

บทที่ 2

การตรวจวัดวิเคราะห์การใช้พลังงานความร้อน (Thermal energy audit)

ความสำคัญของเนื้อหาวิชา (Overview)

ในการอนุรักษ์พลังงานนั้นขั้นตอนที่จำเป็น และขาดไม่ได้ คือ การตรวจวัดค่า หรือปริมาณการใช้พลังงานต่างๆ ความสำคัญในขั้นตอนนี้คือ การได้มาซึ่งปริมาณการใช้พลังงาน และพลังงานที่สูญเสียไปที่ต้องการป้องกัน ยับยั้ง หรือลดการสูญเสียต่างๆ ข้อมูลที่ได้นี้ จะเป็นประโยชน์ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบนั้นๆ หรือหาแนวทางในการอนุรักษ์พลังงานต่อไป

วัตถุประสงค์ (Objective)

อธิบายวิธีการตรวจวัด และวิเคราะห์การใช้พลังงานความร้อน

บทนำ (Introduction)

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึง ขั้นตอน และวิธีการตรวจวัด และวิเคราะห์การใช้พลังงานตามกฎกระทรวง หน่วยวัดทางความร้อน การวัดอุณหภูมิ ความชื้น อัตราการไหล ความดันระบบของเหลว ชนิด และวิธีการใช้อุปกรณ์เครื่องมือวัดพลังงานความร้อน วิธีการตรวจวัด และวิเคราะห์ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ วิธีการตรวจวัด และวิเคราะห์ประสิทธิภาพของเตาเผาอุตสาหกรรม วิธีการตรวจวัด และวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบอบแห้ง

2.1 ขั้นตอน และวิธีการตรวจวัด และวิเคราะห์การใช้พลังงาน ตามกฎกระทรวง

2.1.1 วิธีดำเนินการในการตรวจสอบ และวิเคราะห์การใช้พลังงานเบื้องต้น

วิธีดำเนินการตรวจสอบ และวิเคราะห์การใช้พลังงานเบื้องต้นของโรงงานควบคุมได้กำหนดให้ดำเนินการอย่างน้อยตามขอบเขต และวิธีการตามภาคผนวก 1 แนบท้ายกฎกระทรวงฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) ซึ่งมีรายละเอียดดังกล่าวพร้อมคำอธิบายดังนี้

การตรวจสอบ และวิเคราะห์การใช้พลังงานเบื้องต้นในเครื่องจักร และอุปกรณ์ตลอดจนระบบต่างๆ ในโรงงานควบคุมอย่างน้อยให้ดำเนินการดังต่อไปนี้

1. ตรวจสอบข้อมูลเกี่ยวกับการผลิต ระบบการใช้พลังงานระบบการใช้เครื่องจักร และอุปกรณ์ของระบบต่างๆ ในโรงงานควบคุมตลอดจนตรวจสอบรายละเอียดทั่วไปของโรงงานควบคุม

- การตรวจสอบ หมายถึง การสำรวจ การตรวจวัด และการเก็บรักษาข้อมูล
- การตรวจสอบข้อมูลเกี่ยวกับการผลิต หมายถึง การตรวจสอบข้อมูลต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการผลิต เช่น รายละเอียดวิธีการผลิต แผนผังพร้อมคำอธิบายในการนำวัตถุดิบมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ สกิด และสัดส่วนข้อมูลของผลิตภัณฑ์ที่เสียหาย และไม่ได้คุณภาพรวมทั้งข้อมูลอื่นๆ ที่มีผลต่อการใช้พลังงานในการผลิต เป็นต้น

ตอนที่ 3 บทที่ 2 การตรวจวัดวิเคราะห์การใช้พลังงานความร้อน

- ระบบการใช้พลังงาน หมายถึง การใช้พลังงานในแต่ละรูปแบบ เช่น การใช้พลังงานความร้อนและการใช้พลังงานไฟฟ้า ซึ่งจะต้องทำการตรวจสอบ เพื่อให้ทราบถึงแผนผัง และสัดส่วนการใช้พลังงานในแต่ละแผนกในระดับเบื้องต้น

- ระบบการใช้เครื่องจักร และอุปกรณ์ หมายถึง การตรวจสอบเครื่องจักร และอุปกรณ์ที่ใช้ในแผนกต่าง ๆ เพื่อให้ทราบถึงรายละเอียดของเครื่องจักร และอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในโรงงาน เช่น กำลังการผลิตติดตั้ง การผลิตจริง ข้อมูลด้านเทคนิค จำนวนของเครื่องจักร และอุปกรณ์แต่ละรุ่น ลักษณะการใช้งาน และการใช้พลังงาน เป็นต้น

- รายละเอียดทั่วไปของโรงงาน ได้แก่ ข้อมูลเบื้องต้นทั่วไปของโรงงานมีรายละเอียดตามประกาศกระทรวงฯ เรื่องวิธีการจัดทำรายงานการตรวจสอบ และวิเคราะห์การใช้พลังงานเบื้องต้นของโรงงานควบคุม

2. ตรวจวัดข้อมูลรายละเอียดสภาพการทำงานการใช้พลังงาน และการสูญเสียพลังงานของเครื่องจักรและอุปกรณ์ในระบบต่างๆ ในโรงงานควบคุม ทั้งด้านพลังงานความร้อน และไฟฟ้า การวิเคราะห์การสูญเสียพลังงาน ให้วิเคราะห์ดังต่อไปนี้

- ก. การสูญเสียการเผาไหม้เชื้อเพลิงของอุปกรณ์ที่ใช้เชื้อเพลิง

- ข. การสูญเสียพลังงานจากผิวผนังเตา หม้อไอน้ำ และอุปกรณ์ใช้ความร้อนอื่นๆ รวมทั้งการสูญเสียความร้อนจากท่อไอน้ำ และท่อส่งความร้อนอื่น ๆ

- ค. การสูญเสียไฟฟ้าเนื่องจากระบบแสงสว่าง ระบบปรับอากาศ ตลอดจนจากประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องจักร และอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ไฟฟ้า รวมถึงการมีตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Power factor) ต่ำกว่าปกติ

- ง. การสูญเสียอื่น ๆ

การดำเนินการตามข้อ (2) นี้ เป็นการกำหนดให้ทำการตรวจวัดข้อมูลรายละเอียดสภาพการทำงานการใช้พลังงาน และการสูญเสียพลังงานของเครื่องจักร และอุปกรณ์ในระบบต่างๆ โดยเป็นการกำหนดในรายละเอียดให้ดำเนินการตรวจวัดเฉพาะลงไปในตัวอุปกรณ์นอกเหนือจากที่ระบุให้ทำการตรวจสอบเป็นระบบตามที่ระบุไว้ในข้อ (1)

นอกจากการตรวจวัดแล้วได้กำหนดให้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดเพื่อหาการสูญเสียพลังงานที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์ต่าง ๆ

3. การตรวจวัดการใช้พลังงานและการสูญเสียพลังงานอย่างน้อยต้องปฏิบัติดังนี้

- ก. สำหรับเครื่องจักรหรืออุปกรณ์ที่มีการใช้พลังงานความร้อนเทียบเท่าเฉลี่ยระหว่าง 175 - 350 kW หรือใช้กำลังไฟฟ้าระหว่าง 20 - 50 kW ให้ดำเนินการตรวจวัดข้อมูลเฉพาะสภาพการทำงาน และลักษณะของการใช้พลังงาน และการสูญเสียพลังงานที่สำคัญในระดับเบื้องต้น

- ข. สำหรับเครื่องจักรหรืออุปกรณ์ที่มีขนาดพิกัดการใช้พลังงานต่อเนื่องน้อยกว่า 175 kW หรือใช้กำลังไฟฟ้าน้อยกว่า 20 kW การหาข้อมูลรายละเอียดการใช้พลังงานให้ใช้วิธีสังเกตจากภายนอก

ข้อปฏิบัติในการตรวจวัดในหัวข้อนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะกำหนดความสำคัญของการวัดให้เหมาะสมกับขนาดของเครื่องจักร และอุปกรณ์ที่ต้องทำการตรวจวัด โดยเครื่องจักร และอุปกรณ์ที่ใช้ในโรงงานบางชนิดมีขนาดเล็กเกินไป ไม่มีความจำเป็นที่จะทำการตรวจวัดข้อมูลทุกชนิดที่เกี่ยวข้องกับการใช้พลังงาน เนื่องจากการตรวจวัดจะต้องเสียเวลา และค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ ซึ่งอาจไม่คุ้มค่างกับผลประโยชน์ที่เกิดขึ้น โดยทั่วไปแล้วการตรวจวัดข้อมูลทุกชนิดที่เกี่ยวข้องกับการใช้พลังงาน จะมุ่งเน้นเฉพาะเครื่องจักร และอุปกรณ์หลักซึ่งมีการใช้พลังงาน และมีการสูญเสียพลังงานเป็นปริมาณมาก อย่างไรก็ตามอุปกรณ์ขนาดเล็กแต่มีการใช้งานเป็นจำนวนมากก็จะต้องมีวิธีการ และอยู่ในดุลยพินิจของที่ปรึกษาที่จะต้องพิจารณาดำเนินการได้อย่างเหมาะสม

ความสำคัญของการตรวจวัดในแต่ละช่วงของขนาดอุปกรณ์ สามารถอธิบายได้ดังนี้

เครื่องจักร และอุปกรณ์ที่มีขนาดพิศักการใช้ความร้อนเทียบเท่าเฉลี่ยมากกว่า 350 kW หรือใช้กำลังไฟฟ้าสูงกว่า 50 kW ตามขนาดดังกล่าวนี้ ไม่ได้กำหนดวิธีการในทางปฏิบัติในการตรวจวัดไว้ ซึ่งหมายถึง จะต้องดำเนินการตรวจวัดข้อมูลทุกชนิดที่เกี่ยวข้องกับการใช้พลังงาน และการสูญเสียพลังงาน เช่น ในกรณีของการตรวจวัดหม้อไอน้ำที่มีขนาดพิศักสูงกว่า 150 kW หรือคิดเป็นกำลังผลิตไอน้ำเทียบเท่าประมาณ 550 กิโลกรัมต่อชั่วโมงขึ้นไป การตรวจวัดจะต้องดำเนินการในทุกๆ ส่วนของหม้อไอน้ำที่เกี่ยวข้องกับการสูญเสียพลังงานซึ่ง ได้แก่ การตรวจวัดก๊าซเสีย การตรวจวัดการสูญเสียความร้อนผ่านผนัง การตรวจวัดการสูญเสียจากน้ำระบาย (Blow Down) เป็นต้น ซึ่งจะมีผลต่อเนื่องในการนำข้อมูลมาวิเคราะห์สภาพการสูญเสียในทุกๆ ส่วนที่เกี่ยวข้อง

เครื่องจักรหรืออุปกรณ์ที่มีการใช้ความร้อนเทียบเท่าเฉลี่ยระหว่าง 175 - 350 kW หรือใช้ไฟฟ้าระหว่าง 20 - 50 kW ระบุไว้ตามข้อ (ก) ให้ดำเนินการตรวจวัดเฉพาะข้อมูลสภาพการทำงาน และลักษณะการใช้พลังงาน และการสูญเสียพลังงานที่สำคัญตามข้อกำหนดนี้หมายถึงให้ทำการตรวจวัดเฉพาะจุดสำคัญที่มีการสูญเสียพลังงานเท่านั้น เช่น ในกรณีของการตรวจวัดหม้อไอน้ำ ก็สามารถพิจารณาตรวจวัดเฉพาะการสูญเสียจากก๊าซเสีย ซึ่งเป็นจุดหลักในการสูญเสียพลังงานได้

เครื่องจักรหรืออุปกรณ์ที่มีขนาดพิศักการใช้พลังงานความร้อนต่อเนื่องน้อยกว่า 175 kW หรือใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยกว่า 20 kW ไม่ได้กำหนดให้มีการตรวจวัด แต่ได้กำหนดให้ใช้วิธีสังเกตจากภายนอก ซึ่งหมายถึงการใช้วิธีการตรวจพินิจ เช่น ในกรณีของหม้อไอน้ำก็ต้องพิจารณาตรวจสอบสภาพที่เป็นอยู่ว่ามีลักษณะการใช้งานและการบำรุงรักษาเป็นอย่างไรบ้าง ถ้าหากพบว่ามิจุดที่ผิดปกติหรือมีข้อสงสัยในการสูญเสียพลังงานก็สามารถทำการตรวจวัดเพิ่มเติมได้ ข้อกำหนดนี้เป็นการกำหนดวิธีปฏิบัติในขั้นต่ำหรืออย่างน้อยจะต้องปฏิบัติตามการตรวจวัดจริงจะขึ้นอยู่กับสภาพของเครื่องจักรและอุปกรณ์ที่เป็นอยู่ ถ้าหากผู้ปฏิบัติในการตรวจวัดได้พิจารณาวินิจฉัยในเบื้องต้นว่ามีการสูญเสียพลังงานในจุดอื่นๆ ที่คุ่มค่าที่จะทำการตรวจวัดก็สามารถทำการตรวจวัดเพิ่มเติมจากข้อกำหนดที่ให้ดำเนินการเป็นอย่างน้อยนี้ได้ นอกจากนี้แล้วในกรณีที่เครื่องจักร และอุปกรณ์ดังกล่าวนี้มีใช้เป็นจำนวนมากในโรงงาน เช่น เครื่องปรับอากาศแบบ Split Type หรือ มอเตอร์ที่ใช้ในเครื่องจักรที่มีขนาดเล็ก เมื่อพิจารณาแต่ละตัวแล้วมีการใช้พลังงานไม่มาก แต่เนื่องจากมีการใช้งานเป็นจำนวนมากในโรงงานก็พิจารณาตรวจวัดเป็นระบบหรือมีการใช้งานอย่างไม่มีประสิทธิภาพก็สามารถพิจารณาทำการตรวจวัดและวิเคราะห์การสูญเสียพลังงานได้ซึ่งขึ้นอยู่กับสภาพการใช้งานของอุปกรณ์นั้น ๆ และเป็นดุลยพินิจของที่ปรึกษาต้องดำเนินการได้อย่างเหมาะสมดังกล่าวแล้ว

สำหรับวิธีการตรวจวัดในระดับเบื้องต้น มีรายละเอียดคำอธิบายตามวิธีการตรวจวัดข้อมูล (1) วิธีการตรวจวัดในการตรวจสอบและวิเคราะห์การใช้พลังงานเบื้องต้น

4. สํารวจข้อมูลเบื้องต้นในการหาคะยภาพในการใช้พลังงานรูปอื่น

การสำรวจข้อมูลเบื้องต้นในการหาคะยภาพในการใช้พลังงานรูปอื่น หมายถึง การสำรวจหาข้อมูล ชนิด ปริมาณ ราคา และสภาพการใช้พลังงานรูปอื่น ที่จะสามารถให้ประสิทธิภาพสูงกว่า หรือมีค่าใช้จ่ายที่ต่ำกว่าในปัจจุบันข้อมูลต่างๆ ที่สำรวจนอกจากจะเป็นข้อมูลในการเปรียบเทียบด้านประสิทธิภาพ และราคาพลังงานแล้วจะต้องพิจารณาถึงความเป็นไปได้ในเรื่องสถานที่ ความสะดวก ความปลอดภัย ความแน่นอนของแหล่งพลังงานที่จะนำมาใช้ตลอดจนข้อจำกัดด้านสิ่งแวดล้อมที่มีผลต่อเนื่องจากการใช้พลังงานรูปอื่น

5. ประเมินศักยภาพในเบื้องต้นของการอนุรักษ์พลังงานในด้านเทคนิค และการลงทุนของเครื่องจักรอุปกรณ์ และระบบต่าง ๆ ในเรื่องดังต่อไปนี้

ก. การปรับปรุงประสิทธิภาพการเผาไหม้เชื้อเพลิง

ข. การป้องกันการสูญเสียพลังงาน

- ค. การนำพลังงานที่เหลือจากการใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่
- ง. การเปลี่ยนไปใช้พลังงานอีกประเภทหนึ่ง
- จ. จากการปรับปรุงการใช้ไฟฟ้าด้วยวิธีปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้า การลดความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดในช่วงความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงสุดของระบบ การใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าที่เหมาะสมกับภาระและวิธีการอื่น
- ฉ. การใช้เครื่องจักรหรืออุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพสูงตลอดจนระบบควบคุมการทำงาน และวัสดุที่ช่วยในการอนุรักษ์พลังงาน
- ช. การอนุรักษ์พลังงานโดยวิธีอื่น

การประเมินศักยภาพเบื้องต้นของการอนุรักษ์พลังงาน หมายถึง การนำผลจากการวิเคราะห์การสูญเสียพลังงานมาประเมินถึงผลประโยชน์ และการลงทุนโดยในระดับเบื้องต้นการพิจารณาจุดคุ้มทุนจะพิจารณาจากระยะเวลาคืนทุน (Simple pay back period) โดยพิจารณาในแต่ละมาตรการที่กำหนดให้ดำเนินการดังนี้

ก. การปรับปรุงประสิทธิภาพการเผาไหม้เชื้อเพลิง

การปรับปรุงประสิทธิภาพการเผาไหม้เชื้อเพลิงนั้น โดยทั่วไปแล้วมีอุปกรณ์หลักที่เผาไหม้เชื้อเพลิงในโรงงาน ดังเช่น หม้อไอน้ำ (Boiler) หม้อน้ำมันร้อน และเตาอุตสาหกรรม (Industrial Furnace) เป็นต้น

การเผาไหม้เชื้อเพลิง คือ การทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างเชื้อเพลิงกับออกซิเจนซึ่งมาจากอากาศ เชื้อเพลิงโดยทั่วไป จะประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และซัลเฟอร์ ซึ่งเมื่อทำปฏิกิริยาเคมีกับออกซิเจนในอากาศจะให้พลังงานความร้อนในการเผาไหม้เชื้อเพลิง และต้องการปริมาณอากาศที่พอเหมาะเพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์

โดยทั่วไปอากาศที่นำเข้าไปเผาไหม้เชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ ควรมีปริมาณมากกว่าการเผาไหม้ในทางทฤษฎีที่เรียกว่าอากาศส่วนเกิน (Excess air) ดังนั้นโอกาสที่ออกซิเจนจะผ่านห้องเผาไหม้ออกไปทางปล่องไฟโดยไม่ทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงมีอยู่มากพอสมควร อากาศที่ใช้เผาไหม้ถ้ามีมากเกินไปจะทำให้ประสิทธิภาพของการเผาไหม้ต่ำลงเพราะต้องสูญเสียความร้อนไปกับอากาศส่วนเกินที่ออกไปทางปล่องแต่ถ้าน้อยเกินไปจะทำให้การเผาไหม้เชื้อเพลิงไม่สมบูรณ์ ประสิทธิภาพก็ต่ำเช่นเดียวกัน ดังนั้นในการปรับปรุงประสิทธิภาพการเผาไหม้เชื้อเพลิงในขั้นแรกนี้จึงควรควบคุมปริมาณอากาศส่วนเกิน (Excess air) ให้พอเหมาะ

นอกจากการควบคุมปริมาณอากาศที่ใช้เผาไหม้ให้เหมาะสมแล้ว การปรับปรุงประสิทธิภาพการเผาไหม้จะรวมถึงการควบคุมอุณหภูมิของก๊าซเสียให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมโดยเฉพาะอย่างยิ่งอุปกรณ์ที่ต้องใช้การแลกเปลี่ยนความร้อน เช่น หม้อไอน้ำ จะต้องมีการรักษาพื้นผิวถ่ายเทความร้อนให้ดีอยู่เสมอ การสูญเสียความร้อนจากก๊าซเสีย เนื่องจากอุณหภูมิก๊าซเสียที่สูงเกินความจำเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ประสิทธิภาพการใช้ความร้อนจากการเผาไหม้ลดลงได้

การปรับปรุงประสิทธิภาพการเผาไหม้เชื้อเพลิงจึงหมายถึง การควบคุมสภาพของการเผาไหม้โดยใช้อากาศในการเผาไหม้ และได้อุณหภูมิของก๊าซเสียให้เหมาะสมตามเหตุผลดังกล่าวแล้ว

ข. การป้องกันการสูญเสียพลังงาน

ในโรงงานอุตสาหกรรมมีการสูญเสียพลังงานอยู่หลายรูปแบบที่พอเห็นได้อย่างชัดเจน ได้แก่ การสูญเสียความร้อนจากพื้นผิวของอุปกรณ์และท่อความร้อนต่างๆ การป้องกันการสูญเสียความร้อนในลักษณะดังกล่าวนี้ ได้แก่ การใช้ฉนวนป้องกันการสูญเสียความร้อนโดยการวิเคราะห์การสูญเสียความร้อนและเสนอข้อแนะนำในการติดตั้ง หรือปรับปรุงซ่อมแซมฉนวนความร้อนให้อยู่ในสภาพที่เหมาะสม

การป้องกันการสูญเสียพลังงานที่เห็นได้ชัดอีกรูปแบบหนึ่ง ได้แก่ การรั่วไหลของของไหล เช่น น้ำร้อนหรือไอน้ำ รวมทั้งการรั่วไหลของอากาศอัดที่ใช้ในกระบวนการผลิต เป็นต้น การป้องกันการสูญเสีย

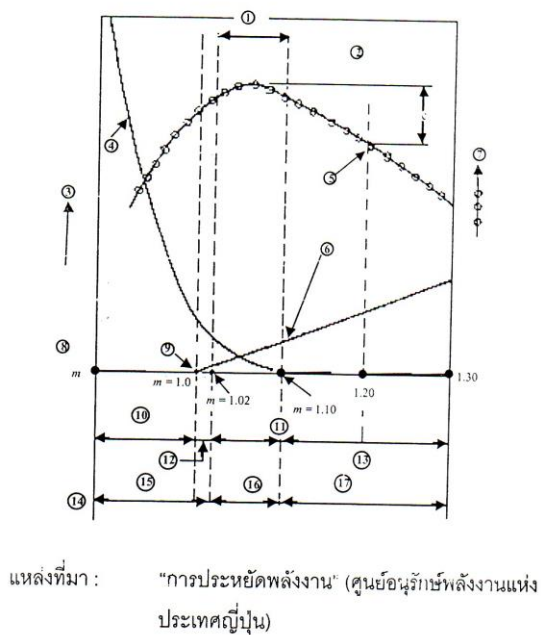
พลังงานในรูปแบบตามตัวอย่างดังกล่าวข้างต้นนอกจากจะเป็นการปรับปรุงซ่อมแซมให้อยู่ในสภาพที่เหมาะสมแล้วยังหมายถึงการบำรุงรักษาเพื่อให้เครื่องจักร และอุปกรณ์คงอยู่ในสภาพที่ดีอยู่เสมอซึ่งมีผลต่อการป้องกันการสูญเสียพลังงานดังกล่าว

ค. การนำพลังงานที่เหลือจากการใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่

ความหมายของพลังงานที่เหลือใช้แล้ว หมายถึง พลังงานที่เหลือจากการผลิตที่เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพแล้ว และยังคงมีพลังงานเหลืออยู่ที่สามารถนำมาใช้ได้ อีก ตัวอย่างของพลังงานที่เหลือใช้แล้ว ได้แก่ ความร้อนจากก๊าซเสียของเตาอุตสาหกรรมต่างๆ ที่มีความร้อนสูงถึงแม้ว่าจะได้มีการปรับปรุงประสิทธิภาพการเผาไหม้ให้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพแล้ว แต่เนื่องจากกระบวนการที่มีความจำเป็นต้องใช้อุณหภูมิสูง ดังนั้น พลังงานความร้อนที่เหลือใช้ที่ออกไปกับก๊าซเสียยังคงมีอุณหภูมิและปริมาณสูงที่จะสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก

ง. การเปลี่ยนไปใช้พลังงานอีกประเภทหนึ่ง

ความหมายของหัวข้อการเปลี่ยนไปใช้พลังงานอีกประเภทหนึ่งนี้หมายถึง การเปลี่ยนประเภทของพลังงานที่ใช้ เช่น การเปลี่ยนจากการใช้ไฟฟ้าทำความร้อนเป็นการใช้แก๊สแทน เป็นต้น หรือในอีกความหมายหนึ่งจะหมายถึงการปรับปรุงประสิทธิภาพในกระบวนการเปลี่ยนรูปพลังงาน จากประเภทหนึ่งไปเป็นอีกประเภทหนึ่ง เช่น กระบวนการเปลี่ยนความร้อนเป็นกำลัง (Conversion of heat into power) ในเครื่องจักรกลหรือกระบวนการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าไปเป็นกำลังและความร้อน (Conversion of electricity into power and heat) ในเครื่องจักร และอุปกรณ์ไฟฟ้า เป็นต้น กระบวนการเปลี่ยนรูปพลังงานดังกล่าวมีความหมายในบริบทของการอนุรักษ์พลังงานเป็นอย่างมากเพราะสามารถนำเอาเทคโนโลยีสมัยใหม่และความรู้ในทางวิทยาศาสตร์มาประยุกต์ใช้ได้ เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องจักร และอุปกรณ์อย่างเห็นได้ชัดเจน อย่างไรก็ตามจากแนวทางทั้งสองต่างก็เป็นแนวทางการปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการเปลี่ยนพลังงาน (Efficiency improvement of energy conversion processes)



- ① ย่านที่การเผาไหม้เหมาะสมที่สุด
- ② ประสิทธิภาพเชิงความร้อน
- ③ ความร้อนสูญเสีย
- ④ ความร้อนสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์
- ⑤ จุดในการใช้งานในกรณีทั่วไป
- ⑥ ความร้อนสูญเสียไปกับไอเสียจากปล่อง
- ⑦ ประสิทธิภาพเชิงความร้อน
- ⑧ อัตราส่วนอากาศ
- ⑨ ปริมาณอากาศเชิงทฤษฎี
- ⑩ ย่านที่อากาศไม่เพียงพอ
- ⑪ ย่านการเผาไหม้ที่อากาศส่วนเกินต่ำ
- ⑫ ย่านการเผาไหม้ที่อากาศส่วนเกินต่ำมาก
- ⑬ ย่านการเผาไหม้ที่อากาศส่วนเกินสูง
- ⑭ ประสิทธิภาพเชิงความร้อน
- ⑮ ค่า
- ⑯ สูงสุด
- ⑰ ลดลงตามลำดับ

รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนอากาศกับประสิทธิภาพเชิงความร้อน

จ. การปรับปรุงการใช้ไฟฟ้าด้วยวิธีปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้า การลดความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดในช่วงความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบการใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าที่เหมาะสมกับภาระและวิธีการอื่น

การปรับปรุงการใช้ไฟฟ้า หมายถึง การปรับปรุงประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าไปเป็นอย่างอื่น เช่น พลังงานกลในมอเตอร์ไฟฟ้า พลังงานแสงสว่างในหลอดไฟ และพลังงานความร้อนในหลอดต้านทาน

การปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้ไฟฟ้าอาจกระทำได้หลายทาง ดังนี้

- การปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้า มีจุดมุ่งหมายเพื่อลดการสูญเสียพลังงานในหม้อแปลงไฟฟ้า สายไฟฟ้า และในระบบอื่นๆ ค่าพลังงานสูญเสียจะลดลงเมื่อปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้า ซึ่งนอกจากจะช่วยลดการสูญเสียพลังงานไปในสายไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟแล้วยังช่วยลดพลังงานสูญเสียของระบบ และทำให้ระบบไฟฟ้ามีความมั่นคงขึ้น

- การลดความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดในช่วงความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุดของระบบ การลดความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดในช่วงความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุดของระบบ เป็นมาตรการที่จะช่วยให้ประเทศชะลอการลงทุนในการขยายกำลังผลิตไฟฟ้าลงได้ และทำให้โหลดแพกเตอร์ของระบบไฟฟ้าดีขึ้น การดำเนินการดังกล่าวจะทำให้ประสิทธิภาพของระบบไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าดีขึ้น การสูญเสียพลังงานในระบบไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟน้อยลง ค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้าจะลดลง นอกจากนี้ประสิทธิภาพของระบบไฟฟ้าโดยรวม และการสูญเสียพลังงานในระบบส่งก็จะลดลงด้วย

- การใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าให้เหมาะสมกับภาระ อุปกรณ์ไฟฟ้าโดยทั่วไปจะทำงานให้ประสิทธิภาพสูงสุดที่ประมาณ 80-100% ของขนาดพิกัดที่กำหนด ดังนั้นในการใช้อุปกรณ์ไฟฟ้า เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า และมอเตอร์ไฟฟ้า หากสามารถใช้งานที่จุดใกล้เคียงกับจุดที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดจะทำให้เกิดการอนุรักษ์พลังงานได้ทางหนึ่ง

ฉ. การใช้เครื่องจักรหรืออุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพสูงตลอดจนระบบควบคุมการทำงานและวัสดุที่ช่วยในการอนุรักษ์พลังงาน

- การใช้เครื่องจักรหรืออุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพสูง เครื่องจักร และอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานจากรูปหนึ่งเป็นอีกรูปหนึ่ง เช่น หม้อไอน้ำ เตาอุตสาหกรรม เครื่องกังหันไอน้ำ กังหันก๊าซ พัดลมดูดอากาศ และเป่าอากาศ เครื่องทำความเย็น เครื่องปรับอากาศ และอื่น ๆ ล้วนทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานจากรูปหนึ่งเป็นอีกรูปหนึ่งทั้งนั้น จึงย่อมมีพลังงานที่สูญเสียไปส่วนหนึ่งเสมอ เทคโนโลยีสมัยใหม่ที่ใช้ในการออกแบบและจัดการได้ช่วยให้เครื่องจักร และอุปกรณ์เหล่านี้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นเรื่อย ๆ การใช้เครื่องจักร และอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพสูงจะช่วยลดการสูญเสียพลังงานลงได้ อย่างไรก็ดี ในระยะเวลาที่ผ่านมายังไม่มีมาตรการที่เหมาะสมที่จะทำให้โรงงานอุตสาหกรรมเปลี่ยนไปใช้เครื่องจักร และอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพสูงได้มากนัก เพราะเครื่องจักร และอุปกรณ์เหล่านั้น ประเทศไทยต้องนำเข้าจากต่างประเทศมีราคาแพง

- การใช้ระบบควบคุมการทำงานของเครื่องจักรอุปกรณ์ การใช้ระบบควบคุมการทำงานของเครื่องจักรและอุปกรณ์ เพื่อให้สามารถทำงานได้โดยมีประสิทธิภาพสูง จะช่วยให้เกิดการประหยัดพลังงานได้ เช่น การใช้ระบบ Variable Speed Drive ในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้าที่เป็นตัวขับเคลื่อนอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อควบคุมของไหลหรือการใช้ระบบคอมพิวเตอร์เข้ามาควบคุมกระบวนการผลิตหรือเครื่องจักรขนาดใหญ่ ล้วนแต่ช่วยให้การทำงานของเครื่องจักร และอุปกรณ์เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพทั้งสิ้น

อย่างไรก็ตามในระยะเวลาที่ผ่านมา การใช้ระบบควบคุมการทำงานบางอย่างยังไม่ได้มีการพิจารณาว่าเป็นอุปกรณ์ที่ช่วยในการประหยัดพลังงาน ซึ่งผู้ที่นำเสนอให้ดำเนินการปรับปรุงจะต้องมีข้อมูลที่อ้างอิงหรือมีรายละเอียดที่สามารถพิสูจน์ได้อย่างชัดเจนในการสนับสนุนข้อเสนอในการปรับปรุงดังกล่าว

- การใช้วัสดุที่ช่วยในการอนุรักษ์พลังงาน วัสดุที่ช่วยในการอนุรักษ์พลังงาน คือ วัสดุที่ใช้รักษาสถานะที่ต้องการให้คงอยู่ในสภาวะนั้น ๆ เช่น ฉนวนกันความร้อนจะใช้ป้องกันการสูญเสียความร้อน หรือเป็นวัสดุที่เป็นส่วนประกอบของเครื่องจักรหรืออุปกรณ์ เช่น แผ่นเมมเบรนประสิทธิภาพสูงที่ใช้ในเครื่องผลิตโซดาไฟ หรือวัสดุเบาที่ใช้ประกอบผนังเตาเผา ในระยะเวลาที่ผ่านมายังไม่เกณฑ์ที่แน่นอนที่จะทำให้โรงงานอุตสาหกรรมหันไปใช้วัสดุดังกล่าว ส่วนใหญ่โรงงานจะตัดสินใจเลือกใช้โดยเกณฑ์ความคุ้มค่าเพียงด้านเดียว

6. ตรวจสอบการกรอกข้อมูลในแบบส่งข้อมูล (บพร.1) และแบบบันทึกข้อมูล (บพร.2)

การตรวจสอบการกรอกข้อมูลในแบบส่งข้อมูล (บพร.1) และแบบบันทึกข้อมูล (บพร.2) มีวัตถุประสงค์ที่จะให้ผู้ดำเนินการตรวจสอบและวิเคราะห์การใช้พลังงานตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลที่ดำเนินการโดยผู้รับผิดชอบพลังงานของโรงงานควบคุม โดยอาจจะเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการตรวจสอบ และตรวจวัดในการดำเนินการตรวจสอบ และวิเคราะห์การใช้พลังงาน รวมทั้งรวบรวมปัญหาอุปสรรค เสนอ แนะนำข้อแก้ไขปรับปรุงให้กับผู้รับผิดชอบพลังงาน โดยเสนอแนะมาในรายงานตรวจสอบ และวิเคราะห์การใช้พลังงานที่ได้ดำเนินการอยู่

7. ประเมินผลการอนุรักษ์พลังงาน และผลการลงทุน ตลอดจนปัญหาอุปสรรคในการดำเนินการอนุรักษ์พลังงานที่ผ่านมา

ในกรณีที่โรงงานควบคุมดำเนินการตามกฎหมายฉบับนี้เป็นการครั้งแรกจะเป็นการประเมินผลการดำเนินการอนุรักษ์พลังงานที่เจ้าของโรงงานควบคุมได้ดำเนินการเองที่ผ่านมา สำหรับในกรณีที่โรงงานควบคุมดำเนินการตามกฎหมายฉบับนี้เป็นการครั้งที่สองและในครั้งต่อไปจะหมายถึงการประเมินผลการดำเนินการอนุรักษ์พลังงานที่ได้ดำเนินการตามกฎหมาย

8. วิเคราะห์ประสิทธิภาพของการบริหารการอนุรักษ์พลังงานโดยการพิจารณาจากองค์กรกิจกรรมขีดความสามารถของบุคลากร และทัศนคติของผู้บริหาร และเจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้อง

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการบริหารการอนุรักษ์พลังงานมีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะวิเคราะห์สถานภาพของการจัดการด้านพลังงานของโรงงานที่เป็นอยู่ ทั้งนี้เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาใช้ในการดำเนินการพิจารณาปรับปรุงแนวทางการบริหารจัดการที่เป็นอยู่ในโรงงานนั้นรวมทั้งข้อมูลดังกล่าวจะเป็นประโยชน์ต่อทางราชการในการกำหนดนโยบายในการช่วยเหลือส่งเสริมให้มีการอนุรักษ์พลังงานได้อย่างตรงจุด

9. ในการดำเนินการต้องใช้เครื่องมืออย่างน้อยดังนี้

(ก) ด้านความร้อน

- (1) เครื่องวัดประสิทธิภาพการเผาไหม้
- (2) เครื่องวัดอุณหภูมิผิว โดยมีหัววัดทั้งแบบ Contact และแบบ Immersion (Pocket thermometer)
- (3) เครื่องวัดอุณหภูมิแบบใช้รังสี (Radiation thermometer)
- (4) เครื่องวัดสภาพความเป็นกรดหรือด่าง (PH meter)
- (5) เครื่องวัดสภาพการนำไฟฟ้าของน้ำ (Conductivity meter)
- (6) เครื่องวัดความเร็วแก๊ส (Gas velocity meter)
- (7) เครื่องมือตรวจสอบกับดักไอน้ำ
- (8) เครื่องวัดและบันทึกอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (Thermometer & hygrometer)
- (9) เครื่องวัดปริมาณการไหลของน้ำในท่อ (Flow meter)

(ข) ด้านไฟฟ้า

- (1) เครื่องบันทึกกำลังไฟฟ้า (kW recording meter)
- (2) เครื่องวัดกำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า (kW, volt, amp meter)
- (3) เครื่องวัดตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Power factor meter)
- (4) เครื่องวัดความเข้มของแสง (Lux meter)
- (5) เครื่องวัดและบันทึกกระแสไฟฟ้า
- (6) เครื่องวัดความเร็วรอบ
- (7) เครื่องวัดความเร็วลม

รายการเครื่องมือดังกล่าวเป็นรายการเครื่องมือที่ระบุให้ที่ปรึกษาที่จะต้องดำเนินการในการตรวจสอบ และวิเคราะห์การใช้พลังงานเบื้องต้นจะต้องมีเครื่องมืออย่างน้อย 1 ชุด ตามที่ระบุในรายการข้างต้น สำหรับการพิจารณารายการใดไปใช้งานในการตรวจสอบ และวิเคราะห์การใช้พลังงานดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับดุลยพินิจของที่ปรึกษาตามความเหมาะสมของแต่ละโรงงานที่ได้ดำเนินการ

2.1.2 วิธีดำเนินการในการตรวจสอบและวิเคราะห์การใช้พลังงานโดยละเอียด

วิธีดำเนินการในการตรวจสอบ และวิเคราะห์การใช้พลังงานโดยละเอียดของโรงงานควบคุมได้กำหนดให้ดำเนินการอย่างน้อยตามขอบเขต และวิธีการตามภาคผนวก 2 แนบท้ายกฎกระทรวง ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) ขอบเขตวิธีการดำเนินการดังกล่าว เป็นการตรวจสอบ และวิเคราะห์ที่ต่อเนื่องมาจากการตรวจสอบ และวิเคราะห์การใช้พลังงานเบื้องต้น โดยมีรายละเอียดตามความหมายของการตรวจสอบ และวิเคราะห์การใช้พลังงานโดยละเอียด ตามหัวข้อ ความหมายในการตรวจสอบ และวิเคราะห์การใช้พลังงานโดยละเอียด

สำหรับรายละเอียดวิธีดำเนินการในการตรวจสอบ และวิเคราะห์การใช้พลังงานโดยละเอียด มีดังนี้

การตรวจสอบ และวิเคราะห์สภาพการใช้พลังงานโดยละเอียดในเครื่องจักร และอุปกรณ์ ตลอดจนระบบต่างๆ ในโรงงานควบคุมอย่างน้อยให้ดำเนินการดังต่อไปนี้

1. ตรวจสอบข้อมูลเกี่ยวกับการผลิต ระบบการใช้พลังงาน ระบบการใช้เครื่องจักร และอุปกรณ์ของระบบต่างๆ ในโรงงานควบคุมโดยละเอียด ตลอดจนตรวจสอบรายละเอียดทั่วไปของโรงงานควบคุม

การตรวจสอบข้อมูลเกี่ยวกับระบบการผลิต ระบบการใช้พลังงานและระบบอื่นๆ ได้ระบุให้ทำการตรวจสอบข้อมูลโดยละเอียดเพื่อให้ทราบระดับการใช้พลังงานที่เป็นอยู่เทียบกับระดับที่กฎกระทรวงกำหนด ดังนั้นวัตถุประสงค์หลักของการตรวจสอบข้อมูลเกี่ยวกับระบบการใช้พลังงาน และระบบอื่นๆ โดยละเอียดตามหัวข้อนี้ นอกจากจะมีวัตถุประสงค์ในการตรวจสอบโดยละเอียดในระบบต่างๆ ที่มีศักยภาพในการอนุรักษ์พลังงานซึ่งได้นำเสนอมาตรการในการตรวจสอบ และวิเคราะห์การใช้พลังงานเบื้องต้นมาแล้ว จะต้องทำการตรวจสอบระบบการใช้พลังงานที่มีผลต่อการวิเคราะห์หาค่าระดับการใช้พลังงานโดยละเอียด ทั้งนี้เพื่อนำข้อมูลไปเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานตามกฎกระทรวงฯ ซึ่งในปัจจุบันนี้ (ม.ค. 44) อยู่ในระหว่างการศึกษาคำมาตรฐานระดับการใช้พลังงานดังกล่าว ยังไม่ได้มีการประกาศใช้แต่อย่างใด ดังนั้นระดับการใช้พลังงานของโรงงานแต่ละประเภทแต่ละแห่งจะเป็นการกำหนดระดับเพื่อเปรียบเทียบกับตนเอง โดยระดับการใช้พลังงาน หมายถึง ตัวชี้วัดที่จะแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการใช้พลังงานในการผลิต ซึ่งตัวชี้วัดดังกล่าวอาจกำหนดในรูปของปริมาณการใช้พลังงานต่อผลผลิต หรือประสิทธิภาพของระบบเครื่องจักร และอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการผลิต เป็นต้น สำหรับในกรณีที่ยังไม่มีมีการประกาศใช้กฎหมายในการกำหนดระดับการใช้พลังงานมาตรฐานของโรงงานควบคุมแต่ละประเภทการดำเนินการจึงควรนำผลจากการตรวจสอบสภาพที่เป็นอยู่กำหนดเป็นระดับการใช้พลังงานในปัจจุบันและตั้งเป้าหมายในการลดการใช้พลังงานหลังจากที่ได้

ปรับปรุงตามมาตรการที่ได้วิเคราะห์แล้วว่าคุ้มค่าต่อการลงทุนให้มีระดับการใช้พลังงาน ที่ดีกว่าเดิม เพื่อผลในการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพตามวัตถุประสงค์ของกฎหมายต่อไป

2. ตรวจวัดข้อมูลรายละเอียดสภาพการทำงาน และการใช้พลังงาน และการสูญเสียพลังงานของเครื่องจักร และอุปกรณ์ในระบบต่าง ๆ ในโรงงานควบคุมทั้งด้านพลังงานความร้อนและไฟฟ้า โดยทำการตรวจวัดและบันทึกอย่างต่อเนื่องหรือเป็นช่วงเวลาอย่างน้อย 1 สัปดาห์ เพื่อให้ทราบถึงสภาพการทำงาน และวิเคราะห์การสูญเสียพลังงาน โดยจัดทำสมดุลพลังงานความร้อนของอุปกรณ์หลัก และสมดุลพลังงานของโรงงานทั้งหมด การวิเคราะห์การสูญเสียพลังงานให้วิเคราะห์ดังต่อไปนี้

(ก) การสูญเสียจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงของอุปกรณ์ที่ใช้เชื้อเพลิง

(ข) การสูญเสียพลังงานจากผิวผนังของเตา หม้อไอน้ำและอุปกรณ์ใช้ความร้อนอื่น ๆ รวมทั้งการสูญเสียความร้อนจากท่อไอน้ำและท่อส่งความร้อนอื่น ๆ

(ค) การสูญเสียไฟฟ้าเนื่องจากระบบแสงสว่าง ระบบปรับอากาศตลอดจนจากประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องจักร และพลังงานอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ไฟฟ้า รวมถึงการมีตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Power factor) ต่ำกว่าปกติ

(ง) การสูญเสียอื่น ๆ

การดำเนินการตามข้อ (2) นี้ เป็นการกำหนดให้ทำการตรวจวัดข้อมูลรายละเอียดสภาพการทำงาน การใช้พลังงาน และการสูญเสียพลังงานของเครื่องจักร และอุปกรณ์ในระบบต่าง ๆ โดยเป็นการกำหนดในรายละเอียดให้ดำเนินการตรวจวัดเฉพาะลงไปในตัวอุปกรณ์นอกเหนือจากที่ระบุให้ทำการตรวจสอบเป็นระบบตามที่ระบุไว้ในข้อ (1)

นอกจากการตรวจวัดแล้ว ได้กำหนดให้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดเพื่อประเมินการสูญเสียพลังงานที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์ต่าง ๆ โดยจัดทำเป็นสมดุลพลังงานความร้อนของอุปกรณ์หลัก และสมดุลของพลังงานของโรงงานทั้งหมด

- การตรวจวัดข้อมูล

การตรวจวัดข้อมูลดังกล่าวกำหนดให้ทำการตรวจ และบันทึกอย่างต่อเนื่อง หรือเป็นช่วงเวลาอย่างน้อย 1 สัปดาห์ เมื่อพิจารณาถึงความหมายของการตรวจสอบ และวิเคราะห์การใช้พลังงานโดยละเอียดตามคำอธิบายในหัวข้อ ความหมายในการตรวจสอบ และวิเคราะห์การใช้พลังงานโดยละเอียด ประกอบกับคำอธิบายลักษณะงานที่ต้องทำการตรวจวัดแบบต่อเนื่อง ในหัวข้อวิธีการตรวจวัดข้อมูลแล้ว การตรวจวัดดังกล่าวตามข้อ (2) นี้ จะเป็นการตรวจวัดที่พิจารณาดำเนินการต่อเนื่องมาจากการตรวจสอบ และวิเคราะห์การใช้พลังงานเบื้องต้น โดยการตรวจวัดและบันทึกแบบต่อเนื่องจะพิจารณาดำเนินการในเครื่องจักร และอุปกรณ์ที่มีภาระงานไม่คงที่ ที่ได้นำเสนอมาตรการปรับปรุงในเบื้องต้นมาแล้วว่ามีศักยภาพในการประหยัดพลังงาน และต้องการศึกษาเพิ่มเติมในรายละเอียด และ/หรือเครื่องจักร และอุปกรณ์หลักที่มีการใช้พลังงานเป็นปริมาณมาก ซึ่งมีความต้องการนำข้อมูลจากการตรวจวัดไปใช้ในการจัดทำสมดุลพลังงานหรือประกอบการวิเคราะห์สภาพการใช้พลังงานของโรงงานเพื่อให้ทราบรูปแบบของภาระการทำงาน และนำข้อมูลมาวิเคราะห์สภาพการใช้งาน และการสูญเสียพลังงานได้อย่างถูกต้องแม่นยำ การตรวจวัดแบบต่อเนื่องในเครื่องจักร และอุปกรณ์ที่มีภาระการทำงานไม่คงที่นั้น ตามปกติจะตรวจวัดใน 1 รอบการทำงานของเครื่องจักร และในกรณีที่ภาระงานของเครื่องจักรในแต่ละรอบไม่คงที่ทำการวัดมากกว่า 1 รอบการทำงาน เพื่อหาข้อมูลเฉลี่ยที่สามารถนำไปวิเคราะห์ได้อย่างถูกต้องแม่นยำ สำหรับเครื่องจักร และอุปกรณ์ที่ทำงานตลอด 24 ชั่วโมง ก็จะมีการวัดต่อเนื่องตลอด 24 ชั่วโมง ในกรณีที่ภาระงานในแต่ละวันไม่คงที่ควรจะทำการวัดต่อเนื่อง 7 วัน ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดของการตรวจวัดตามข้อ 2 นี้

- การจัดทำสมดุลพลังงาน

การจัดทำสมดุลพลังงานได้กำหนดให้ดำเนินการจัดทำสมดุลพลังงานความร้อนในอุปกรณ์หลัก และสมดุลพลังงานของโรงงานทั้งหมด การจัดทำสมดุลพลังงานความร้อนของอุปกรณ์หลัก ได้แก่ การดำเนินการจัดทำสมดุลพลังงานของอุปกรณ์ที่ใช้เชื้อเพลิงและความร้อน ซึ่งได้แก่ อุปกรณ์หม้อไอน้ำ หม้อน้ำมันร้อน และเตาอุตสาหกรรมต่าง ๆ เป็นต้น

สำหรับการจัดทำสมดุลพลังงานของโรงงานทั้งหมด จะรวมถึงการใช้พลังงานทางด้านไฟฟ้าที่ใช้ในอุปกรณ์ต่างๆ ที่ไม่ใช้การทำความร้อน ส่วนใหญ่จะเป็นการใช้พลังงานไฟฟ้ากับมอเตอร์ที่ใช้กับอุปกรณ์ และระบบต่างๆ การทำสมดุลพลังงานทางด้านไฟฟ้าจะเป็นการทำสมดุลในลักษณะหาสัดส่วนการใช้งานในระบบ หรือเครื่องจักรอุปกรณ์ที่ใช้ไฟฟ้า ไม่ใช่เป็นการหาสมดุลพลังงานในตัวมอเตอร์เอง การจัดทำสมดุลพลังงานทั้งไฟฟ้า และความร้อนสามารถดำเนินการรวมหน่วยของพลังงานเป็นหน่วยเดียวกันในรูปของ GJ/ปี และจัดทำเป็นสมดุลพลังงานของโรงงานทั้งหมดได้ อย่างไรก็ตามการทำสมดุลพลังงานในลักษณะของค่าใช้จ่าย ควรจะพิจารณาดำเนินการควบคู่ไปด้วย เนื่องจากพลังงานที่ใช้อยู่ในโรงงานเป็นปริมาณมากอาจจะมีราคาสูงกว่าพลังงานที่ใช้เป็นจำนวนน้อยกว่า

3. การตรวจวัดการใช้พลังงาน และการสูญเสียพลังงานอย่างน้อยต้องปฏิบัติดังนี้

(ก) สำหรับเครื่องจักรหรืออุปกรณ์ที่มีการใช้พลังงานความร้อนเทียบเท่าเฉลี่ยระหว่าง 175-350 kW หรือใช้กำลังไฟฟ้าระหว่าง 20-50 kW ให้ดำเนินการตรวจวัดข้อมูลเฉพาะสภาพการทำงาน ลักษณะของการใช้พลังงาน และการสูญเสียพลังงานที่สำคัญในระดับเบื้องต้น

(ข) สำหรับเครื่องจักรหรืออุปกรณ์ที่มีขนาดพิกัดการใช้พลังงานความร้อน ต่อเนื่องน้อยกว่า 175 kW หรือใช้กำลังไฟฟ้าน้อยกว่า 20 kW การหาข้อมูลรายละเอียดการใช้พลังงานให้ใช้วิธีสังเกตจากภายนอก

ข้อกำหนดทางปฏิบัติในการตรวจวัดในการตรวจสอบ และวิเคราะห์การใช้พลังงานโดยละเอียด ได้รับความสำคัญในการตรวจวัดเครื่องจักรหรืออุปกรณ์ในแต่ละขนาดที่ใช้พลังงานไว้ เช่นเดียวกันกับการตรวจสอบและวิเคราะห์การใช้พลังงานเบื้องต้น สำหรับวิธีการตรวจวัดได้ระบุให้ทำการตรวจวัดโดยละเอียด มีรายละเอียดคำอธิบายตามวิธีการตรวจวัดในการตรวจสอบ และวิเคราะห์การใช้พลังงานโดยละเอียด

4. สืบหาข้อมูลโดยละเอียดในการหาคักยภาพในการใช้พลังงานรูปอื่น

การสืบหาข้อมูลโดยละเอียดในการหาคักยภาพการใช้พลังงานรูปอื่นเป็นการดำเนินการที่ต่อเนื่อง มาจากการสืบหาข้อมูลเบื้องต้น และได้ประเมินแล้วว่ามีความศักยภาพที่จะสามารถดำเนินการได้ จึงมีความจำเป็นที่จะสืบหาข้อมูลโดยละเอียดอีกครั้งหนึ่งเพื่อให้มีความมั่นใจว่าผลสรุปจากศักยภาพการใช้พลังงานรูปอื่น สามารถที่จะใช้ทดแทนพลังงานเดิมที่ใช้อยู่ได้อย่างเป็นจริง และมีผลดีต่อประสิทธิภาพ และค่าใช้จ่ายการใช้พลังงาน

