์ไบน์ไม่ใช่แนวคิดใหม่ รูปแบบอื่นก็มีหลายอย่าง ซึ่งได้ถูกนำมาใช้แล้วดังตารางที่ 1.7 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิขาเข้าของก๊าซเทอร์ไบน์จะทำให้เทอร์ไบน์มีประสิทธิภาพสูงขึ้น แต่อุณหภูมิก๊าซไอเสียก็จะเพิ่มขึ้นด้วย ระยะหลังนี้ก๊าซไอเสียจะมีอุณหภูมิถึง

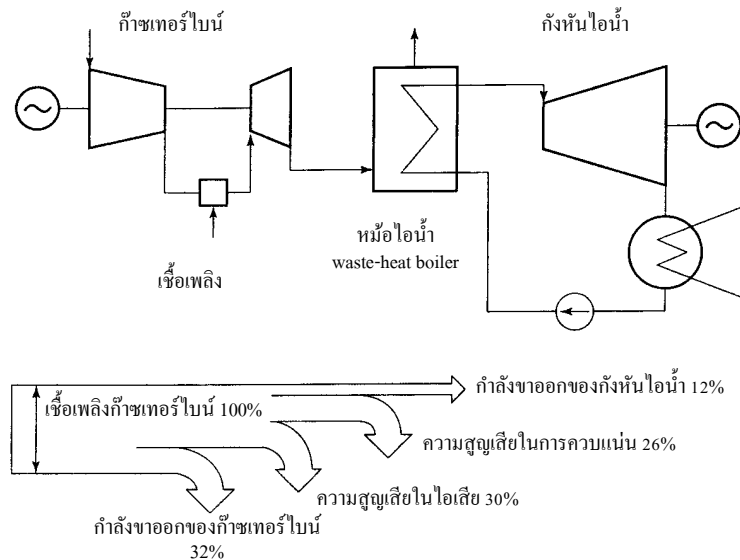
ตอนที่ 3 บทที่ 1 ระบบความร้อนและอุปกรณ์ที่ใช้ไอน้ำ

550-600°C ทำให้ความเข้มข้นออกซิเจนที่เหลือในก๊าซไอเสียมีค่าต่ำ วิธีนำความร้อนกลับมาใช้ซึ่งไม่ต้องเพิ่มเชื้อเพลิงเข้าไปจึงกลายเป็นวิธีที่ใช้กันเป็นหลัก อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันมีการนำวิธี Exhaust gas reheating มาใช้ในการ Repowering โรงไฟฟ้าพลังความร้อนเก่า และโรงไฟฟ้าพลังขยะมากขึ้น รูปที่ 1.54 แสดงหลักการทำงานของคอมไบน์ไซเคิลกับตัวอย่างสมดุลความร้อน

การกำเนิดไฟฟ้าด้วยคอมไบน์ไซเคิล เป็นวิธีที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพความร้อนได้อย่างมาก ในขณะที่การเพิ่มประสิทธิภาพความร้อนด้วยการเพิ่มอุณหภูมิและความดันเริ่มเข้าใกล้ขีดจำกัดเข้าไปเรื่อยๆ ด้วยเหตุนี้ เทคโนโลยีข้างต้นจึงแพร่หลายอย่างรวดเร็วในฐานะที่เป็นเทคโนโลยีที่สามารถตอบสนองความต้องการของยุคสมัยได้ ปัจจุบันกลายเป็นวิธีหลักในการผลิตไฟฟ้าพลังความร้อนแล้ว กล่าวคือ ประสิทธิภาพความร้อนของคอมไบน์ไซเคิลนั้นแม้จะใช้ก๊าซเทอร์โบไบน์เดิมๆ แบบ Simple open cycle ที่มีอุณหภูมิก๊าซเข้าเทอร์โบไบน์ 1100°C ก็ยังมีประสิทธิภาพประมาณ 43% หากใช้ก๊าซเทอร์โบไบน์ประสิทธิภาพสูงอุณหภูมิ 1350°C จะมีประสิทธิภาพสูงได้ถึงประมาณ 48% ยิ่งกว่านั้นปัจจุบันกำลังมีการพัฒนาก๊าซเทอร์โบไบน์ใหม่อุณหภูมิ 1500°C ซึ่งจะทำให้ไซเคิลมีประสิทธิภาพสูงถึง 53%

ตารางที่ 1.7 คอมไบน์ไซเคิลประเภทต่างๆ

	หลักการทำงาน	ภาพโครงสร้างระบบ
นำไอเสียมาอุ่นน้ำเลี้ยง	นำความร้อนทั้งจากก๊าซเทอร์โบไบน์มาให้ความร้อนแก่น้ำเลี้ยงของโรงไฟฟ้าพลังไอน้ำ	
นำไอเสียมาเผาไหม้ซ้ำ	นำความร้อนทั้งจากก๊าซเทอร์โบไบน์มาใช้เป็นอากาศสำหรับเผาไหม้ของหม้อไอน้ำเพื่อนำความร้อนทั้งกลับมาใช้	
นำไอเสียมาเติมเชื้อเพลิง	ระหว่างทางที่นำก๊าซไอเสียจากก๊าซเทอร์โบไบน์ไปที่หม้อไอน้ำแบบ waste-heat boiler จะทำการเผาไหม้เชื้อเพลิงเสริม เพื่อปรับปรุงสถานะของไอน้ำให้ดีขึ้น และเพิ่มกำลังขาออกของกังหันไอน้ำ	
นำความร้อนทั้งกลับมาใช้	นำไอเสียของก๊าซเทอร์โบไบน์มาคายความร้อนให้หม้อไอน้ำแบบ waste-heat boiler แล้วใช้ไอน้ำที่เกิดขึ้นไปขับกังหันไอน้ำ	



รูปที่ 1.54 หลักการทำงานของคอมไบน์ไซเคิลและตัวอย่างสมดุลความร้อน

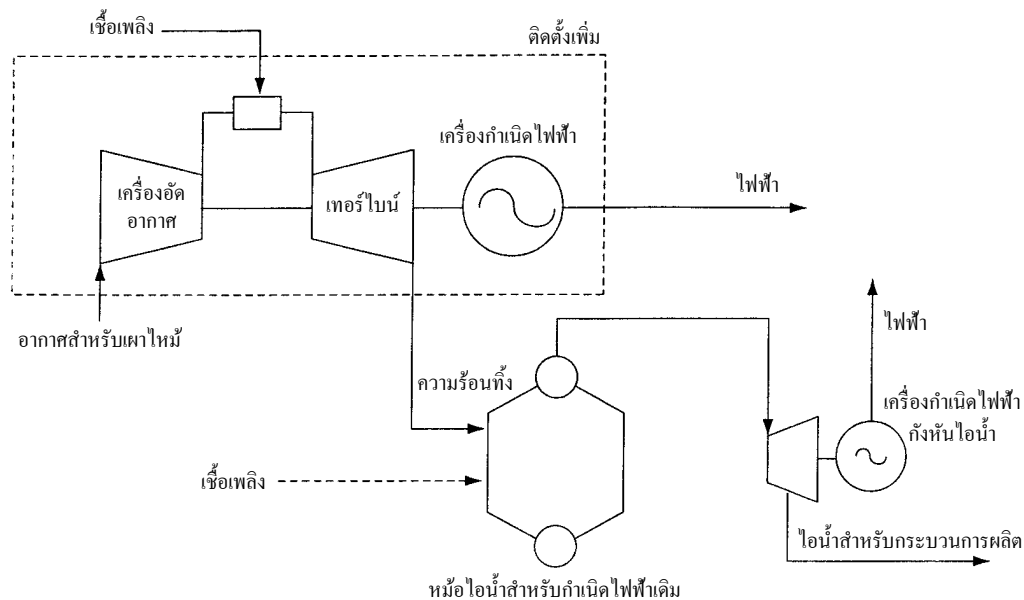
นอกจากนี้ปัจจุบัน ยังมีแนวคิดที่จะนำเครื่องยนต์เจ็ทสำหรับเครื่องบินมาใช้ในการผลิตไฟฟ้าอีกด้วย แก๊สเทอร์ไบน์สำหรับเครื่องบินแต่เดิมเคยนำมาใช้สำหรับรองรับภาระสูงสุดเป็นระยะเวลาสั้นๆ หรือใช้ในกรณีฉุกเฉิน อย่างไรก็ตาม เครื่องบินซึ่งต้องการแรงขับเคลื่อนอย่างมากนั้นเป็นเครื่องยนต์ที่มีอัตราส่วนความดันสูงถึง 30 เท่า เครื่องยนต์เดี่ยวๆ เองก็มีประสิทธิภาพสูงถึง 37-40% ในอนาคตเครื่องยนต์เดี่ยวๆ จะมีประสิทธิภาพ 40-44% เมื่อนำมาใช้ในคอมไบน์ไซเคิลจะทำให้ได้ประสิทธิภาพถึง 50-55% ขึ้นไป จึงมีโครงการที่จะนำมาใช้ ยิ่งไปกว่านั้น ในโรงไฟฟ้าคอมไบน์ไซเคิลประสิทธิภาพสูงเหล่านี้ ยังถูกคาดหวังว่าอนาคตจะไปใช้ร่วมกับโรงไฟฟ้าแบบ Coal gasification กลายเป็นระบบกำเนิดไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูงและสะอาด

เมื่อมีภาระไม่เต็มพิกัด ปริมาณโอเลียงของแก๊สเทอร์ไบน์จะลดลง อัตราความสิ้นเปลืองความร้อนของโรงไฟฟ้าคอมไบน์ไซเคิลจึงลดลงอย่างมาก แต่ถ้าโรงไฟฟ้าประกอบด้วยแก๊สเทอร์ไบน์หลายตัวแล้วใช้วิธีควบคุมจำนวนเครื่องจะมีข้อดีคือสามารถรักษาประสิทธิภาพสูงขณะที่มีภาระไม่เต็มพิกัดได้ วิธีกำเนิดไฟฟ้าแบบคอมไบน์ไซเคิลที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน แบ่งเป็น 2 แบบ ได้แก่ แบบเพลาดียวซึ่งแก๊สเทอร์ไบน์จะต่อกับกังหันไอน้ำโดยตรงบนเพลาดียวกัน แต่นำมาเรียงกันหลายๆ ชุด กับแบบหลายเพลาส่งประกอบด้วยแก๊สเทอร์ไบน์หลายตัวกับกังหันไอน้ำ 1 ตัว แบบเพลาดียวสามารถตรวจสอบแต่ละเพลาดียวได้โดยไม่ต้องหยุดโรงไฟฟ้า เหมาะสำหรับเดินเครื่องรับโหลดค่ากลางๆ ส่วนแบบสองเพลาในการตรวจสอบกังหันไอน้ำจะไม่สามารถกำเนิดไฟฟ้าได้ เหมาะสำหรับเดินเครื่องรับ Base load

1.12.2 Repowering

Repowering หมายถึง การนำเครื่องจักรใหม่ไปติดตั้งเพิ่มเติมให้โรงไฟฟ้าเดิม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ และกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ รวมถึงการเพิ่มกำลังของโรงไฟฟ้าพลังน้ำโดยพิจารณาปรับระบบน้ำใหม่ด้วย แต่ในที่นี้จะกล่าวถึงการติดตั้งแก๊สเทอร์ไบน์เพิ่มเติมให้โรงไฟฟ้าพลังความร้อนเดิม เพื่อทำคอมไบน์ไซเคิลกับหม้อไอน้ำและกังหันไอน้ำที่มีอยู่แล้วดังรูปที่ 1.55 เท่านั้น โรงไฟฟ้าพลังความร้อนที่เดินเครื่องโดยใช้น้ำมันหนักชนิด C หรืออื่นๆ เป็นเชื้อเพลิงของหม้อไอน้ำ โดยติดตั้งเครื่องกำเนิดกำลังที่ปล่อยโอเลียงนั้น โดยมากจะถูกนำมาพิจารณาทำ Repowering เมื่ออยู่ในสถานะที่ต้องเปลี่ยนเชื้อเพลิงเป็นชนิดอื่น โดยจะพิจารณาความสมดุลระหว่างการลดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมกับการลดต้นทุนพลังงาน เป็นต้น

ตอนที่ 3 บทที่ 1 ระบบความร้อนและอุปกรณ์ที่ใช้ไอน้ำ



รูปที่ 1.55 ตัวอย่าง Repowering system

ยิ่งไปกว่านั้น เพื่อนำพลังงานที่ยังไม่ได้นำมาใช้ มาใช้ให้เป็นประโยชน์ และเพื่อลดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม เรายังสนใจการ Repowering โรงไฟฟ้าพลังขยะเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้สูงขึ้นอีกด้วย ปัจจัยสำคัญที่ทำให้ Repowering ได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นก็คือ การที่ก๊าซเทอร์โบมีสมรรถนะสูงขึ้น โดย Repowering มีข้อดีดังต่อไปนี้

- * การอนุรักษ์พลังงาน : ด้วยการใช้พลังงานอย่างเป็นขั้นๆ (Cascade) ทำให้สามารถอนุรักษ์พลังงานได้มากกว่าโรงไฟฟ้าเดิม 10-30%

- * ลดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม : ผลจากการอนุรักษ์พลังงาน จะสามารถลดคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) ได้

- * ใช้โรงไฟฟ้าเดิมอย่างมีประสิทธิภาพ ยืดอายุการใช้งาน เพิ่มกำลังไฟฟ้าที่กำเนิดได้ : ได้กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจากก๊าซเทอร์โบที่ติดตั้งเพิ่ม และมี Lead time สั้น (โดยทั่วไปประมาณ 1-2 ปี)

- * ลดต้นทุนพลังงาน : ลดต้นทุนเนื่องจากผลของการอนุรักษ์พลังงานและได้กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เป็นต้น วิธีนำความร้อนทิ้งจากก๊าซเทอร์โบมาใช้สามารถแบ่งได้ดังต่อไปนี้

- (1) นำไอเสียมาอุ่นน้ำเลี้ยง

เป็นการนำความร้อนทิ้งจากก๊าซเทอร์โบมาใช้อุ่นน้ำเลี้ยงหม้อไอน้ำของโรงไฟฟ้าเดิม มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน แต่ไม่สามารถคาดหวังประสิทธิภาพได้มากนัก

- (2) นำไอเสียมาเผาไหม้ซ้ำ

ในไอเสียจากก๊าซเทอร์โบ จะมีออกซิเจนเหลืออยู่ประมาณ 14-16% หากนำก๊าซนี้ไปใช้เป็นอากาศสำหรับเผาไหม้ในหม้อไอน้ำเดิม จะทำได้ด้วยต้นทุนต่ำ อย่างไรก็ตาม โดยมากไอเสียนี้มักจะมีปริมาณออกซิเจนไม่เพียงพอให้กับหม้อไอน้ำที่ต้องการ ดังนั้น จึงต้องเดินเครื่อง Forced draft fan ควบคู่ไปด้วย วิธีนี้สามารถนำความสูญเสียในไอเสียของก๊าซเทอร์โบกลับมาใช้ใหม่ได้จำนวนมาก

- (3) นำความร้อนทิ้งกลับมาใช้

นำก๊าซเทอร์โบและหม้อไอน้ำแบบ Waste-heat boiler สำหรับกำเนิดไอน้ำจากไอเสียของก๊าซเทอร์โบมาติดตั้งเพิ่มเติม แล้วนำไอน้ำเหล่านี้ไปป้อนให้กับกังหันไอน้ำร่วมกับไอน้ำจากหม้อไอน้ำเดิมบางครั้งอาจต้องรื้อถอนหม้อไอน้ำเดิม เป็นต้น ซึ่งการแบ่งประเภทจะเหมือนกับกรณีของคอมไบน์ไซเคิล การทำ Repowering ด้วยการติดตั้ง Waste-heat boiler แทนหม้อไอน้ำเดิมจะเรียกว่า Partial repowering

ส่วนการเปลี่ยน Steam cycle เดิมทั้งหมด เรียกว่า Station repowering และการเปลี่ยนทั้งหมดทุกอย่างโดยใช้ที่ดินและสายส่งไฟฟ้าเดิม เรียกว่า Full repowering ในกรณีใดก็ตาม สิ่งที่สำคัญที่สุดคือ จะต้องให้โรงไฟฟ้าเดิมกับเครื่องจักรที่ติดตั้งใหม่ (เพิ่มเติม) ทำงานได้สอดคล้องกันเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด โดยทั่วไปแล้ว กังหันไอน้ำเดิมมักจะยังสามารถใช้งานต่อได้ อย่างไรก็ตาม โดยเฉพาะอย่างยิ่งวิธีนำไอเสียมาเผาไหม้ซ้ำ ส่วนมากจะต้องมีการดัดแปลงหม้อไอน้ำ เช่น การเปลี่ยนประเภทเชื้อเพลิง เป็นต้น จึงต้องวางแผนเพื่อไม่ให้โรงไฟฟ้า ต้องหยุดเดินเครื่องเป็นระยะเวลานาน

การทำ Repowering หม้อไอน้ำที่เผาไหม้ถ่านหินในสหรัฐอเมริกาจะมีการนำหม้อไอน้ำแบบ Fluidized bed มาใช้เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากก่อมลพิษต่ำ และสามารถลดต้นทุนได้ด้วยการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งหลายประเภท เช่น ขยะอุตสาหกรรม เป็นต้น ยิ่งไปกว่านั้น ในอนาคตยังมีการคาดหวังว่าจะพัฒนาไปเป็นโรงไฟฟ้าร่วมกับ Coal gasification ได้อีกด้วย

1.13 ระบบแลกเปลี่ยนความร้อน หลักการทำงานของระบบแลกเปลี่ยนความร้อน การเลือกใช้ชุดแลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพ การบำรุงรักษาชุดแลกเปลี่ยนความร้อน

ในโรงงานผลิตที่ใช้ปฏิกิริยาเคมีหรือการบังคับทางกายภาพ เช่น การเผาไหม้ การอบแห้ง การผลิตไอน้ำ ฯลฯ จะมีการถ่ายเทความร้อนเพื่อให้ความร้อนแบบบังคับหรือระบายความร้อน การถ่ายเทความร้อนแบบบังคับแบ่งเป็นการบังคับสัมผัสโดยตรงระหว่างตัวกลางให้ความร้อนกับตัวกลางรับความร้อน และการบังคับทางอ้อมโดยการแลกเปลี่ยนความร้อนผ่านผนังกัน ในโรงงานผลิตโดยมากจะใช้วิธีบังคับสัมผัสทางอ้อมเพื่อป้องกันไม่ใหตัวกลางทั้งสองเข้าไปผสมกัน ซึ่งอาจเกิดปัญหาได้

การให้ความร้อนหรือระบายความร้อนจากของแข็ง ของเหลว ก๊าซซึ่งเป็นเป้าหมายการบังคับถ่ายเทความร้อน จะใช้วิธีการถ่ายเทความร้อน 3 วิธี ได้แก่ การพาความร้อน การนำความร้อน การแผ่รังสี อย่างไรก็ตามหนึ่งหรือตั้งแต่สองวิธีร่วมกัน