5. ประเมินศักยภาพการอนุรักษ์พลังงานในด้านเทคนิคในระดับการปรับปรุงกระบวนการผลิต และการปรับปรุงเปลี่ยนแปลงเครื่องจักรหลัก ทำการออกแบบเชิงวิศวกรรมในระดับเบื้องต้น (Conceptual design) เพื่อให้สามารถประเมินการลงทุนได้อย่างใกล้เคียง ทำการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ และทางการเงินในแต่ละมาตรการ ซึ่งมีศักยภาพการอนุรักษ์พลังงาน และมีศักยภาพในการใช้พลังงานรูปอื่น โดยมีรายละเอียดในระดับที่สามารถขอรับการสนับสนุนทางการเงินจากสถาบันการเงินได้

ขอขยายการดำเนินการตามข้อ (5) นี้ สามารถแยกประเด็นที่กำหนดให้ดำเนินการได้ดังนี้

- การประเมินศักยภาพการอนุรักษ์พลังงานในด้านเทคนิค
- การวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ และทางการเงิน

การประเมินศักยภาพการอนุรักษ์พลังงานในด้านเทคนิค

การประเมินศักยภาพการอนุรักษ์พลังงานในด้านเทคนิคได้ระบุให้ดำเนินการถึงขั้นปรับปรุงกระบวนการผลิต และปรับปรุงเปลี่ยนแปลงเครื่องจักรหลัก รวมทั้งทำการออกแบบเชิงวิศวกรรมในระดับเบื้องต้น (Conceptual design) เพื่อให้สามารถประเมินการลงทุนได้อย่างใกล้เคียงการปรับปรุงกระบวนการผลิตและปรับปรุงเปลี่ยนแปลงเครื่องจักรหลักเป็นการพิจารณาที่ต้องผ่านลำดับตามขั้นตอนของการพิจารณาดำเนินการปรับปรุงในการอนุรักษ์พลังงาน โดยจะต้องพิจารณาถึงการจัดการในการใช้เครื่องจักรและการบำรุงรักษาเครื่องจักรอุปกรณ์ต่างๆ (House keeping) ให้อยู่ในสภาพที่ดีก่อนตัดสินใจดำเนินการปรับปรุงกระบวนการผลิต เนื่องจากการปรับปรุงกระบวนการผลิต และเปลี่ยนแปลงเครื่องจักรหลักจะต้องเสียค่าใช้จ่ายในการลงทุนปรับปรุงสูง การบำรุงรักษาที่ดีจะมีผลทำให้เครื่องจักรมีเสถียรภาพ และมีประสิทธิภาพซึ่งอาจจะไม่มีความจำเป็นหรือไม่คุ้มค่าต่อการลงทุนในการปรับปรุงกระบวนการผลิตและปรับปรุงเครื่องจักรหลักอย่างไรก็ตามการปรับปรุงกระบวนการผลิต และปรับปรุงเปลี่ยนแปลงเครื่องจักรหลักนั้น โดยทั่วไปจะมีเหตุผลอยู่ 2 ประการ ได้แก่ กระบวนการผลิตหรือเครื่องจักรเดิมมีการเสื่อมสภาพในลักษณะหมดอายุการใช้งานไม่สามารถซ่อมแซมหรือบำรุงรักษาให้อยู่ในสภาพเดิมได้หรือมีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาที่สูงอีกประการหนึ่ง อีกประการหนึ่ง ได้แก่ กระบวนการผลิตหรือเครื่องจักรเดิมล้าสมัยไม่สามารถใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพเมื่อเปรียบเทียบกับทางเลือกที่จะต้องพิจารณาถึงการแข่งขันกับการผลิตในยุคปัจจุบันที่เป็นอยู่ ดังนั้นจึงพิจารณานำเอาเทคโนโลยีสมัยใหม่มาใช้ปรับปรุงหรือเปลี่ยนแปลงกระบวนการผลิตหรือเครื่องจักรให้มีการใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

สำหรับการออกแบบเชิงวิศวกรรมในระดับเบื้องต้น (Conceptual design) จะเป็นการดำเนินการในกรณีที่จำเป็นต้องปรับปรุงกระบวนการผลิตหรือเครื่องจักรหลักที่มีระบบซับซ้อนไม่สามารถเข้าใจได้โดยง่ายหรือเพื่อความชัดเจนในการประเมินราคาค่าใช้จ่ายในการลงทุนในขั้นจัดทำรายการงานการตรวจสอบ และวิเคราะห์โดยละเอียดนี้ได้อย่างใกล้เคียง โดยในขั้นการดำเนินการปรับปรุงจะต้องมีการจัดทำแบบในการปรับปรุง (Engineering design) อีกครั้งหนึ่ง

การวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์และทางการเงิน

- การวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ เป็นการวิเคราะห์ผลตอบแทน เมื่อคำนึงถึงต้นทุนที่แท้จริง (Real Cost) ของโครงการและเปรียบเทียบกับผลประโยชน์ หรือผลกระทบที่เกิดขึ้น ซึ่งอาจมีทั้งแง่บวก และแง่ลบ

- การวิเคราะห์ทางการเงิน เป็นการวิเคราะห์ผลตอบแทน โดยพิจารณาจากราคาตลาดของเงินลงทุน และผลประโยชน์โดยตรงที่เกิดจากโครงการนั้น

การให้การสนับสนุนจากกองทุนเพื่อการส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน จะนำผลจากการวิเคราะห์ผลตอบแทนการคืนทุนทางด้านเศรษฐศาสตร์ (EIRR) และทางการเงิน (FIRR) (ดูรายละเอียดเพิ่มเติมในการวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์)

6. ในการดำเนินการต้องใช้เครื่องมืออย่างน้อยดังนี้

(ก) ด้านความร้อน

- (1) เครื่องวัดประสิทธิภาพการเผาไหม้ (โดยสามารถวัดได้ทั้งปริมาณ O_2 หรือ CO_2 และ CO)
- (2) เครื่องวัดอุณหภูมิโดยมีหัววัดทั้งแบบ Contact และแบบ Immersion (Pocket thermometer)
- (3) เครื่องวัดอุณหภูมิแบบใช้รังสี (Radiation thermometer)
- (4) เครื่องวัดความร้อนสูญเสีย (Heat flow meter)
- (5) เครื่องมือตรวจสอบคุณภาพน้ำ

(6) เครื่องวัดความเร็วแก๊ส (Gas velocity meter)

(7) เครื่องวัดและบันทึกอุณหภูมิ โดยสามารถวัดและบันทึกอุณหภูมิได้หลายจุด (Multipoint thermometer & recorder)

(8) เครื่องวัดปริมาณการไหลของน้ำในท่อ (Flow meter)

(9) เครื่องวัดอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์

(10) เครื่องวัดและบันทึกอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์

(11) เครื่องวัดความชื้นวัสดุ

(12) มิเตอร์วัดไอน้ำ และคอนเดนเสท

(13) มิเตอร์วัดน้ำมันเชื้อเพลิง และมิเตอร์วัดแก๊สเชื้อเพลิง

(ข) ด้านไฟฟ้า

(1) เครื่องบันทึกกำลังไฟฟ้า (kW recorder meter)

(2) เครื่องวัดกำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า (kW, volt, amp meter)

(3) เครื่องวัดตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Power factor meter)

(4) เครื่องวัดความเข้มของแสง (Lux meter)

(5) เครื่องวัดและบันทึกกระแสไฟฟ้า

(6) เครื่องวัดความเร็วลม

รายการเครื่องมือดังกล่าวเป็นรายการที่ระบุให้ที่ปรึกษาที่จะต้องดำเนินการตรวจสอบ และวิเคราะห์การใช้พลังงานโดยละเอียด จะต้องมียุทธศาสตร์อย่างน้อย 1 ชุด ตามที่ระบุไว้ในรายการข้างต้น สำหรับการพิจารณาการนำเครื่องมือรายการใดไปใช้งาน จะขึ้นอยู่กับดุลพินิจของที่ปรึกษาตามความเหมาะสมของแต่ละโรงงานแต่ละกรณีที่ได้ดำเนินการ

2.2 ชนิด และวิธีการใช้อุปกรณ์เครื่องมือวัดพลังงานความร้อน

2.2.1 การวัดอุณหภูมิ

2.2.1.1 หลักการของวิธีวัดอุณหภูมิ

การวัดอุณหภูมิ จะใช้วิธีนำเซ็นเซอร์ที่จะมีคุณสมบัติทางฟิสิกส์เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ไปสัมผัสกับวัตถุ แล้ววัดการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติข้างต้น ปริมาณทางฟิสิกส์ที่ใช้ได้แก่ ปริมาณเชิงไฟฟ้า ปริมาณการแผ่รังสีความร้อน ปริมาณเชิงกล ปริมาณเชิงแสง ปริมาณเชิงแม่เหล็ก เมื่อเปรียบเทียบวิธีวัดอุณหภูมิหลักๆ ที่มีใช้กันอยู่จากมุมมองนี้ จะได้ตารางที่ 2.1 อนึ่ง ถ้าเปรียบเทียบวิธีวัดอุณหภูมิระหว่างแบบสัมผัสกับแบบไม่สัมผัสแล้ว ในทางปฏิบัติการวัดแบบไม่สัมผัสจะมีแต่วิธีการแผ่รังสีเท่านั้น ซึ่งในกรณีนี้ เซ็นเซอร์จะไม่สัมผัสกับตัววัตถุในทางกายภาพ แต่สัมผัสกันในเชิงความร้อน

ในตารางนี้ วิธีที่ใช้กันมากที่สุดในอุตสาหกรรม ได้แก่ แบบเทอร์โมคัปเปิล แบบความต้านทาน (รวมทั้งแบบเทอร์มิสเตอร์) และแบบการแผ่รังสี ต่อไปนี้จะอธิบายทั้ง 3 วิธีนี้เป็นหลัก

เรื่องที่มีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับการวัดอุณหภูมิ ได้แก่ Scale ของอุณหภูมิ ซึ่ง Scale ของอุณหภูมิจะมีการแก้ไขเป็นครั้งคราวเมื่อเทคโนโลยีมีความก้าวหน้ามากขึ้น ปัจจุบัน เราใช้ Scale อุณหภูมินานาชาติ ITS-90 ซึ่งได้รับการแก้ไขใน พ.ศ. 2533 ซึ่งรายละเอียดจะไม่กล่าวในที่นี้ แต่เมื่อมีการแก้ไข Scale อุณหภูมินานาชาติ มาตรฐาน JIS ของญี่ปุ่นก็จะมีแก้ไขเป็นครั้งคราวไปด้วย ดังนั้น เมื่อจะทำการวัดที่ต้องการความเที่ยงตรงสูง จะต้องอ้างอิงมาตรฐาน JIS ฉบับล่าสุด ตัวอย่างเช่น ตาม ITS-90 จุดเดือดของน้ำจะเท่ากับ 99.974°C

อนึ่ง Scale อุณหภูมิ จะมีอุณหภูมิทางเทอร์โมไดนามิกส์ (หรืออุณหภูมิสัมบูรณ์) และอุณหภูมิเซลเซียส (หรือ Celsius scale) ความสัมพันธ์ของทั้งสองได้แก่ $K = \text{องศาเซลเซียส } [^{\circ}\text{C}] + 273.15$ ในที่นี้ K อ่านว่า เคลวิน

ตารางที่ 2.1 วิธีวัดอุณหภูมิหลักๆ ที่มีใช้กันอยู่

คุณสมบัติทางฟิสิกส์ที่ใช้	ชื่อเรียก	เซ็นเซอร์	หลักการทำงาน
ปริมาณเชิงไฟฟ้า	แบบเทอร์โมคัปเปิล	เทอร์โมคัปเปิล	Seebeck effect
	แบบความต้านทาน	ตัวต้านทานโลหะ (ทองคำขาว นิกเกิล เป็นต้น)	การเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้า
	แบบเทอร์มิสเตอร์	compound sintered compact ของออกไซด์ของโลหะหลายชนิด	การเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้า
ปริมาณการแผ่รังสีความร้อน	แบบการแผ่รังสี	silicon cell, PbS, thermopile เป็นต้น	การใช้พลังงานแสง (ที่มองเห็นได้และอินฟราเรด)
ปริมาณเชิงกล	แบบหลอดแก้ว	หลอดแก้วกับของเหลวข้างใน	การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของของเหลว
	แบบ filled system	bourdon tube กับอุปกรณ์ตรวจวัด (บรรจุของเหลวหรือก๊าซ)	การเปลี่ยนแปลงปริมาตรหรือความดันของของเหลวหรือก๊าซที่บรรจุอยู่
	แบบ bimetal	ชิ้นโลหะสองชนิด	ความแตกต่างของการขยายตัวด้วยความร้อนของชิ้นโลหะ 2 ชนิด
	แบบ crystal oscillator	crystal oscillator	การเปลี่ยนแปลงความถี่เฉพาะตัว
ปริมาณเชิงแสง	แบบฟลูออเรสเซนซ์	สารฟลูออเรสเซนซ์กับใยแก้วนำแสง	การเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของปรากฏการณ์เรืองแสงเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสง
	แบบการกระเจิงใยแก้วนำแสง	ใยแก้วนำแสง	อัตราส่วนของความเข้มของแสงระหว่างแสง stokes กับ antistokes ขึ้นที่อุณหภูมิค่าหนึ่งๆ
	แบบสี-ผลึกเหลวบอกอุณหภูมิ	สี-ผลึกเหลวบอกอุณหภูมิ	การเปลี่ยนแปลงสีเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป
ปริมาณเชิงแม่เหล็ก	แบบแม่เหล็ก	เฟอร์ไรต์	การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงแม่เหล็กที่อุณหภูมิใกล้เคียงกับ Curie temperature

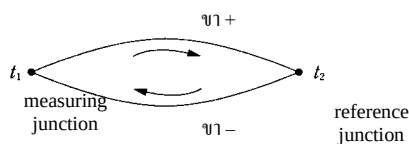
2.2.1.2 เครื่องวัดอุณหภูมิแบบเทอร์โมคัปเปิล

1. หลักการทำงาน

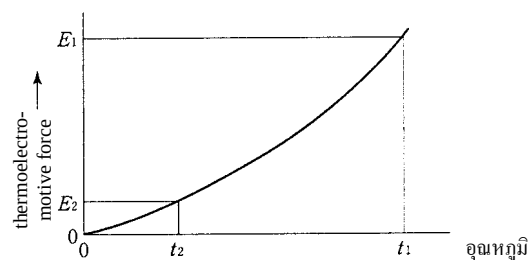
เมื่อนำเส้นลวดโลหะ 2 เส้นที่ทำจากวัสดุต่างกันมาต่อกันดังรูปที่ 2.2 และรักษา Junction ทั้ง 2 ให้มีอุณหภูมิแตกต่างกันแล้ว จะมีกระแสไฟฟ้าไหลในวงจรนี้ ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Seebeck effect และแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้านี้ เรียกว่า Thermoelectromotive force ขนาดของ Thermoelectromotive force นี้จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของ Junction ทั้งสองเท่านั้น ไม่เกี่ยวกับอุณหภูมิของบริเวณอื่นๆ นอกเหนือจาก Junction ของเส้นลวดทั้งสอง ดังนั้น เมื่อรักษาอุณหภูมิของ Junction ด้านหนึ่งให้คงที่ และวัด Thermoelectromotive force ที่เกิดขึ้นในวงจรนี้ ก็สามารถทราบอุณหภูมิของ Junction อีกด้านหนึ่งได้ โดย Junction ด้านที่รักษาให้มีอุณหภูมิคงที่ เรียกว่า Reference junction หรือ Cold junction ส่วน Junction อีกด้านหนึ่ง เรียกว่า Measuring junction เนื่องจากวางไว้ในตำแหน่งที่ต้องการวัดอุณหภูมิ เส้นลวดโลหะทั้ง 2 เส้นที่มาประกอบกับนี้เรียกว่า เทอร์โมคัปเปิล เส้นลวดโลหะทั้ง 2 เส้นของเทอร์โมคัปเปิลนี้จะมีขา + และขา - ตามทิศทางของกระแสไฟฟ้าตามที่แสดงในรูปที่ 2.2

Thermoelectromotive force ของเทอร์โมคัปเปิล จะมีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิของ Measuring junction เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม การเพิ่มนี้ไม่จำเป็นต้องแปรผันตรงตามอุณหภูมิ นอกจากนี้ ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับ Thermoelectromotive force ยังขึ้นอยู่อย่างมากกับชนิดของเส้นลวดเทอร์โมคัปเปิลอีกด้วย คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับ Thermoelectromotive force นี้ในมาตรฐาน JIS หรือมาตรฐานอื่นๆ จะระบุไว้ในตาราง Thermoelectromotive force มาตรฐานเมื่ออุณหภูมิของ Reference junction เท่ากับ 0°C อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการรักษาอุณหภูมิของ Reference junction ไว้ที่ 0°C เป็นเรื่องที่ยุ่งยาก ดังนั้น โดยทั่วไปจะใช้วิธีชดเชยอุณหภูมิของ Reference junction แล้วทำการวัดที่อุณหภูมิใดๆ ที่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิปกติ

รูปที่ 2.3 แสดงคุณลักษณะด้าน Thermoelectromotive force ของเทอร์โมคัปเปิล โดย t_1 เป็นอุณหภูมิของ Measuring junction และ t_2 เป็นอุณหภูมิของ Reference junction ส่วน E_1 และ E_2 เป็น Thermoelectromotive force มาตรฐานที่เทียบเท่ากับ t_1 และ t_2 ตามลำดับ เมื่อวัด t_2 ด้วยวิธีใดๆ แล้วใช้ค่านั้นหา E_2 นำมาบวกกับ Thermoelectromotive force ของเทอร์โมคัปเปิลแล้วจะสามารถหาค่า Thermoelectromotive force E_1 ที่เทียบเท่ากับ t_1 ได้ หลักการนี้เรียกว่า หลักการชดเชยอุณหภูมิของ Reference junction

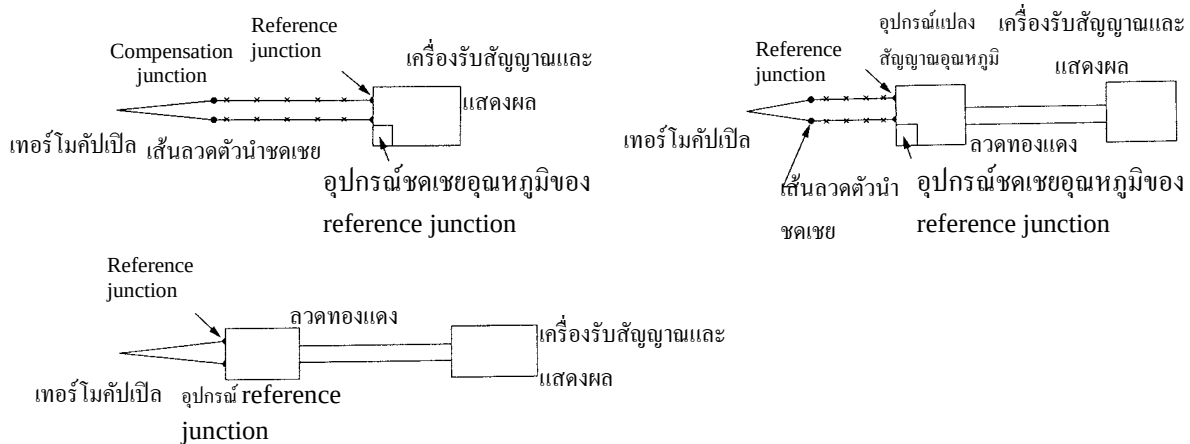


รูปที่ 2.2 เทอร์โมคัปเปิล



รูปที่ 2.3 หลักการชดเชยอุณหภูมิของ Reference junction

เครื่องวัดอุณหภูมิแบบเทอร์โมคัปเปิล ประกอบด้วย เทอร์โมคัปเปิล เส้นลวดตัวนำชดเชย อุปกรณ์ Reference junction อุปกรณ์แปลงสัญญาณอุณหภูมิ เครื่องรับสัญญาณ และแสดงผล เส้นลวดตัวนำชดเชย เป็นเส้นลวดที่มีคุณลักษณะด้าน Thermoelectromotive force เกือบเท่ากับเทอร์โมคัปเปิลภายใต้อุณหภูมิไม่เกินประมาณ 100°C ซึ่งมีราคาค่อนข้างต่ำกว่าเทอร์โมคัปเปิล อุปกรณ์ Reference junction เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่รักษาอุณหภูมิของ Reference junction ให้คงที่ หรือทำหน้าที่กำเนิด Thermoelectromotive force ที่เทียบเท่ากับอุณหภูมิของ Reference junction แบบแรกยังแบ่งเป็นแบบ Freezing point และแบบ Thermoelectric refrigeration ส่วนแบบหลังเรียกว่าแบบ Compensation โครงสร้างของเครื่องวัดอุณหภูมิแบบเทอร์โมคัปเปิลที่สำคัญ แสดงไว้ในรูปที่ 2.4 อุปกรณ์แปลงสัญญาณอุณหภูมิ จะแปลง Thermoelectromotive force ให้เป็นสัญญาณ 4-20 mACD หรือ 1-5 VDC ที่แปรผันตรงกับอุณหภูมิ



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของเครื่องวัดอุณหภูมิแบบเทอร์โมคัปเปิล

2. คุณสมบัติ

(ก) ข้อดี

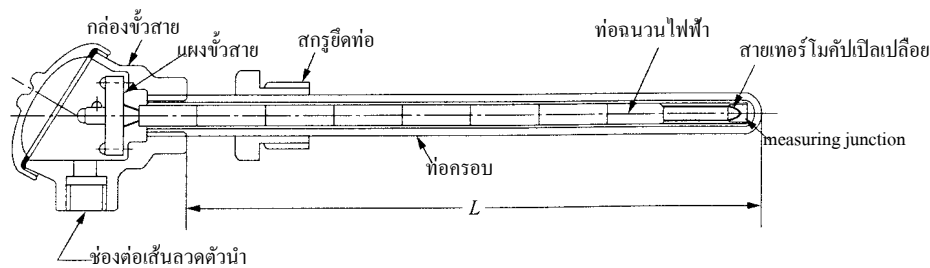
- (1) โครงสร้างไม่ซับซ้อน ใช้งานง่าย
- (2) ราคาค่อนข้างต่ำ
- (3) หากเลือกใช้เทอร์โมคัปเปิลที่เหมาะสมจะสามารถวัดอุณหภูมิได้ในช่วงกว้างตั้งแต่อุณหภูมิต่ำถึงอุณหภูมิสูง

(ข) ข้อเสีย

- (1) ต้องชดเชยอุณหภูมิของ Reference junction
- (2) เมื่อวัดอุณหภูมิสูงหรือวัดอุณหภูมิไปนานๆ เทอร์โมคัปเปิลจะเสื่อมสภาพ Thermoelectromotive force จะลดต่ำลง
- (3) ความเที่ยงตรงต่ำกว่าเครื่องวัดอุณหภูมิแบบความต้านทานที่จะกล่าวต่อไปอยู่บ้าง (คลาส 1 มีความเที่ยงตรง $\pm 0.4\%$ ของอุณหภูมิที่วัด คลาส 2 มีความเที่ยงตรง $\pm 0.75\%$)

3. เทอร์โมคัปเปิล

เทอร์โมคัปเปิลมีหลายประเภท แต่เทอร์โมคัปเปิลส่วนใหญ่จะมีมาตรฐานระดับนานาชาติกำหนดเอาไว้ ในประเทศญี่ปุ่นก็มีการกำหนดมาตรฐาน JIS ตามมาตรฐานเหล่านี้



รูปที่ 2.5 ตัวอย่างโครงสร้างของเทอร์โมคัปเปิลพร้อมท่อครอบ

เทอร์โมคัปเปิลในอุตสาหกรรมโดยปกติแล้วจะใส่ไว้ในท่อครอบแล้วนำไปใช้งาน เรียกว่าเทอร์โมคัปเปิลพร้อมท่อครอบ ซึ่งตัวอย่างโครงสร้างแสดงไว้ในรูปที่ 2.5 และเพื่อเป็นฉนวนไฟฟ้าระหว่างขาทั้งสองของเทอร์โมคัปเปิลกับท่อครอบ จะใช้ท่อฉนวนไฟฟ้า

ตารางที่ 2.2 แสดงประเภทของเทอร์โมคัปเปิลที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน JIS และอุณหภูมิใช้งานสูงสุด ข้อความในวงเล็บ

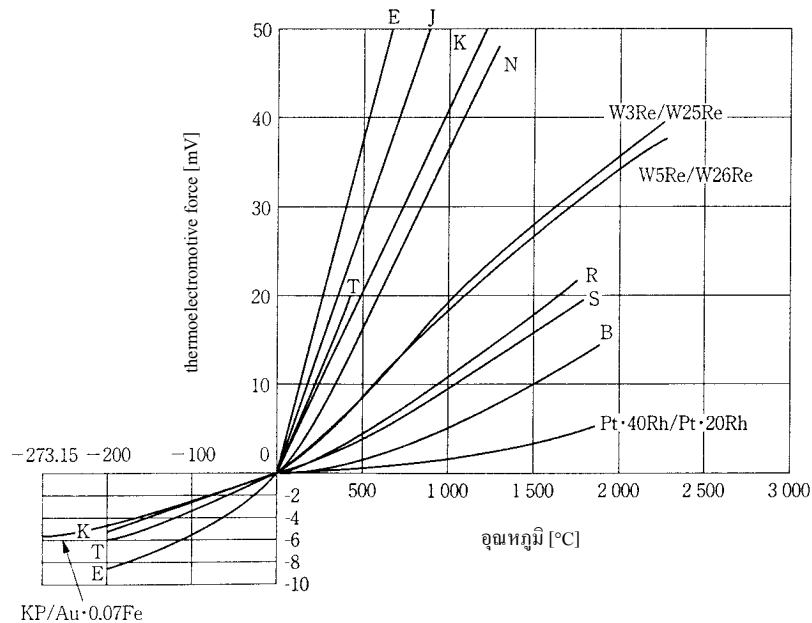
ตารางที่ 2.2 ประเภทของเทอร์โมคัปเปิลที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน JIS และอุณหภูมิใช้งานสูงสุด

สัญลักษณ์ประเภท	วัสดุ		เส้นผ่านศูนย์กลางสายเปลือย [mm]	อุณหภูมิใช้งานทั่วไปสูงสุด ^{*1} [°C]	อุณหภูมิใช้งานความร้อนสูงสุด ^{*2} [°C]
	ขา +	ขา -			
B	โลหะผสมทองคำขาว-โรเดียมที่มีโรเดียม 30%	โลหะผสมทองคำขาว-โรเดียมที่มีโรเดียม 6%	0.50	1500	1700
R	โลหะผสมทองคำขาว-โรเดียมที่มีโรเดียม 13%	ทองคำขาว	0.50	1400	1600
S	โลหะผสมทองคำขาว-โรเดียมที่มีโรเดียม 10%	ทองคำขาว	0.50	1400	1600
N	โลหะผสมที่มีนิกเกิลโครเมียมและซิลิกอนเป็นหลัก(Nichrosil)	โลหะผสมที่มีนิกเกิลและซิลิกอนเป็นหลัก(Nisil)	0.65	850	900
			1.00	950	1000
			0.60	1050	1100
			2.30	1100	1150
			3.20	1200	1250
K	โลหะผสมที่มีนิกเกิลและโครเมียมเป็นหลัก(Chromel)	โลหะผสมที่มีนิกเกิลเป็นหลัก(Alumel)	0.65	650	850
			1.00	750	950
			1.60	850	1050
			2.30	900	1100
			3.20	1000	1200
E	โลหะผสมที่มีนิกเกิลและโครเมียมเป็นหลัก(Chromel)	โลหะผสมที่มีทองแดงและนิกเกิลเป็นหลัก(Constantan)	0.65	450	500
			1.00	500	550
			1.60	550	650
			2.30	600	750
			3.20	700	800
J	เหล็ก	โลหะผสมที่มีทองแดงและนิกเกิลเป็นหลัก(Constantan)	0.65	400	500
			1.00	450	550
			1.60	500	650
			2.30	550	750
			3.20	600	750
T	ทองแดง	โลหะผสมที่มีทองแดงและนิกเกิลเป็นหลัก(Constantan)	0.32	200	250
			0.65	200	250
			1.00	250	300
			1.60	300	350

*1 อุณหภูมิใช้งานทั่วไปสูงสุด หมายถึง อุณหภูมิสูงสุดที่สามารถใช้งานได้ต่อเนื่องในอากาศ

*2 อุณหภูมิใช้งานความร้อนสูงสุด หมายถึง อุณหภูมิสูงสุดที่สามารถใช้งานได้เป็นระยะเวลานั้นๆ ในกรณีที่จำเป็นและหลีกเลี่ยงไม่ได้

หมายเหตุ () แสดงชื่อสามัญหรือชื่อเรียกตามมาตรฐาน JIS เก่า



รูปที่ 2.6 คุณสมบัติด้าน Thermoelectromotive force ของเทอร์โมคัปเปิลที่สำคัญ

เทอร์โมคัปเปิลแบบ R, S, B และ Pt-40Rh / Pt-20Rh เป็นเทอร์โมคัปเปิลพวกทองคำขาวซึ่งสามารถวัดอุณหภูมิสูงได้ อย่างไรก็ดี เนื่องจากเทอร์โมคัปเปิลแบบนี้ไม่ทนต่อไอระเหยของโลหะ ท่อครอบจึงจำเป็นต้องใช้ท่อครอบอลูมิน่า (Al_2O_3) ในที่นี้ Pt-40Rh หมายถึงโลหะผสมระหว่างทองคำขาว 60% กับโรเดียม 40% เทอร์โมคัปเปิลที่สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงสุด คือเทอร์โมคัปเปิลทังสเตน (W)-รีเนียม (Re) ซึ่งมีช่วงการใช้งาน 0-2300°C ในรูปที่ 2.6 W5Re/W26Re หมายถึง องค์ประกอบของขา + เป็นทังสเตน 95% รีเนียม 5% และองค์ประกอบของขา - เป็นทังสเตน 74% รีเนียม 26% สำหรับอุณหภูมิที่ต่ำมากๆ มักจะใช้เทอร์โมคัปเปิล Chromel / ทองคำ-เหล็ก (KP / Au-0.07Fe) ซึ่งมีขา + เหมือนกับเทอร์โมคัปเปิล K และขา - เป็นโลหะผสมของทองคำและเหล็กปริมาณเล็กน้อย มีช่วงการใช้งานระหว่าง 1-300K

โครงสร้างของเทอร์โมคัปเปิล นอกจากเทอร์โมคัปเปิลพร้อมท่อครอบ (รูปที่ 2.5) แล้ว ยังมี Sheathed thermocouple อีกด้วย ซึ่งแบบหลังนี้จะใช้ท่อโลหะพอมบาง (เรียกว่า Sheathed) เป็นท่อครอบ และในการกันฉนวนไฟฟ้าจะใช้ผงแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) หรืออื่นๆ อัดให้แน่น เนื่องจากติดตั้งได้ง่ายจึงสามารถใช้วัดในช่องแคบๆ หรือด้านหลังของวัตถุได้ นอกจากนี้ เนื่องจากมีลักษณะพอม จึงมีการตอบสนองเร็วกว่าอีกด้วย

4. เส้นลวดตัวนำชดเชย

หากใช้เส้นลวดที่ทำจากวัสดุเดียวกับเทอร์โมคัปเปิลเป็นเส้นลวดตัวนำชดเชย จะมีความเที่ยงตรงสูงขึ้น แต่ราคาจะแพงขึ้นตามไปด้วย ดังนั้น โดยมากจึงใช้เส้นลวดที่มีคุณสมบัติด้าน Thermoelectromotive force เกือบเหมือนกับเทอร์โมคัปเปิลที่อุณหภูมิต่ำ อย่างไรก็ดี เนื่องจากคุณลักษณะจะไม่ตรงกับเทอร์โมคัปเปิลเลยทีเดียว หากช่วงอุณหภูมิที่ใช้งานกว้างจะเกิดความคลาดเคลื่อนขึ้น ดังนั้น จึงต้องพิจารณาช่วงอุณหภูมิใช้งาน และเลือกใช้ให้เหมาะสมกับราคาและความเที่ยงตรงที่เหมาะสม เส้นลวดตัวนำชดเชยที่ทำจากวัสดุเกือบเหมือนกับเทอร์โมคัปเปิล เรียกว่า แบบ Extension หากทำจากวัสดุที่แตกต่างจากเทอร์โมคัปเปิล จะเรียกว่า แบบ Compensation

5. ท่อครอบ

ท่อครอบจำเป็นต้องทนต่ออุณหภูมิสูง ก๊าซภายนอกไม่รั่วเข้ามาและไม่ซึมเข้ามา และยังต้องมีความแข็งแรงทางกลศาสตร์อย่างเพียงพออีกด้วย วัสดุที่นิยมใช้ได้แก่ SUS304 SUS316 เป็น

ตัน แต่กรณีที่อุณหภูมิใช้งานปกติสูงกว่า 1000°C จะใช้ท่อเหล็กโครเมียมสูงหรือโลหะผสมพิเศษ กรณีที่เทอร์โมคัปเปิลพวกทองคำขาว โดยทั่วไปจะใช้ท่ออลูมินา แต่เนื่องจากท่อแบบนี้จะไม่ทนต่อการได้รับความร้อน-ความเย็นอย่างรวดเร็ว โดยมากจึงทำเป็นท่อครอบ 2 ชั้นโดยชั้นนอกจะเป็นท่อซิลิกอนคาร์ไบด์หรือซิลิกอนไนไตรด์

6. ข้อควรระวังในการวัด

ในการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลกับอุปกรณ์หรือท่อ หากสอดเทอร์โมคัปเปิลได้ไม่ลึกพอ อุณหภูมิที่ Measuring junction ของเทอร์โมคัปเปิลจะได้รับอิทธิพลจากอุณหภูมิภายนอกผ่านท่อครอบ ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนขึ้น ดังนั้นเพื่อลดความผิดพลาดดังกล่าว กรณีของท่อครอบโลหะ ควรสอดให้ลึก 15-20 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อครอบ กรณีของท่อครอบอลูหะ ควรสอดให้ลึก 10-15 เท่า หากไม่สามารถสอดได้ลึกมาก ต้องพยายามใช้เทอร์โมคัปเปิลที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางพอม (เช่น Sheathed thermocouple)

บางครั้งอุณหภูมิของผนังเตาจะสูงกว่าอุณหภูมิภายในเตาเนื่องจากอิทธิพลของเปลวไฟหรือสาเหตุอื่นๆ ดังนั้น บางครั้งแม้อุณหภูมิที่อ่านได้จะไม่สูงนัก แต่กลางเส้นลวดเทอร์โมคัปเปิลอาจจะเปลี่ยนสภาพหรือขาดได้ จึงต้องระมัดระวัง

2.2.1.3 เครื่องวัดอุณหภูมิแบบตัวต้านทาน

1. หลักการทำงาน

เครื่องวัดอุณหภูมิแบบตัวต้านทานเป็นเครื่องวัดอุณหภูมิที่ใช้หลักการว่าความต้านทานไฟฟ้าของโลหะหรือโลหะจะเปลี่ยนแปลงเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป สำหรับตัวต้านทานโลหะทองคำขาวจะเป็นที่ใช้กันมากที่สุด และมีมาตรฐานกำหนดไว้ในระดับสากล ก่อนหน้านี้เคยใช้นิกเกิล-ทองแดงเป็นตัวต้านทานสำหรับวัดอุณหภูมิเช่นกัน แต่ปัจจุบันได้ถูกนำออกไปจากมาตรฐานแล้ว สำหรับตัวต้านทานอลูหะ อาจจะมองได้ว่ามีแต่เทอร์มิสเตอร์เท่านั้น แม้ว่าเทอร์มิสเตอร์จะมีใช้ในอุตสาหกรรมเช่นกัน แต่จะใช้กันมากอย่างยิ่งในเครื่องไฟฟ้าสำหรับครัวเรือน เครื่องใช้สำนักงาน ใช้ในที่พักอาศัย เป็นต้น และมีมาตรฐาน JIS กำหนดไว้ด้วย

2. คุณสมบัติของตัวต้านทานวัดอุณหภูมิทองคำขาว

(ก) ข้อดี

- มีความเที่ยงตรงสูงกว่าเทอร์โมคัปเปิล โดย Tolerance ที่ 300°C เท่ากับ $\pm 0.75^{\circ}\text{C}$ สำหรับคลาส A และ $\pm 1.8^{\circ}\text{C}$ สำหรับคลาส B
- ไม่ต้องชดเชยอุณหภูมิของ Reference junction เหมือนเทอร์โมคัปเปิล
- สัญญาณเอาต์พุตมีกำลังสูง เส้นลวดตัวต้านทานทองคำขาว $100\ \Omega$ ที่ 0°C จะมีการเปลี่ยนแปลงประมาณ $0.4\ \Omega$ ต่อ 1°C หากมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน $1\ \text{mA}$ จะได้สัญญาณเอาต์พุตประมาณ $400\ \mu\text{V}$ ซึ่งสูงกว่าเทอร์โมคัปเปิลถึง 1 หลัก มีการเสื่อมสภาพตามเวลาน้อย มีความทนทานสูง

(ข) ข้อเสีย

- อุณหภูมิสูงสุดที่วัดได้ค่อนข้างต่ำกว่าเทอร์โมคัปเปิล (ตัวต้านทานสำหรับอุณหภูมิสูงวัดได้ถึง 650°C)
- โดยทั่วไปจะมีโครงสร้างซับซ้อนกว่าเทอร์โมคัปเปิลและมีขนาดใหญ่กว่า

3. ตัวต้านทานวัดอุณหภูมิทองคำขาว

ตัวต้านทานวัดอุณหภูมิทองคำขาวทำจากเส้นลวดทองคำขาวที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.01-0.04 mm พันรอบแกนแก้วหรือเซรามิก ให้ค่าความต้านทานของเส้นลวดทองคำขาว $100\ \Omega$ ที่ 0°C โดยเรียกว่า อุปกรณ์ตัวต้านทาน ในมาตรฐาน JIS จะใช้สัญลักษณ์แทนด้วย Pt 100 นำอุปกรณ์นี้ใส่ในท่อครอบ แล้วต่อขั้วต่อสายที่ปลายด้านหนึ่งเพื่อต่อวงจรกับภายนอก มองจากภายนอกจะเหมือนกับเทอร์โมคัปเปิลพร้อมท่อครอบ

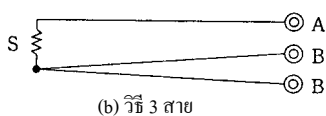
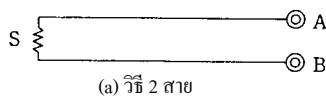
มาตรฐาน JIS ยังกำหนดตัวต้านทานวัดอุณหภูมิแบบ Sheathed ไว้อีกด้วย โดยใช้ท่อครอบผสม (จะไม่ใช้โลหะแต่ใช้พลาสติกสังเคราะห์ก็ได้) เพื่อให้สามารถติดตั้งได้

คุณลักษณะระหว่างอุณหภูมิ-ความต้านทานไฟฟ้าของตัวต้านทานวัดอุณหภูมิทองคำขาว สามารถกำหนดได้อย่างแน่นอนจากอัตราส่วนระหว่างค่าความต้านทาน R_{100} เมื่ออุณหภูมิเท่ากับ 100°C กับค่าความต้านทาน R_0 เมื่ออุณหภูมิเท่ากับ 0°C มาตรฐาน JIS เดิมกำหนดให้ R_{100} / R_0 เท่ากับ 1.3916 แต่ปัจจุบันได้แก้ไขให้เท่ากับ 1.3851 ให้สอดคล้องกับมาตรฐานสากล

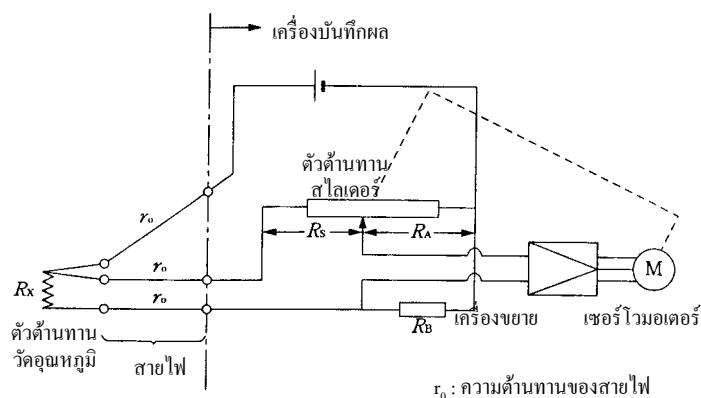
วิธีต่อวงจรตัวต้านทานวัดอุณหภูมิ มี 3 วิธีดังรูปที่ 2.7 วิธี 2 สายจะใช้สายไฟเพียง 2 เส้นเท่านั้นจึงประหยัด แต่การเปลี่ยนแปลงความต้านทานของสายไฟจะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนขึ้นเท่ากับการเปลี่ยนแปลงนั้น วิธี 4 สายจะสามารถกำจัดผลกระทบของความต้านทานของสายไฟได้อย่างสิ้นเชิง แต่จะมีต้นทุนสูงกว่า ดังนั้น ในงานอุตสาหกรรมจึงนิยมใช้วิธี 3 สายกันมากที่สุด รูปที่ 2.8 แสดงตัวอย่างวงจรของเครื่องรับสัญญาณและแสดงผลแบบ 3 สาย

4. ข้อควรระวังในการใช้งาน

ความถี่ในการสอดตัวต้านทานวัดอุณหภูมิจะเหมือนกับเทอร์โมคัปเปิล เนื่องจากเครื่องวัดอุณหภูมิแบบตัวต้านทานใช้วิธีวัดความต้านทานเพื่อหาอุณหภูมิ ดังนั้น จึงได้รับผลกระทบจากความต้านทานของสายไฟ ความต้านทานของหน้าสัมผัส



S: อุปกรณ์ตัวต้านทานวัดอุณหภูมิ
A, B: ขั้วสาย



รูปที่ 2.7 วิธีต่อสายไฟของตัวต้านทานวัดอุณหภูมิ

รูปที่ 2.8 ตัวอย่างวงจรของเครื่องรับสัญญาณและแสดงผลตัวต้านทานวัดอุณหภูมิ

และฉนวนไฟฟ้า นอกจากนี้ ในการวัดความต้านทาน จะต้องป้อนกระแสไฟฟ้าให้ไหลผ่านอุปกรณ์ตัวต้านทาน ดังนั้นจึงเกิดความร้อนขึ้น ทำให้อุณหภูมิของอุปกรณ์สูงขึ้น ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Self heating อย่างไรก็ตาม เครื่องวัดในปัจจุบันจะป้อนกระแสให้อุปกรณ์น้อยลง โดยทั่วไปจึงไม่เป็นปัญหา

5. เทอร์มิสเตอร์

มาตรฐาน JIS ได้นิยาม เทอร์มิสเตอร์ ไว้ว่า “อุปกรณ์ตัวต้านทานที่ทำจากออกไซด์ของโลหะ (แมงกานีส นิกเกิล โคบอลต์ เป็นต้น) และมีค่าสัมประสิทธิ์ของความต้านทานต่ออุณหภูมิเป็นลบ ผิวหน้าคลุมด้วยแก้ว”

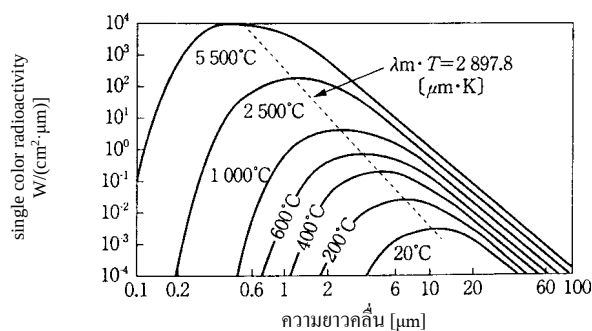
เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าความต้านทานของเทอร์มิสเตอร์จะลดต่ำลงเป็นฟังก์ชันยกกำลัง ดังนั้น จึงมีความไวต่ออุณหภูมิสูง อย่างไรก็ตาม ช่วงอุณหภูมิที่อุปกรณ์หนึ่งสามารถวัดครอบคลุมได้จะแคบ และสามารถทำให้อุปกรณ์มีขนาดเล็กมาก (เส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 1 mm ก็ได้) จึงมีการตอบสนองรวดเร็ว เหมาะกับการผลิตเชิงอุตสาหกรรม และมีราคาถูกมาก

2.2.1.4 เครื่องวัดอุณหภูมิแบบการแผ่รังสี (pyrometer)

1. หลักการทำงาน

วัตถุทุกชนิดจะแผ่พลังงานรังสีความร้อนจากผิวหน้าออกมาในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยส่วนใหญ่จะเป็นรังสีอินฟราเรด และเมื่อวัตถุมีอุณหภูมิสูงขึ้นก็จะมีแสงที่มองเห็นได้ออกมาด้วย การกระจายความยาวคลื่นและความเข้มของพลังงานของแต่ละความยาวคลื่นของพลังงานของการแผ่รังสีความร้อนนี้ มีความสัมพันธ์ที่ตายตัวกับอุณหภูมิของวัตถุ ดังนั้น เราจึงวัดการกระจายและความเข้มนี้เพื่อหาอุณหภูมิของวัตถุได้ นี่เป็นหลักการทำงานของ Pyrometer นั่นเอง

วัตถุในอุดมคติเกี่ยวกับการแผ่รังสี เรียกว่า วัตถุดำ ซึ่งพลังงานการแผ่รังสีความร้อนจากวัตถุดำจะมีการกระจายความยาวคลื่นตามรูปที่ 2.9 Single color radioactivity หมายถึง พลังงานการแผ่รังสีความร้อน [W] ที่มีความยาวคลื่น λ ต่อพื้นที่ผิวของวัตถุดำหนึ่งหน่วยพื้นที่ต่อหนึ่งหน่วยเวลา อนึ่ง ความยาวคลื่นของแสงที่มองเห็นได้จะมีค่าประมาณ 0.38-0.78 μm



รูปที่ 2.9 การแจกแจงความยาวคลื่นของพลังงานของการแผ่รังสีความร้อนของวัตถุดำ

พลังงานการแผ่รังสีทั้งหมดจากวัตถุดำ จะเป็นค่าที่อินทิเกรตค่า Single color radioactivity รวมทุกความยาวคลื่น หากจะอธิบายด้วยรูปนี้ จะเท่ากับพื้นที่ใต้เส้นกราฟของอุณหภูมิแต่ละค่า ซึ่งจากกฎของ Stefan-Boltzman จะพบว่าพลังงานรวมจะแปรผันตามกำลัง 4 ของอุณหภูมิทางเทอร์โมไดนามิกส์ พื้นฐานของ Pyrometer จะประกอบด้วย Single color pyrometer ซึ่งทำหน้าที่วัดพลังงานการแผ่รังสีความร้อนของความยาวคลื่นค่าใดค่าหนึ่ง กับ Wide band (total) pyrometer ในทางปฏิบัติเนื่องจากเราไม่สามารถวัดพลังงานของความยาวคลื่นเดียวได้อย่างสมบูรณ์ ดังนั้น เราจึงต้องวัดพลังงานของแถบความยาวคลื่นค่าหนึ่ง Pyrometer ที่วัดพลังงานของแถบความยาวคลื่นช่วงหนึ่ง เรียกว่า Narrow band pyrometer

Single color radioactivity ที่แสดงในรูปที่ 2.9 เป็นค่าในกรณีของวัตถุดำ สำหรับวัตถุจริงๆ จะมีค่าน้อยกว่านี้เสมอ เมื่อนำค่าพลังงานการแผ่รังสีความร้อนจากวัตถุจริงๆ มาหารด้วยของวัตถุดำ จะได้ Emissivity โดยทั่วไปจะเขียนแทนด้วย ϵ ซึ่งค่า Emissivity ของวัตถุหนึ่งๆ ยังขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นอีกด้วย ค่า Emissivity ที่ความยาวคลื่นหนึ่งๆ เรียกว่า Single color emissivity ϵ_λ โดย Pyrometer มีคุณสมบัติที่ดีเลิศคือ สามารถวัดอุณหภูมิของวัตถุได้จากระยะไกล อย่างไรก็ตาม เนื่องจาก Emissivity จะมีการเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากสาเหตุต่างๆ การกำจัดหรือลดผลกระทบเหล่านี้จึงเป็นปัญหาที่สำคัญที่สุด

อุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อกำจัดผลกระทบเหล่านี้ก็คือ Two color (ratio) pyrometer จากรูปที่ 2.9 จะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เส้นกราฟของ Single color radioactivity จะมีการเลื่อนไปทางความยาวคลื่นสั้นลง ดังนั้น หากหาอัตราส่วนของ Single color radioactivity ที่ความยาวคลื่น 2 ค่า อัตราส่วนนี้จะเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ ดังนั้น จึงสามารถวัดค่านี้เพื่อหาอุณหภูมิได้ และยังสามารถกำจัดผลกระทบของ Single color emissivity ได้อีกด้วย อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติแล้ว Single color emissivity ของวัตถุส่วนใหญ่จะเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ ดังนั้นวิธีนี้จึงอาจใช้ไม่ได้เสมอไป ถึงกระนั้นก็ตาม วิธีนี้ก็ยังมีประสิทธิภาพในระดับหนึ่ง และมีประสิทธิภาพเมื่อวัตถุที่จะวัดมีขนาดเล็กกว่าขอบเขตการตรวจจับของเครื่องวัดและเมื่อต้องวัดอุณหภูมิผ่านควันสีเทาอีกด้วย จึงถือว่าเป็น Pyrometer ประเภทหนึ่ง

2. คุณสมบัติ

(ก) ข้อดี

- สามารถวัดอุณหภูมิสูงได้ โดยหลักการแล้วไม่มีขอบเขตอุณหภูมิสูงสุดที่วัดได้
- ความเร็วการตอบสนองรวดเร็ว
- สามารถวัดวัตถุที่กำลังเคลื่อนที่หรือหมุนอยู่ได้
- สามารถวัดวัตถุที่อยู่ระยะไกล หรือมีขนาดใหญ่มากหรือพื้นที่กว้างมากได้
- สามารถวัดวัตถุที่มีขนาดเล็กได้

(ข) ข้อเสีย

- ความเที่ยงตรงของการวัดจะได้รับผลกระทบจาก Emissivity ของวัตถุ
- หากมีวัตถุที่มีอุณหภูมิสูงอยู่ข้างๆ เป้าหมายที่ต้องการวัด พลังงานจากการแผ่รังสีของวัตถุอุณหภูมิสูงนั้นจะไปสะท้อนที่เป้าหมายที่ต้องการวัดทำให้มีความคลาดเคลื่อนสูง
- หากมีวัตถุอยู่ระหว่าง Pyrometer กับเป้าหมายที่ต้องการวัด (แม้จะเป็นวัตถุโปร่งใส) บางครั้งก็ไม่สามารถวัดได้หรืออาจเกิดความคลาดเคลื่อนได้มาก

3. Pyrometer

ตาราง 2.3 แสดงประเภทและหลักการทำงานของ Pyrometer ต่อไปนี้จะอธิบายเพิ่มเติมเกี่ยวกับ Pyrometer แต่ละประเภท

(n) Wide band (total) pyrometer : โดยมากใช้กับการวัดอุณหภูมิต่ำ อย่างไรก็ตาม หากในทางเดินของแสงมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หรือน้ำแล้ว ก๊าซเหล่านี้จะดูดกลืนพลังงานการแผ่รังสีความร้อนเอาไว้ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อน ดังนั้น ผลิตภัณฑ์ส่วนมากจึงเลือกวัดแถบความยาวคลื่น 8-13 μm