1.13.1 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนประเภทต่างๆ

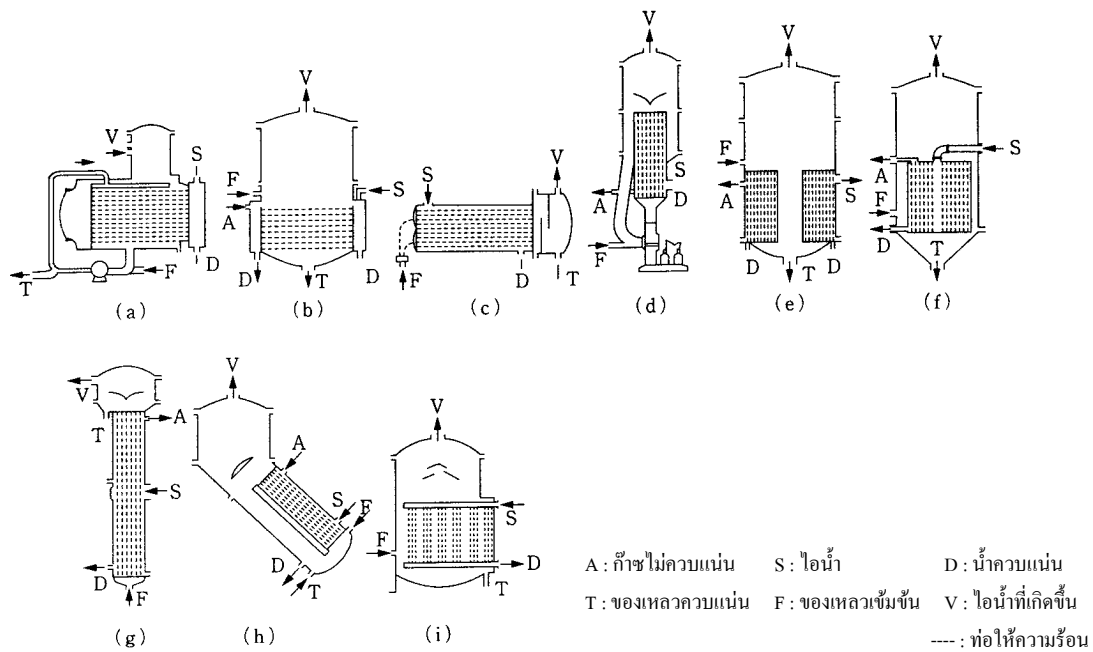
ถ้าจะแยกประเภทอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนตามวัตถุประสงค์การใช้งาน อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีวัตถุประสงค์ในการให้ความร้อนจะเรียกว่า เครื่องให้ความร้อน ส่วนอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนที่มีวัตถุประสงค์ในการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของไหลกับของไหลจะเรียกว่า เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนยังแบ่งออกตามวัตถุประสงค์การใช้งานและหน้าที่การทำงานได้เป็น เครื่องอุ่น (Preheater) เครื่องระเหย หม้อไอน้ำความร้อนทิ้ง (Waste-heat boiler) เครื่องควบแน่น เป็นต้น

1.13.1.1 เครื่องให้ความร้อน

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีวัตถุประสงค์ในการให้ความร้อน สามารถแบ่งตามแหล่งความร้อนได้เป็นวิธีให้ความร้อนด้วยเปลวไฟโดยตรง เช่น เตาเผา ซึ่งใช้วิธีนำก๊าซเผาไหม้ไปสัมผัสกับเป้าหมายที่ต้องการให้ความร้อนโดยตรง กับวิธีให้ความร้อนด้วยแจ็กเก็ต วิธีให้ความร้อนด้วยแผ่นโลหะ วิธีให้ความร้อนด้วยท่อ ซึ่งจะใช้น้ำหรือตัวกลางความร้อน นอกจากนี้ ยังมีวิธีให้ความร้อนด้วย Radiant tube ซึ่งเป็นวิธีส่งก๊าซเผาไหม้อุณหภูมิสูงเข้าไปในท่อ ทำให้ท่อมีอุณหภูมิสูง แล้วให้ความร้อนด้วยการแผ่รังสีความร้อน และวิธีอื่นๆ อีกด้วย วิธีให้ความร้อนด้วยท่อยังแบ่งออกได้ดังต่อไปนี้ (รูปที่ 1.56)

ตอนที่ 3 บทที่ 1 ระบบความร้อนและอุปกรณ์ที่ใช้ไอน้ำ

- (a) แบบท่อนอน
 - แบบควบแน่นในท่อ
 - แบบฟิล์มบาง (รูปที่ 1.56 (a))
 - แบบของเหลวซึม (รูปที่ 1.56 (b))
 - แบบควบแน่นนอกท่อ (รูปที่ 1.56 (c))
- (b) แบบท่อตั้ง
 - แบบ forced circulation (รูปที่ 1.56 (d))
 - แบบ natural circulation
 - แบบมาตรฐาน (รูปที่ 1.56 (e))
 - แบบตะกร้า (รูปที่ 1.56 (f))
 - แบบท่อยาว (รูปที่ 1.56 (g))
- (c) แบบท่อเอียง (รูปที่ 1.56 (h))
- (d) แบบท่อพิเศษ (รูปที่ 1.56 (i))



รูปที่ 1.56 วิธีให้ความร้อนด้วยท่อแบบต่างๆ

นอกจากนี้ หม้อต้มแบบหลายท่อที่ใช้ไอน้ำ ยังแบ่งตามทิศทางของท่อให้ความร้อนได้เป็นแบบท่อนอนและท่อตั้งอีกด้วย ซึ่งแต่ละแบบมีสมบัติดังต่อไปนี้

(1) แบบท่อนอน

กรณีที่ท่อมีความยาวมาก ความลึกจะไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้น จุดเดือดของของเหลวตามแนวความลึกจะไม่เพิ่มขึ้นมาก ผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างไอน้ำสำหรับให้ความร้อนกับของเหลวจะสูงกว่าแบบท่อตั้ง อย่างไรก็ตาม เทียบกับแบบท่อตั้งแล้วจะทำความสะอาดได้ยากกว่า จึงใช้ในกรณีที่ไม่ต้องห่วงเรื่องความสกปรก

(2) แบบท่อตั้ง

มีการระบายน้ำควบแน่นจากไอน้ำสำหรับให้ความร้อนและการหมุนเวียนของเหลวที่ต้องการให้ความร้อนดีกว่าแบบท่อนอน นอกจากนี้ ยังมีสิ่งสกปรกเกาะ และสะสมน้อยกว่าแบบท่อนอน ทำความสะอาดง่าย

ในการรักษาสมรรถนะในการกำเนิดไอของเหลวของหม้อต้ม มีข้อควรระวังในการเดินเครื่องดังต่อไปนี้

- เนื่องจากมีท่อซึ่งมีปริมาตรน้อยและมีพื้นที่ถ่ายเทความร้อนกว้างเรียงอยู่ เพื่อใช้พื้นผิวถ่ายเทความร้อนอย่างมีประสิทธิภาพ จะต้องถ่ายน้ำควบแน่นจากไอน้ำ สำหรับให้ความร้อนและก๊าซที่ไม่ควบแน่นออกตลอดเวลา

- เพื่อรักษาผลต่างอุณหภูมิ ต้องระวังการแห้งงวดจนตกผลึกของของเหลวที่ต้องการให้ความร้อนและการเกิดก๊าซที่ไม่ควบแน่น

- ทำความสะอาดเพื่อป้องกันการเกิดตะกรันเนื่องจากการตกผลึกและป้องกันการผุกร่อน

แหล่งความร้อนของเครื่องให้ความร้อน มีทั้งก๊าซเผาไหม้ ไอน้ำ น้ำมันตัวกลางความร้อน น้ำร้อน ฯลฯ แต่ละประเภทมีสมบัติด้านวัตถุประสงค์การใช้งานและช่วงอุณหภูมิแตกต่างกัน กรณีที่ใช้ไอน้ำจะมีข้อดีดังต่อไปนี้

- สามารถให้ความร้อนได้อย่างสม่ำเสมอ

- สามารถปรับอุณหภูมิได้สะดวกโดยการปรับความดัน

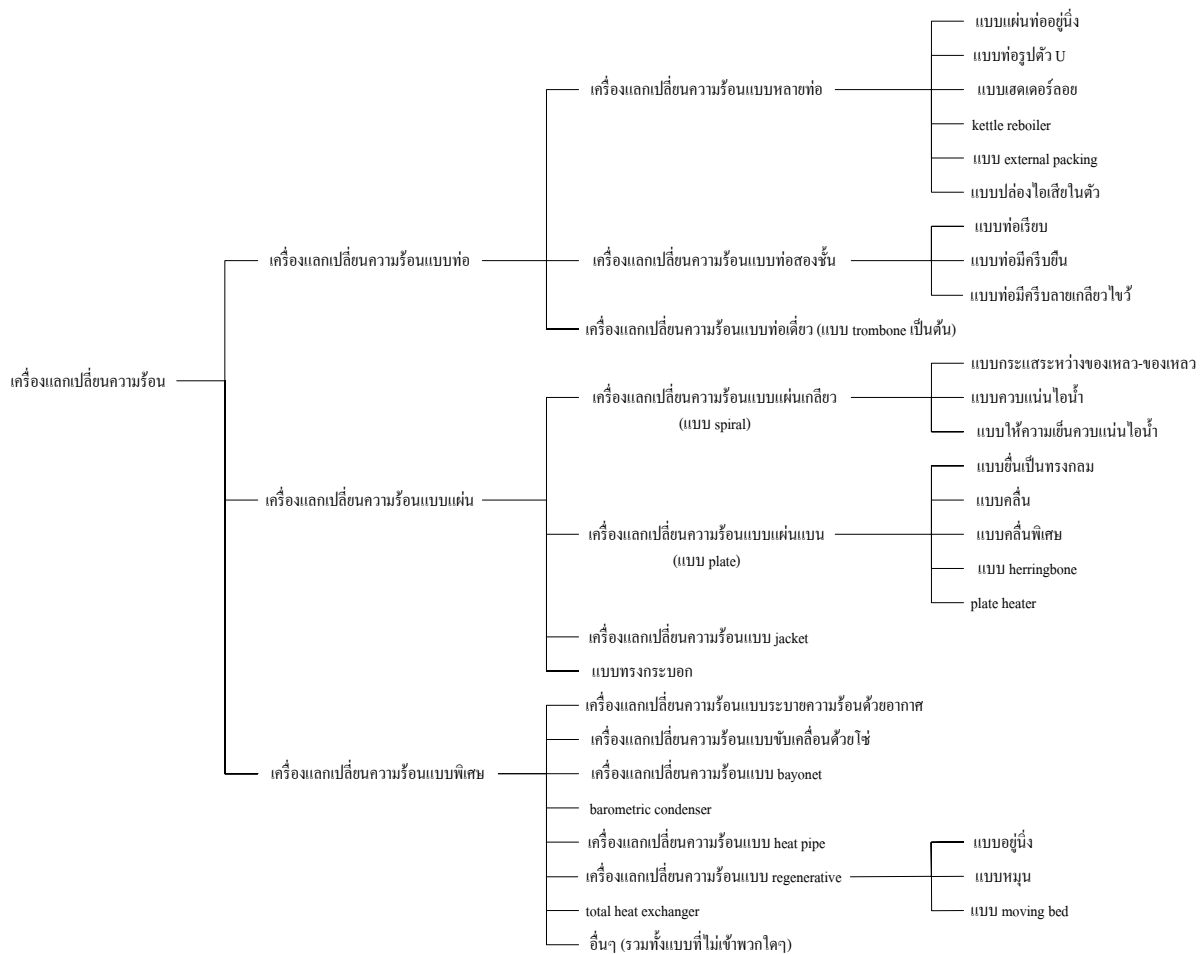
- มีความร้อนแฝงของการควบแน่นสูงมาก และมีสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ของการควบแน่นสูง จึงสามารถออกแบบพื้นที่ถ่ายเทความร้อนให้มีขนาดเล็กได้

- โดยมากวิธีนำความร้อนทิ้ง เช่น ก๊าซไอเสีย ฯลฯ กลับมาใช้จะนำกลับมาในรูปไอน้ำจึงสามารถนำมาใช้ในที่นี้ได้

1.13.1.2 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นอุปกรณ์ที่ทำการให้และรับความร้อนระหว่างของไหลอุณหภูมิสูงกับของไหลอุณหภูมิต่ำ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถแบ่งออกตามโครงสร้างว่ามีผนังของแข็งกั้นระหว่างที่ถ่ายเทความร้อนหรือไม่ได้เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบมีผนังกั้น และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบสัมผัสโดยตรง นอกจากนี้ยังมีแบบ Regenerative และแบบคล้ายๆ กับปั๊มความร้อนที่จะหมุนเวียนตัวกลางความร้อนระหว่างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบมีผนังกั้น 2 เครื่องอีกด้วย ในการนำความร้อนจากก๊าซไอเสียกลับมาใช้ โดยทั่วไปจะใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทางอ้อมระหว่างของไหลกับของไหลเป็นส่วนใหญ่

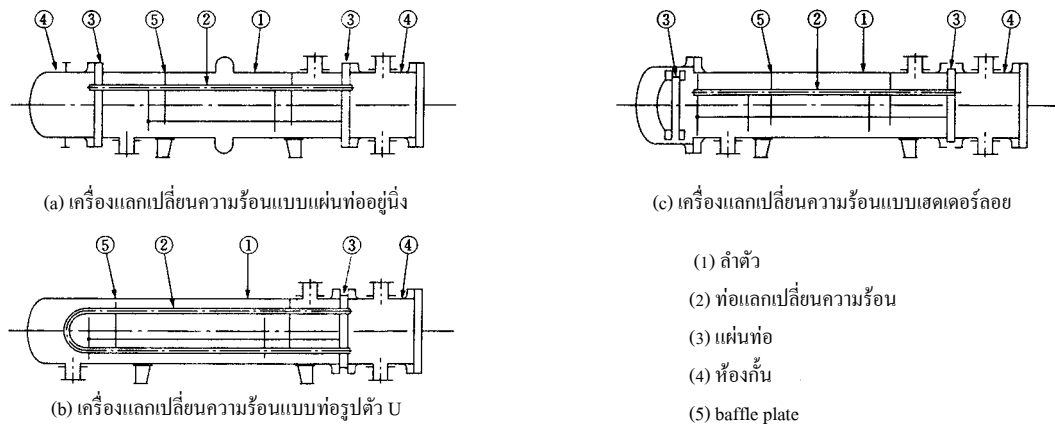
ตัวอย่างการแบ่งประเภทของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแสดงไว้ในรูปที่ 1.57



รูปที่ 1.57 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนประเภทต่างๆ

(ก) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อ

แบบที่สำคัญได้แก่ แบบหลายท่อ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้จะมีท่อจำนวนมากอยู่ภายในลำตัวทรงกระบอก เพื่อทำการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของไหลที่ไหลอยู่ภายในท่อกับภายนอก เนื่องจากสามารถออกแบบได้หลายแบบ และมีความเชื่อถือได้สูง จึงเป็นแบบที่ใช้กันในงานจำนวนมาก ใช้ได้หลายวัตถุประสงค์ตั้งแต่ให้ความร้อน ทำความเย็น ระเหย ควบแน่น เป็นต้น เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบหลายท่อสามารถแบ่งตามวิธีการติดตั้งท่อและแผ่นท่อ (Tube plate) รวมทั้งรูปร่างของท่อได้เป็น 3 ประเภทหลักๆ ดังต่อไปนี้ (รูปที่ 1.58)



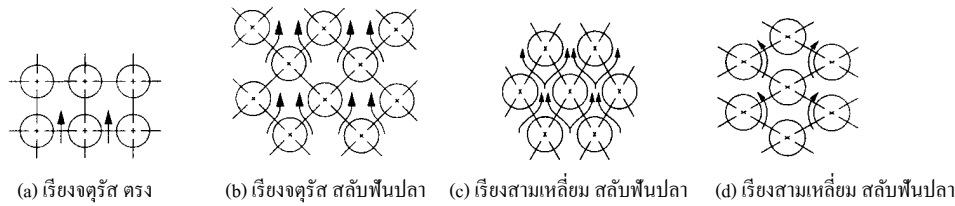
รูปที่ 1.58 รูปแบบพื้นฐานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบหลายท่อ

■ แบบแผ่นท่ออยู่หนึ่ง (รูปที่ 1.58 (a)) : เป็นแบบที่ง่ายที่สุด โดยยึดแผ่นท่อไว้กับลำตัวทั้งสองด้าน อย่างไรก็ตาม เนื่องจากบริเวณระหว่างลำตัวด้านในกับแผ่นท่อไม่สามารถเปิดออกได้ จึงไม่สามารถทำความสะอาดบริเวณดังกล่าว นอกจากนี้ เนื่องจากถูกยึดไว้ทั้งสองด้าน กรณีที่ลำตัวและท่อมีการขยายตัวด้วยความร้อนแตกต่างกันจะต้องมีมาตรการรองรับ

■ แบบท่อรูปตัว U (รูปที่ 1.58 (b)) : ท่อแลกเปลี่ยนความร้อนมีลักษณะเป็นรูปตัว U และมีแผ่นท่อเพียงด้านเดียว สามารถถอดมัดท่อออกได้จึงทำความสะอาดและตรวจสอบลำตัวด้านในและผิวท่อได้สะดวก แต่การทำความสะอาดและตรวจสอบด้านในท่อจะทำได้ยาก ข้อได้เปรียบของวิธีนี้คือไม่เกิดความเค้นเนื่องจากการขยายตัวด้วยความร้อนของท่อแลกเปลี่ยนความร้อน

■ แบบเฮดเคอร์ลอย (รูปที่ 1.58 (c)) : ใช้ท่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่เป็นท่อตรง รองรับทั้งสองด้านไว้ด้วยแผ่นท่อ แผ่นท่อด้านหนึ่งจะไม่ยึดตายตัว ทำให้สามารถป้องกันความเค้นความร้อนได้ อีกทั้งทำความสะอาดและตรวจสอบด้านในท่อได้สะดวก แต่เนื่องจากมีความซับซ้อนจึงมีราคาสูง

การเลือกประเภทเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนให้เหมาะสม จะต้องพิจารณาเงื่อนไขต่างๆ เช่น ปริมาณความร้อนที่แลกเปลี่ยน อัตราไหล อุณหภูมิ ความดันสูญเสีย การผุกร่อน ความสกปรก สถานที่ติดตั้ง เป็นต้น กรณีที่แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซกับของเหลว จะลดความต้านทานความร้อนทางด้านก๊าซด้วยการติดตั้งท่อมีพัดลม และให้ก๊าซไหลด้านนอกท่อ นอกจากนี้ ยังติดตั้ง Baffle plate ในลำตัวเพื่อเพิ่มความเร็วกระแสน้ำในตัวทำให้มีสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูงขึ้นอีกด้วย วิธีเรียงท่อมีหลายแบบดังรูปที่ 1.59 โดยการเรียงสามเหลี่ยมจะสามารถเรียงได้ชิดกว่า แต่จะทำความสะอาดโดยอัตโนมัติได้ยาก การเรียงสี่เหลี่ยมจะทำความสะอาดง่าย จึงใช้กับแบบแผ่นท่ออยู่หนึ่งซึ่งต้องดึงมัดท่อออกมาตรวจสอบหรือทำความสะอาด นอกจากนี้ การเรียงสี่เหลี่ยมยังมีความต้านทานการไหลต่ำ แต่สัมประสิทธิ์การพาความร้อนก็ต่ำกว่าด้วย

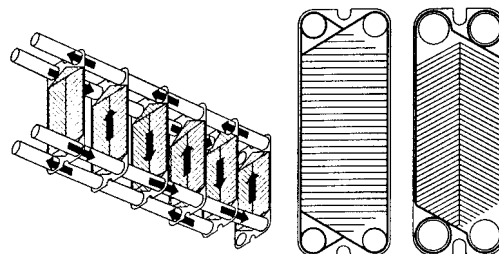


รูปที่ 1.59 วิธีเรียงท่อของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบหลายท่อ

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อชนิดอื่นๆ จะมีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศโดยใช้ท่อที่มีครีป บางครั้งก็เรียกว่า Air cooler หรือ Air fin cooler มีใช้ในรถยนต์ เครื่องปรับอากาศ และในที่ที่ไม่มีน้ำระบายความร้อนจะใช้ในเครื่องควบแน่นของเทอร์โบ

(ข) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น

ที่สำคัญคือเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Plate เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Plate จะมี Plate ซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นบางๆ ที่มีร่องสูงต่ำ ซ้อนกันอยู่โดยมี Gasket คั่น ในช่องระหว่าง Plate จะมีช่องไหลอุณหภูมิต่ำกับช่องไหลอุณหภูมิสูงไหลสลับกันคนละช่อง เพื่อทำการแลกเปลี่ยนความร้อน (รูปที่ 1.60) ระยะห่างระหว่าง Plate มีตั้งแต่หลายมิลลิเมตรจนถึงหลายสิบมิลลิเมตร เนื่องจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้มีพื้นที่ถ่ายเทความร้อนต่อปริมาตรหนึ่งหน่วยสูงจึงมีขนาดกะทัดรัด มีประสิทธิภาพอุณหภูมิสูงจึงมีความดันสูญเสียสูงด้วย แต่ก็ยังนำไปใช้เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับนำความร้อนกลับมาใช้ เช่น เครื่องอุ่นอากาศของหม้อไอน้ำขนาดเล็ก เป็นต้น



รูปที่ 1.60 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Plate

(ค) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบพิเศษ

ตัวอย่างของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบพิเศษ ได้แก่ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ในการนำความร้อนของก๊าซไอเสียกลับมาใช้ เช่น เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Regenerative เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Heat pipe เป็นต้น

1.13.2 ปริมาณการแลกเปลี่ยนความร้อน

ถ้าให้ Overall heat transfer coefficient ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเท่ากับ K [$W/(m^2K)$] ให้พื้นที่ถ่ายเทความร้อนเท่ากับ A [m^2] ให้ผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ ΔT_m [K] แล้ว ปริมาณการแลกเปลี่ยนความร้อน Q [W] จะคำนวณได้จากสูตรต่อไปนี้

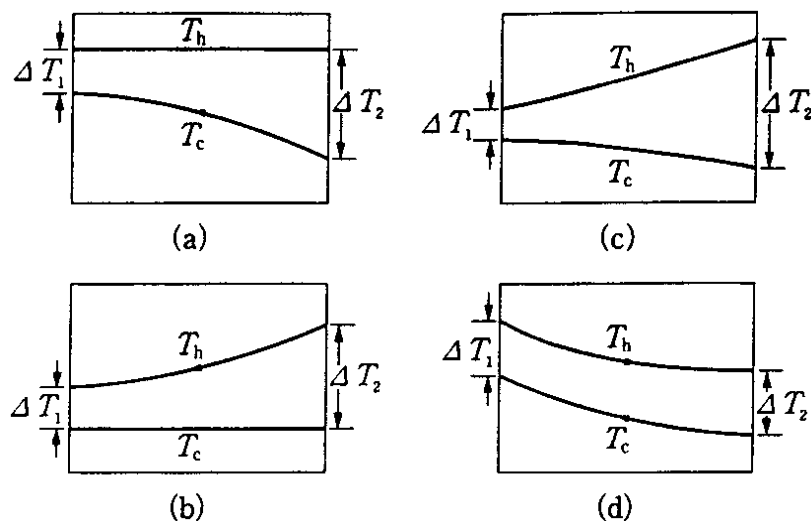
$$Q = K \cdot A \cdot \Delta T_m \quad (1.18)$$

ผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะขึ้นอยู่กับประเภทของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน กรณีที่กระแสน้ำในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนไม่มีการเปลี่ยนสถานะ อุณหภูมิของของไหลจะไม่คงที่ตามแนวทิศทางการไหล รูปที่ 1.61 แสดงลักษณะการแจกแจงอุณหภูมิในกรณีของท่อแลกเปลี่ยนความร้อนสองชั้น โดยแกนตั้งแสดงอุณหภูมิ และแกนนอนแสดงทิศทางการไหล รูปที่ 1.61 (a) แสดงกรณีที่ของไหลอุณหภูมิสูงเป็นไอระเหยอิ่มตัว แล้วใช้ความร้อนแฝงของการควบแน่น รูปที่ 1.61 (b) แสดงกรณีที่ของไหลอุณหภูมิต่ำอยู่ในสภาพเดือด รูปที่ 1.61(c) แสดงกรณีที่ไหลไปทางเดียวกัน รูปที่ 1.61 (d) แสดงกรณีที่ไหลสวนทางกัน

ในกรณีของท่อสองชั้น เราจะใช้ผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยลอการิทึม ΔT_{lm} ซึ่งคำนวณได้ดังต่อไปนี้เป็นผลต่างอุณหภูมิ

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln \left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \right)} \quad (1.19)$$

กรณีของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบหลายท่อ ซึ่งภายในลำตัวมีทั้งการไหลไปทางเดียวกันและไหลสวนกัน หรือในกรณีของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบอื่นๆ จะใช้ผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยลอการิทึมคูณกับสัมประสิทธิ์ชดเชยเพื่อหาปริมาณการแลกเปลี่ยนความร้อน

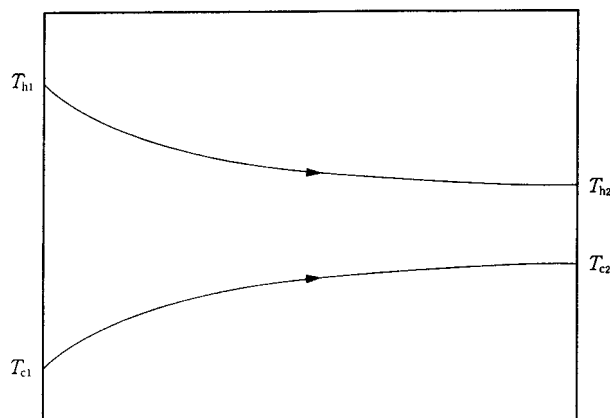


รูปที่ 1.61 ผลต่างอุณหภูมิ

1.13.3 ประสิทธิภาพเชิงอุณหภูมิ

ประสิทธิภาพเชิงอุณหภูมิเป็นค่าที่แสดงอัตราส่วนผลต่างของอุณหภูมิที่ทำได้ต่อผลต่างอุณหภูมิสูงสุดที่คาดหวังของของไหลที่พิจารณาประสิทธิภาพเชิงอุณหภูมิแบ่งตามกระแสของไหลได้เป็น ประสิทธิภาพอุณหภูมิด้านอุณหภูมิสูง η_h และประสิทธิภาพอุณหภูมิด้านอุณหภูมิต่ำ η_c

ในกรณีของการไหลไปทางเดียวกัน ถ้าสนใจที่ของไหลอุณหภูมิสูง ผลต่างอุณหภูมิสูงสุดที่คาดหวังจะเท่ากับ $(T_{h1} - T_{c1})$ และผลต่างของอุณหภูมิที่ทำได้จะเท่ากับ $(T_{h1} - T_{h2})$ ดังนั้น ประสิทธิภาพอุณหภูมิด้านอุณหภูมิสูง η_h จะเท่ากับสูตรต่อไปนี้



รูปที่ 1.62 การแจกแจงอุณหภูมิของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลไปทางเดียวกัน

$$\eta_h = \frac{T_{h1} - T_{h2}}{T_{h1} - T_{c1}} \quad (1.20)$$

ในที่นี้ T เป็นอุณหภูมิ ตัวห้อย h หมายถึงของไหลอุณหภูมิสูง ตัวห้อย c หมายถึงของไหลอุณหภูมิต่ำ ตัวห้อย 1 หมายถึงค่าที่เข้าของของไหล ตัวห้อย 2 หมายถึงค่าที่ออกของของไหล

ในทำนองเดียวกัน ประสิทธิภาพเชิงอุณหภูมิเมื่อสนใจที่ของไหลอุณหภูมิต่ำ η_c จะเท่ากับ

$$\eta_c = \frac{T_{c2} - T_{c1}}{T_{h1} - T_{c1}} \quad (1.21)$$

หากอัตราไหลและอุณหภูมิคงที่แล้ว ความต้านทานความร้อนยังมีค่าสูง (Overall heat transfer coefficient ยังมีค่าต่ำ) เท่าใด ประสิทธิภาพเชิงอุณหภูมิจะยิ่งลดลงเท่านั้น

1.13.4 ความสกปรกของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบผนังกัน เช่น เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อ ฯลฯ หากของไหลสกปรก จะมีสิ่งสกปรกไปเกาะติดที่ผิวท่อแลกเปลี่ยนความร้อนเมื่อใช้งานไปนานๆ จึงทำให้ความต้านทานความร้อนเพิ่มสูงขึ้น ปริมาณการแลกเปลี่ยนความร้อนจะลดลง นอกจากนี้ หากสิ่งสกปรกไปเกาะและสะสมภายในท่อเป็นจำนวนมาก เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อจะแคบลง ทำให้ความต้านทานการไหลเพิ่มขึ้น ความสูญเสียที่แรงขับปั๊มจึงเพิ่มขึ้นอีกด้วย

(1) สัมประสิทธิ์ความสกปรก

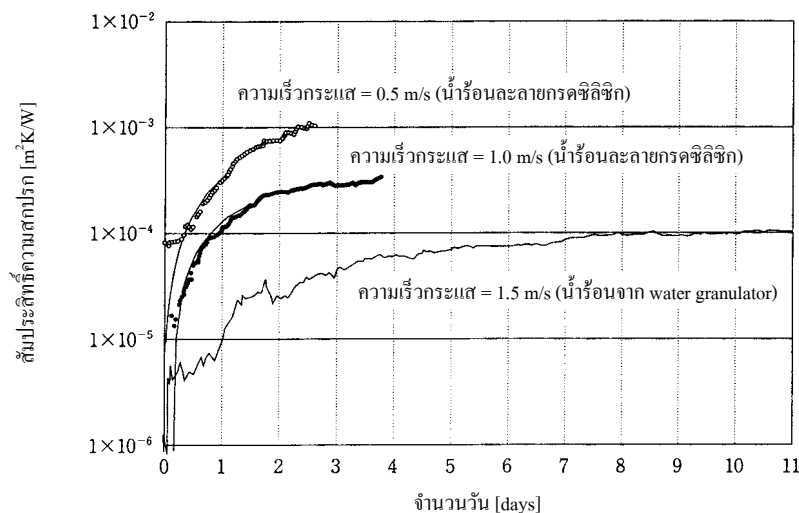
กรณีผิวท่อแลกเปลี่ยนความร้อนสกปรก เราจะใช้สัมประสิทธิ์ความสกปรก R แสดงระดับความต้านทานการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากความสกปรกนั้น

Overall heat transfer coefficient K_2 เทียบจากพื้นผิวด้านนอกของท่อในระบบท่อสองชั้น จะมีความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์ความสกปรก R ดังต่อไปนี้

$$\frac{1}{K_2} = \frac{r_2}{(\alpha_1 \cdot r_1)} + \frac{R_1 \cdot r_2}{r_1} + \left(\frac{r_2}{\lambda}\right) \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + R_2 + \frac{1}{\alpha_2} \quad (1.22)$$

ในที่นี้ สัญลักษณ์ α (สัมประสิทธิ์การพาความร้อน) λ (สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุท่อ) r (เส้นผ่านศูนย์กลาง) ตัวห้อย 1 และ 2 หมายถึงผิวท่อด้านในและผิวท่อด้านนอกตามลำดับ

สัมประสิทธิ์ความสกปรกจะขึ้นอยู่กับสภาพการเดินเครื่อง (สมบัติของของไหล อุณหภูมิ ความเร็วกระแส เป็นต้น) และสภาพของพื้นผิวถ่ายเทความร้อน (อุณหภูมิของพื้นผิว วัสดุ ลักษณะของพื้นผิว) ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา (รูปที่ 1.63) สมรรถนะในการถ่ายเทความร้อนจะเสื่อมลงเร็วเพียงใด จะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขเหล่านี้



รูปที่ 1.63 ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของสัมประสิทธิ์ความสกปรก

(2) สาเหตุของความสกปรก

สาเหตุที่ทำให้ความต้านทานความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มสูงขึ้นมีดังต่อไปนี้

- เกลือต่างๆ : เกลือต่างๆ ที่ละลายอยู่จะกลายเป็นตะกอนที่พื้นผิวถ่ายเทความร้อนในน้ำระบายความร้อนจะมี CaCO_3 , CaSO_4 , Ca(OH)_2 , Mg(OH)_2 , NaSO_4 เป็นต้น
- อนุภาคของแข็ง : อนุภาคที่ไม่ละลายในของเหลวและของแข็งต่างๆ ซึ่งจะมาเกาะและสะสมที่พื้นผิวถ่ายเทความร้อน
- การผุกร่อน : การผุกร่อนของพื้นผิวถ่ายเทความร้อน
- สิ่งมีชีวิต : มีตัวอ่อนของสัตว์น้ำมาเกาะ หรือเกิดสารเป็นเมือกเรียกว่า Slime ที่เกิดจากแบคทีเรีย
- การเยือกแข็ง : การเยือกแข็งของของเหลว เช่น น้ำ ฯลฯ ที่พื้นผิวถ่ายเทความร้อน
- Coking : มีสารลักษณะเป็น Coke หรือ Tar จากก๊าซสลายตัวอุณหภูมิสูงมาเกาะที่พื้นผิวให้ความเย็น

(3) การทำความสะอาด

กรณีที่พื้นผิวถ่ายเทความร้อนสกปรก เราสามารถกำจัดสิ่งสกปรกออกจากพื้นผิวถ่ายเทความร้อนได้ด้วยการถอดออกมาล้างทำความสะอาด หรือล้างด้วยสารเคมี (เช่น กรด เป็นต้น) หรือทำความสะอาดโดยอัตโนมัติโดยปล่อย Sponge ball เข้าไปหมุนเวียนภายใน ฯลฯ แล้วแต่ประเภทและสภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน นอกจากนี้ ในกรณีของก๊าซไอเสียจากการเผาไหม้ จะมีขี้เถ้าและสารที่ไม่เผาไหม้ต่างๆ แล้วแต่ประเภทและองค์ประกอบของเชื้อเพลิง หรือมีฝุ่นละอองมาสะสมหรือเกาะที่พื้นผิวถ่ายเทความร้อน จึงต้องพิจารณาสมบัติต่างๆ และจัดเตรียมระบบกำจัดขี้เถ้าต่างๆ ที่สะสมอยู่ เช่น การทำ Soot blow ซึ่งเป็นวิธีพ่นไอน้ำหรืออากาศเพื่อกำจัดสิ่งสกปรก เป็นต้น

1.13.5 การควบคุมประจำวัน

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถเกิดปัญหาหลายประการ เช่น สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนต่ำลง การผุกร่อน การรั่วเนื่องจากแตกร้าว ของไหลชนิดอื่นเข้าไปปนกับผลิตภัณฑ์ เป็นต้น ซึ่งไม่ได้เป็นปัญหาต่อเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเท่านั้น แต่อาจทำให้กระบวนการผลิตผิดปกติได้ การควบคุมประจำวันของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจึงมีความสำคัญมากกว่าการรักษาสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน แต่รวมถึงการควบคุมกระบวนการผลิต คุณภาพ ความปลอดภัย และสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

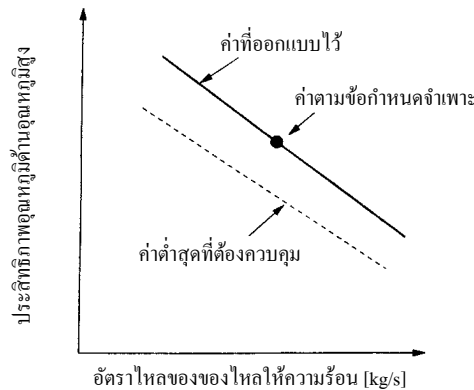
หัวข้อที่ต้องควบคุมประจำวันเกี่ยวกับสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน ได้แก่ อุณหภูมิของของไหลก่อนและหลังเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ความดัน องค์ประกอบ เป็นต้น หากสิ่งเหล่านี้เปลี่ยนแปลงไปเราจะทราบว่าอาจเกิดการสกปรก การอุดตัน และรั่วไหล

การวิเคราะห์องค์ประกอบ ให้เลือกองค์ประกอบที่สามารถตรวจสอบได้ง่ายจากจำนวนองค์ประกอบของของไหลทั้งสองที่จะแลกเปลี่ยนความร้อนกัน อนึ่ง ความดันระหว่างของไหลทั้งสองภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน จะตั้งไว้ให้ต่ำเพื่อลดผลกระทบจากการรั่วไหล ดังนั้น เพียงนำของไหลด้านที่มีความดันต่ำมาวิเคราะห์องค์ประกอบก็พอ

การควบคุมสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนด้วยการวัดอุณหภูมิ สามารถทำได้โดยใช้กราฟประสิทธิภาพเชิงอุณหภูมิ (รูปที่ 1.64) เป็นต้น ประสิทธิภาพอุณหภูมิในกรณีที่ของไหลที่สนใจอยู่ด้านอุณหภูมิสูง ให้ใช้ประสิทธิภาพอุณหภูมิด้านอุณหภูมิสูง η_h เพื่อกำจัดตัวแปรเรื่องความสกปรกภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ให้หาประสิทธิภาพอุณหภูมิจากข้อมูลการตรวจวัดอุณหภูมิทันทีหลังจากล้างทำความสะอาด แล้ว

วาดเป็นกราฟไว้ จากข้อมูลให้จัดทำภาพความสัมพันธ์ระหว่างอัตราไหลของของไหลให้ความร้อนกับประสิทธิภาพอุณหภูมิ (กรณีที่อัตราไหลของของไหลรับความร้อนมีค่าคงที่) ดังรูปที่ 1.64 แล้วตรวจสอบสภาพความสกปรก จากการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลประจำวัน และจากกราฟหรืออื่นๆ ให้กำหนดช่วงเวลา และความถี่ในการทำความสะอาดพื้นผิวถ่ายเทความร้อน ทำความสะอาดไม่ให้เบี่ยงเบนไปมากกว่าค่าขอบเขตที่ต้องควบคุม

นอกจากนี้ การวางแผนการควบคุมระบบเกี่ยวกับการเดินเครื่องเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน จะมีความแตกต่างกันอย่างมากจากสภาพที่ไม่สกปรกกับสภาพเมื่อได้เวลาทำความสะอาด ดังนั้น จึงต้องวัดการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์ความสกปรกในสภาพใช้งานเพื่อใช้อ้างอิงเวลาวางแผนด้วย



รูปที่ 1.64 ตัวอย่างกราฟควบคุมประจำวันด้วยประสิทธิภาพอุณหภูมิ

นอกจากนี้ยังมีสาเหตุอื่นๆ ที่ทำให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนลดลงอีกขึ้นอยู่กับประเภทของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เช่น ในเครื่องควบแน่นความเป็นสุญญากาศอาจลดลงเนื่องจากมีก๊าซที่ไม่ควบแน่นปะปนเข้าไป หรือสัมประสิทธิ์การพาความร้อนด้วยการควบแน่นอาจลดลงเนื่องจากมีสิ่งแปลกปลอมปะปนเข้าไป หรือในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Heat pipe อาจมีการรั่วของตัวกลางความร้อน เป็นต้น จึงต้องทำการควบคุมให้สอดคล้องกับประเภทและสมบัติของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนั้นๆ

1.14 การวัดและการควบคุมพลังงานความร้อนแบบอัตโนมัติ การวัดทางอุตสาหกรรมและหน่วยวัด