ตารางที่ 2.3 ประเภทของ Pyrometer

ชื่อเรียก	อุปกรณ์ตรวจวัด (หมายเหตุ)	หลักการทำงาน
wide band (total) pyrometer	thermopile, pyroelectric device	รับพลังงานการแผ่รังสีจากวัตถุเกือบทุกความยาวคลื่นในรูปความร้อน แล้ววัดอุณหภูมิด้วยอุณหภูมิที่สูงขึ้นของอุปกรณ์ ใช้กับอุณหภูมิต่ำเป็นหลัก
single color pyrometer narrow band pyrometer	Si, Ge, InGaAs PbS, PbSe	รับพลังงานการแผ่รังสีจากวัตถุเฉพาะในแถบความความคลื่นแคบๆ ในช่วงแสงที่มองเห็นได้หรือใกล้อินฟราเรด แล้วแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้า
two color (ratio) pyrometer	Si, Ge, InGaAs	วัดอัตราส่วนความเข้มของพลังงานการแผ่รังสีของความยาวคลื่น 2 ค่า ใช้ได้ดีเมื่อวัตถุมีขนาดเล็กกว่าขอบเขตการตรวจจับและเมื่อต้องวัดผ่านควันสีเทา
temperature scanner	Si, InGaAs, PbS, PbSe, InSb, HgCdTe	ทำการสแกนเป้าหมายที่จะวัดในหนึ่งมิติหรือสองมิติ เพื่อวัดอุณหภูมิของบริเวณกว้าง
optical pyrometer	ตาเปล่า	เปรียบเทียบความเข้มของแสงจากวัตถุกับความเข้มของแสงจากไส้หลอดด้วยตาเปล่า พบว่าได้
หมายเหตุ) Si : silicon Ge : germanium InGaAs : indium gallium arsenide PbS : zinc sulfide		PbSe : zinc selenide InSb : indium antimony HgCdTe : mercury cadmium telurium

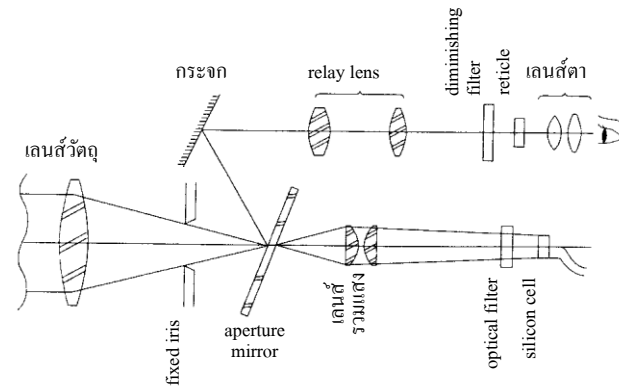
(ข) Single color pyrometer: รูปที่ 2.10 แสดงตัวอย่างโครงสร้างของ Single color pyrometer โดย Optical filter ที่อยู่หน้า Silicon cell จะทำหน้าที่กรองความยาวคลื่นให้ในช่วงแคบให้สามารถพิจารณาในทางปฏิบัติได้ว่าเป็นความยาวคลื่นเดียว

(ค) Two color pyrometer: ทำการหาอัตราส่วนพลังงานการแผ่รังสีของความยาวคลื่น 2 ค่า สามารถวัดได้เมื่อวัตถุมีขนาดเล็กกว่าขอบเขตการตรวจจับและเมื่อต้องวัดผ่านควันสีเทานอกจากนี้ ยังสามารถลดผลกระทบจาก Emissivity ได้ในระดับหนึ่ง

(ง) Temperature scanner: ใช้สแกนผิวหน้าของวัตถุเป็นเส้น (หนึ่งมิติ) หรือเป็นระนาบ (สองมิติ) เพื่อหาการกระจายของอุณหภูมิ กลไกการสแกนมีทั้งแบบกล (ใช้กระจกหมุน เป็นต้น) และแบบอิเล็กทรอนิกส์ (ใช้ CCD เซ็นเซอร์ เป็นต้น)

(จ) Optical pyrometer: ผู้สังเกตจะมองเป้าหมายที่จะวัดผ่านไส้หลอดที่ให้ความร้อนด้วยไฟฟ้า ปรับกระแสไฟฟ้าเพื่อหาจุดที่ไส้หลอดกลืนไปกับเป้าหมายที่จะวัดด้านหลังจนมองไม่เห็นแล้วหาอุณหภูมิของเป้าหมายที่จะวัดจากค่ากระแสไฟฟ้าในขณะนั้น เป็นเครื่องวัดที่ใช้กันมาตั้งแต่อดีต อย่างไรก็ตาม เนื่องจากต้องอาศัยสายตาและมือของมนุษย์ ปัจจุบันจึงแทบไม่ใช้กันแล้ว

อนึ่ง นอกเหนือจากอุปกรณ์ที่กล่าวข้างต้นแล้ว ยังมี Pyrometer ที่ใช้ใยแก้วนำแสงอีกด้วย อุปกรณ์นี้ทำงานโดยใช้แสงส่องผ่านใยแก้วนำแสงให้ไปตกกระทบอุปกรณ์ตรวจวัด อุปกรณ์นี้มีข้อดีมากมาย เช่น สามารถวัดด้านหลังของวัตถุหรือในช่องแคบๆ ได้ มีการใช้กันค่อนข้างมาก



รูปที่ 2.10 ตัวอย่างโครงสร้างของ Single color pyrometer (JIS C 1612)

4. ข้อควรระวังในการวัด

(ก) มาตรการรองรับ Emissivity

ใช้เครื่องวัดอุณหภูมิแบบเทอร์โมคัปเปิลร่วมกับ Pyrometer วัดอุณหภูมิที่จุดเดียวกันพร้อมกัน แล้วปรับตั้ง Emissivity ของ Pyrometer ให้ค่าเดียวกับเครื่องวัดอุณหภูมิแบบเทอร์โมคัปเปิล ข้อมูล Emissivity มีระบุไว้ในคู่มือต่างๆ แต่ ลักษณะพื้นผิวของวัตถุจะทำให้ Emissivity จริงๆ แตกต่างไปได้มาก ดังนั้นโดยทั่วไปจึงไม่สามารถนำมาใช้ได้ บริเวณที่เว้าลงไปหรือในรูในร่อง ลิ่ม ฯลฯ จะมี Emissivity สูง ควรเลือกใช้บริเวณนั้น นอกจากนี้ ผลกระทบของ Emissivity เกือบจะแปรผันตรงตามความยาวคลื่นที่วัด ดังนั้น จึงควรเลือกใช้ Pyrometer ที่วัดความยาวคลื่นสั้น

(ข) มาตรการรองรับการสะท้อน

วัตถุในเตาที่มีอุณหภูมิสูง จะมีการสะท้อนพลังงานการแผ่รังสีความร้อนอย่างรุนแรงจากผนังเตาและที่อื่นๆ ดังนั้น ค่าที่ Pyrometer ชี้ออกจึงสูงกว่าอุณหภูมิจริงๆ ในกรณีนี้ เราต้องกันเป้าหมายที่จะวัดจากวัตถุที่มีอุณหภูมิสูงรอบๆ หรือวัดพลังงานการแผ่รังสีความร้อนจากวัตถุอุณหภูมิสูงแล้วลบค่านั้นออกไป อนึ่ง ในกรณีเช่นนี้ Pyrometer ที่วัดความยาวคลื่นยาวจะได้เปรียบกว่า

(ค) การดูดกลืนและกระเจิงในเส้นทางเดินของแสง

กรณีที่มีควัน ฝุ่นละออง ฯลฯ อยู่ระหว่าง Pyrometer กับเป้าหมายการวัด ให้ทำ Air purge เพื่อไล่สิ่งเหล่านั้นออกไป นอกจากนี้ กรณีที่มีไอน้ำหรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จะต้องหลีกเลี่ยงแถบความยาวคลื่นที่จะถูกดูดกลืนโดยก๊าซเหล่านี้ กรณีที่เป็นวัตถุในเตา ให้เลือก Pyrometer ที่วัดความยาวคลื่น 2.2 μm หรือ 3.9 μm

2.2.1.5 เครื่องวัดอุณหภูมิอื่นๆ

1. เครื่องวัดอุณหภูมิแบบแก้ว

เครื่องวัดอุณหภูมิแบบนี้มีใช้กันมานานแล้ว วิธีการรักษาความเที่ยงตรงก็เป็นที่ยากที่สุด ปัจจุบันใช้เป็นเครื่องวัดอุณหภูมิมาตรฐานที่ได้รับการรับรองของสถาบันวิจัยการชั่งตวงวัด หรือใช้เป็นเครื่องวัดอุณหภูมิมาตรฐานในบริษัท

เครื่องวัดอุณหภูมิแบบแก้วมีหลายประเภท แต่ในแง่ของความสัมพันธ์กับของเหลวที่เป็นเป้าหมายการวัด สามารถแบ่งได้เป็นแบบแช่ทั้งตัวและแบบมีแท่งกระเปาะยื่นเข้าไปแช่ ไม่ว่าจะใช้เครื่องวัดอุณหภูมิแบบใด หากมีส่วนที่ไม่สัมผัสเป็นบริเวณกว้างแล้ว จะต้องทำการชดเชยค่าที่อ่านได้ด้วยอุณหภูมิของบริเวณที่ไม่สัมผัส

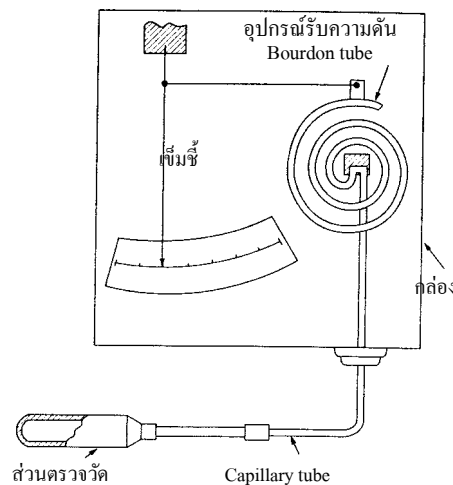
2. เครื่องวัดอุณหภูมิแบบ Filled system

เมื่อบรรจุของเหลวหรือของไหลไว้ในภาชนะปิดสนิทที่มีปริมาณคงที่ค่าหนึ่ง ความดันในภาชนะนั้นจะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ ด้วยการวัดความดันนี้เราสามารถหาค่าอุณหภูมิได้ นี่เป็นหลักการทำงานของเครื่องวัดอุณหภูมิแบบ Filled System.

เครื่องวัดอุณหภูมิแบบ Filled system มี 4 ชนิดดังต่อไปนี้

- (1) เครื่องวัดอุณหภูมิแบบบรรจุปรอท : บรรจุปรอท
- (2) เครื่องวัดอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลว : บรรจุแอลกอฮอล์ น้ำมันก๊าด ฯลฯ
- (3) เครื่องวัดอุณหภูมิแบบความดันก๊าซ : บรรจุก๊าซไนโตรเจน ฮีเลียม ฯลฯ
- (4) เครื่องวัดอุณหภูมิแบบความดันไอ : บรรจุของเหลวที่ระเหยได้ง่ายไว้

ที่ส่วนหนึ่งของอุปกรณ์ตรวจวัด ทำงานด้วย



รูปที่ 2.11 ผังโครงสร้างพื้นฐานของเครื่องวัดอุณหภูมิแบบ Filled system

หลักการ เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป ความดันไออิ่มตัวของของเหลวจะเปลี่ยนแปลงไปด้วย

ผังโครงสร้างพื้นฐานของแบบที่ (1) และ (2) แสดงไว้ในรูปที่ 2.11

ช่วงการวัดอุณหภูมิของชนิดที่ (1) เท่ากับ $-50 - 600^{\circ}\text{C}$ ชนิดที่ (2) เท่ากับ $-100 - 400^{\circ}\text{C}$ ชนิดที่ (3) เท่ากับ $-200 - 600^{\circ}\text{C}$ ชนิดที่ (4) เท่ากับ $-30 - 200^{\circ}\text{C}$ (ทั้งนี้ ช่วงการวัดของเครื่องวัดอุณหภูมิ 1 เครื่อง จะค่อนข้างแคบ และ Scale ก็ไม่เป็นเชิงเส้น)

เครื่องวัดอุณหภูมิแบบ Filled system มีข้อดีดังต่อไปนี้ (1) โครงสร้างไม่ซับซ้อน ราคาถูก (2) ไม่ต้องใช้แรงขับเคลื่อนจากภายนอกก็สามารถขับเคลื่อนได้ (3) สามารถใช้งานได้ในสภาพบรรยากาศที่อาจเกิดการระเบิด ข้อเสียได้แก่ มีความเที่ยงตรงต่ำกว่าแบบเทอร์โมคัปเปิล และแบบความดันทาน และไม่สามารถแยกอุปกรณ์ตรวจวัดกับอุปกรณ์แสดงผลให้ห่างกันมากได้

3. เครื่องวัดอุณหภูมิแบบ Bimetal

เครื่องวัดอุณหภูมิแบบ Bimetal ทำจากแผ่นโลหะบาง 2 แผ่นที่มีอัตราการขยายตัวด้วยความร้อนแตกต่างกัน เชื่อมติดกันเป็นแผ่นเดียว เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป แผ่นโลหะนี้จะงอ จึงสามารถใช้เป็นเครื่องวัดอุณหภูมิ และเทอร์มิสแตด (อุปกรณ์ที่ใช้ปิดเปิดสวิตช์ที่อุณหภูมิคงที่ค่าหนึ่ง)

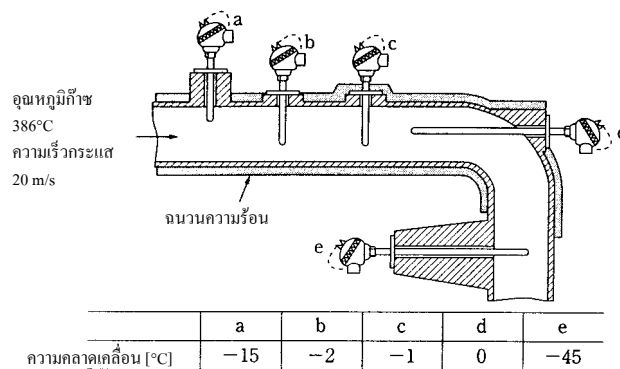
ในกรณีที่ใช้เป็นเครื่องวัดอุณหภูมิ จะม้วนแผ่น Bimetal เป็นเกลียว ยึดปลายด้านหนึ่งไว้ และยึดปลายอีกด้านหนึ่งกับเข็มชี้ มีช่วงการวัดอุณหภูมิ $-50 - 500^{\circ}\text{C}$ และมี scale ไม่เป็นเชิงเส้น

4. เครื่องวัดอุณหภูมิแบบ Crystal

เมื่อนำผลึกควอตซ์มาตัดด้วยมุมที่เหมาะสม เราสามารถทำให้ Crystal oscillator มีสัมประสิทธิ์ของความถี่ต่ออุณหภูมิมีค่าสูงได้ เครื่องวัดอุณหภูมิแบบ Crystal ก็นำ Crystal นั้นมาใช้นั่นเอง เนื่องจากเครื่องวัดแบบนี้มีสัญญาณขาออกเป็นความถี่ จึงมีความละเอียดสูง เหมาะกับการนำสัญญาณไปประมวลผลทางดิจิทัล มีช่วงการวัด $-80 - 250\text{ }^{\circ}\text{C}$ มีความเที่ยงตรง $\pm 0.05 - 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ อย่างไรก็ดีตาม เนื่องจากทุก $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ความถี่จะเปลี่ยนไป 1 kHz จึงมีความละเอียดสูงถึง $0.001\text{ }^{\circ}\text{C}$

2.2.1.6 ข้อควรระวังทั่วไปในการวัดอุณหภูมิ

1. ลดผลกระทบของการที่อุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิไปก่อกรวนเป้าหมายการวัด เมื่อติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิที่เป้าหมายการวัด จะต้องระมัดระวังไม่ให้เกิดการติดตั้งนั้นมีผลกระทบต่ออุณหภูมิของเป้าหมายการวัดและการแจกแจงอุณหภูมิ
2. ต้องทำให้เป้าหมายการวัดกับอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิมีอุณหภูมิเท่ากัน



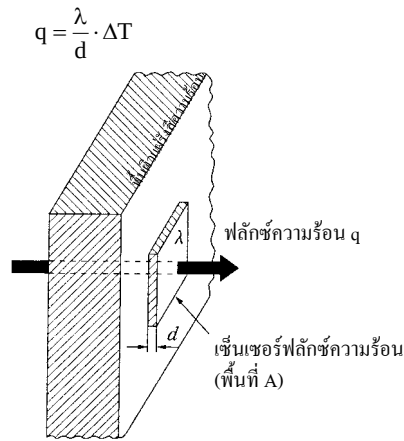
รูปที่ 2.12 แสดงตัวอย่างการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิด้วยวิธีต่างๆ ในท่อที่มีก๊าซอุณหภูมิสูงไหลอยู่

2.2.1.7 เครื่องวัดฟลักซ์ความร้อน

เครื่องวัดฟลักซ์ความร้อนเป็นเครื่องวัดปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทผ่านอุปกรณ์ต่างๆ ในโรงงาน ท่อ หรือพื้นผิวของอาคาร โดยวัดฟลักซ์ความร้อนต่อพื้นที่หนึ่งหน่วย (ความหนาแน่นของปริมาณความร้อน) เนื่องจากความหนาแน่นของปริมาณความร้อนจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการกั้นฉนวนความร้อน ดังนั้นจึงเป็นเครื่องมือที่สำคัญอย่างหนึ่งในการพิจารณาการอนุรักษ์พลังงาน หน่วยของปริมาณนี้เท่ากับ วัตต์ต่อตารางเมตร [W/m^2]

รูปที่ 2.13 แสดงหลักการทำงานของเครื่องวัดฟลักซ์ความร้อน เซ็นเซอร์ฟลักซ์ความร้อนในรูป ทำจากแผ่นบางที่ทำด้วยวัสดุที่ทราบสัมประสิทธิ์การนำความร้อนอยู่แล้ว และติดเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิไว้ที่ผิวหน้าทั้งสองด้าน นำอุปกรณ์นี้ไปติดหรือฝังไว้ในพื้นผิวแผ่รังสีความร้อน วัดผลต่างอุณหภูมิระหว่างทั้งสองด้านของแผ่นบางเพื่อหาความหนาแน่นของปริมาณความร้อน q

สมการหาความหนาแน่นปริมาณความร้อน q มีดังต่อไปนี้ ทั้งนี้ให้ d เป็นความหนาของเซ็นเซอร์กระแสความร้อน λ เป็นสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของเซ็นเซอร์



รูปที่ 2.13 ภาพแสดงหลักการทำงานของเครื่องวัดฟลักซ์ความร้อน

2.2.2 การวัดอัตราการไหล

2.2.2.1 หลักการของวิธีวัดอัตราการไหล

เป้าหมายการวัดอัตราการไหล ซึ่งเกือบทั้งหมดจะเป็นของไหล (ของเหลว ก๊าซ ไอระเหย) ที่ไหลอยู่ในท่อ อนึ่ง บางครั้งเรานำเครื่องวัดความเร็วของกระแสใส่เข้าไปในท่อเพื่อวัดแทนเครื่องวัดอัตราการไหล

ปริมาณที่วัดได้ในขั้นที่ 1 จากเครื่องวัดอัตราการไหล จะได้เป็นอัตราการไหลโดยปริมาตร อัตราการไหลสะสมโดยปริมาตร และอัตราการไหลโดยมวล ปริมาณเหล่านี้มีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับหลักการวัดของเครื่องวัดอัตราการไหล ตาราง 2.4 แสดงเครื่องวัดอัตราการไหลประเภทต่างๆ โดยแบ่งตามหลักการทำงาน

ตารางที่ 2.4 เครื่องวัดอัตราการไหลในท่อที่สำคัญ

ปริมาณที่วัด	ชื่อเรียก	หลักการทำงาน	ของไหลที่วัดได้ หมายเหตุ)			คุณสมบัติ
			ของเหลว	ก๊าซ	ไอระเหย	
อัตราการไหล โดยปริมาตร	แบบผลต่าง ความดัน	ผลต่างความดันที่เกิดขึ้น ก่อนและหลังคอคอดจะแปร ผันตามกำลังสองของอัตรา การไหล	○	○	○	* ความดันสูญเสียสูง * ราคาค่อนข้างถูก * ไม่ต้องวัด
	แบบพื้นที่	ตำแหน่งของลูกลอยใน tapered tube จะเกือบ แปรผันตามอัตราการไหล	○	○	○	* ราคาถูกใช้เป็นเครื่องวัด หน้างาน
	แบบ แม่เหล็กไฟฟ้า	เมื่อของเหลวที่นำไฟฟ้าไหล ตัดผ่านสนามแม่เหล็กจะเกิด แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่แปรผัน ตามความเร็วกระแส	○	×	×	* ไม่มีความดันสูญเสีย * วัดของเหลวที่มีของแข็ง ปนได้ * วัดได้เฉพาะของเหลวที่ นำไฟฟ้า
	แบบคลื่นอัลตรา โซนิก	ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกที่ ตัดเฉียงๆ ผ่านกระแสจะ เปลี่ยนแปลงไปตาม ความเร็วกระแส	○	○	△	* ไม่มีความดันสูญเสีย * วัดอัตราการไหลจาก ภายนอกท่อได้
อัตราการไหล สะสมโดย ปริมาตร	แบบปริมาตร	วัดปริมาตรของเหลวด้วย “ถ้วยตวง” แล้วนับจำนวน ถ้วย	○	○	×	* ความเที่ยงตรงสูง * วัดของเหลวที่มีของแข็ง ปนไม่ได้
	แบบกระแสนวน	ความถี่ของกระแสนวน Karman ที่เกิดขึ้นหลังวัตถุ รูปเสาคจะแปรผันตาม ความเร็วกระแส	○	○	○	* ความดันสูญเสียต่ำ * ราคาค่อนข้างถูก
	แบบเทอร์ไบน์	ความเร็วรอบของใบพัดหรือ เทอร์ไบน์ที่วางอยู่ในกระแส จะแปรผันตามความเร็วกระ แส	○	○	△	* ทำให้มีความเที่ยงตรงสูงไ ด้ * แบร์ริงมีอายุการใช้งานจำกัด
อัตราการ ไหล โดยมวล	แบบแรงโคริโอลิส	แรงโคริโอลิสที่เกิดขึ้นในท่อ รูปตัว U ที่สั้นจะแปรผันตามอัตรากา รไหลโดยมวลของกระแสที่ไ หลผ่านท่อนั้น	○	△	×	* เมื่อใช้กับของเหลวจะมีค ความเที่ยงตรงสูง * ราคาแพง
	แบบความร้อน	การเพิ่มอุณหภูมิเมื่อ ของเหลวได้รับความร้อนจะ เปลี่ยนแปลงไปตามอัตรา การไหล	△	○	×	* ใช้กับท่อขนาดเล็กเป็น หลัก * ราคาค่อนข้างถูก

หมายเหตุ) ○ วัดได้ △ มีข้อจำกัด × วัดไม่ได้

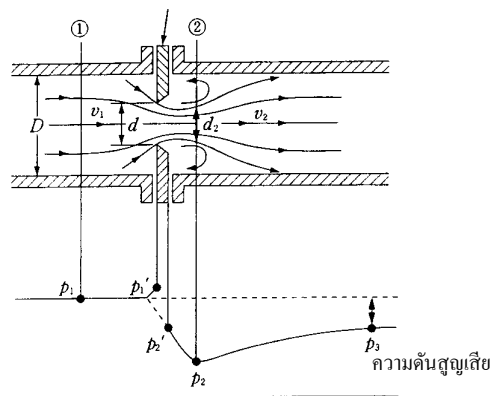
2.2.2.2 เครื่องวัดอัตราการไหลแบบผลต่างความดัน

1. หลักการทำงาน

เมื่อติดตั้งคอคอดในท่อที่มีของไหลไหลอยู่ จะเกิดผลต่างความดันขึ้นก่อนและหลังคอคอดนั้น เนื่องจากผลต่างความดันนี้จะแปรผันตามกำลัง 2 ของอัตราการไหล ดังนั้น เมื่อวัดผลต่างความดันนี้จะหาอัตราการไหลได้ เนื่องจากเครื่องวัดนี้จะวัดผลต่างความดัน จึงมักเรียกว่า เครื่องวัดอัตราการไหลแบบผลต่างความดัน อย่างไรก็ตาม มาตรฐาน JIS Z 8762 เรียกว่า “วิธีวัดอัตราการไหลด้วยกลไกคอคอด” กลไกคอคอดที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน JIS มีทั้ง Orifice, Nozzle และ Venturi tube แต่ที่นิยมใช้กันมากที่สุดได้แก่ Orifice

รูปที่ 2.14 แสดงการเปลี่ยนแปลงความดันภายในท่อเมื่อติดตั้ง Orifice เอาไว้ หลังจากกระแสไหลผ่าน Orifice ไปแล้วความดันจะลดลง หลังจากนั้นความดันจะเพิ่มกลับขึ้นมาพอสมควร แต่จะไม่เท่ากับความดันเดิม ความดันสูญเสียสุดท้ายเรียกว่า ความดันสูญเสียถาวร หรือเรียกสั้นๆ ว่า ความดันสูญเสีย ซึ่งเกิดจากกระแสไหลวนที่เกิดขึ้นหลัง Orifice และพลังงานสูญเสียจากแรงเสียดทานระหว่างของไหลกับผนัง Orifice

ความสัมพันธ์ระหว่างของไหลกับผลต่างความดัน สามารถคำนวณได้จาก Bernoulli's theorem ซึ่งกล่าวว่า “หากไม่มีพลังงานสูญเสียแล้ว ผลบวกของพลังงานจลน์ต่อปริมาตรหนึ่งหน่วยกับพลังงานของความดันและพลังงานศักย์ที่มีอยู่ในของไหลจะมีค่าคงที่เสมอ” อย่างไรก็ตามเนื่องจากในทางปฏิบัติจะมีพลังงานสูญเสีย ดังนั้น จึงไม่เป็นไปตาม Bernoulli's theorem ดังนั้นเราจึงทำการทดลองหลาย ๆ ครั้ง เพื่อหา Run-off factor C (< 1) ซึ่งจะบอกค่าที่แท้จริงเบี่ยงเบนไปจาก Bernoulli's theorem ไปมากเท่าใดจึงจะสอดคล้องกับข้อมูลที่แท้จริง นอกจากนี้ กรณีที่ใช้อากาศความดันสูงยังต้องเพิ่ม Expansion factor E อีกด้วย เมื่อคำนึงถึงปัจจัยจากการทดลองต่างๆ เหล่านี้แล้ว จะได้สมการพื้นฐานในการวัดอัตราการไหลด้วยวิธีผลต่างความดันดังต่อไปนี้ กล่าวคือ อัตราการไหลโดยปริมาตรของของไหลจะแปรผันตามรากที่สองของผลต่างความดัน และแปรผันกลับกับรากที่สองของความหนาแน่นของของไหล

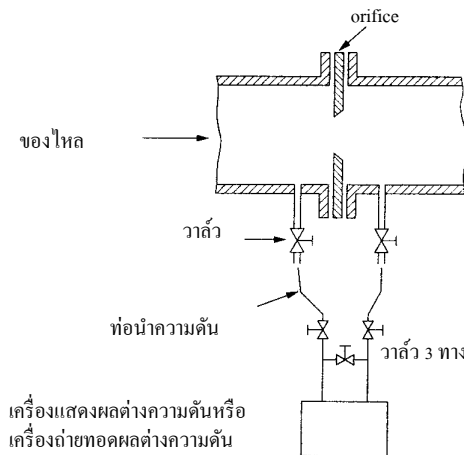


รูปที่ 2.14 การเปลี่ยนแปลงความดันภายในท่อที่ติดตั้ง Orifice

$$Q = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \varepsilon \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}}$$

ในที่นี้ Q เป็นอัตราการไหลโดยปริมาตรของของไหล D และ d เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อและคอคอของ Orifice ตามลำดับ β เป็นอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางของคอคอต่อของท่อ (d / D) นอกจากนี้ p_1 และ p_2 เป็นความดันก่อนและหลัง Orifice และ ρ เป็นความหนาแน่นของของไหล โดย C เป็นฟังก์ชันของ β กับ Reynolds number Re_D * ซึ่งกำหนดไว้ในมาตรฐาน JIS

รูปที่ 2.15 แสดงตัวอย่างโครงสร้างทั่วไปของเครื่องวัดอัตราการไหลแบบผลต่างความดัน สำหรับเครื่องส่งผลต่างความดัน



รูปที่ 2.15 โครงสร้างของเครื่องวัดอัตราการไหลแบบผลต่างความดัน

*Reynolds number Re_D สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$Re_D = (\text{ความเร็วกระแสน้ำ}) \times (\text{เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ}) \times (\text{ความหนาแน่นของของไหล}) / (\text{ความหนืดของของไหล})$
กรณีที่ Reynolds number เท่ากัน ไม่ว่าของไหลจะเป็นของเหลว ก๊าซ หรือไอระเหย พฤติกรรมของการไหลจะเหมือนกัน

2. คุณสมบัติ

(ก) ข้อดี

- โครงสร้างไม่ซับซ้อน ราคาถูก (โดยเฉพาะอย่างยิ่ง Orifice)
- หากจัดทำและติดตั้งตามที่มาตรฐานกำหนดไว้ จะไม่จำเป็นต้องสอบเทียบ

ด้วยการปล่อยของไหลผ่านจริงๆ

- ใช้งานได้กว้างขวางทั้งของเหลว ก๊าซ และไอระเหย

(ข) ข้อเสีย

- เนื่องจากผลต่างความดันจะแปรผันตามกำลัง 2 ของอัตราการไหล ดังนั้นช่วงการวัดอัตราการไหลในทางปฏิบัติจึงค่อนข้างแคบ (ตั้งแต่ 20% ของ Full scale ขึ้นไป)

- Orifice มีความดันสูญเสียสูง ดังนั้นจึงเสียเปรียบในแง่การอนุรักษ์พลังงาน
- ไม่เหมาะจะใช้กับของเหลวที่มีของแข็งหรือฟองก๊าซรวมอยู่ด้วยจำนวนมาก

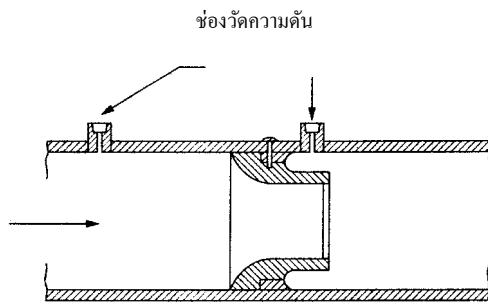
(โดยเฉพาะ Orifice)

3. กลไกคอคอด

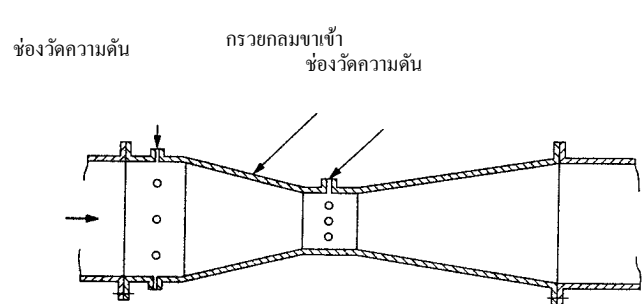
ก. Orifice: เป็นแผ่นกลม 1 แผ่นที่มีรูกลมอยู่ตรงกลาง มีราคาถูก และผลิตได้ง่าย อย่างไรก็ตาม จำเป็นต้องทำให้ขอบรูคม ดังนั้น จึงไม่เหมาะกับของไหลที่มีความเร็วสูงและของไหลที่มีอนุภาคเล็กๆ รวมอยู่ด้วย

ข. Nozzle (รูปที่ 2.16) : มีขอบมน ดังนั้นจึงเหมาะกับการวัดของไหลที่มีอุณหภูมิและความดันสูง (ไอน้ำความดันสูง น้ำเข้าหม้อไอน้ำ เป็นต้น)

ค. Venturi tube (รูปที่ 2.17) : มีการสูญเสียความดันต่ำ แต่มีราคาสูง และต้องใช้พื้นที่มากในการติดตั้ง



รูปที่ 2.16 Nozzle วงรี



รูปที่ 2.17 Venturi tube รูปกรวยกลม

4. ข้อควรระวังในการวัด

- หากกระแสน้ำมีความปั่นป่วน จะมีความคลาดเคลื่อน ดังนั้น จึงต้องจัดให้มีท่อตรงอย่างน้อยเท่ากับที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน JIS

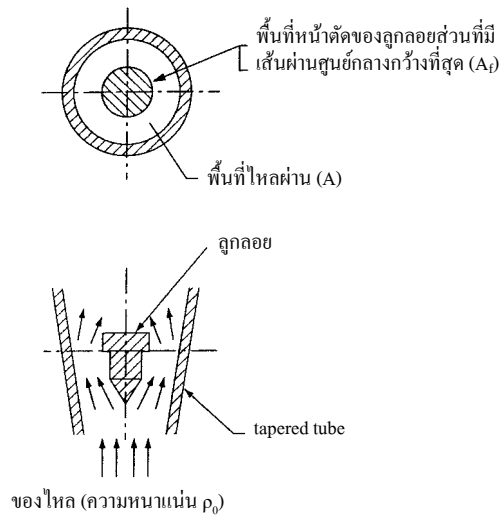
- ในการวัดอัตราการไหลของก๊าซ จะต้องระมัดระวังการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความดันของก๊าซ โดยทำการชดเชยอุณหภูมิและความดันตามความเหมาะสม

2.2.2.3 เครื่องวัดอัตราการไหลแบบพื้นที่

มีหลักการทำงานเกือบเหมือนกับเครื่องวัดอัตราการไหลแบบผลต่างความดัน ในเครื่องวัดอัตราการไหลแบบพื้นที่ จะเปลี่ยนแปลงพื้นที่ของคอคอดตามอัตราการไหลโดยให้ผลต่างความดันคงที่ แล้วหาอัตราการไหลออกมา หลักการทำงานแสดงไว้ในรูปที่ 2.18

เมื่อมีของไหลไหลจากด้านล่างของ Tapered tube ของไหลจะไหลผ่านช่องว่างระหว่างลูกกลิ้งกับ Tapered tube ซึ่งจะเกิดผลต่างความดันขึ้น ลูกกลิ้งจะหยุดนิ่งในตำแหน่งที่แรงในทิศทางขึ้นเนื่องจากผลต่างความดันนี้สมดุลกับแรงในทิศทางขึ้นเนื่องจากน้ำหนักของลูกกลิ้งในของไหล ซึ่ง Tapered tube นี้จัดทำขึ้นให้ตำแหน่งของลูกกลิ้งแปรผันตามอัตราการไหลของของไหล โดยทั่วไปเครื่องวัดอัตราการไหลแบบพื้นที่จะมีความเที่ยงตรงประมาณ $\pm 2\%$ ของ Span

ถ้า Tapered tube ทำด้วยแก้วหรือพลาสติกใส จะสามารถชั่งบอกรัตราการไหลได้โดยตรง ดังนั้น จึงไม่จำเป็นต้องใช้แหล่งพลังงานภายนอก และสามารถจัดทำขึ้นได้ด้วยราคาถูก จึงนิยมใช้เป็นเครื่องวัดหน้างาน นอกจากนี้ยังมีเครื่องวัดแบบที่วัดตำแหน่งของลูกกลิ้งแล้วส่งสัญญาณ 4-20 mADC ออกมาอีกด้วย

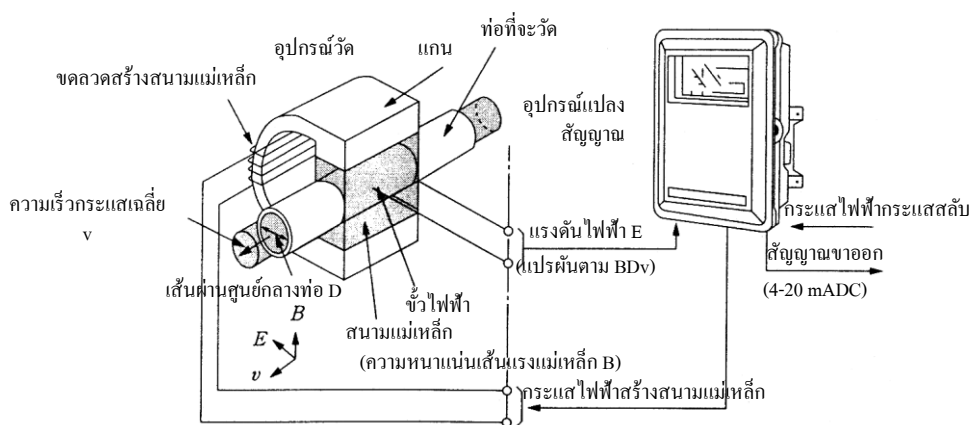


รูปที่ 2.18 หลักการทำงานของเครื่องวัดอัตราการไหลแบบฟีนท์

2.2.2.4 เครื่องวัดอัตราการไหลแบบแม่เหล็กไฟฟ้า

เครื่องวัดอัตราการไหลแบบแม่เหล็กไฟฟ้า จะใช้กฎของฟาราเดย์เกี่ยวกับการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า โดยมีหลักการทำงานเหมือนกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ในเครื่องวัดอัตราการไหลแบบแม่เหล็กไฟฟ้า ของเหลวที่ไหลอยู่ในท่อจะเปรียบเสมือนโรเตอร์ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หลักการทำงานแสดงไว้ในรูปที่ 2.19 โดยเมื่อให้สนามแม่เหล็กจากด้านนอกท่อตั้งฉากกับท่อที่มีของเหลวไหลอยู่ ของเหลวในท่อจะวิ่งตัดสนามแม่เหล็ก ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าที่แปรผันตามผลคูณของความเร็วกระแสเฉลี่ยกับความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก แล้วใช้ขั้วไฟฟ้าในการวัดค่าแรงดันไฟฟ้านี้ นำไปขยายด้วยเครื่องแปลงสัญญาณและหารด้วยความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก จะได้ความเร็วกระแสเฉลี่ยออกมา ซึ่งเมื่อนำไปคูณกับพื้นที่หน้าตัดของท่อที่วัดแล้ว จะหาอัตราการไหลได้

เพื่อป้องกันไม่ให้แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในของเหลวเกิดการลัดวงจรตามท่อที่วัด จะต้องบุผนังด้านในท่อด้วยพลาสติกฟลูออรีนหรือด้วยยาง หรือใช้เซรามิกเป็นวัสดุทำท่อ เนื่องจากผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าจะมีระดับเท่ากับผนังด้านในท่อ ดังนั้น จึงไม่มีอะไรมาขวางกระแสเลย ดังนั้นจึงไม่มีความดันสูญเสียใดๆ สามารถใช้กับของเหลวที่มีของแข็งปนอยู่ด้วยและของเหลวที่มีความหนืดสูงได้ นอกจากนั้น หากเลือกวัสดุของขั้วไฟฟ้าและผนังด้านในท่อให้ดีแล้ว จะสามารถใช้กับของเหลวกัดกร่อนรุนแรงได้เกือบทุกชนิด



รูปที่ 2.19 หลักการทำงานของเครื่องวัดอัตราการไหลแบบแม่เหล็กไฟฟ้า

หากของเหลวมีอัตราการนำไฟฟ้าไม่น้อยกว่า $20 \mu\text{S/cm}$ แล้วโดยทั่วไปจะสามารถวัดด้วยวิธีนี้ได้ แต่ถ้ามีค่าไม่เกิน $5 \mu\text{S/cm}$ แล้วจะวัดได้ยาก อย่างไรก็ตาม เครื่องวัดอัตราการไหลแบบแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดวัดความจุไฟฟ้าสถิตจะสามารถวัดได้ถึง $0.01 \mu\text{S/cm}$ โดยเครื่องวัดชนิดนี้จะติดตั้งขั้วไฟฟ้าที่ตัววัสดุท่อ และวัดแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในของเหลวผ่านความจุไฟฟ้าสถิต ดังนั้น ขั้วไฟฟ้าจึงไม่สัมผัสกับของเหลว

ข้อดีของเครื่องวัดอัตราการไหลแบบแม่เหล็กไฟฟ้า มีดังต่อไปนี้

- (1) มีความเที่ยงตรงสูง (บางรุ่นวัดได้ถึง $\pm 0.5\%$ ของค่าที่อ่านได้)
- (2) ไม่มีความดันสูญเสียเลย
- (3) สามารถวัดอัตราการไหลโดยปริมาตรของของเหลวที่มีสิ่งเจือปน (ของแข็ง ก๊าซ) รวมอยู่ด้วยได้ ทั้งนี้ กรณีที่มีฟองก๊าซอยู่ด้วย จะวัดได้อัตราการไหลโดยปริมาตรที่รวมเอาปริมาตรของฟองก๊าซเข้าไว้
- (4) สามารถวัดของเหลวกัดกร่อนและของเหลวที่มีความหนืดสูงได้
- (5) ช่วงการวัดที่เครื่องวัด 1 เครื่องสามารถวัดได้จะมีช่วงกว้างมาก

ข้อเสีย มีดังต่อไปนี้

- (1) ไม่สามารถวัดก๊าซและของเหลวที่ไม่นำไฟฟ้าเลยได้ (ถ้าเป็นน้ำบริสุทธิ์สามารถใช้เครื่องวัดชนิดวัดความจุไฟฟ้าสถิตได้)
- (2) ไม่สะดวกในการวัดของเหลวอุณหภูมิสูง (ขึ้นอยู่กับการทนความร้อนของวัสดุท่อ)

2.2.2.5 เครื่องวัดอัตราการไหลแบบอัลตราโซนิก

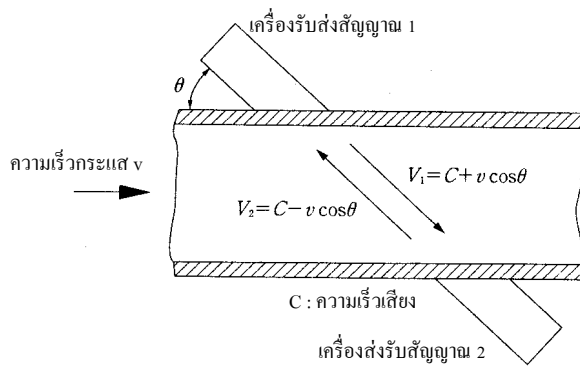
เครื่องวัดอัตราการไหลแบบอัลตราโซนิกมีทั้งชนิดผลต่างความเร็วคลื่น (บางครั้งเรียกว่า ผลต่างเวลาแฝคลื่น) และแบบ Doppler แต่แบบที่ใช้กันมากคือแบบแรก ในที่นี้จะอธิบายแบบแรกเป็นหลัก

1. ชนิดผลต่างความเร็วคลื่น

เมื่อส่งคลื่นอัลตราโซนิกเฉียงๆ กับการไหลในท่อ ความเร็วจะขึ้นอยู่กับทิศทางการส่งคลื่นกับความเร็วของไหล (V_1 และ V_2 ในรูปที่ 2.20) ดังนั้นจึงมีความสัมพันธ์ตามสมการต่อไปนี้ ซึ่งจะช่วยให้สามารถหาความเร็วของไหล v ได้

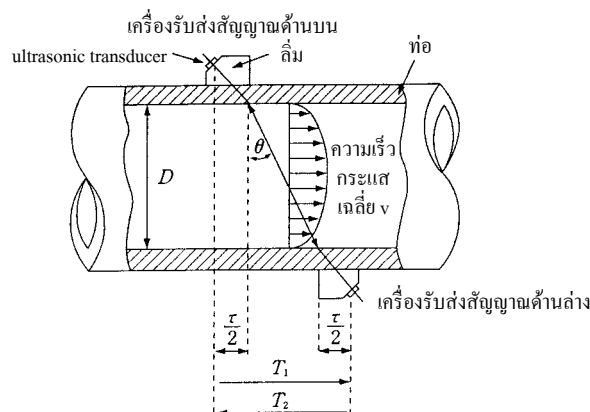
$$v = \frac{V_1 - V_2}{2 \cos \theta}$$

ในที่นี้ V_1 และ V_2 สามารถหาได้จากเวลาแฝคลื่นอัลตราโซนิกในท่อ



รูปที่ 2.20 หลักการทำงานของเครื่องวัดอัตราการไหลแบบอัลตราโซนิก

เครื่องวัดอัตราการไหลแบบอัลตราโซนิกชนิดผลต่างความเร็วคลื่นสามารถแบ่งได้เป็นแบบ Clamp on กับแบบสัมผัสของเหลว แบบ Clamp on จะมีเครื่องรับส่งสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิกทำจาก Ultrasonic transducer กับลิ้ม โดยลิ้มเป็นวัตถุที่สามารถยอมให้คลื่นอัลตราโซนิกทะลุผ่านได้ดี ซึ่งจะนำลิ้มไปติดให้แน่นกับด้านนอกท่อด้วยจารบีหรือกาว เครื่องวัดแบบนี้คลื่นอัลตราโซนิกจะต้องทะลุผ่านผนังท่อและลิ้ม ดังนั้นเวลาแผ่คลื่นอัลตราโซนิกจึงต้องบวกค่า τ ในรูปที่ 2.21 เข้าไปด้วยและสมการการคำนวณจะค่อนข้างซับซ้อน แต่มีข้อดีคือไม่ต้องนำท่อไปตัดแปลง และสามารถวัดอัตราการไหลภายในท่อจากภายนอกท่อได้ นอกจากเครื่องวัดแบบติดตั้งกับท่อแล้วยังมีแบบพกพาจำหน่ายอีกด้วย



รูปที่ 2.21 ภาพแสดงหลักการทำงานของเครื่องวัดอัตราการไหลแบบอัลตราโซนิกแบบ Clamp on

หากในท่อมีวัสดุที่คลื่นอัลตราโซนิกทะลุผ่านได้ยากหรือมีพื้นผิวที่ขรุขระ และในการวัดอัตราการไหลของก๊าซ จะไม่สามารถใช้เครื่องวัดแบบ Clamp on ได้ ดังนั้น ในกรณีเช่นนี้จึงต้องใช้เครื่องวัดแบบสัมผัสของเหลว โดยเจาะรูที่ผนังท่อ แล้วนำเครื่องรับส่งสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิกไปสัมผัสกับของไหลโดยตรง

ความเที่ยงตรงของเครื่องวัดอัตราการไหลแบบอัลตราโซนิก เท่ากับประมาณ $\pm 1.0-2.0\%$ ของค่าที่อ่านได้

ข้อดีของเครื่องวัดอัตราการไหลแบบอัลตราโซนิก มีดังต่อไปนี้

- (1) สามารถวัดอัตราการไหลจากภายนอกท่อได้ (แบบ Clamp on)
- (2) ไม่มีความดันสูญเสีย

(3) สามารถวัดท่อที่มีขนาดใหญ่ได้ และยิ่งท่อมีขนาดใหญ่ จะยิ่งมีราคาถูก เทียบกับเครื่องวัดอัตราการไหลชนิดอื่น

ส่วนข้อเสีย มีดังต่อไปนี้

- (1) ประเภทและรูปร่างของท่อบางชนิดจะทำให้ไม่สามารถวัดได้ (แบบ Clamp on)
- (2) หากในของเหลวมีของแข็งหรือฟองก๊าซรวมอยู่ด้วยจำนวนมากจะไม่สามารถวัดได้
- (3) หากกระแสน้ำมีการปั่นป่วนจะเกิดความคลาดเคลื่อนขึ้น ดังนั้น จึงต้องจัดทำให้ท่อตรงเป็นระยะอย่างน้อยเท่ากับที่กำหนด หรือใช้เครื่องรับส่งสัญญาณหลายตัว เพื่อชดเชยผลกระทบของการแจกแจงความเร็วกระแสน้ำ

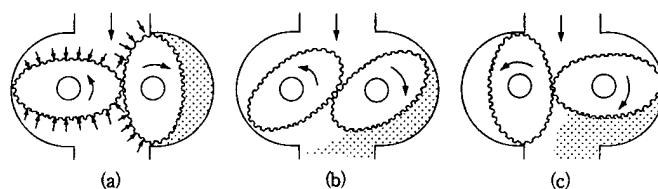
2. แบบ Doppler

เมื่อส่งคลื่นอัลตราโซนิกเข้าไปในกระแสน้ำ คลื่นอัลตราโซนิกที่สะท้อนกลับด้วยฟองก๊าซหรือของแข็งที่อยู่ในกระแสน้ำ จะมีความถี่เปลี่ยนไปด้วยปรากฏการณ์ Doppler ผลต่างของความถี่ระหว่างคลื่นที่ได้รับกับคลื่นที่ส่งออกไปจะแปรผันตามความเร็วกระแสน้ำ ดังนั้น จึงสามารถนำมาคำนวณหาความเร็วกระแสน้ำได้

2.2.2.6 เครื่องวัดอัตราการไหลแบบปริมาตร

เครื่องวัดอัตราการไหลแบบปริมาตรอาจเปรียบเทียบเหมือนการวัดของไหลด้วย “ถ้วยตวง” รูปที่ 2.22 แสดงตัวอย่างที่ทำงานด้วยเฟืองวงรี ของไหลจะไหลเข้ามาจากด้านบน ทำให้เฟืองหมุนไปทิศตามเข็มนาฬิกา ในขณะนั้น ของไหลระหว่างเฟืองตัวขวาในรูป (a) กับกำแพงจะถูกขับออกมาด้านล่าง เมื่อเฟืองหมุนทุก 1 รอบ ของเหลวปริมาณ 4 เท่าของข้างต้นจะถูกขับออกมา ดังนั้น หากวัดจำนวนรอบที่หมุนไปของเฟืองนี้จะสามารถหาค่าอัตราการไหลสะสมโดยปริมาตรได้ และหากวัดความเร็วของการหมุน จะสามารถหาค่าอัตราการไหลโดยปริมาตรได้

เนื่องจากเครื่องวัดอัตราการไหลแบบปริมาตรจะวัดปริมาตรของของไหลโดยตรง จึงวัดอัตราการไหลสะสมได้ด้วยความสะดวกสูง นอกจากเครื่องวัดแบบเฟืองวงรีแล้ว ยังมีตัวหมุนแบบอื่นๆ ที่ใช้กันอีกด้วย ในการวัดก๊าซ นอกจากจะใช้แบบตัวหมุนแล้ว ยังใช้เยื่อบาง (ใช้กับมาตรวัดก๊าซตามบ้าน) และแบบถังเปียก (ใช้กับการทดลองและการตรวจสอบ) อีกด้วย



รูปที่ 2.22 หลักการทำงานของเครื่องวัดอัตราการไหลแบบปริมาตร (แบบเฟืองวงรี)

ข้อดีของเครื่องวัดอัตราการไหลแบบปริมาตรมีดังต่อไปนี้

- (1) ค่าอัตราการไหลสะสมที่วัดได้มีความเที่ยงตรงสูง (ทำได้เที่ยงตรงถึง $\pm 0.2\%$ ของค่าที่อ่านได้)
- (2) เหมาะกับการวัดของเหลวที่มีความหนืดสูง
- (3) แสดงค่าที่วัดได้โดยไม่ต้องใช้แหล่งพลังงานภายนอกส่วน