1.14.1 การวัดและการควบคุมพลังงานความร้อนแบบอัตโนมัติ

ตามมาตรฐาน JIS Z 8116:1994 “คำศัพท์เกี่ยวกับการควบคุมอัตโนมัติ - ศัพท์ทั่วไป” ให้ความหมายของการควบคุมไว้ว่า หมายถึง “การบังคับเป้าหมายการควบคุมให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์” อนึ่ง คำศัพท์ที่จะนิยามต่อไปนี้จะยึดตามมาตรฐาน JIS ดังกล่าวเช่นกัน

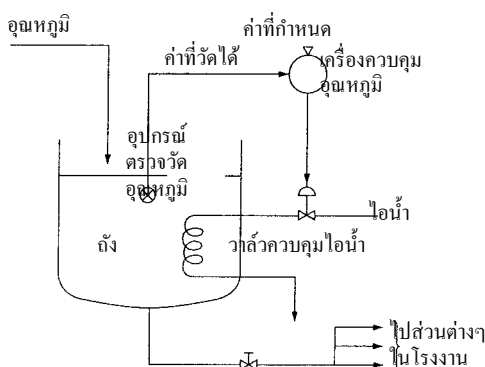
วัตถุประสงค์ของการควบคุมมีหลายประการ วัตถุประสงค์ที่พื้นฐานที่สุดได้แก่ 2 ประการต่อไปนี้

- (1) การทำให้ตัวแปรควบคุม (Controlled variable) มีค่าเท่ากับค่าที่กำหนด (Set point) และรักษาค่าไว้ให้คงที่ หรือบังคับให้ได้ตามค่าที่กำหนด
- (2) กำจัดอิทธิพล (เรียกว่าการรบกวนหรือ Disturbance) จากภายนอกที่ไม่ต้องการให้มีต่อเป้าหมายการควบคุม

ในที่นี้ตัวแปรควบคุม หมายถึง “ตัวแปรที่เป็นคุณสมบัติของเป้าหมายการควบคุม ที่เรามีวัตถุประสงค์ในการควบคุมตัวแปรนั้น” ตัวอย่างของเป้าหมายการควบคุมแสดงไว้ในรูปที่ 1.65 ในรูปเป็น

ตอนที่ 3 บทที่ 1 ระบบความร้อนและอุปกรณ์ที่ใช้ไอน้ำ

เครื่องทำความร้อนให้แก่น้ำที่อยู่ถังน้ำโดยใช้ไอน้ำ วัตถุประสงค์ของเครื่องนี้คือทำให้อุณหภูมิของน้ำในถังมีค่าเท่ากับที่กำหนด ดังนั้นตัวแปรควบคุมจึงได้แก่อุณหภูมิของน้ำในถังนั่นเอง



รูปที่ 1.65 การควบคุมอุณหภูมิของเครื่องทำน้ำอุ่น

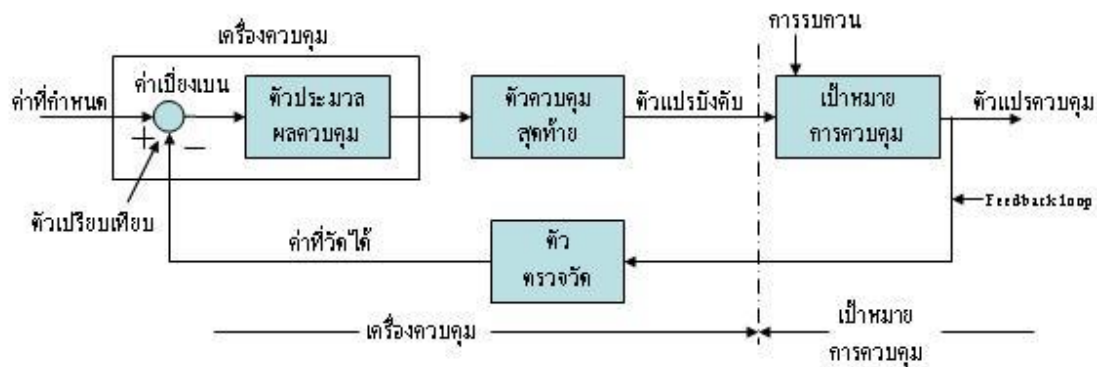
ค่าที่กำหนด มีนิยามว่า “ค่าที่กำหนดให้เป็นเป้าหมายในระบบควบคุมเพื่อให้ตัวแปรควบคุมมีค่าเท่ากับค่านั้น” ในรูปที่ 1.65 เนื่องจากเราใช้เครื่องควบคุมอุณหภูมิในการบังคับวาล์วควบคุมไอน้ำเพื่อให้อุณหภูมิของน้ำในถังเท่ากับค่าที่กำหนดไว้ ดังนั้น ค่าที่กำหนดไว้ก็คือค่าที่กำหนดนั่นเอง ทั้งนี้ บางกรณีค่าที่กำหนดอาจมีค่าไม่คงที่ แต่มีการเปลี่ยนแปลงเป็นครั้งคราวก็ได้ ในกรณีนี้ เราจะต้องทำให้ตัวแปรควบคุมให้ไล่ตามค่าที่กำหนดที่เปลี่ยนแปลงไป การควบคุมเช่นนี้ เรียกว่า Tracking control (หรือ Follow-up control) ส่วนการควบคุมที่มีค่าที่กำหนดคงที่ เรียกว่า Set-point control รูปที่ 1.65 เป็นตัวอย่างของ Set-point control ส่วน Tracking control จะอธิบายในหัวข้อ “Tracking control”

นิยามของการรบกวน หมายถึง “การกระทำจากภายนอกที่ทำให้สถานะของระบบควบคุมเสียเสถียรภาพ” ในรูปที่ 1.65 หากอัตราการไหลและอุณหภูมิของน้ำที่ไหลเข้าไปในถังมีการเปลี่ยนแปลงสถานะของระบบควบคุมนี้จะเสียเสถียรภาพ ปริมาณเหล่านี้จึงถือว่าการรบกวน

ในรูปที่ 1.65 เนื่องจากเราใช้เครื่องควบคุมอุณหภูมิในการควบคุมอุณหภูมิของน้ำในถังโดยอัตโนมัติ จึงเรียกว่า การควบคุมอัตโนมัติ กรณีที่ไม่ใช้เครื่องควบคุมอุณหภูมิ จะใช้คนปรับระดับการเปิดวาล์วควบคุมไอน้ำ เพื่อควบคุมอุณหภูมิของน้ำในถังก็ได้ ซึ่งเรียกว่า การควบคุมด้วยมือ การใช้คนปรับระดับการเปิดวาล์วควบคุมทำได้ 2 วิธี ได้แก่ กรณีที่ใช้มือปรับระดับการเปิดวาล์วโดยตรง เช่น การปรับอัตราการไหลของน้ำประปาตามบ้านเรือน กับกรณีที่ปรับระดับการเปิดวาล์วทางอ้อมโดยใช้หน้าที่การทำงานในการควบคุมด้วยมือของเครื่องควบคุมอุณหภูมิ การควบคุมด้วยมือมีนิยามว่า “การควบคุมโดยใช้คนกำหนดตัวแปรบังคับ (Manipulated variable) โดยตรงหรือทางอ้อม” ส่วนการควบคุมอัตโนมัติมีนิยามว่า “การควบคุมโดยสร้างระบบควบคุมให้ทำงานโดยอัตโนมัติ”

1.14.1.1 โครงสร้างของระบบควบคุมกับ Block diagram

ระบบควบคุม มีนิยามว่า “ระบบที่สร้างขึ้นโดยเชื่อมเครื่องควบคุมกับเป้าหมาย การควบคุมเพื่อทำการควบคุม” นิยามของเครื่องควบคุม (Controller) หมายถึง “อุปกรณ์ที่ประกอบด้วยตัวตรวจวัด ตัวเปรียบเทียบ ตัวประมวลผลควบคุม ตัวควบคุมสุดท้าย เพื่อทำหน้าที่กำเนิดค่าตัวแปรบังคับ” ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 1.66

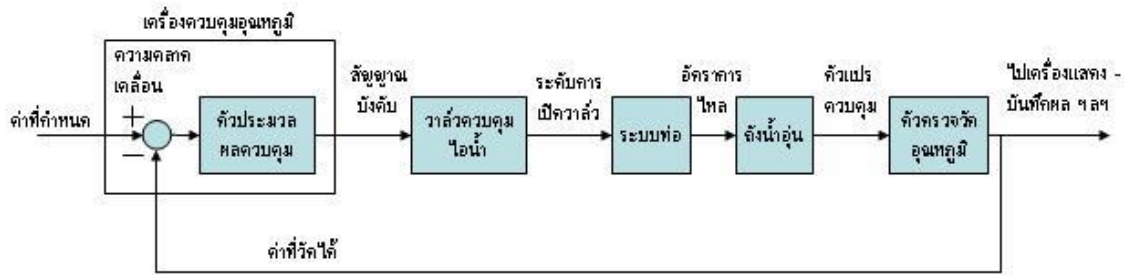


รูปที่ 1.66 โครงสร้างของระบบควบคุม

ในระบบควบคุมทั่วไป จะนำค่าที่กำหนดกับตัวแปรควบคุมมาเปรียบเทียบกับ แล้วทำการปรับตัวแปรบังคับในทิศทางที่ทำให้ผลต่าง (เรียกว่า ค่าเบี่ยงเบน) หดไป การกระทำข้างต้นจะทำให้ ตัวแปรควบคุมเปลี่ยนไป แล้วนำตัวแปรควบคุมมาผ่าน Feedback loop กลับไปที่ตัวเปรียบเทียบ และทำให้ค่า เบี่ยงเบนหดไปในที่สุด กล่าวคือ เมื่อตัวแปรควบคุมเปลี่ยนไปเนื่องจากค่าที่กำหนดเปลี่ยนไป หรือเนื่องจาก อิทธิพลของการรบกวน ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงนั้นจะถ่ายทอดไปรอบระบบควบคุมจนครบรอบ วิธีการ ควบคุมเช่นนี้ เรียกว่า การควบคุม Feedback หรือการควบคุมแบบ Closed loop นิยามของการควบคุม Feedback คือ “การควบคุมที่นำตัวแปรควบคุมมาเปรียบเทียบกับค่าที่กำหนดด้วยการ Feedback และกำหนด ตัวแปรบังคับเพื่อให้ค่าทั้งสองมีค่าเท่ากัน”

เนื่องจากตัวแปรควบคุมจะถูกตัวตรวจวัดแปลงเป็นค่าที่วัดได้ (Measured value) ก่อนนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่กำหนด ดังนั้น ค่าที่กำหนดกับตัวแปรควบคุมจึงไม่ได้ถูกเปรียบเทียบกับ โดยตรง อย่างไรก็ตาม ในเครื่องควบคุมทั่วไปจะแปลงปริมาณทั้งสองให้มีหน่วยเดียวกัน (ตัวอย่างเช่น °C) ก่อน นำไปเปรียบเทียบ ดังนั้น ในทางปฏิบัติจึงสามารถพิจารณาได้ว่าการเปรียบเทียบโดยตรง อนึ่ง ในคำอธิบาย ตั้งแต่หัวข้อถัดไปเป็นต้นไป จะใช้คำว่าค่าที่วัดได้แทนคำว่าตัวแปรควบคุม

แผนภาพที่นำส่วนประกอบต่างๆ ของระบบควบคุม มาเขียนโดยเน้นที่การ เคลื่อนที่ของสัญญาณ เรียกว่า Block diagram โดย Block diagram ของรูปที่ 1.65 แสดงไว้ในรูปที่ 1.67 ใน Block diagram อย่างเป็นทางการ จะเขียน Transfer function ไว้ในแต่ละ Block โดย Transfer function หมายถึง อัตราส่วนระหว่างสัญญาณที่ออกมาทางด้านขวาของ Block (สัญญาณขาออก) ต่อสัญญาณที่เข้าไปทางซ้ายของ Block (สัญญาณขาเข้า) โดยทั่วไปจะแสดงด้วยรูป Laplace transform



รูปที่ 1.67 Block diagram ของระบบควบคุม

1.14.1.2 การควบคุมอัตโนมัติแบบต่างๆ

(1) การแบ่งประเภทตามมุมมองทางทฤษฎี

แบ่งเป็นทฤษฎีการควบคุมแบบดั้งเดิม ทฤษฎีการควบคุมสมัยใหม่ และทฤษฎีการควบคุม Fuzzy โดยการควบคุมที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมได้แก่ ทฤษฎีการควบคุมแบบดั้งเดิม ซึ่งหัวใจของการควบคุมแบบนี้ได้แก่ การควบคุม PID โดยในหนังสือเล่มนี้จะอธิบายถึงการควบคุมแบบนี้

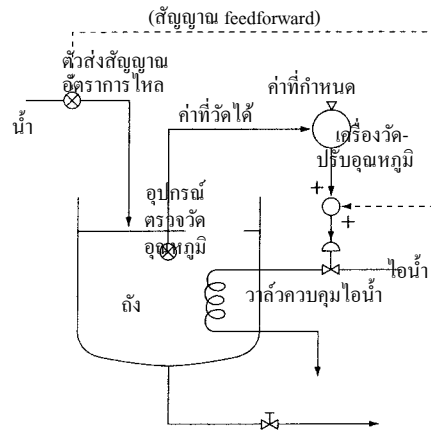
(2) การแบ่งประเภทตามวิธีการเคลื่อนที่ของสัญญาณ

(ก) การควบคุม Feedback

การควบคุม Feedback เป็นพื้นฐานของการควบคุมอัตโนมัติ ในคำอธิบายต่อไปนี้หากไม่ได้ระบุไว้เป็นพิเศษ จะหมายถึง การควบคุม Feedback ทั้งสิ้น

(ข) การควบคุม Feedforward

ในการควบคุม Feedback จะต้องคอยให้สัญญาณตัวแปรควบคุมกลับมาที่ตัวเปรียบเทียบก่อนจึงจะทราบได้ว่าการบังคับที่กระทำไปนั้นได้ผลลัพธ์ดีหรือไม่อย่างไร ดังนั้น จึงเกิดการล่าช้าขึ้นในช่วงเวลานั้นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ อย่างไรก็ตาม หากเราทราบอย่างแน่นอนว่าการรบกวนจะมีอิทธิพลอย่างไรต่อตัวแปรควบคุมแล้ว การตรวจวัดการรบกวนแล้วปรับตัวแปรควบคุมโดยตรงให้สอดคล้องกับค่าที่วัดได้จะสะดวกและรวดเร็วกว่า วิธีการควบคุมแบบนี้ เรียกว่า การควบคุม Feedforward หากใช้รูปที่ 1.65 เป็นตัวอย่างแล้ว การรบกวนที่ส่งผลกระทบอย่างมากต่ออุณหภูมิของน้ำในถัง ได้แก่ อัตราการไหลของน้ำใหม่ที่ไหลเข้ามาในถัง ดังนั้น เราจะวัดอัตราการไหลนี้เพื่อนำไปปรับระดับการเปิดวาล์วควบคุมไอน้ำ อย่างไรก็ตาม การควบคุมเพียงเท่านั้นยังไม่เพียงพอที่จะประกันว่าอุณหภูมิของน้ำในถังจะคงที่ จึงต้องใช้ร่วมกับระบบควบคุม Feedback ในรูปที่ 1.65 ซึ่งจะได้ระบบที่แสดงในรูปที่ 1.68 นิยามของการควบคุม Feedforward หมายถึง “การควบคุมโดยกำหนดตัวแปรควบคุมตามข้อมูลเกี่ยวกับค่าที่กำหนด การรบกวน ฯลฯ”



รูปที่ 1.68 การควบคุมร่วม Feedback กับ Feedforward

(ค) การควบคุม Sequential

นิยามของการควบคุม Sequential หมายถึง “การควบคุมที่ดำเนินไปทีละขั้นทีละขั้นตามลำดับหรือขั้นตอนที่กำหนดเอาไว้ล่วงหน้า” ตัวอย่างที่ใกล้ตัว ได้แก่ เครื่องซักผ้าไฟฟ้าตามครัวเรือน

การควบคุม Sequential ไม่มีทั้งค่าที่กำหนดและ Feedback loop ดังนั้น จึงไม่สามารถทำให้ตัวแปรควบคุมมีค่าคงที่ได้ การควบคุม Sequential ใช้กันมากในระบบอัตโนมัติในการแปรรูป ประกอบเครื่องจักร และการลำเลียง ฯลฯ ในหนังสือเล่มนี้จะไม่อธิบายถึงการควบคุมแบบนี้

(3) การแบ่งประเภทตามวิธีการประมวลผลสัญญาณ

แบ่งได้เป็นการควบคุมอนาล็อกกับการควบคุมดิจิทัล การควบคุมแบบแรกเป็นวิธีควบคุมโดยประมวลผลควบคุมด้วยสัญญาณอนาล็อก (สัญญาณที่แสดงด้วยขนาดของปริมาณที่มีความต่อเนื่อง) โดยรูปธรรมแล้วจะใช้เครื่องประมวลผล-ขยายสัญญาณอนาล็อก ส่วนการควบคุมแบบหลังเป็นวิธีควบคุมโดยประมวลผลควบคุมด้วยสัญญาณดิจิทัล (สัญญาณที่แสดงด้วยสัญลักษณ์ที่ไม่ต่อเนื่องซึ่งแสดงถึงค่าตัวเลข) โดยรูปธรรมแล้วจะใช้เครื่องแปลงสัญญาณ A/D กับไมโครโปรเซสเซอร์

ปัจจุบันการควบคุมอนาล็อกไม่ค่อยมีใช้กันในทางปฏิบัติ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการควบคุมดิจิทัลโดยทั่วไปจะมีคาบการ Sampling (ระยะห่างของเวลาในการประมวลผล) สั้น และสัญญาณขาออกของเครื่องควบคุมโดยทั่วไปจะเป็นสัญญาณอนาล็อก (โดยทั่วไป 4-20 mA DC) ดังนั้น ในทางปฏิบัติจึงไม่จำเป็นต้องแยก

1.14.1.3 การควบคุม PID

เครื่องควบคุมที่มีจำหน่ายในท้องตลาดเกือบทั้งหมดจะทำงานแบบ PID นอกจากนั้นเครื่องควบคุมจำนวนมากยังสามารถเลือกรูปแบบการทำงานได้หลายแบบตั้งแต่ การทำงาน ON-OFF การทำงาน Proportional (การทำงาน P) การทำงาน Proportional-integral (การทำงาน PI) การทำงาน Proportional-integral-derivative

การทำงาน ON-OFF

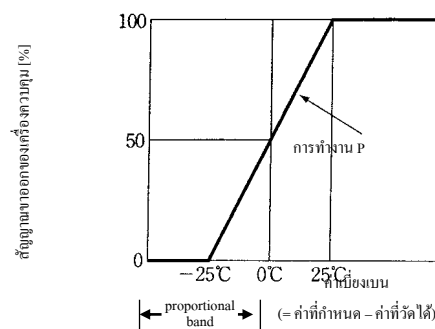
การทำให้อุณหภูมิของน้ำในถังมีค่าเท่ากับค่าที่กำหนดวิธีหนึ่ง ได้แก่ หากน้ำมีอุณหภูมิต่ำกว่าค่าที่กำหนด ให้เปิดวาล์วควบคุมจนสุดเพื่อปล่อยไอน้ำออกมา หากสูงกว่าค่าที่กำหนดให้ปิดวาล์วควบคุมจนสุดเพื่อ