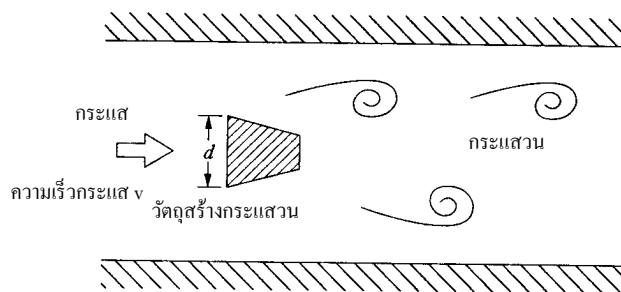
ข้อเสียมีดังต่อไปนี้

- (1) หากในของเหลวมีสิ่งแปลกปลอมหรือของแข็งอยู่จะเป็นอุปสรรคต่อการวัด
- (2) ในของเหลวที่มีความหนืดสูงจะมีความดันสูญเสียมาก
- (3) สำหรับของเหลวที่มีความหนืดต่ำมาก จะเกิดการรั่วจากช่องว่างได้ง่าย ทำให้ความเที่ยงตรงลดลง
- (4) ต้องถอดออกมาตรวจสอบเป็นระยะ

2.2.2.7 เครื่องวัดอัตราการไหลแบบกระแสนวน

เมื่อวางวัตถุรูปเสาไว้ในกระแส ที่แนวกระแสนหลังพื้นเสาไปแล้วจะเกิดกระแสนวนขึ้น 2 แนวดังรูปที่ 2.23 กระแสนวนนี้เรียกว่า กระแสนวน Karman ซึ่งความถี่ f ของกระแสนวนกับความเร็วกระแส v มีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงดังต่อไปนี้

$$f = St \frac{v}{d}$$



รูปที่ 2.23 หลักการทำงานของเครื่องวัดอัตราการไหลแบบกระแสนวน

ค่า St เรียกว่า Strouhal number ซึ่งจะขึ้นอยู่กับรูปร่างและขนาดของวัตถุสร้างกระแสนวน นอกจากนี้ St ยังขึ้นอยู่กับ Reynolds number อีกด้วย อย่างไรก็ตาม เมื่อ Reynolds number มีค่าสูงจนถึงค่าหนึ่ง St จะมีค่าเกือบคงที่ ดังนั้น เมื่อนำวัตถุสร้างกระแสนวนวางไว้ในท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางค่าหนึ่ง ปล่องของไหลให้ไหลในท่อนั้นแล้ววัดความถี่ของกระแสนวนที่เกิดขึ้น จะสามารถวัดอัตราการไหลได้ อนึ่ง เนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่าง Reynolds number กับ Strouhal number จะแทบไม่ขึ้นกับประเภทของไหล ไม่ว่าจะเป็นของเหลว ก๊าซ หรือไอระเหย ดังนั้น จึงสามารถใช้เครื่องวัดเครื่องเดียวกันวัดได้ทั้งสิ้น วิธีการวัดกระแสนวนนั้น สามารถใช้อุปกรณ์ Piezoelectric (ตรวจวัดแรง) เทอร์มิสเตอร์ให้ความร้อน (จากผลการระบายความร้อน) หรือคลื่นอัลตราโซนิก (วัดการเปลี่ยนแปลงความเร็วเสียง) เป็นต้น

สัญญาณขาออกของเครื่องวัดอัตราการไหลแบบกระแสนวนจะเป็นสัญญาณความถี่ ดังนั้นเมื่อนับจำนวนนี้จะได้ค่าอัตราการไหลสะสม นอกจากนี้ หากนำไปประมวลผลด้วยอุปกรณ์ประมวลผล ก็สามารถให้สัญญาณอัตราการไหลโดยปริมาตรได้ โดยมีความเที่ยงตรงประมาณ $\pm 1.0\%$ ของค่าที่อ่านได้

ข้อดีของเครื่องวัดอัตราการไหลแบบกระแสน้ำมีดังต่อไปนี้

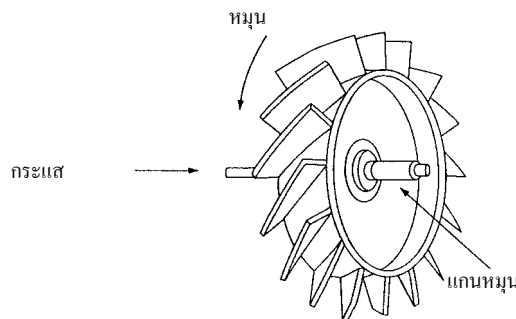
- (1) มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน ราคาค่อนข้างถูก
- (2) เทียบกับเครื่องวัดอัตราการไหลแบบผลต่างความดัน จะไม่ต้องใช้ท่อนำความดันและวาล์ว 3 ทาง ดังนั้นต้นทุนรวมถึงต่ำกว่า
- (3) มีความดันสูญเสียค่อนข้างต่ำกว่าแบบผลต่างความดัน
- (4) ไม่มีชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่จึงบำรุงรักษาได้ง่าย

ส่วนข้อเสียมีดังต่อไปนี้

- (1) กรณีที่ Reynolds number มีค่าต่ำมาก (อัตราการไหลต่ำ ความหนืดสูง ฯลฯ) จะไม่เกิดกระแสน้ำหรือไม่มีเสถียรภาพ
- (2) ไม่เหมาะกับของเหลวที่มีของแข็งหรือฟองก๊าซเป็นจำนวนมาก

2.2.2.8 เครื่องวัดอัตราการไหลแบบเทอร์ไบน์

เครื่องวัดอัตราการไหลแบบเทอร์ไบน์บางครั้งก็เรียกว่าเครื่องวัดอัตราการไหลแบบกังหันหรือแบบใบพัด หลักการทำงานก็เหมือนกับกังหันลมนั่นเอง รูปที่ 2.24 แสดงหลักการทำงาน เมื่อมีกระแสไหลมาในทิศเดียวกับแกนหมุน มากระทบกังหันที่มีใบทำมุมเฉียงกับแกนหมุนแล้ว กังหัน (เรียกว่าโรเตอร์) จะหมุนด้วยความเร็วที่แปรผันตรงกับความเร็วกะแส แล้วใช้ Pickup coil ที่ติดตั้งอยู่ด้านนอกในการตรวจวัดการหมุนนี้ ถ้าแบ่งประเภทตามหลักการทำงานจะเรียกว่าเครื่องวัดอัตราการไหลแบบใบพัดชนิด Axial flow แต่ในอุตสาหกรรมจะเรียกว่า เครื่องวัดอัตราการไหลแบบเทอร์ไบน์ นิยมใช้กันในการรับรองในการซื้อขายน้ำมันปิโตรเลียมต่างๆ



รูปที่ 2.24 หลักการทำงานของเครื่องวัดอัตราการไหลแบบเทอร์ไบน์

ข้อดีของเครื่องวัดอัตราการไหลแบบเทอร์ไบน์มีดังต่อไปนี้

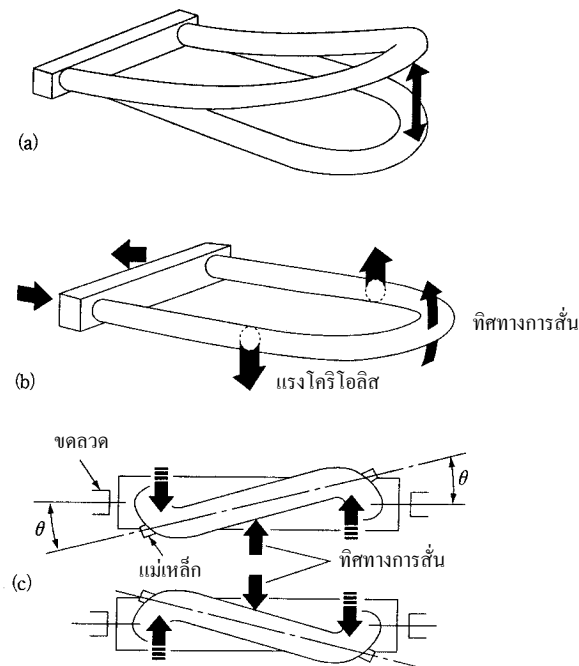
- (1) สัญญาณขาออกจะแปรผันตามอัตราการไหล และมีความเที่ยงตรงสูง (เครื่องวัดสำหรับงานทั่วไป $\pm 0.5\%$ สำหรับงานพาณิชย์ $\pm 0.2\%$)
- (2) เหมาะกับของไหลความดันสูง
- (3) มีขนาดเล็ก แต่สามารถวัดอัตราการไหลที่สูงมากได้

ส่วนข้อเสียมีดังต่อไปนี้

- (1) ไม่เหมาะกับของเหลวที่มีความหนืดสูงและของเหลวที่มีของแข็งรวมอยู่ด้วย
- (2) โรเตอร์จะหมุนด้วยความเร็วสูง ดังนั้น จึงต้องเปลี่ยนชิ้นส่วนเป็นระยะ
- (3) ได้รับผลกระทบจากการแจกแจงความเร็วกระแสน้ำ ดังนั้น จึงต้องติดตั้งเครื่องปรับกระแสให้ราบเรียบที่ต้นทาง และต้องจัดทำให้มีท่อตรงเป็นระยะทางที่กำหนดก่อนและหลังเครื่องวัดอัตราการไหล

2.2.2.9 เครื่องวัดอัตราการไหลแบบแรงโคริโอลิส

เครื่องวัดอัตราการไหลแบบแรงโคริโอลิสเป็นเครื่องวัดอัตราการไหลที่มีคุณสมบัติพิเศษคือ สามารถวัดอัตราการไหลโดยมวลของของไหลได้โดยตรง หลักการทำงานแสดงไว้ในรูปที่ 2.25 โดยของไหลจะไหลอยู่ในท่อรูปตัว U เมื่อสั่นท่อนขึ้นลงดังรูป (a) จะมีแรงที่มีขนาดแปรผันตามอัตราการไหลโดยมวลของของไหลนี้เกิดขึ้นในของไหล แรงนี้เรียกว่า แรงโคริโอลิส ทิศทางของแรงนี้จะขึ้นอยู่กับทิศทางการไหล ดังนั้น ท่อนี้จึงเกิดการบิดตัว (รูป (b)) เนื่องจากท่อจะสั่นในทิศทางขึ้นลง ทิศทางการบิดของท่อก็จะขึ้นอยู่กับทิศทางการสั่นด้วย (รูป (c)) เมื่อใช้ชดเชยกับแม่เหล็กในการวัดมุมบิดต่อการสั่นพื้นฐาน จะสามารถคำนวณอัตราการไหลโดยมวลได้ คำอธิบายข้างต้นใช้ท่อรูปตัว U เป็นตัวอย่าง แต่นอกจากนี้ยังมีเครื่องวัดอีกหลายแบบในท้องตลาด ทั้งท่อรูปตัว S รูปตัว B รูปเกลียว รูปท่อตรง เป็นต้น



รูปที่ 2.25 หลักการทำงานของเครื่องวัดอัตราการไหลแบบแรงโคริโอลิส

ข้อดีของเครื่องวัดอัตราการไหลแบบแรงโคริโอลิสมีดังต่อไปนี้

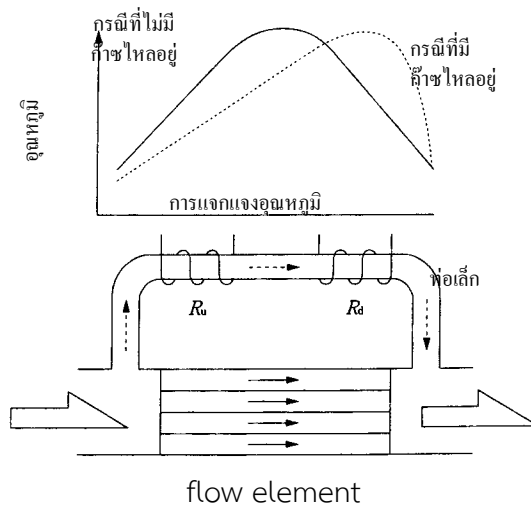
- (1) สามารถวัดอัตราการไหลโดยมวลได้โดยตรง
- (2) มีความเที่ยงตรงสูงมาก (บางรุ่นสามารถวัดได้เที่ยงตรงถึง $\pm 0.15\%$ ของค่าที่อ่านได้)
- (3) สามารถใช้กับของไหลได้หลายชนิด (นอกจากของไหลทั่วไปแล้วยังสามารถวัดของไหลที่มีของแข็งรวมอยู่ด้วย ของไหลความหนืดสูง ของไหลที่เป็นจิ้งหะ และก๊าซความดันสูงได้อีกด้วย)

ส่วนข้อเสียมีดังต่อไปนี้

- (1) มีราคาสูงกว่าเครื่องวัดอัตราการไหลแบบอื่น
- (2) ได้รับผลกระทบจากการสั่นสะเทือนภายนอกได้ง่าย

2.2.2.10 เครื่องวัดอัตราการไหลแบบความร้อน

เมื่อของไหลสัมผัสกับวัตถุที่มีความร้อน ของไหลจะได้รับพลังงานความร้อนจากวัตถุทำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น ความร้อนที่ถ่ายเทต่อหนึ่งหน่วยเวลา จะแปรผันตาม (ความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ของของไหล) $\times$ (อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของของไหล) $\times$ (อัตราการไหลโดยมวลของของไหล) ดังนั้นจากความสัมพันธ์นี้จึงสามารถหาอัตราการไหลโดยมวลของของไหลได้



รูปที่ 2.26 ตัวอย่างโครงสร้างของเครื่องวัดอัตราการไหลแบบความร้อน

รูปที่ 2.26 แสดงตัวอย่างเครื่องวัดอัตราการไหลที่ทำงานด้วยหลักการนี้ ของไหล (ในที่นี้ได้แก่ ก๊าซ) จะเข้ามาจากทางซ้าย ของไหลส่วนใหญ่จะไหลผ่าน Flow element อีกส่วนหนึ่งจะผ่านท่อเล็ก โดยมีโครงสร้างให้อัตราส่วนของอัตราการไหลของทั้งสองมีค่าคงที่ ในท่อเล็กจะมีอุปกรณ์ที่เป็นทั้งตัวต้านทานและเซ็นเซอร์อุณหภูมิ R_u และ R_d พันอยู่ในตัวต้านทานทั้งสองมีกระแสไหลที่มีขนาดเท่ากันไหลอยู่ เมื่อไม่มีของไหลไหลผ่าน ตัวต้านทานทั้งคู่จะมีอุณหภูมิเท่ากัน แต่เมื่อมีของไหลไหลผ่าน อุณหภูมิของ R_u จะลดลง อุณหภูมิของ R_d จะเพิ่มขึ้น แล้วต่อวงจร Bridge เพื่อวัดผลต่างอุณหภูมิทั้งสองนี้มาคำนวณสัญญาณอัตราการไหล มีความเที่ยงตรงประมาณ $\pm 1\%$ ของ Span

เครื่องวัดอัตราการไหลแบบความร้อนมีข้อดีดังต่อไปนี้

- (1) สามารถหาค่าอัตราการไหลโดยมวลของก๊าซได้โดยตรงด้วยความเที่ยงตรงสูง ไม่ต้องชดเชยอุณหภูมิ-ความดัน
- (2) สามารถวัดอัตราการไหลที่ต่ำมากๆ ได้ โดยทั่วไปจะใช้กับก๊าซ แต่รุ่นที่ใช้กับของเหลวก็มี

อนึ่ง เครื่องวัดอัตราการไหลแบบนี้โดยหลักการทำงานแล้ว หากชนิดของก๊าซเปลี่ยนแปลงไปจะเกิดความคลาดเคลื่อนอย่างมาก จึงต้องใช้ความระมัดระวัง

2.2.2.11 เครื่องวัดความเร็วของไหล

1. หลักการทำงาน

เครื่องวัดอัตราการไหลที่อธิบายไปแล้วส่วนมาก หากเปลี่ยนรูปร่างของอุปกรณ์ตรวจวัด จะสามารถวัดความเร็วของไหลได้ ตาราง 2.5 แสดงเครื่องวัดความเร็วของไหลและเป้าหมายการใช้งาน ในจำนวนเครื่องวัดเหล่านี้ ที่ยังไม่ได้อธิบายได้แก่ เครื่องวัดแบบ Pitot tube และแบบ Laser Doppler ดังนั้น จะอธิบายในหัวข้อ (2) และ ข้อ (3)

ตารางที่ 2.5 หลักการทำงานและเป้าหมายการวัดของเครื่องวัดความเร็วของไหล

หลักการทำงาน	ของเหลว	ก๊าซ
แบบ pitot tube	○	○
แบบความร้อน	×	○
แบบคลื่นอัลตราโซนิก	○	○
แบบแม่เหล็กไฟฟ้า	○	×
แบบกระแสนวน	○	○
แบบเทอร์ไบน์	○	○
แบบ laser Doppler	○	○

มีการนำเครื่องวัดความเร็วของไหลมาใช้แทนเครื่องวัดอัตราการไหลกันมากในอุตสาหกรรม เนื่องจากเครื่องวัดอัตราการไหลของท่อขนาดใหญ่จะมีราคาสูงมาก หากสามารถนำเครื่องวัดความเร็วของไหลมาใช้แทนได้จะมีข้อได้เปรียบมาก อย่างไรก็ตาม กรณีที่การกระจายความเร็วของไหลในท่อมีความไม่สม่ำเสมอ หรือมีการเปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลาแล้ว ความเที่ยงตรงในฐานะที่เป็นเครื่องวัดอัตราการไหลจะไม่ค่อยดีนัก

วิธีใช้เครื่องวัดความเร็วของไหลในการวัดอัตราการไหลแบ่งเป็น 2 วิธี

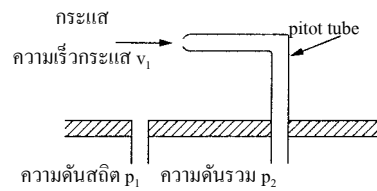
(ก) เลือกตำแหน่งที่การกระจายความเร็วภายในท่อไม่มีความปั่นป่วน ติดตั้งเครื่องวัดความเร็วของไหล ณ ตำแหน่งที่สามารถวัดได้ความเร็วของไหลเฉลี่ย นำผลลัพธ์ที่ได้มาคูณกับพื้นที่หน้าตัดของท่อจะได้อัตราการไหล อนึ่ง ตำแหน่งที่จะวัดได้ความเร็วของไหลเฉลี่ย โดยประมาณจะอยู่ห่างจากผนังท่อออกมาเป็นระยะ 12% ของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ

(ข) วัดความเร็วของไหลหลายๆ จุดบนพื้นที่หน้าตัดท่อซึ่งกำหนดตำแหน่งไว้ก่อนแล้ว นำมาหาความเร็วของไหลเฉลี่ยภายหลัง หรือติดตั้งเซ็นเซอร์ความเร็วของไหลหลายๆ ตัวพร้อมกัน แล้วนำมาคำนวณหาความเร็วของไหลเฉลี่ย เครื่องวัดบางรุ่นเพียง 1 เครื่อง สามารถทำงานเหมือนกับมีเซ็นเซอร์ความเร็วของไหลจำนวนหลายตัว

2. เครื่องวัดความเร็วของไหลแบบ Pitot tube

เมื่อวางแผ่นวัสดุไวตั้งฉากกับของไหล จะมีความดันกระทำต่อแผ่นวัสดุเท่ากับผลบวกของความดันสถิตของของไหลกับความดันจลน์ซึ่งแปรผันตามกำลัง 2 ของความเร็วของไหล ผลบวกนี้เรียกว่าความดันรวม เมื่อใช้อุปกรณ์ที่แสดงในรูปที่ 2.27 (เรียกว่า Pitot tube) วัดความดันรวมกับความดันสถิต และหาผลต่างออกมาแล้ว จะได้ค่าซึ่งแปรผันตามกำลัง 2 ของความเร็วของไหล ความสัมพันธ์นี้สามารถหาได้จาก Bernoulli's theorem สมการแสดงความเร็วของไหล v สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้ ทั้งนี้ ρ เป็นความหนาแน่นของของไหล

$$v_1 = \sqrt{\frac{2(p_2 - p_1)}{\rho}}$$



รูปที่ 2.27 ภาพแสดงหลักการทำงานของเครื่องวัดความเร็วของไหลแบบ Pitot tube

Pitot tube เป็นอุปกรณ์ที่สามารถวัดความเร็วของไหลได้โดยมีโครงสร้างไม่ซับซ้อน จึงนิยมใช้ในการวัดการกระจายของไหลความเร็ว อย่างไรก็ตามด้วยเหตุผลเดียวกับเครื่องวัดอัตราการไหลแบบผลต่างความดัน เนื่องจากผลต่างความดันจะแปรผันตามกำลังสองของความเร็วของไหล ดังนั้น จึงไม่เหมาะกับการวัดความเร็วของไหลที่มีค่าน้อย นอกจากนี้ยังมีข้อจำกัดคือ หากทิศทางของของไหลกับทิศทางของแกน Pitot tube ไม่ตรงกันก็จะไม่สามารถวัดได้อย่างถูกต้อง

อุปกรณ์ที่สามารถวัดอัตราการไหลภายในท่อโดยใช้หลักการทำงานของ Pitot tube ได้แก่ Averaging pitot tube ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ตรวจวัด 1 ท่อ (ภายในแบ่งเป็น 2 ท่อ) ซึ่งมีรูตรวจวัดความดันรวมและรูตรวจวัดความดันสถิตจำนวนหลายรู ทำการหาค่าเฉลี่ยภายในด้วยตัวเอง จากผลต่างของความดันทั้ง 2 นี้จะสามารถหาค่าอัตราการไหลเฉลี่ยได้ ในการวัดอัตราการไหลในท่อขนาดใหญ่ เครื่องวัดนี้จะมีราคาค่อนข้างถูกและมีความดันสูญเสียต่ำ

3. เครื่องวัดความเร็วของไหลแบบ Laser Doppler

เมื่อฉายแสงเลเซอร์ให้กระทบของไหล ความถี่ของคลื่นที่ตกกระทบอนุภาคเล็กๆ ในของไหลจะเปลี่ยนแปลงไปตามความเร็วของอนุภาคนั้นด้วยปรากฏการณ์ Doppler เราสามารถนำหลักการนี้มาใช้วัดความเร็วของอนุภาคได้

เครื่องวัดแบบนี้มีข้อดีที่ไม่พบในเครื่องวัดความเร็วของไหลแบบอื่น คือ สามารถวัดความเร็วของของไหลได้โดยไม่มีการสัมผัสเลย บริเวณที่วัดมีขนาดเล็กมาก กล่าวคือมีความละเอียดทางตำแหน่งสูงมาก ทั้งนี้ หากในของไหลไม่มีอนุภาคใดๆ เลยจะไม่สามารถวัดได้ และหากมีอนุภาคมากเกินไปก็ไม่สามารถวัดได้เช่นกัน เนื่องจากมีราคาสูง โดยทั่วไปจึงใช้ในการทดลองและวิจัยเป็นหลัก

ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานที่สำคัญ ได้แก่ การวัดความเร็วของไหลเฉพาะที่ของก๊าซเผาไหม้หรือของไหลภายใต้อุณหภูมิและความดันสูง การวัดการกระจายความเร็วของไหลภายในท่อโปร่งใส เป็นต้น ในสถานที่ที่แสงเลเซอร์ไม่สามารถทะลุผ่านได้ ก็มีเครื่องวัดที่ใช้ใยแก้วนำแสงในการวัดด้วย

2.3 วิธีการตรวจวัดและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ

การวิเคราะห์หาสมดุลความร้อนหม้อไอน้ำ

ข้อมูลหม้อไอน้ำและข้อมูลทั่วไป		หน่วย	สัญลักษณ์	คำอธิบาย
	ชื่อหม้อไอน้ำ			ระบุผู้ผลิต / Model / หมายเลข
	ขนาดพิกัดหม้อไอน้ำ	ton/h	}	ตาม Name Plate ของหม้อไอน้ำ
	ความดันไอน้ำสูงสุด	Bar		
	พื้นที่ผิวถ่ายเทความร้อน	sq.m		
	ประเภทของหัวเผา			ระบุประเภทหัวเผา
	ระบบการควบคุมของหัวเผา			
	เส้นผ่านศูนย์กลางของหม้อไอน้ำ	m	D	
	ความยาวของหม้อไอน้ำ	m	L	
	อุณหภูมิอ้างอิง	°C	Tref	หรือ อุณหภูมิบรรยากาศ
ข้อมูลเชื้อเพลิง				
	ชนิดของเชื้อเพลิง			ระบุชนิดของเชื้อเพลิง
	ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงต่อปี	l/y	Fy	
	ราคาเชื้อเพลิง	B/l	Pf	
	ค่าความร้อนขั้นต่ำของเชื้อเพลิง	MJ/kg (kcal/kg)	H _L	กรณีใช้วิเคราะห์หาค่า Ao, Go โดย Rosin ให้ใช้หน่วย H _L : kcal/kg
ข้อมูลที่ได้จากการวัด				
	ความดันไอน้ำเฉลี่ยที่ใช้งาน (gauge pressure)	Bar	Pst	
	ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงต่อชั่วโมง	l/h	Fh	อ่านจากมิเตอร์ในช่วงตรวจวัด
	อุณหภูมิน้ำมันที่จุดวัดปริมาณ(มิเตอร์น้ำมันเตา)	°C	Tfm	
	อุณหภูมิน้ำมันที่จุดเข้าห้องเผาไหม้	°C	Tf	
	ปริมาณน้ำป้อน	kg/h	W	
	อุณหภูมิน้ำป้อน	°C	Tw	
	อุณหภูมิอากาศที่ช่วยเผาไหม้	°C	Ta	
	ปริมาณออกซิเจนในก๊าซเสีย	%	O ₂	
	อุณหภูมิของก๊าซไอเสีย	°C	Tg	
	ปริมาณ CO ในก๊าซไอเสีย	ppm	CO	
	สารละลายของน้ำป้อน	ppm	TDSw	Total Dissolve solid
	สารละลายของน้ำโบล์ดวอร์น	ppm	TDSb	
	อุณหภูมิผิวของหม้อไอน้ำด้านหน้า	°C	Tsf	อุณหภูมิผิวเฉลี่ย
	อุณหภูมิผิวของหม้อไอน้ำด้านข้าง	°C	Tss	
	อุณหภูมิผิวของหม้อไอน้ำด้านหลัง	°C	Tsb	
	อัตราการสูญเสียความร้อนผ่านผนัง	%	R	