ตอนที่ 3 บทที่ 1 ระบบความร้อนและอุปกรณ์ที่ใช้ไอน้ำ

หยุดไอน้ำไว้ การทำงานแบบนี้เรียกว่า การทำงาน ON-OFF อย่างไรก็ตาม การทำงาน ON-OFF อุณหภูมิของน้ำในถังจะไม่คงที่ แต่แกว่งไปอย่างต่อเนื่อง บางขณะก็สูง บางขณะก็ต่ำกว่าค่าที่กำหนด

การทำงาน Proportional

การที่อุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงเช่นนี้ เนื่องจากวาล์วควบคุมมีการทำงานเพียง 2 สถานะ กล่าวคือ เปิดสุดหรือปิดสุดเท่านั้น หากสามารถปรับระดับการเปิดวาล์วได้ทีละน้อย อุณหภูมิก็จะมีการเปลี่ยนแปลงทีละน้อยเช่นกัน หากสามารถปรับระดับการเปิดวาล์วควบคุมได้ต่อเนื่องแปรผันตามค่าเบี่ยงเบน (ค่าที่กำหนด – ค่าที่วัดได้) แล้ว การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำจะแทบไม่แกว่งอีกต่อไป การทำงานโดยให้ระดับการเปิดวาล์วควบคุมแปรผันตามค่าเบี่ยงเบนเช่นนี้ เรียกว่า การทำงาน Proportional หรือการทำงาน P (P เป็นอักษรตัวแรกของคำว่า Proportional) อนึ่ง แม้ว่าที่ผ่านมาจะอธิบายโดยใช้คำว่าระดับการเปิดวาล์วควบคุม แต่เนื่องจากสัญญาณขาออกของเครื่องควบคุมจะมีค่าเกือบเท่ากับระดับการเปิดวาล์วควบคุม ดังนั้น ต่อไปนี้จะอธิบายโดยใช้คำว่าสัญญาณขาออกของเครื่องควบคุม



รูปที่ 1.69 การทำงานแบบ P

ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างค่าเบี่ยงเบนกับสัญญาณขาออกเมื่อเครื่องควบคุมทำงานแบบ P แสดงไว้ในรูปที่ 1.69 ความสัมพันธ์ดังรูปนี้แสดงได้ตามสมการดังต่อไปนี้

$$\text{สัญญาณขาออกของเครื่องควบคุม } [\%] = 50 [\%] + 2 \times \text{ค่าเบี่ยงเบน } [^{\circ}\text{C}]$$

พจน์ที่ 1 ทางด้านขวาของสมการ (1.23) จะเท่ากับสัญญาณขาออกของเครื่องวัดเมื่อค่าเบี่ยงเบนเท่ากับ 0 ซึ่งจะแสดงด้วย mv_0 และพจน์ที่ 2 เป็นการเปลี่ยนแปลงสัญญาณขาออกของเครื่องวัดที่เกิดจากค่าเบี่ยงเบน ค่าคงที่ที่คูณอยู่กับค่าเบี่ยงเบน (ในที่นี้เท่ากับ 2) เรียกว่า Proportional gain (K_p) นอกจากนี้ค่าเบี่ยงเบนโดยทั่วไปยังมักนำมาหารด้วย Span การวัด (ผลต่างระหว่างค่าสูงสุดกับค่าต่ำสุดของช่วงการวัด) ของเครื่องควบคุมแล้วคูณด้วย 100 เพื่อแสดงค่าเป็น % อีกด้วย

ถ้าให้สัญญาณขาออกของเครื่องควบคุมเท่ากับ mv [%] ให้ค่าเบี่ยงเบนเท่ากับ e [%] แล้ว

$$mv = mv_0 + K_p \cdot e \quad (1.23)$$

สมการนี้เป็นสมการทั่วไปของเครื่องควบคุมที่ทำงานแบบ P ตัวอย่างเช่น ถ้าให้ span การวัดของเครื่องควบคุมเท่ากับ 200°C แล้ว K_p ในรูปที่ 1.69 จะเท่ากับ 4 (เมื่อค่าเบี่ยงเบนเปลี่ยนไป $\pm 12.5\%$ สัญญาณขาออกจะเปลี่ยนไป $\pm 50\%$)

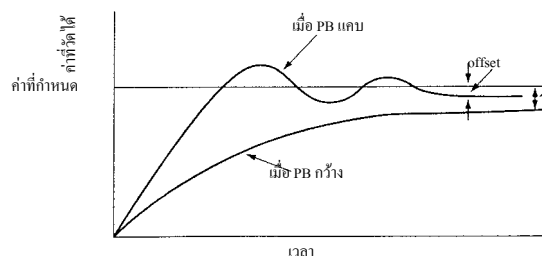
อนึ่ง เครื่องควบคุมในท้องตลาด จะใช้ Proportional band แทน Proportional gain ซึ่งค่า Proportional band จะแสดงช่วงค่าเบี่ยงเบนเป็น % ที่ทำให้สัญญาณขาออกของเครื่องควบคุมมีค่าตั้งแต่

0-100% ซึ่งในตัวอย่างในรูปที่ 1.69 จะมีค่าเท่ากับ 25% สัญญาณของ Proportional band เขียนแทนด้วย PB ความสัมพันธ์กับ Proportional gain ได้แก่ $K_p = 100 / PB$

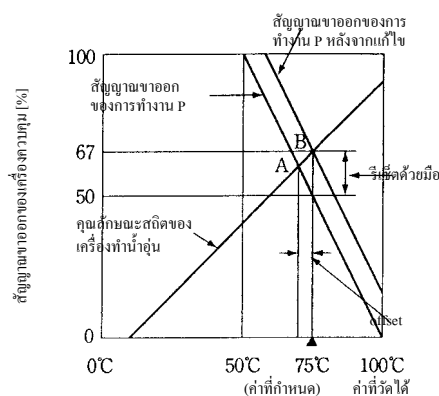
เครื่องควบคุมที่ทำงานแบบ P บางเครื่อง เมื่อควบคุมระบบควบคุมในรูปที่ 1.65 การเปลี่ยนแปลงตามเวลาของการควบคุมโดยทั่วไปจะแสดงได้ดังรูปที่ 1.70 หาก PB มีช่วงแคบ (Proportional gain มีค่าสูง) ค่าที่วัดได้จะแกว่ง ถ้า PB เท่ากับ 0% จะทำงานแบบ ON-OFF เมื่อ PB มีช่วงกว้างขึ้น (Proportional gain มีค่าต่ำลง) การเปลี่ยนแปลงสัญญาณขาออกของเครื่องวัด-ปรับเทียบกับค่าเบี่ยงเบนจะลดลง ทำให้ค่าที่วัดได้ไม่แกว่งอีกต่อไป แต่การเปลี่ยนแปลงค่าที่วัดได้จะช้า และสุดท้ายแล้วจะมีค่าเบี่ยงเบนเหลืออยู่ ค่าเบี่ยงเบนที่เหลืออยู่นี้เรียกว่า Offset

ต่อไปนี้จะอธิบายเหตุผลที่เกิด Offset ขึ้นด้วยรูปที่ 1.71 คุณลักษณะสถิต (Static characteristics) ของเครื่องทำน้ำอุ่น จะขึ้นอยู่กับการไหลของไอน้ำ (ต่อสัญญาณขาออกของเครื่องควบคุม) กับอัตราการไหลของน้ำที่ไหลผ่านถัง และอุณหภูมิของน้ำที่ไหลเข้ามาในถัง คุณลักษณะดังกล่าวนี้ก็คือเส้นตรงที่พุ่งขึ้นทางด้านขวาในรูปที่ 1.71 ส่วนคุณลักษณะของสัญญาณขาออกของเครื่องควบคุมซึ่งเทียบเท่ากับรูปที่ 1.69 เมื่อให้ค่าที่กำหนดเท่ากับ 75°C จะแสดงด้วยเส้นตรง “สัญญาณขาออกของการทำงาน P” อุณหภูมิสุดท้ายในระบบควบคุมนี้ จะเท่ากับจุดตัดของเส้นตรงทั้งสอง (จุด A) ซึ่งจุดนี้โดยทั่วไปจะไม่เท่ากับค่าที่กำหนด หากต้องการทำให้อุณหภูมิของน้ำมีค่าเท่ากับ 75°C จะต้องแก้ไขคุณลักษณะสัญญาณขาออกของเครื่องควบคุม เพื่อให้จุดตัดกับคุณลักษณะสถิตของเครื่องทำน้ำอุ่นอยู่ที่จุด B การแก้ไขเช่นนี้เรียกว่า การรีเซ็ตด้วยมือ ซึ่งเทียบเท่ากับการแก้ไขค่า mv_0 ในสมการที่ (1.23) ในตัวอย่างในรูปที่ 1.71 เมื่อแก้ไขค่า mv_0 จากเดิม 50% เป็น 67% แล้วค่า Offset จะหายไป

เครื่องควบคุมที่ทำงานแบบ P ที่มีจำหน่ายในท้องตลาด โดยทั่วไปจะมีหน้าที่การทำงานในการรีเซ็ตด้วยมือได้



รูปที่ 1.70 การเปลี่ยนแปลงของการควบคุมในการทำงาน P



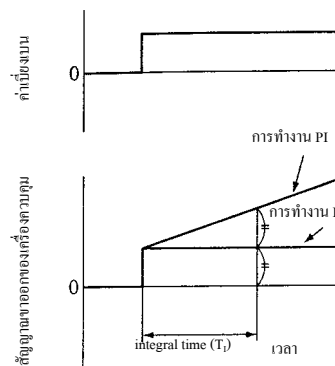
รูปที่ 1.71 ภาพอธิบาย Offset

การทำงาน Integral

ขนาดของ Offset ไม่ได้คงที่เสมอไป แต่จะเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของเป้าหมายการควบคุม (ตัวอย่างเช่น อัตราการไหลและอุณหภูมิของน้ำในตัวอย่างที่แล้ว) ดังนั้น เราจึงไม่แก้ไขด้วยการรีเซ็ตด้วยมือทีละครั้งทีละครั้ง แต่ให้เครื่องควบคุมทำการแก้ไขด้วยตัวเอง ซึ่งเรียกว่า การทำงาน Integral

ในการทำงาน Integral เราจะใช้ค่าค่าเบี่ยงเบนที่อินทิเกรตด้วยเวลาเป็นสัญญาณขาออก โดยทั่วไปจะนำสัญญาณนี้ไปบวกกับการทำงาน Proportional เรียกว่า การทำงาน Proportional-integral เมื่อนำค่าเบี่ยงเบนที่อินทิเกรตแล้วไปบวกกับสัญญาณขาออกของการทำงาน P สัญญาณขาออกของเครื่องควบคุมจะค่อยๆ เปลี่ยนแปลงไปทีละน้อยตรงเท่าที่ยังมีค่าเบี่ยงเบนอยู่ และความเร็วในการเปลี่ยนแปลงนั้นจะแปรผันตามขนาดของค่าเบี่ยงเบน เมื่อค่าเบี่ยงเบนเป็น 0 การเปลี่ยนแปลงจึงหยุด ถ้าอธิบายด้วยรูปที่ 1.72 หมายความว่า เส้นตรง “สัญญาณขาออกของการทำงาน P” จะย้ายที่ไปอยู่ที่เส้นตรง “สัญญาณขาออกของการทำงาน P หลังจากแก้ไข” กล่าวคือ เครื่องควบคุมจะทำการรีเซ็ตด้วยมือโดยอัตโนมัติ จึงเรียกว่า การรีเซ็ตอัตโนมัติก็ได้ อนึ่ง การทำงาน Integral เรียกว่า การทำงาน I ซึ่งมาจากอักษร “I” ตัวแรกของคำว่า Integral

ระดับของการทำงาน I แสดงด้วย Integral time (T_I) รูปที่ 1.72 แสดงสัญญาณขาออกของเครื่องควบคุมของการทำงาน P และการทำงาน PI เมื่อมีสัญญาณค่าเบี่ยงเบนรูปขั้นบันไดป้อนเข้ามาที่เครื่องควบคุม และค่าค่าเบี่ยงเบนนั้นมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง ในกรณีนี้ ระยะเวลาจนถึงเมื่อสัญญาณขาออกจากการทำงาน I มีค่าเท่ากับสัญญาณขาออกจากการทำงาน P เรียกว่า Integral time ถ้า Integral time มีระยะเวลานาน สัญญาณขาออกของการทำงานส่วน I จะเปลี่ยนแปลงช้า ดังนั้นการทำงาน I จึงมีระดับความรุนแรงน้อย หาก Integral time มีระยะเวลานั้นสั้นเกินไป ค่าที่วัดได้จะแกว่ง ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Hunting ของการทำงาน I หาก Integral time เท่ากับ 0 จะมีคุณสมบัติเหมือนกับการทำงาน ON-OFF



รูปที่ 1.72 การทำงาน PI

การทำงาน Derivative

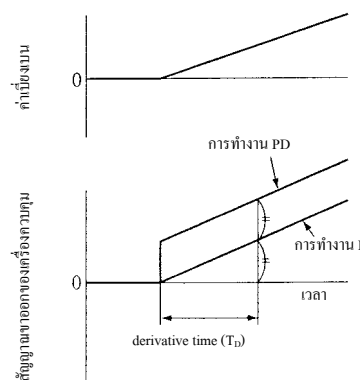
การทำงาน Derivative ถูกคิดค้นขึ้นมาเพื่อกำจัดผลกระทบของการรบกวนให้หมดไปอย่างรวดเร็วเป็นหลัก ในเครื่องทำน้ำอุ่นในรูปที่ 1.65 สมมติว่าใช้น้ำอุ่นไปเป็นปริมาณมาก เนื่องจากเราจำเป็นต้องรักษาระดับน้ำในถังให้ค่อนข้างคงที่ จึงต้องเติมน้ำเข้าไปใหม่เป็นจำนวนมากเช่นกัน เมื่อจำเช่นนั้นอุณหภูมิของน้ำในถังจะลดลงอย่างรวดเร็ว การทำให้ผลกระทบนั้นหมดไปอย่างรวดเร็วได้จะต้องเปิดวาล์วควบคุมไอน้ำให้มากอย่างรวดเร็วก็ตาม

เนื่องจากสัญญาณขาออกของเครื่องควบคุมที่ทำงานแบบ P จะขึ้นอยู่กับค่าเบี่ยงเบนกับ PB ดังนั้น จึงไม่จำเป็นว่าสัญญาณขาออกจะมีค่าสูงเสมอไป ดังนั้น ถ้าตรวจวัดความเร็วการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำ

ในถัง แล้วบวกสัญญาณขาออกที่แปรผันตามความเร็วนี้เข้ากับสัญญาณขาออกของการทำงาน P แล้วจะได้สัญญาณขาออกที่มีค่าสูง จึงสามารถเพิ่มอุณหภูมิของน้ำกลับได้อย่างรวดเร็ว

ความเร็วการเปลี่ยนแปลงของค่าที่วัดได้ซึ่งได้แก่อุณหภูมิของน้ำ จะแปรผันตามค่าอนุพันธ์ของค่าที่วัดได้ ดังนั้นการทำงานนี้จึงเรียกว่าการทำงาน Derivative หรือการทำงาน D (D เป็นตัวอักษรตัวแรกของคำว่า Derivative) แต่การทำงาน P เพียงอย่างเดียวไม่สามารถใช้ในการควบคุมอัตโนมัติได้ ดังนั้น จึงต้องใช้ร่วมกับการทำงาน P หรือการทำงาน PI เสมอ

ระดับของการทำงาน D จะแสดงด้วย Derivative time (T_D) รูปที่ 1.73 แสดงสัญญาณขาออกของเครื่องควบคุมของการทำงาน PD เมื่อสัญญาณค่าเบี่ยงเบน (หรือค่าที่วัด) เปลี่ยนแปลงด้วยความเร็วคงที่ ถ้า Derivative time มีระยะเวลานาน สัญญาณขาออกของการทำงาน D จะมีค่าสูง ดังนั้น การทำงาน D จึงมีระดับความรุนแรงมาก ดังนั้น หาก Derivative time มีระยะเวลายาวเกินไป ค่าที่วัดได้จะแกว่ง หาก Derivative time มีค่าเป็น 0 การทำงาน D จะไม่มีเกิดอะไรขึ้นเลย อนึ่ง หากค่าเบี่ยงเบนมีการเปลี่ยนแปลงเป็นรูปขั้นบันได สัญญาณขาออกตามทฤษฎีของการทำงาน D จะเป็นพัลส์ที่มีความสูงเป็นอนันต์และมีความกว้างตามแกนเวลาเท่ากับ 0 ซึ่งในปฏิบัติเป็นไปได้ รวมทั้งหากพยายามทำให้การทำงานมีความใกล้เคียงกับทฤษฎีจะมีอันตรายต่อตัวควบคุมสุดท้าย ดังนั้น โดยทั่วไปจะใช้การทำงานที่เรียกว่า Inexact derivative กล่าวคือ เสมือนการนำสัญญาณขาออกของการกระทำ P มาทำให้เปลี่ยนแปลงช้าลงบ้าง



รูปที่ 1.73 การทำงาน PD

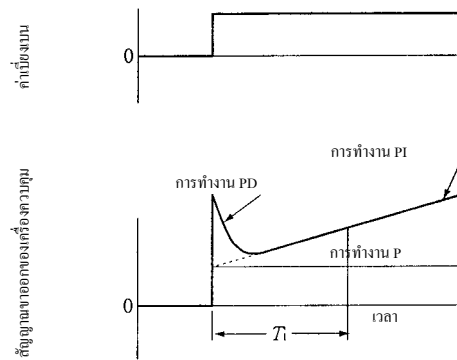
การทำงาน PID กับเครื่องควบคุม PID

ตามที่ได้อธิบายไปแล้วว่า หากเครื่องควบคุมมีการทำงานทั้ง 3 อย่าง ได้แก่ การทำงาน P การทำงาน I และการทำงาน D จะทำให้มีประสิทธิภาพมาก ในที่นี้ การทำงานร่วมกันระหว่างการทำงานทั้ง 3 ประเภท เรียกว่า การทำงาน PID และวิธีการควบคุมที่ใช้การทำงาน PID นี้ เรียกว่า การควบคุม PID อนึ่ง ค่า PD ค่า Integral time และค่า Derivative time เรียกว่าค่าคงที่ PID

สมการที่ (1.24) เป็นสมการคณิตศาสตร์ที่แสดงสัญญาณขาออกของเครื่องควบคุมที่ทำงานแบบ PID อนึ่ง ค่า mv_0 หมายถึงค่าสัญญาณขาออกขณะที่เริ่มเปิดเครื่องวัด PID เมื่อค่าเบี่ยงเบนเท่ากับ 0

$$mv = mv_0 + \frac{100}{PB} \left\{ e + \frac{1}{T_I} \int e \, dt + T_D \frac{d}{dt} e \right\} \quad (1.24)$$

รูปที่ 1.74 แสดงการเปลี่ยนแปลงสัญญาณขาออกเมื่อมีสัญญาณค่าเบี่ยงเบนรูปขั้นบันไดป้อนให้เครื่องควบคุม PID แบบ Inexact derivative (การเปลี่ยนแปลงนี้เรียกว่า Step response)

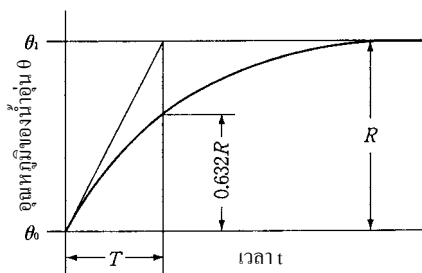


รูปที่ 1.74 Step response ของเครื่องควบคุม PID

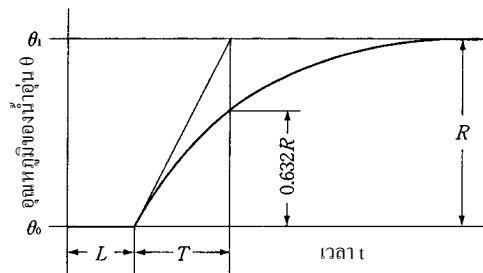
อนึ่ง ในคำอธิบายที่ผ่านมา เราได้ใช้การทำงาน PID เมื่อมีค่าเบี่ยงเบน e แต่เนื่องจากค่าเบี่ยงเบนมีค่าเท่ากับ ค่าที่กำหนด - ค่าที่วัดได้ ดังนั้น กรณีที่พนักงานปฏิบัติงานเปลี่ยนแปลงค่าที่กำหนด ก็จะทำให้การทำงาน PID ขึ้นเช่นกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่การทำงาน D ค่อนข้างมีความรุนแรงมากนั้น ทุกครั้งที่เปลี่ยนแปลงค่าที่กำหนด สัญญาณขาออกของเครื่องควบคุมจะเปลี่ยนแปลงอย่างมาก เพื่อหลีกเลี่ยงอาการดังกล่าวนี้ เครื่องควบคุมบางชนิดจะใช้ค่าที่วัดได้แทนค่าเบี่ยงเบนในการทำงาน D เครื่องควบคุมแบบนี้เรียกว่า เครื่องควบคุมแบบอนุพันธ์ค่าที่วัดได้

คุณลักษณะของกระบวนการผลิตกับวิธีวัดคุณลักษณะ

เมื่อเราพิจารณาการไหลของสัญญาณ กระบวนการผลิตจะสามารถแบ่งออกเป็น Element ได้หลายๆ ตัว เมื่อแบ่งเครื่องทำน้ำอุ่นในรูปที่ 1.65 ออกเป็น Element ต่างๆ จะได้รูปที่ 1.67 คุณลักษณะสัญญาณขาเข้า-ขาออกของแต่ละ Element ตั้งแต่ตัวลวปรับไอน้ำจนถึงตัวตรวจวัดอุณหภูมิ สามารถประมาณได้ด้วยคุณลักษณะ First order โดยคุณลักษณะ First order หมายถึง คุณลักษณะ Step response ที่แสดงในรูปที่ 1.75 หากเป็นวงจรไฟฟ้าจะเป็นคุณลักษณะที่พบได้ในวงจร CR ค่า T ที่แสดงในรูปที่ 1.75 เรียกว่า Time constant ในกระบวนการผลิตทั่วไป จะมี Element ที่มีคุณลักษณะ First order เช่นนี้ต่อเนื่องกันเป็นจำนวนมาก นอกจากนี้ ยังมีบาง Element ที่มีคุณลักษณะ Dead time อีกด้วย ตัวอย่างเช่น ในรูปที่ 1.65 สมมติว่าตัวตรวจวัดอุณหภูมิติดตั้งอยู่ที่ปลายท่อทางออกถังน้ำ เมื่อเป็นเช่นนั้น แม้อุณหภูมิในถังจะเปลี่ยนแปลงไปแล้ว กว่าตัวตรวจวัดอุณหภูมิจะตรวจจับการเปลี่ยนแปลงนี้ได้ จะต้องให้เวลาผ่านไประยะหนึ่งก่อน ดังนั้น Step response ในกรณีนี้จะใกล้เคียงกับรูปที่ 1.76 ค่า L ในรูปนี้เรียกว่า Dead time กล่าวคือ คุณลักษณะของกระบวนการผลิตส่วนใหญ่ จะสามารถพิจารณาได้กว่าประกอบด้วยคุณลักษณะ First order จำนวนมากกับคุณลักษณะ Dead time นั้นเอง



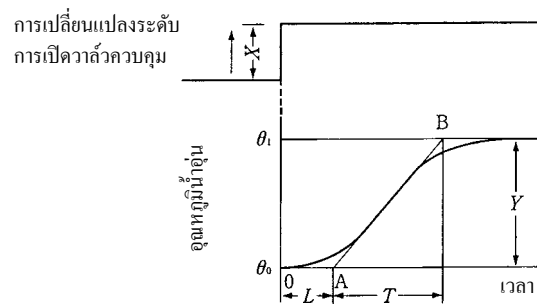
รูปที่ 1.75 Step response ของ First order element



รูปที่ 1.76 Step response ของ Dead time + First order element

วิธีวัดคุณลักษณะของกระบวนการผลิต มีทั้งวิธี Step response และวิธี Ultimate sensitivity แต่โดยทั่วไปจะใช้วิธีแรก วิธีดังกล่าวจะเปิดวาล์วควบคุมเป็นรูปขั้นบันไดไปที่ระดับหนึ่งในสภาพที่ไม่ได้ทำการควบคุม แล้วตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของค่าที่วัดได้ โดยทั่วไป ค่าที่วัดได้จะมีการเปลี่ยนแปลงดังรูปที่ 1.77 แต่ในรูปนี้จะวัดเชิงปริมาณได้ยาก ดังนั้น จึงลากเส้นสัมผัสกับจุดที่มีความเร็วของการเปลี่ยนแปลงค่าที่วัดได้สูงที่สุด และหาค่า L กับ T ตามที่แสดงในรูป ค่าทั้งสองนี้เรียกว่า Dead time สมมูลและ Time constant สมมูลตามลำดับ การทำเช่นนี้จะเทียบเท่ากับการนำคุณลักษณะในรูปที่ 1.77 มาประมาณให้เป็นรูปที่ 1.76 นั่นเอง การเปลี่ยนแปลงสุดท้ายของค่าที่วัดได้ [%] หาด้วยการเปลี่ยนแปลงระดับการเปิดวาล์วควบคุม [%] เรียกว่า Process gain (K_{pr}) ซึ่งตามรูปที่ 1.77 จะเท่ากับ Y / X

อนึ่ง โดยทั่วไปจะใช้การเปลี่ยนแปลงสัญญาณขาออกของเครื่องควบคุมแทนการเปลี่ยนแปลงระดับการเปิดวาล์วควบคุม



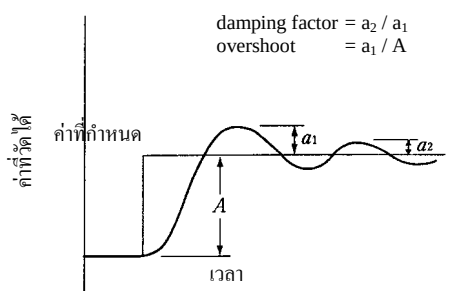
รูปที่ 1.77 ตัวอย่าง Step response ของกระบวนการผลิต

การปรับค่าคงที่ PID

เราอาจพิจารณาได้ว่า วัตถุประสงค์ในทางปฏิบัติของการควบคุมอัตโนมัติมี 2 ประการดังต่อไปนี้

- (1) เมื่อค่าที่กำหนดเปลี่ยนแปลงไป ต้องพยายามทำให้ค่าที่วัดได้เท่ากับค่าที่กำหนดให้เร็วที่สุดเท่าที่จะทำได้ (การตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าที่กำหนด)
- (2) เมื่อการรบกวนหรือการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขของสภาพแวดล้อม ถึงแม้ว่าค่าที่วัดได้จะเบี่ยงเบนไปจากค่าที่กำหนดไว้ไปชั่วขณะหนึ่ง แต่ก็ต้องทำให้กลับเข้าที่เดิมให้เร็วที่สุดเท่าที่จะทำได้ (การตอบสนองต่อการรบกวน)

ในจำนวนวัตถุประสงค์ข้างต้น สำหรับข้อ (1) เมื่อค่าที่กำหนดได้มีการเปลี่ยนแปลงเป็นรูปขั้นบันได ค่าที่วัดได้จะเปลี่ยนแปลงเกือบเหมือนรูปที่ 1.78 ในกรณีนี้ ค่าที่วัดได้จะเพิ่มเกินค่าที่กำหนดไว้ไประยะหนึ่ง หลังจากนั้นจะมีการแกว่งบ้างจนมีค่าเท่ากับค่าที่กำหนดไว้ ตัวเลขที่ใช้แสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงในช่วงนี้ได้แก่ Damping factor และ Overshoot ที่แสดงไว้ในรูป นอกจากนี้ เวลาที่จนกว่าค่าที่วัดได้จะมีค่าเกือบเท่ากับค่าที่กำหนด เรียกว่า Settling time



รูปที่ 1.78 ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงค่าที่วัดได้เมื่อทำการควบคุม PID

สำหรับวัตถุประสงค์ของการควบคุมบางอย่าง หากค่าที่วัดได้เพิ่มขึ้นสูงกว่าค่าที่กำหนดอาจเกิดปัญหา เช่น การทำ Quenching การฆ่าเชื้อผลิตภัณฑ์อาหาร เป็นต้น ซึ่งหากอุณหภูมิสูงเกินกว่าค่าหนึ่งผลิตภัณฑ์อาจเสียหายได้ ดังนั้น จึงใช้ Overshoot เป็นเสมือนกับเงื่อนไขการควบคุมให้ Setting time มีระยะเวลาน้อยที่สุด หรือบางครั้งก็ใช้ Damping factor เป็นเงื่อนไขการควบคุม แต่ในกรณีนี้จะหมายความว่าต้องเกิด Overshoot ขึ้นเสมอ

สำหรับการตอบสนองต่อการรบกวนในข้อ (2) ก็สามารถอธิบายได้ในทำนองเดียวกับข้างต้น

การปรับค่าคงที่ PID ภายใต้เงื่อนไขที่กล่าวไปแล้วข้างต้น เรียกว่า การ Optimization ค่าคงที่ PID มีผู้เสนอวิธีการปรับค่าคงที่นี้หลายวิธี แต่วิธีที่เป็นที่รู้จักกันดีจะแสดงไว้ในตารางที่ 1.8 ค่า K_{pr} , L , T ในตารางนี้เป็นค่าคุณลักษณะของกระบวนการซึ่งหาได้ด้วยวิธี Step response

ตารางที่ 1.8 ค่าคงที่ PID ในการทำ Optimization

ผู้เสนอ	ประเภท ^{*1}	การทำงานควบคุม	PB [%]	T_i [min]	T_p [min]	เงื่อนไข
Ziegler Nichols	A, B	PI	$110 K_{pr} L / T$	3.3L	–	damping factor 25%
		PID	$83 K_{pr} L / T$	2L	0.5L	
Chien Hrones Reswick	A	PI	$167 K_{pr} L / T$	T	–	การตอบสนองสั้นที่สุดที่ overshoot 20%
		PID	$105 K_{pr} L / T$	1.35T	0.47L	
Chien Hrones Reswick	B	PI	$143 K_{pr} L / T$	2.3L	–	การตอบสนองสั้นที่สุดที่ overshoot 20%
		PID	$83 K_{pr} L / T$	2L	0.42L	
Chien Hrones Reswick	A	PI	$286 K_{pr} L / T$	1.2T	–	การตอบสนองสั้นที่สุดโดยไม่ overshoot
		PID	$167 K_{pr} L / T$	T	0.5L	
Chien Hrones Reswick	B	PI	$167 K_{pr} L / T$	4L	–	การตอบสนองสั้นที่สุดโดยไม่ overshoot
		PID	$105 K_{pr} L / T$	2.4T	0.4L	

*1 ประเภท A : กรณีที่เปลี่ยนแปลงค่าที่กำหนดไว้ของการควบคุม

ประเภท B : กรณีของการตอบสนองการรบกวน

*2 K_{pr} : process gain

อนึ่ง เครื่องควบคุมบางชนิดจะสามารถวัดคุณลักษณะของกระบวนการ และกำหนดค่าคงที่ PID เองได้ หน้าที่การทำงานนี้เรียกว่า Automatic tuning

ในที่นี้ จะสรุปผลของค่าคงที่ PID ต่างๆ ในการควบคุมได้ดังต่อไปนี้

(1) PB (Proportional band) : หาก PB มีค่าน้อย เมื่อมีการรบกวนหรือเมื่อเปลี่ยนค่าเป้าหมาย จะทำงานแก้ไขได้รวดเร็ว อย่างไรก็ตาม การตอบสนองจะแกว่ง

(2) Integral time : หาก Integral time มีค่าน้อย จะสามารถกำจัด Offset ได้เร็ว แต่หากมีค่าน้อยเกินไปการตอบสนองจะแกว่ง

(3) Derivative time : หาก Derivative time มีค่ามาก จะมีผลในการลดการตอบสนองแบบแกว่ง เนื่องจากการทำงาน P ได้ ทำให้สามารถลดค่า PB ให้น้อยลงอีกได้ อย่างไรก็ตาม หากมีค่ามากเกินไปการตอบสนองจะแกว่ง

ปริมาณการวัดต่างๆ กับการเลือกใช้ PID

(1) การควบคุมอัตราการไหล : ค่าที่วัดได้ของอัตราการไหล มักจะมีลักษณะแกว่งน้อยๆ การทำงาน D จะขยายการแกว่งนี้ให้มีขนาดใหญ่ขึ้นจึงไม่เป็นที่ต้องการ โดยทั่วไปจะใช้งาน PI

(2) การควบคุมความดัน : เหมือนกับการควบคุมอัตราการไหลเกือบทุกประการ

(3) การควบคุมระดับ : โดยทั่วไปเราไม่จำเป็นต้องรักษาระดับให้คงที่ที่ค่าหนึ่ง นอกจากนี้ บางครั้งเรายังไม่ต้องการการทำงาน I อีกด้วย ดังนั้น การทำงาน P อย่างเดียวก็น่าพอ

(4) การควบคุมอุณหภูมิ : โดยทั่วไปจะใช้การทำงาน PID อย่างไรก็ตาม บางกรณีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะทำให้คุณลักษณะของกระบวนการเปลี่ยนแปลงได้ บางครั้งจึงต้องใช้การทำงาน PID หลายตัวสลับกันใช้งาน

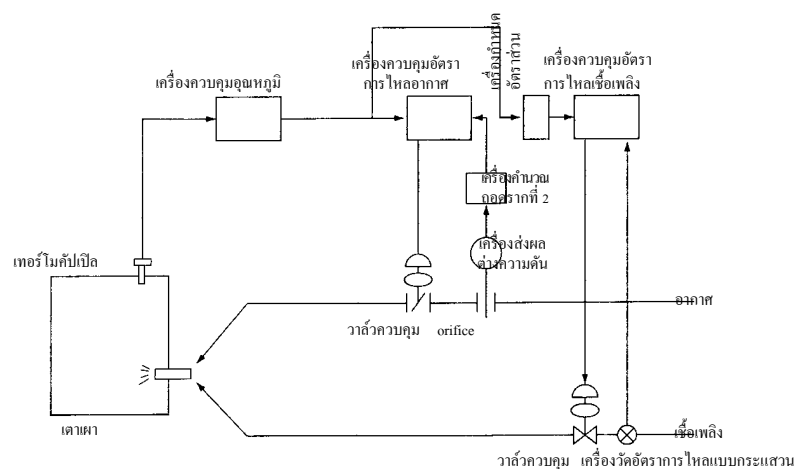
(5) การควบคุมสัดส่วนองค์ประกอบ : โดยทั่วไปจะใช้การควบคุม PID แต่บางครั้งการควบคุม PID ทั่วไปจะไม่สามารถควบคุมได้ดี ในกรณีนั้นจำเป็นต้องมีวิธีพลิกแพลงอย่างใดอย่างหนึ่ง

การควบคุม Tracking control

การควบคุมที่ค่าที่กำหนดจะมีการเปลี่ยนแปลงไปเรื่อยๆ และต้องบังคับค่าที่วัดได้ให้ไล่ตามค่าที่กำหนดนั้น เรียกว่า การควบคุม Tracking control การควบคุม Tracking control แบ่งเป็นการควบคุม Cascade control การควบคุม Ratio control และการควบคุม Program control

(1) การควบคุม Cascade control

การควบคุม Cascade control มีนิยามว่า “การควบคุมที่กำหนดค่าที่กำหนด (Set point) ของระบบควบคุมอื่นด้วยสัญญาณขาออกของอุปกรณ์ควบคุมตัวหนึ่งในระบบควบคุม Feedback” ซึ่งตัวอย่างแสดงไว้ในรูปที่ 1.79 ในตัวอย่างนี้ สัญญาณขาออกของเครื่องควบคุมอุณหภูมิจะกลายเป็นค่าที่กำหนดของเครื่องควบคุมอัตราการไหลอากาศ และผ่านเครื่องกำหนดอัตราส่วนกลายเป็นค่าที่กำหนดของเครื่องควบคุมอัตราการไหลเชื้อเพลิง ในกรณีนี้เช่นนี้ จะเรียกเครื่องควบคุมอุณหภูมิว่า เครื่องควบคุมปฐมภูมิ และเครื่องควบคุมอัตราการไหลทั้งสองตัวว่า เครื่องควบคุมทุติยภูมิ

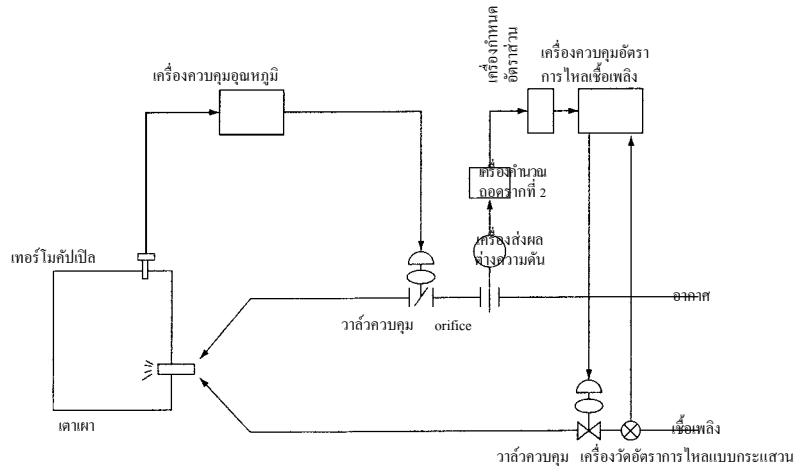


รูปที่ 1.79 ตัวอย่างการควบคุม Cascade control

ประสิทธิภาพของการควบคุม Cascade control ได้แก่ การใช้เครื่องควบคุมทุติยภูมิ จะสามารถกำจัดผลกระทบของการรบกวนที่เข้ามาในระบบควบคุมด้านทุติยภูมิ (ตัวอย่างเช่น การเปลี่ยนแปลงความดันด้านต้นทางก่อนเครื่องวัดอัตราการไหล) ได้อย่างรวดเร็ว

(2) การควบคุม Ratio control

นิยามของการควบคุม Ratio control ได้แก่ “การควบคุมปริมาณตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไปให้แปรผันตามกันด้วยความสัมพันธ์อย่างใดอย่างหนึ่ง” ตัวอย่างแสดงไว้ในรูปที่ 1.80 ในตัวอย่างนี้ สัญญาณอัตราการไหลของอากาศจะผ่านเครื่องกำหนดอัตราส่วนกลายเป็นค่าที่กำหนดของเครื่องควบคุมอัตราการไหลเชื้อเพลิง อนึ่ง ระบบในรูปที่ 1.80 ก็เป็นการควบคุม Ratio control อย่างหนึ่ง



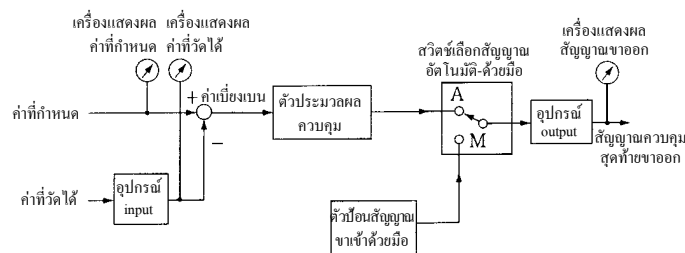
รูปที่ 1.80 ตัวอย่างการควบคุม Ratio control

(3) การควบคุม Program control

นิยามของการควบคุม Program control หมายถึง “การควบคุมให้ไล่ตามค่าที่กำหนดซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามที่กำหนดไว้ล่วงหน้า” นิยมใช้ในการควบคุมอุณหภูมิของ Heat treatment ของโลหะ หรือ Baking furnace ของเซรามิก เป็นต้น โดยจะใช้เครื่องควบคุมที่สามารถเปลี่ยนค่าที่กำหนดได้ตามตารางเวลาที่กำหนดไว้ล่วงหน้า (เรียกว่า Program controller)

1.14.1.4 เครื่องควบคุม (Controller)

รูปที่ 1.81 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของเครื่องควบคุม เครื่องควบคุมจะรับสัญญาณขาเข้า ได้แก่ ค่าที่กำหนดและค่าที่วัดได้



รูปที่ 1.81 โครงสร้างพื้นฐานของเครื่องควบคุม

นำมาคำนวณค่าเบี่ยงเบน แล้วทำการคำนวณ PID ที่ตัวประมวลผลควบคุม ผลลัพธ์จะผ่านอุปกรณ์ Output ทำให้มีค่า 4-20 mADC (สัญญาณอิเล็กทรอนิกส์) หรือ 20-100 kPa (สัญญาณความดันอากาศ) นอกจากนี้ โดยทั่วไปยังประกอบด้วยตัวป้อนสัญญาณขาเข้าด้วยมือและสวิตช์เลือกสัญญาณอัตโนมัติ-ด้วยมือ อีกด้วย

1.14.1.5 ประเภทของเครื่องควบคุม

เครื่องควบคุมสามารถแบ่งออกคร่าวๆ ได้เป็นแบบอิเล็กทรอนิกส์กับแบบความดันอากาศ ทั้งนี้ ปัจจุบัน มูลค่าการผลิตเครื่องควบคุมแบบความดันอากาศมีจำนวนน้อยอย่างยิ่ง

เครื่องควบคุมแบบอิเล็กทรอนิกส์ยังแบ่งออกได้เป็นแบบอนาล็อกกับแบบดิจิทัล แต่ปัจจุบันไม่มีการผลิตเครื่องควบคุมแบบอนาล็อกแล้ว เครื่องควบคุมแบบดิจิทัลจะใช้วงจรแปลง A/D

แปลงสัญญาณขาเข้าเป็นสัญญาณดิจิทัล แล้วใช้วงจรคำนวณดิจิทัลซึ่งประกอบด้วยไมโครโปรเซสเซอร์กับหน่วยความจำในการทำการคำนวณ เครื่องควบคุมแบบดิจิทัลแบ่งออกเป็นเครื่องควบคุมอุณหภูมิซึ่งมีวัตถุประสงค์ในการควบคุมอุณหภูมิเป็นหลัก เครื่องควบคุมอิเล็กทรอนิกส์แบบสัญญาณมาตรฐานซึ่งใช้สัญญาณ 4-20 mADC เป็นสัญญาณทั้งขาเข้า และขาออก และ Distributed controller system (DCS) ซึ่งมีสัญญาณขาเข้าและขาออกหลายตัว อย่างไรก็ตาม หน้าที่การทำงานพื้นฐานของเครื่องควบคุมจะเหมือนกันทั้งสิ้น

1.14.1.6 หน้าที่การทำงานของเครื่องควบคุม

เครื่องควบคุมมีหน้าที่การทำงานหลายประการ ต่อไปนี้จะอธิบายเฉพาะหน้าที่การทำงานในการตั้งค่าที่กำหนดและหน้าที่การทำงานในการส่งสัญญาณขาออกเท่านั้น

(1) หน้าที่การทำงานในการตั้งค่าที่กำหนด

หน้าที่การทำงานนี้มีทั้งการตั้งค่าทางไกล (Local) และการตั้งค่าทางไกล (Remote) การตั้งค่าทางไกลเป็นวิธีที่พนักงานผู้ปฏิบัติงานจะใช้คีย์หรือลูกบิดในการปรับเครื่องควบคุม การตั้งค่าทางไกลเป็นวิธีที่รับสัญญาณจากเครื่องวัดภายนอก (เครื่องควบคุมตัวอื่นหรือเครื่องส่งสัญญาณต่างๆ) แล้วใช้สัญญาณนั้นเป็นค่าที่กำหนด วิธีนี้จะใช้กับการควบคุม Cascade control เป็นหลัก บางครั้งการตั้งค่าทางไกลก็เรียกว่า การตั้งค่า Cascade

(2) หน้าที่การทำงานในการส่งสัญญาณขาออก

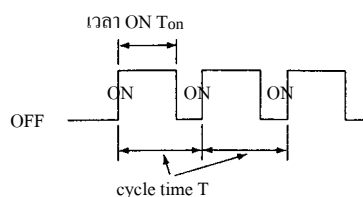
ตารางที่ 1.9 แสดงสัญญาณขาออกของเครื่องควบคุมกับตัวควบคุมสุดท้ายที่เป็นตัวกำเนิดสัญญาณนี้ สัญญาณขาออกที่ใช้กันมากที่สุดได้แก่ 4-20 mADC สัญญาณแบบอื่นๆ จะใช้กับการควบคุมอุณหภูมิเป็นหลัก

ตารางที่ 1.9 สัญญาณขาออกของเครื่องควบคุมกับตัวควบคุมสุดท้าย

ประเภท	การทำงาน	ตัวควบคุมสุดท้าย
4-20 mADC	สัญญาณขาออกต่อเนื่อง	วาล์วควบคุมแบบอากาศ วาล์วไฟฟ้า, Control motor ไทรสเตอร์ เป็นต้น
สัญญาณขาออกรีเลย์	แปรผันตามเวลา	รีเลย์ วาล์วแม่เหล็กไฟฟ้า
สัญญาณขาออกพัลส์แรงดันไฟฟ้า	แปรผันตามเวลา	Solid state relay (SSR)
สัญญาณขาออกขับวาล์วไฟฟ้า	แปรผันตามตำแหน่ง	วาล์วไฟฟ้า, Control motor

(1) สัญญาณขาออกรีเลย์

เรามักใช้รีเลย์ในการเปิดปิดกระแสไฟฟ้าของฮีตเตอร์ ในการควบคุมอุณหภูมิ จะใช้วิธีการทำงาน ON-OFF ทำให้เกิดประสิทธิผลเหมือนกับการทำงาน PID ในรูปที่ 1.82 ถ้าให้ T เป็นเวลาของ 1 คาบ (เรียกว่า cycle time) และให้ T_{on} เป็นเวลา ON ของรีเลย์ แล้วให้ T_{on} / T แปรผันตามค่าคำนวณ PID ของเครื่องควบคุม ค่านี้จะเรียกว่า สัญญาณขาออกแปรผันตามเวลา



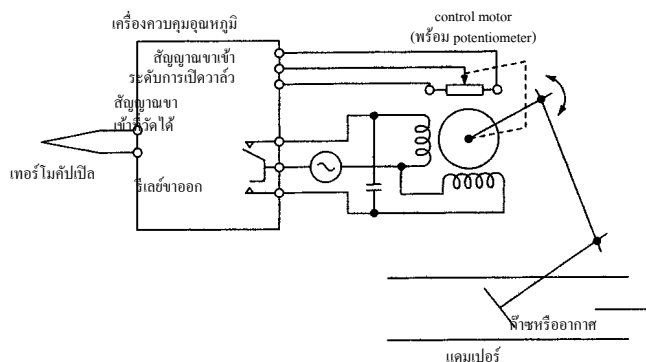
รูปที่ 1.82 สัญญาณขาออกแปรผันตามเวลา

(2) สัญญาณขาออกพัลส์แรงดันไฟฟ้า

มีการทำงานเหมือนกับสัญญาณขาออกรีเลย์ แต่มีวงจรขาออกที่ใช้ขับ Solid state relay

(3) สัญญาณขาออกขับวาล์วไฟฟ้า

วาล์วไฟฟ้าและ Control motor โดยปกติจะหมุนไปหรือหมุนกลับไปเรื่อยๆ โดยไม่สามารถกำหนดตำแหน่งได้ ดังนั้น จึงตรวจวัดสัญญาณที่แปรผันตามระดับการเปิดวาล์วไฟฟ้าหรือมุมที่บิดไปของ Control motor แล้วนำไปเปรียบเทียบกับค่าคำนวณ PID ของวาล์วควบคุม พยายามทำให้ค่าทั้งสองเท่ากันก็จะสามารถกำหนดตำแหน่งได้ หลักการทำงานแสดงไว้ในรูปที่ 1.83 สัญญาณที่แปรผันตามมุมที่บิดไปจะสามารถวัดได้จาก Potentiometer (ตัวต้านทานแบบสไลด์) ซึ่งติดตั้งไว้ที่มอเตอร์ เมื่อมุมที่บิดไปของมอเตอร์เท่ากับค่าคำนวณ PID รีเลย์ที่ขาออกของเครื่องคำนวณจะเป็น OFF ทั้งคู่ มอเตอร์จึงหยุดหมุน



รูปที่ 1.83 ภาพแสดงหลักการทำงานของการทำงานแปรผันตามตำแหน่ง

1.14.1.7 ตัวควบคุมสุดท้าย (Final control element)

เป้าหมายการควบคุมและประเภทของตัวควบคุมสุดท้าย

เป้าหมายการควบคุมของตัวควบคุมสุดท้าย ส่วนใหญ่แล้วจะเป็นของไหล ได้แก่ ก๊าซ ของเหลว ไอระเหย การบังคับควบคุมของไหล จะใช้วิธีเปลี่ยนความต้านทานของไหล โดยนำของไหลใส่ในท่อที่สามารถปรับขนาดของคอคออดได้ อย่างไรก็ตาม วิธีนี้จะทำให้เกิดพลังงานสูญเสียตามมาด้วย ดังนั้น จึงมีการใช้วิธีควบคุมความเร็วรอบของปั๊มหรือ Blower กันค่อนข้างมาก ในมุมมองของการอนุรักษ์พลังงาน แล้ววิธีหลังจะดีกว่า อย่างไรก็ตาม วิธีแรกก็ยังใช้กันมากเนื่องจากเหตุผลด้านต้นทุนอุปกรณ์และความสะดวก

ส่วนการควบคุมอุณหภูมิ นอกจากการบังคับควบคุมของไหลยังมีการบังคับควบคุมพลังงานไฟฟ้าอีกด้วย ตารางที่ 1.10 จะสรุปเป้าหมายการควบคุมสุดท้ายกับประเภทของตัวควบคุมสุดท้ายเอาไว้

ตารางที่ 1.10 เป้าหมายการควบคุมสุดท้ายกับประเภทของตัวควบคุมสุดท้าย

เป้าหมายการควบคุมสุดท้าย		ตัวควบคุมสุดท้าย	สัญญาณควบคุม
ของไหล	ความดันทานของไหล	วาล์วควบคุมทำงานด้วยความดันอากาศ	20-100 kPa
		วาล์วควบคุมทำงานด้วยไฟฟ้า	4-20 mADC
		control motor + damper	สัญญาณขาออกขับเคลื่อนวาล์วไฟฟ้า(รีเลย์)
	ความเร็วรอบของปั๊มหรือ blower	เกียร์ อุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบ	โดยทั่วไป 4-20 mADC
พลังงานไฟฟ้า		รีเลย์	สัญญาณขาออกรีเลย์
		solid state relay (SSR)	สัญญาณขาออกพัลส์แรงดันไฟฟ้า
		ไทรสเตอร์	4-20 mADC 1-5 VDC

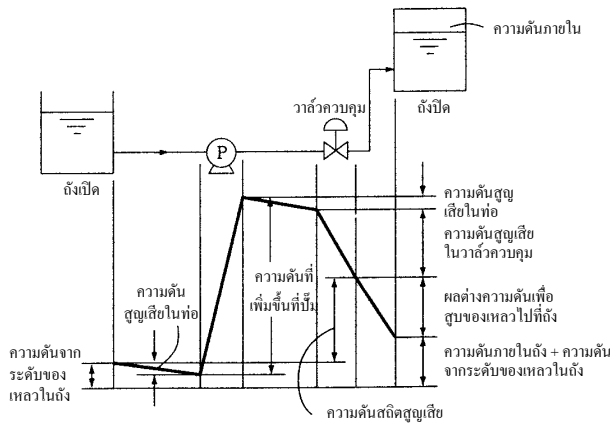
วาล์วควบคุม

(1) หลักการทำงานของระบบการบังคับควบคุมของไหลด้วยวาล์วควบคุม

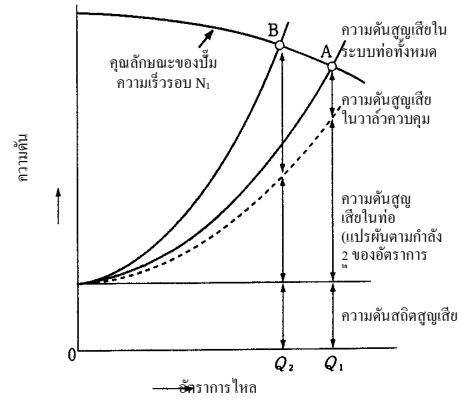
รูปที่ 1.84 แสดงตัวอย่างการแจกแจงความดันของปั๊มและท่อ ผลต่างความดันที่เกิดขึ้นที่ปั๊ม (ในรูปจะเรียกว่าความดันที่เพิ่มขึ้น) จะเท่ากับผลบวกของความดันสูญเสียในท่อและวาล์วควบคุม กับผลต่างความดันเพื่อสูบของเหลวขึ้นไปถึงด้านปลายน้ำ และผลต่างความดันระหว่างด้านต้นน้ำกับปลายน้ำ เนื่องจากความดันสูญเสียในท่อและวาล์วควบคุมจะขึ้นอยู่กับอัตราการไหล ดังนั้น จึงสามารถกำหนดอัตราการไหลที่ทำให้การแจกแจงความดันของทั้งระบบอยู่ในภาวะสมดุลเช่นนี้ได้ การหาความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้จะขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของปั๊ม

Centrifugal pump ที่นิยมใช้กันมากที่สุดในอุตสาหกรรม จะมีแรงดันขาออกสูงสุดเมื่ออัตราการไหลเท่ากับ 0 เมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นความดันขาออกจะลดลง และความดันสูญเสียในท่อและวาล์วควบคุมจะแปรผันตามกำลังสองของอัตราการไหล ดังนั้น อัตราการไหลที่ปั๊มและท่อ จะแสดงอยู่ที่จุด A และจุด B ในรูปที่ 1.85 จุด A เป็นกรณีที่วาล์วควบคุมเปิดสุด โดยมีอัตราการไหลเท่ากับ Q_1 จุด B เป็นกรณีที่ระดับการเปิดวาล์วควบคุมสมมติว่าเท่ากับ 60% โดยมีอัตราการไหลเท่ากับ Q_2 ความดันสถิตสูญเสียที่แสดงไว้ในรูปหมายถึง ผลบวกของผลต่างความดันเพื่อสูบของเหลวขึ้นไปถึงด้านปลายน้ำ กับผลต่างความดันระหว่างด้านต้นน้ำกับปลายน้ำ ซึ่งความดันสถิตสูญเสียจะขึ้นกับอัตราการไหล อนึ่ง สาเหตุที่ความดันสูญเสียของวาล์วควบคุมที่จุด A ไม่เท่ากับ 0 เนื่องจากในวาล์วควบคุมทั่วไป แม้จะเปิดวาล์วจนสุดก็จะมีมีความดันสูญเสียอยู่บ้าง

ตอนที่ 3 บทที่ 1 ระบบความร้อนและอุปกรณ์ที่ใช้ไอน้ำ



รูปที่ 1.84 การแจกแจงความดันของปั๊มและท่อ



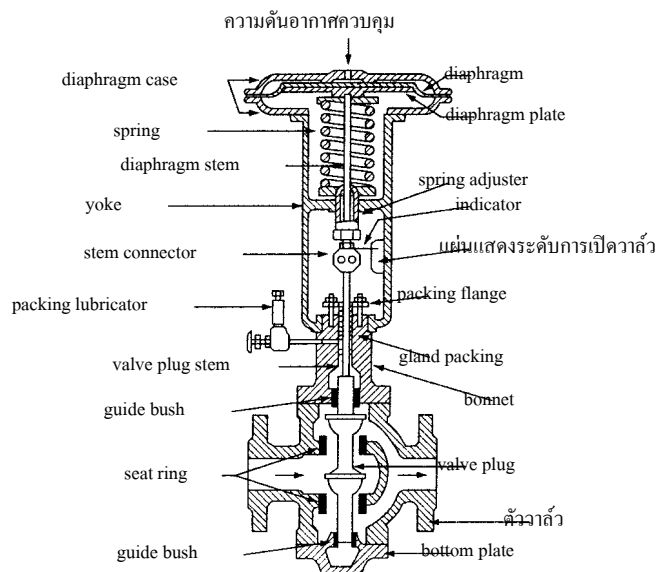
รูปที่ 1.85 การบังคับควบคุมด้วยวาล์วควบคุม

จากรูปจะเห็นว่าเมื่อระดับการเปิดวาล์วควบคุมลดลง จุด B จะเลื่อนไปทางซ้าย ทำให้อัตราการไหลลดลง

(2) โครงสร้างของวาล์วควบคุม

รูปที่ 1.86 แสดงโครงสร้างของวาล์วควบคุมแบบ Diaphragm ทำงานด้วยอากาศที่นิยมใช้กันมากที่สุด

เมื่อมีความดันอากาศ (โดยทั่วไป 20-100 kPa) ซึ่งเป็นสัญญาณควบคุมเข้ามาที่ด้านบนของ Diaphragm case แล้ว ที่ Diaphragm จะมีแรงกระทำที่แปรผันตามผลคูณของพื้นที่ของ Diaphragm กับความดันอากาศนั้น ไปกด Diaphragm stem ให้เลื่อนลงด้านล่าง อย่างไรก็ตาม เนื่องจากที่ด้านล่างของ Diaphragm จะมีสปริงอยู่ การขจัดของ Stem จึงแปรผันตามความดันอากาศ ที่ด้านล่างของ Stem จะมี Bulb plug ติดตั้งอยู่ ทำให้ระยะห่างระหว่าง Seat ring กับ Plug ในรูปแคบลง ผลคือ ความต้านทานของไหลจะเพิ่มขึ้น หากจัดทำ Plug นี้ให้มีรูปร่างที่เหมาะสม จะสามารถทำให้มีคุณลักษณะอัตราการไหลต่างๆ ตามต้องการได้



รูปที่ 1.86 โครงสร้างของวาล์วควบคุมแบบ Diaphragm

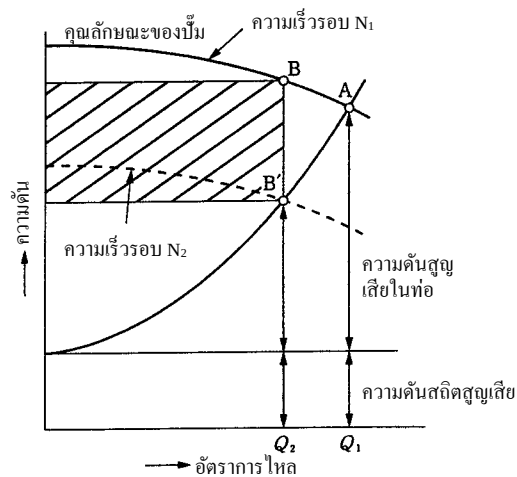
ในรูปข้างต้น สาเหตุที่ต้องมีลูกกลมของ Plug และ Seat ring ถึง 2 ชุด ก็เพื่อให้ความดันของของไหลมีสมดุล เพื่อให้แรงที่ใช้ในการเคลื่อน Plug มีค่าน้อย วาล์วแบบนี้เรียกว่า Double seat valve วาล์วบางชนิดจะมีลูกกลมของ Plug และ Seat ring เพียง 1 ชุด เรียกว่า Single seat valve โดยใน Single seat valve จะต้องใช้แรงมากในการถอด Plug แต่เมื่อถอดแล้วจะแทบไม่มีการรั่วเลย สามารถปิดกั้นของไหลได้อย่างสมบูรณ์

อนึ่ง เมื่อใช้เครื่องควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ร่วมกับวาล์ว Diaphragm จะใช้ Electropneumatic converter หรือใช้ Electropneumatic positioner โดย Electropneumatic converter เป็นอุปกรณ์ที่แปลงสัญญาณขาออกของเครื่องควบคุม 4-20 mADC เป็นความดันอากาศ 20-100 kPa และ Electropneumatic positioner เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ติดตั้งกับ Stem ของวาล์วควบคุม แล้วขอยืมใช้ความดันอากาศในการทำให้ระดับการเปิดวาล์วควบคุมตรงกับสัญญาณ 4-20 mADC

การควบคุมความเร็วรอบ

การควบคุมอัตราการไหลด้วยวาล์วควบคุมจะทำให้เกิดความดันสูญเสียของของไหล ดังนั้นจะเกิดพลังงานสูญเสียขึ้นเสมอ แต่หากใช้วิธีเปลี่ยนความเร็วรอบของปั๊มในการเปลี่ยนอัตราการไหลของของไหล จะไม่เกิดพลังงานสูญเสียขึ้นในของไหล วิธีนี้แสดงไว้ในรูปที่ 1.87 เมื่อเพิ่มความเร็วรอบจาก N_1 เป็น N_2 จะเห็นว่าสามารถควบคุมอัตราการไหลได้โดยไม่ต้องใช้วาล์วควบคุม (ลองเปรียบเทียบกับรูปที่ 1.85) เนื่องจากแรงขับเพลลาของปั๊มจะแปรผันตาม (ความดันขาออกของปั๊ม) $\times$ อัตราการไหล $\div$ (ประสิทธิภาพของปั๊ม) ดังนั้นพื้นที่บริเวณที่แรเงาในรูปจึงเป็นพลังงานที่อนุรักษ์ไว้ได้ด้วยการควบคุมความเร็วรอบ ทั้งนี้ กรณีที่มีความดันสถิตสูญเสียสูง จะไม่สามารถลดความเร็วรอบของปั๊มได้ จึงไม่มีข้อได้เปรียบในการควบคุมความเร็วรอบ

การควบคุมความเร็วรอบของปั๊ม โดยทั่วไปจะใช้วิธีควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้วยอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 1.87 การบังคับควบคุมของเหลวด้วยการควบคุมความเร็วรอบ

การควบคุมพลังงานไฟฟ้า

การควบคุมพลังงานไฟฟ้าจะใช้รีเลย์ ใช้ Solid state relay (SSR) หรือใช้ไทรสเตอร์

SSR เป็นรีเลย์ที่สร้างขึ้นด้วยสารกึ่งตัวนำ ซึ่งไม่มีชิ้นส่วนที่เคลื่อนไหวและไม่มีหน้าสัมผัส ดังนั้นจึงมีอายุการใช้งานยืนยาวกว่ารีเลย์ธรรมดาตามาก แต่หากมีกระแสไฟฟ้าไหลเป็นจำนวนมากจะเกิดความร้อนขึ้น ดังนั้น หากมีกระแสไหลมากจะต้องติดตั้งระบายความร้อน (Heat sink)

ไทรสเตอร์เป็นชื่อเรียกรวมๆ ของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำซิลิกอนที่สามารถควบคุมกระแสไฟฟ้าได้ ไทรสเตอร์ 1 ตัวจะควบคุมไฟฟ้ากระแสสลับได้เพียงครึ่งไซเคิลเท่านั้น หากใช้ในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับจะต้องใช้อุปกรณ์ 2 ตัวต่อขนานกลับทิศทาง อุปกรณ์ที่ใช้ไทรสเตอร์ในการรับสัญญาณ 4-20 mADC จากเครื่องควบคุมมาปรับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านฮีตเตอร์ให้แปรผันตามสัญญาณนั้น เรียกว่า Thyristor power conditioner โดยทั่วไปมักจะเรียกง่ายๆ ว่า Thyristor unit

Thyristor unit มีข้อดีคือมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา สามารถควบคุมกระแสไฟฟ้าที่มีค่าสูงได้ ไม่มีหน้าสัมผัส อายุการใช้งานยืนยาว แต่มีข้อเสียคือ เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านมากจะเกิดความร้อนสูง ต้องระบายความร้อนด้วยอากาศหรือด้วยน้ำ

1.14.2 การวัดทางอุตสาหกรรมและหน่วยวัดที่ใช้ทางความร้อน

1.14.2.1 ระบบการวัดอุตสาหกรรม

ระบบการวัดอุตสาหกรรม ประกอบด้วยเครื่องส่งสัญญาณ ซึ่งจะตรวจวัดค่าต่างๆ เช่น ความดัน อัตราการไหล อุณหภูมิ ฯลฯ แล้วส่งสัญญาณให้แก่อุปกรณ์อื่น กับเครื่องรับสัญญาณซึ่งทำหน้าที่รับสัญญาณจากเครื่องส่งสัญญาณมาเพื่อส่งการ บันทึกผล และควบคุม เป็นต้น ทั้งนี้ อุปกรณ์บางอย่างก็มีทั้งเครื่องส่งสัญญาณและเครื่องรับสัญญาณรวมอยู่ด้วยกัน (เช่น เทอร์โมมิเตอร์แบบหลอดแก้ว เครื่องวัดความดันแบบ Bourdon tube) ซึ่งถือได้ว่าเป็นระบบวัดระบบหนึ่ง

เมื่อพิจารณารายละเอียดย่อยๆ ของเครื่องส่งสัญญาณ จะประกอบด้วยอุปกรณ์ตรวจวัด อุปกรณ์แปลงสัญญาณ และอุปกรณ์ส่งสัญญาณ อุปกรณ์ตรวจวัดเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ตรวจวัดค่าที่จะวัดแล้วส่งไปให้อุปกรณ์แปลงสัญญาณหรืออุปกรณ์ส่งสัญญาณ กล่าวคือ เปรียบเสมือนเป็น “เซ็นเซอร์ (Sensor)” นั่นเอง ตัวอย่างเช่น เทอร์โมคัปเปิลหรืออุปกรณ์ตรวจวัดของเครื่องวัดอัตราการไหลแบบแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นต้น อุปกรณ์แปลงสัญญาณเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แปลงสัญญาณจากอุปกรณ์ตรวจวัดให้เป็นสัญญาณที่จะส่งให้อุปกรณ์ส่งสัญญาณ ตัวอย่างเช่น อุปกรณ์แปลงสัญญาณอุณหภูมิ อุปกรณ์แปลงสัญญาณของเครื่องวัดอัตราการไหลแบบแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นต้น อุปกรณ์ส่งสัญญาณโดยมากจะหมายถึงอุปกรณ์ตรวจวัดกับอุปกรณ์แปลงสัญญาณรวมกัน เช่น อุปกรณ์ส่งสัญญาณผลต่างความดัน

เครื่องรับสัญญาณ ประกอบด้วย เครื่องแสดงผล เครื่องบันทึกผล เครื่องปรับระบบควบคุมแบบ Distributed เครื่องส่งสัญญาณเตือน เป็นต้น นอกจากนี้ยังแบ่งเป็น 2 ชนิด ได้แก่ แบบติดตั้งที่แผงควบคุมกับแบบติดตั้งที่หน้างาน

1.14.2.2 หน่วยวัดที่ใช้ทางความร้อน

ระบบหน่วยวัด หมายถึง ระบบและหน่วยวัดต่างๆ ที่กำหนดหน่วยพื้นฐานจำนวนไม่กี่หน่วย แล้วใช้หน่วยพื้นฐานนั้นมาประกอบกันขึ้นเป็นหน่วยอื่นๆ ปัจจุบันระบบหน่วยวัดที่มีหน่วยพื้นฐานเป็นเมตร และวินาทีเป็นระบบที่ใช้กันเป็นหลักโดยสากล อย่างไรก็ตาม ระบบหน่วยวัดยังมีระบบหน่วยวัดแรงโน้มถ่วงซึ่งใช้กิโลกรัมน้ำหนักเป็นหน่วยพื้นฐาน กับระบบหน่วยวัดสัมบูรณ์ซึ่งใช้กิโลกรัมมวลเป็นหน่วยพื้นฐานอีกด้วย กฎหมายชั่งตวงวัดของญี่ปุ่นฉบับแก้ไข พ.ศ. 2536 ได้ยกเลิกระบบหน่วยวัดแรงโน้มถ่วงไปแล้ว

ดังนั้น ตั้งแต่เดือนตุลาคม พ.ศ. 2543 เป็นต้นไป หน่วยกิโลกรัมน้ำหนัก [kgf] และ หน่วยกิโลกรัมน้ำหนักต่อตารางเซนติเมตร [kgf/cm²] จะไม่สามารถใช้ในการติดต่อธุรกิจและการรับรองต่างๆ ได้อีกต่อไป

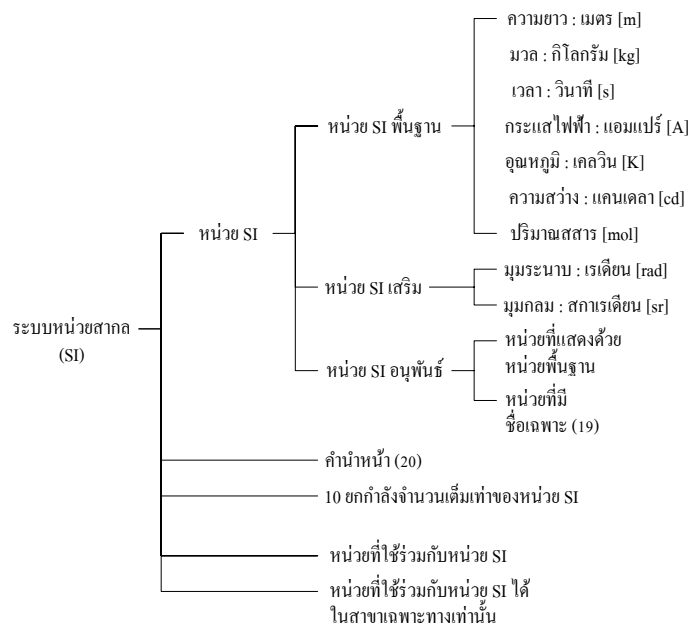
ระบบหน่วยวัดที่ถูกกำหนดให้ใช้ในกฎหมายซึ่งดวงวัดฉบับใหม่ ได้แก่ ระบบหน่วยวัดสากล (SI)

ระบบหน่วยวัดสากล

โครงสร้างของระบบหน่วยวัดสากล แสดงไว้ในรูปที่ 1.88 ระบบหน่วยวัดนี้ใช้หน่วยพื้นฐาน 7 หน่วยที่ด้านขวาบนและหน่วยเสริมอีก 2 หน่วยในการสร้างหน่วยวัดใดๆ ขึ้นมา หน่วยวัดที่สร้างขึ้น เรียกว่า หน่วยอนุพันธ์ อย่างไรก็ตาม หน่วยอนุพันธ์บางหน่วยก็มีชื่อเรียกเฉพาะเพื่อความสะดวกในการใช้งาน เช่น หน่วยดังต่อไปนี้

หน่วยของแรง หรือ นิวตัน [N] จาก แรง = มวล × ความเร่ง จะได้ว่า เท่ากับ [kg·m/s²] หน่วยของความดัน หรือ ปาสกาล [Pa] เนื่องจาก ความดัน = แรง ÷ พื้นที่ ดังนั้นจะเท่ากับ [N/m²] หน่วยงานงาน พลังงาน และปริมาณความร้อน หรือ จูล [J] จากนิยามว่า “งานที่เกิดขึ้นเมื่อแรง 1 นิวตัน เคลื่อนวัตถุไปตามทิศทางของแรงเป็นระยะทาง 1 เมตร” จะเท่ากับ [N·m]

เพื่อแสดงปริมาณที่มีค่าสูงหรือต่ำมากๆ จะใช้คำนำหน้าซึ่งแสดงจำนวนเท่าของ 10 ยกกำลังจำนวนเต็ม (กิโล เซนติมิลลิไมโคร เป็นต้น)



รูปที่ 1.88 โครงสร้างของระบบหน่วย SI

นอกจากนี้ ยังมีหน่วยที่ใช้ร่วมกับหน่วย SI และหน่วยที่ใช้ร่วมกับหน่วย SI ได้ในสาขาเฉพาะทางเท่านั้นอีกด้วย ตัวอย่างของหน่วยแบบแรก เช่น หน่วยของเวลา (วัน ชั่วโมง นาที) หน่วยของมุม (องศา ลิปดา พิลิปดา) หน่วยของปริมาตร ได้แก่ ลิตร [L] หน่วยของมวล [t] ตัวอย่างของหน่วยแบบหลัง เช่น หน่วยของความดัน ได้แก่ บาร์ [bar] เป็นต้น

สรุป

ประเภทของหม้อไอน้ำ ซึ่งโดยทั่วไปจะแบ่งเป็น 3 ประเภทคือ Cylindrical boiler, Water tube boiler และหม้อไอน้ำพิเศษ โดยขนาดของหม้อไอน้ำ โดยมากจะแสดงด้วยปริมาณไอน้ำที่กำเนิดได้ต่อหนึ่งหน่วยเวลา ส่วนประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ แสดงได้ด้วยปริมาณความร้อนที่ต้องใช้ในการกำเนิดไอน้ำหารด้วยปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นในการเผาไหม้สมบูรณ์ของเชื้อเพลิงที่ใช้ไปในหม้อไอน้ำ ในทางปฏิบัติจะไม่สามารถใช้ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงไปผลิตไอน้ำทั้งหมด เนื่องจากมีพลังงานสูญเสียต่างๆ ความร้อนสูญเสียหลักๆ ในหม้อไอน้ำมีดังต่อไปนี้

ความร้อนสูญเสียในก๊าซไอเสีย ความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ความร้อนสูญเสียจากเชื้อเพลิงที่ไม่เผาไหม้ เช่น เชม่า ความร้อนสูญเสียจากการแผ่รังสี ความร้อนสูญเสียอื่นๆ เป็นความร้อนสูญเสียที่เกิดจากการ Blow down หรือ Condensate ของน้ำในหม้อไอน้ำ หรือจากไอน้ำรั่ว ฯลฯ อีกทั้งรายละเอียดอุปกรณ์เสริมที่สำคัญของหม้อไอน้ำ เช่น Superheater และ Reheater economizer การควบคุมอัตโนมัติของหม้อไอน้ำ การควบคุมคุณภาพน้ำของหม้อไอน้ำ การบำรุงรักษาหม้อไอน้ำ

หลักการส่งจ่าย และกักเก็บไอน้ำ การส่งไอน้ำกับคุณภาพของไอน้ำ การส่งความร้อนสามารถส่งได้ในรูปของ ไอน้ำ อัดไอน้ำ ของเหลวอัดไอน้ำ น้ำอัดความดัน และของไหลสองสถานะ รวมถึงการวางแผนเดินท่อส่งไอน้ำท่อส่งไอน้ำนอกจากจะต้องรักษาคุณภาพของไอน้ำได้ดีแล้วยังต้องสามารถอนุรักษ์พลังงานได้ดีอีกด้วย เงื่อนไขของการวางแผน และออกแบบท่อส่งไอน้ำในอุดมคติมีดังต่อไปนี้ คือมีระยะทางสั้น เส้นผ่านศูนย์กลางเล็ก และไม่โค้งงอโดยไม่จำเป็น และมีความร้อนสูญเสียจากการแผ่รังสี และความดันสูญเสียน้อยที่สุด และกรณีปริมาณการใช้ไอน้ำเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว หรือมากๆ เป็นบางครั้ง ก็จะมีการติดตั้ง Steam accumulator

การปรับปรุงประสิทธิภาพหม้อไอน้ำทำได้โดย การควบคุมการเผาไหม้ การพิจารณาวิธีเดินเครื่อง การตรวจสอบและทบทวนความดันที่กำหนดไว้ การควบคุมน้ำเลี้ยง การโบล์ดาวน์ให้เหมาะสม การจัดการการซ่อมบำรุง และการควบคุมท่อส่งไอน้ำ เช่น ปริมาณการส่งไอน้ำกับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ การป้องกันไอน้ำรั่ว และการจัดระเบียบท่อที่ไม่จำเป็น อีกทั้งการติดตั้งฉนวนความร้อนให้เหมาะสม การใช้ประโยชน์จากไอน้ำอย่างมีประสิทธิภาพ การควบคุมกับดักไอน้ำ การนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ในรูปแบบต่างๆ เช่น การนำความร้อนทิ้งในก๊าซไอเสียจากการเผาไหม้กลับมาใช้ในการ อุ่นน้ำเลี้ยง อุ่นอากาศ เป็นต้น การนำความร้อนในน้ำทิ้ง อุณหภูมิสูงกลับมาใช้ การควบคุมความดันให้เหมาะสมกับภาระ การหุ้มฉนวนกันความร้อน และการติดตั้งฉนวนกันความร้อนให้เหมาะสม หน้าที่การทำงานของกับดักไอน้ำตลอดจนการเลือกใช้ และติดตั้งกับดักไอน้ำ การอนุรักษ์พลังงานโดยการนำคอนเดนเสทกลับมาใช้ใหม่ วิธีนำ Condensate กลับมาใช้ การใช้ประโยชน์จาก Flash steam เป็นต้น

โรงไฟฟ้าพลังไอน้ำ เป็นเครื่องจักรอุปกรณ์สำหรับแปลงพลังงานความร้อนในไอน้ำให้เป็นกำลังขับเคลื่อน หลักการทำงานของโรงไฟฟ้าพลังไอน้ำ การควบคุมการเดินเครื่องกับมาตรการอนุรักษ์พลังงาน

เครื่องยนต์สันดาปภายในเป็นเครื่องจักรที่เผาไหม้เชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้เพื่อผลิตก๊าซอุณหภูมิและความดันสูง แล้วนำก๊าซนี้ไปใช้เป็น Working fluid ขยายตัวในเทอร์ไบน์ หรือกระบอกสูบเพื่อให้ใบพัดหมุนหรือผลักดันลูกสูบให้เคลื่อนที่ เช่นเครื่องยนต์เบนซิน หรือ เครื่องยนต์ดีเซล หลักการทำงานของเครื่องยนต์สันดาปภายใน รวมถึงการเผาไหม้เชื้อเพลิง และปัญหาสิ่งแวดล้อม นอกจากนั้นยังกล่าวถึงระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนร่วม และระบบ Combined Cycle

ระบบแลกเปลี่ยนความร้อน หลักการทำงานของระบบแลกเปลี่ยนความร้อน การเลือกใช้ชุดแลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสม และมีประสิทธิภาพ การบำรุงรักษาชุดแลกเปลี่ยนความร้อน

การวัด และการควบคุมพลังงานความร้อนแบบอัตโนมัติ การวัดทางอุตสาหกรรม และหน่วยวัดที่ใช้