ในกรณีฉนวนอยู่ในสภาพดีและเป็นไปตามมาตรฐาน อุณหภูมิผิวเฉลี่ยไม่ควรเกิน 55 °C สามารถใช้อัตราการสูญเสียความร้อนตามตารางได้

ตารางที่ 2.6 Radiation Heat Loss of Boiler (R) Table

Boiler capacity	5	10	50	100	500
Radiation Heat Loss % of Q _{inp}	2	1.4	0.8	0.5	0.3

ในกรณีอุณหภูมิผิวเฉลี่ยสูงมาก ควรวิเคราะห์หรือตรวจสอบหาอัตราสูญเสียความร้อนโดยเฉพาะในแต่ละด้าน

		หน่วย	สัญลักษณ์	คำอธิบาย
	สภาพเปล่งรังสี(emissivity) ของด้านหน้า		Ef	พิจารณาจากตารางที่ 5
	สภาพเปล่งรังสี(emissivity) ของด้านข้าง		Es	
	สภาพเปล่งรังสี(emissivity) ของด้านหลัง		Eb	
ข้อมูลจากตารางไอน้ำ				
	Enthalpy ของน้ำที่อุณหภูมิอ้างอิง	kJ/kg	hf,ref	จาก steam table
	Enthalpy ของน้ำป้อน	kJ/kg	hf,w	
	Enthalpy ของน้ำโบล์ดวาร์	kJ/kg	hf,b	
	Enthalpy ของไอน้ำ	kJ/kg	hg,st	
ข้อมูลหม้อไอน้ำและข้อมูลทั่วไป				
	ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงที่ 15 °C	kg/l	Df1	เป็นข้อมูลและสูตรโดยทั่วไปใน
	ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงที่จุดวัดปริมาณ	kg/l	Df2	
	Df2 = Df1 -0.00065× (Tfm-15)			อุณหภูมิเปลี่ยนไป
	ค่าความร้อนจำเพาะของเชื้อเพลิง*	kJ/kg- °C	Cpf	ควรตรวจสอบข้อมูลจากบริษัทผู้จำหน่ายน้ำมัน
	Cpf 0.45×4.187			
	ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศ	kJ/Nm³- °C	Cpa	
	Cpa = 0.312×4.187			เป็นค่าเฉลี่ย 0-200 °C
	ค่าความร้อนจำเพาะของก๊าซไอเสีย	kJ/Nm³- °C	Cpg	
	Cpg = 0.332×4.187			เป็นค่าเฉลี่ย 0-300 °C
	Cpg = 0.334×4.187			เป็นค่าเฉลี่ย 0-400 °C
	Cpg = 0.337×4.187			เป็นค่าเฉลี่ย 0-500 °C

* ค่าความร้อนจำเพาะของเชื้อเพลิงน้ำมันเตา C = 0.45 kJ/kg °C ควรตรวจสอบจากบริษัทผู้ผลิตผู้จำหน่ายสำหรับเชื้อเพลิงแต่ละชนิด,

1 kcal = 4.187 kJ

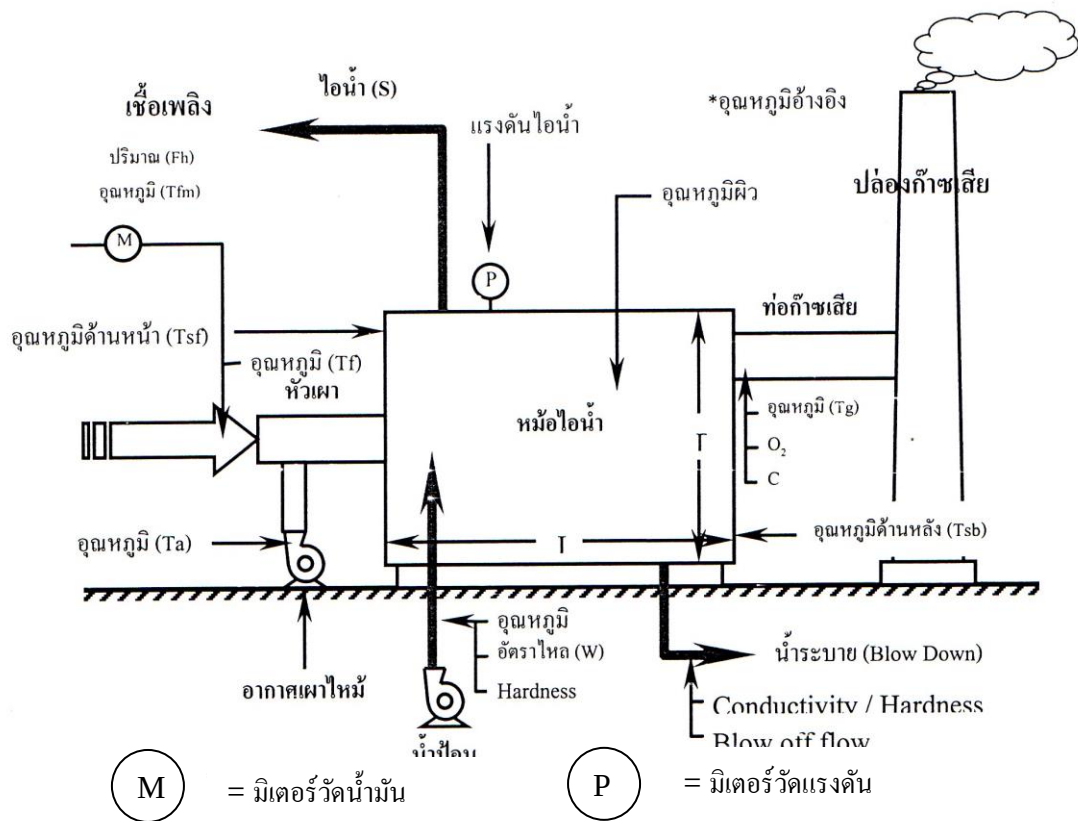
ตอนที่ 3 บทที่ 2 การตรวจวัดวิเคราะห์การใช้พลังงานความร้อน

วัตถุ	อุณหภูมิ °C	อัตราการแผ่รังสี
lamp black	อุณหภูมิห้อง	0.97
platinum black	อุณหภูมิห้อง ~ 1,650	0.97
ผิวทาผิวแก่	อุณหภูมิห้อง	0.95
สีอคริลิก	อุณหภูมิห้อง	0.4 ~ 0.7
ผิวขัดมัน	อุณหภูมิห้อง	0.06
	540	0.12
แผ่นเหล็กเหนียวรีด	อุณหภูมิห้อง	0.56
เหล็กหล่อ (ผิวดำ)	อุณหภูมิห้อง	0.7 ~ 0.8
ผิวขัดมันของทองเหลือง	อุณหภูมิห้อง	0.09
อิฐทนไฟ	600 ~ 1,000	0.85
อิฐแดง	อุณหภูมิห้อง ~ 1,000	0.90

ที่มา : เทคนิคการประหยัดพลังงานภาคความร้อน สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น)

ตารางที่ 2.7 รายละเอียดการตรวจวัดหม้อไอน้ำ

หม้อไอน้ำ		
น้ำป้อน		
อุณหภูมิ น้ำป้อน(°C)		
TDS		
pH		
Flue Gas		
% O2		
% CO2		
CO content(ppm)		
Flue Gas Temp (°C)		
เชื้อเพลิง		
อัตราการใช้เชื้อเพลิง Mf (l/h)		
อุณหภูมิ น้ำมัน (°C)		
Ambient Temp.(°C)		
อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าห้องเผาไหม้		
อุณหภูมิผิวหม้อไอน้ำ(°C)		
ด้านหน้า		
ด้านข้าง		
ด้านหลัง		



รูปที่ 2.28 จุดตรวจวัดสำหรับหม้อไอน้ำ

การวิเคราะห์การสมดุลความร้อนหม้อไอน้ำ

		หน่วย	สัญลักษณ์	คำอธิบาย
การคำนวณ				
	ปริมาณโบล์ดวาร์เป็นร้อยละของไอน้ำ	%	B	
	$B = \text{TDSw} / (\text{TDSb} - \text{TDSw}) \times 100$			
	ปริมาณอากาศเชิงทฤษฎี	Nm ³ /kg	Ao	เป็นสูตรประมาณการ Ao อาจจะหา
	$Ao = (12.38 \times \text{LH} / 10000) - 1.36$			ได้จากสมการเผาไหม้ H _L : kcal/kg
	ปริมาณก๊าซไอเสียเชิงทฤษฎี	Nm ³ /kg	Go	เป็นสูตรประมาณการ Go อาจจะหา
	$Go = (15.75 \times \text{LGH} / 10000) - 3.91$			ได้จากสมการเผาไหม้ H _L : kcal/kg
	ปริมาณก๊าซไอเสีย	Nm ³ /kg	G	
	$G = Go + (m - 1)$			
	อัตราส่วนอากาศ		m	
	$m = 21 / (21 - O_2)$			
	ปริมาณอากาศเผาไหม้จริง	Nm ³ /kgf	A	
	$A = m \times Ao$			
	ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้จริง	kg/h	(Fh) _L	
	$(Fh)_L = Fh \times D_2$			
1. ความร้อนเข้า Q _{inp}				
	1.1 ความร้อนของเชื้อเพลิง	MJ/h	Q _{fc}	HL ให้ใช้หน่วย MJ/kg
	$Q_{fc} = (Fh)_L \times H_L$			
	1.2 ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิง	MJ/h	Q _{fs}	
	$Q_{fs} = (Fh)_L \times C_{pf} \times (T_f - T_{ref}) / 1000$			
	1.3 ความร้อนสัมผัสของน้ำป้อน	MJ/h	Q _w	
	$Q_w = (h_{f,w} - h_{f,ref}) / 1000$			
	1.4 ความร้อนของอากาศช่วยเผาไหม้	MJ/h	Q _a	
	$Q_a = A \times C_{pa} \times (T_a - T_{ref}) / 1000$			
	1.5 ความร้อนเข้ารวม	MJ/h	Q _{inp}	
	$Q_{inp} = Q_{fc} + Q_{fs} + Q_w + Q_a$			
2. ความร้อนออก				
	2.1 ความร้อนสูญเสียในก๊าซไอเสีย	MJ/h	Q _g	
	$Q_g = (Fh)_L \times G \times C_{pg} \times (T_g - T_{ref}) / 1000$			
	2.2 ความร้อนสูญเสียในโบล์ดวาร์	MJ/h	Q _b	S = ปริมาณไอน้ำที่ผลิต kh/h
	$Q_b = (B / 100) \times (h_{f,b} - h_{f,ref}) \times S / 1000$ $S = \frac{Q_{st} \times 1000}{(h_{gs} - h_{f,ref})}$			
	2.3 ความร้อนสูญเสียผ่านผนังหม้อไอน้ำ	MJ/h	Q _R	
	$Q_R = \frac{R \times Q_{inp}}{100}$			
	2.4 ความร้อนของไอน้ำ	MJ/h	Q _{st}	
	$Q_{st} = Q_{inp} - Q_g - Q_b - Q_R$			
	รวมความร้อนออก	MJ/h	Q _{st}	
	$Q_{out} = Q_g + Q_b + Q_R + Q_{st}$			
สมดุลความร้อน				
	1. ความร้อนเข้า		Q _{inp}	
	1.1 ความร้อนของเชื้อเพลิง			
		%		
	1.2 ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิง			
		%		

1.3 ความร้อนสัมผัสของน้ำป้อน			
	%		
1.4 ความร้อนของอากาศช่วยเผาไหม้			
	%		
รวมความร้อนเข้า			
	%		
2. ความร้อนออก			
2.1 ความร้อนสูญเสียในก๊าซไอเสีย			
	%		
2.2 ความร้อนสูญเสียผ่านผนังหม้อไอน้ำ			
	%		
2.3 ความร้อนสูญเสียผ่านปลั้วดาว			
	%		
รวมความร้อนออก	MJ/h	Qout	
	%		
สรุปผลการคำนวณ			
ประสิทธิภาพหม้อไอน้ำ(อ้างอิงความร้อนต่ำ)	%	Eff	
$Eff = (Q_{st} - Q_w) \times 100 / Q_{fc}$			
ปริมาณไอน้ำที่ผลิตได้	kg/h	S	
$S = Q_{st} \times 1000 / (h_{g,s} - h_{f,ref})$			
อัตราส่วนการผลิตไอน้ำ	kgsteam/kgfuel	Em	
$Em = S / (F_h)_i$			
อัตราส่วนการผลิตไอน้ำ	kgsteam/l,fuel	Ev	
$Ev = Em \times D_i$			
ค่าใช้จ่ายเชื้อเพลิงในการผลิตไอน้ำ	฿/kg	Cst	
$Cst = Pf / Ev$			

ที่มา : เรียบเรียงจาก Report of study on Energy Conservation Project / เทคนิคการประหยัดพลังงาน ภาควิชาความร้อนสมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น)

2.4 วิธีการตรวจวัดและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของเตาเผาอุตสาหกรรม

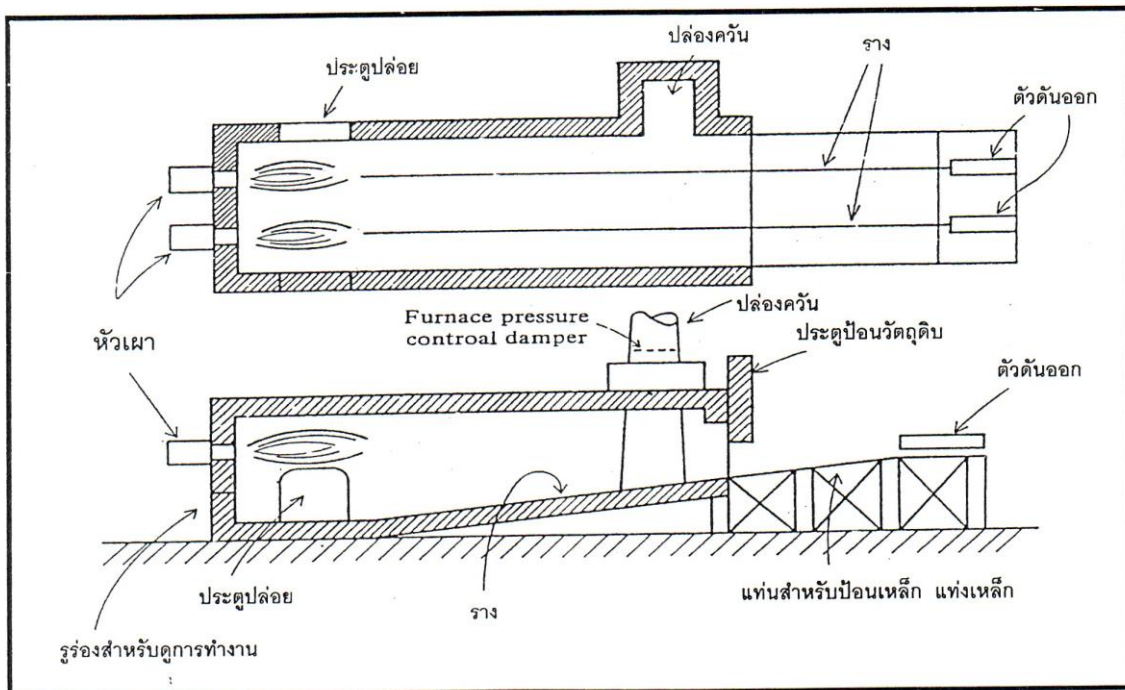
การวิเคราะห์สมดุลความร้อนของเตาอุตสาหกรรม

การวิเคราะห์สมดุลความร้อนของเตาอุตสาหกรรมต่าง ๆ ในที่นี้ได้กำหนดรูปแบบมาจากการตรวจสอบและวิเคราะห์การใช้พลังงาน ในโครงการ The study on the Energy Conservation Project โดยผู้เชี่ยวชาญจาก Energy Conservation Center, JAPAN (ECCJ) การวิเคราะห์สมดุลความร้อนของเตาเผาในประเทศไทย ยังไม่ได้มีการกำหนดมาตรฐานในการดำเนินการ นอกจากนั้นแล้วการกำหนดขอบเขตของระบบจะขึ้นอยู่กับลักษณะของเตาแต่ละชนิด ซึ่งเตาที่พบในประเทศไทยโดยทั่วไปอาจใช้รูปแบบดังต่อไปนี้เป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้ในการดำเนินการได้

1. การคำนวณสมดุลความร้อนของเตาเผาเหล็ก (Reheating Furnace)

ข้อมูลของเตาและข้อมูลทั่วไป

ชื่อ / หมายเลขเตา		ระบุผู้ผลิต / model / หมายเลข
กำลังการผลิต	ton / hr	ระบุกำลังผลิตสูงสุดของเตาที่ออกแบบ
ขนาดเตา		
กว้าง	m	
ยาว	m	ระบุขนาดภายนอกเตา
สูง	m	



รูปที่ 2.29 ตัวอย่างลักษณะและรูปร่างเตาเผาเหล็ก (Reheating furnace)

ข้อมูลการตรวจสอบ	หน่วย	สัญลักษณ์	คำอธิบาย
- ชนิดของเชื้อเพลิง			(ระบุชนิดเชื้อเพลิงที่ใช้)
- ปริมาณการใช้ที่จุดวัด	l/h	Fh	
- ค่าความร้อนต่ำ	kJ/kg	H _L	ในการคำนวณหาค่า A _o , G _o โดย
	(kcal/kg)		ให้ใช้หน่วย kcal/kg
- ค่าความร้อนจำเพาะของเชื้อเพลิง	kJ/kg ^o C	C _{pf}	
- อุณหภูมิเชื้อเพลิง	°C	T _f	อุณหภูมิที่ใช้เผาไหม้
- ความหนาแน่น 15 °C	kg/l	D _{f1}	
- ความหนาแน่นที่จุดวัด D _{f2} =D _{f1} -0.00065 (t _r -15)	kg/l	D _{f2}	
- อุณหภูมิอ้างอิง	°C	T _{ref}	หรืออุณหภูมิบรรยากาศ
- อุณหภูมิอากาศเผาไหม้	°C	T _a	
- ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศ	kJ/Nm ³ °C	C _{pa}	(kcal/Nm ³ °C) x 4.187 kJ/Nm ³ °C
- ปริมาณออกซิเจนในก๊าซเสีย	%	O ₂	
- อุณหภูมิก๊าซเสีย	°C	T _g	
- ค่าความร้อนจำเพาะเฉลี่ยของก๊าซเสีย	kJ/Nm ³ °C	C _{pg}	ค่าเฉลี่ย 0.33 (kcal/Nm ³ °C) x 4.187 kJ/Nm ³ °C
- ปริมาณชิ้นเหล็ก (billet) ที่ป้อนเข้า	ton/hr	bi	เก็บข้อมูลในช่วงเวลาตรวจสอบ
- ปริมาณชิ้นเหล็กออกจากเตา	ton/hr	bo	
- อุณหภูมิของ billet			
- เข้าเตา	°C	T _{bi}	
- ออกจากเตา	°C	T _{bo}	
- ปริมาณความร้อนใน billet			
- เข้าเตา	kJ/kg	H _{bi}	ใช้ข้อมูลจากตาราง 2.8
- ออกจากเตา	kJ/kg	H _{bo}	

ตารางที่ 2.8 Heat content of billet (H_b)

Temp °C	50	100	1,000	1,050	1,100	1,150	1,200	1,250
Heat content (kJ/kg)	(24.28)	(48.57)	(685.41)	(718.49)	(751.57)	(784.64)	(817.72)	(850.80)
kcal/kg	5.8	11.6	163.7	171.6	179.5	187.4	195.3	203.2

ที่มา : Report on the study on Energy Conservation Project. Vol. 2 (Textile, Metal) หน้า 10-6

	หน่วย	สัญลักษณ์	คำอธิบาย
- ปริมาณน้ำหล่อเย็น	m ² /h	We	
- อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น			ในกรณีมีการระบายความร้อน
- เข้า	°C	Twci	ด้วยน้ำในเตา
- ออก	°C	Twco	
- อัตราการเกิด scale	%	S	โดยทั่วไปประมาณ 1.5-2% ของ
- ความร้อนที่เกิดจาก scale	kJ/kgFe	Qfs	ชิ้นเหล็กที่ป้อนเข้า แนะนำโดย ผู้เชี่ยวชาญสาขาอุตสาหกรรม เหล็ก ECCJ ประเทศญี่ปุ่น

ค่าความร้อนที่เกิดจากการ Oxidizing และ Scale เหล็กโดยประมาณการ ซึ่งแนะนำ โดยผู้ชำนาญสาขา อุตสาหกรรมเหล็กของ ECCJ ประเทศญี่ปุ่น ประมาณเท่ากับ 5,589.65 kJ/kgFe (1335 kcal/kgFe)

- ค่าความร้อนจำเพาะของ scale	kJ/kg-°C	Cps	แนะนำโดยผู้เชี่ยวชาญสาขา อุตสาหกรรมเหล็ก ECCJ ประเทศญี่ปุ่น = 0.215 (kcal/kg°C) x 4.187 kJ/kg°C
- อุณหภูมิผิวเฉลี่ย	°C	T _s	
- พื้นที่	m ²	A	

ให้ทำการวัดอุณหภูมิผิวแต่ละด้าน และพื้นที่แต่ละด้าน (ในกรณีผนังแต่ละด้านมีหลายโซน ที่อุณหภูมิแตกต่างกันมากอาจแบ่งพื้นที่แต่ละด้านเป็นหลายโซน

การคำนวณสมดุลความร้อน

การคำนวณสมดุลความร้อนของเตาสามารถวิเคราะห์ปริมาณความร้อน ต่อ Ton ของ Billet ที่ป้อนเข้า โดยจัดเตรียมข้อมูลในการวิเคราะห์ ตามขั้นตอนดังนี้

คำนวณหาปริมาณมวลสารที่ป้อนเข้าและออกจากระบบ

ก. ปริมาณมวลสารป้อนเข้าระบบ

- 1) ปริมาณมวลสารที่ป้อนเข้าต่อ ton ของ billet

$$\text{ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ (Fh}_1\text{)} = F_h \times D_2 \quad \text{kg/hr}$$

(หลังปรับค่าชดเชยเนื่องจากอุณหภูมิที่จุดใช้งาน)

ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ ต่อ ton billet (Fhb)

$$F_{hB} = (F_h)_1 / b \quad \text{kg เชื้อเพลิง / ton billet}$$

- 2) ปริมาณอากาศเผาไหม้ ต่อ ton billet

อากาศที่ใช้เผาไหม้ทางทฤษฎี (Ao)

$$A_o = 2 + (0.85 \times H_L / 1,000) \text{ Nm}^3/\text{kg เชื้อเพลิง}$$

(H_L ให้ใช้หน่วย kcal/kg)

อัตราส่วนอากาศ (m)

$$M = 21 / (21 - O_2) \quad \text{Nm}^3/\text{kg} \text{ เชื้อเพลิง}$$

ปริมาณอากาศเผาไหม้ ต่อ ton billet (Atb)

$$= A \times F_{hb} \quad \text{Nm}^3/\text{ton billet}$$

ข. ปริมาณมวลสารออกจากระบบ

1) ปริมาณก๊าซเสียทางทฤษฎี (Go)

$$Go = 1.11 (H_L/1,000) \quad \text{Nm}^3/\text{kg} \text{ เชื้อเพลิง}$$

(H_L ให้ใช้หน่วย kcal/kg)

ปริมาณก๊าซเสียจริง (G)

$$G = Go + (m-1) Ao \quad \text{Nm}^3/\text{kg} \text{ เชื้อเพลิง}$$

ปริมาณก๊าซเสีย ต่อ ton billet (Gtb)

$$= G \times F_{hb} \quad \text{Nm}^3/\text{ton billet}$$

2) ปริมาณการเกิด Scale

กรณีอัตราการเกิด scale 2%

$$= (2 / 100) \times 1,000 \quad \text{kg/ton}$$

$$= 20 \text{ kg/ton}$$

3) ปริมาณ Billet ออกจากเตา (bo)

อัตราการเกิด Scale 20 kg ต่อ 1 ton ของ Billet ที่ป้อนเข้า อัตราส่วนของ Fe โดยน้ำหนัก ใน Scale ประมาณ 75.5% (แนะนำโดยผู้เชี่ยวชาญจาก ECCJ จากประเทศญี่ปุ่น ในกรณีที่มีความจำเป็นอาจต้องใช้ข้อมูลจากการวิจัย โดยเฉพาะของเหล็กแต่ละชนิด)

$$(bo) = 1 - (0.02 \times 0.755) = 0.985 \quad \text{ton/ton billet}$$

ข.4) ปริมาณของน้ำหล่อเย็น (Wc)

$$(Wc) = \frac{Wc}{bi} \text{ kg/tonbillet}$$

ค. การคำนวณความร้อนเข้า

1) ความร้อนจากการเผาไหม้ (Qc)

$$Qc = H_L \times F_{hb} \quad \text{kJ/ton billet}$$

2) ความร้อนสัมผัส (Sensible heat) ของเชื้อเพลิง (Qf)

$$Qf = C_{pf} \times F_{hb} \times (t_f - t_{ref}) \quad \text{kJ/ton billet}$$

3) ความร้อนสัมผัสของอากาศเผาไหม้ (Qa)

$$Qa = Atb \times C_{pa} \times (T_a - T_{ref}) \quad \text{kJ/ton billet}$$

4) ความร้อนที่เกิดจากการ Formation ของ scale (Afs)

(Heat of oxidation reaction)

$$(Qfs)_1 = Qfs \times (20 \times 0.755) \quad \text{kJ/ton billet}$$

Qfs แนะนำโดยผู้เชี่ยวชาญสาขาอุตสาหกรรมเหล็ก ECCJ ประเทศญี่ปุ่น = 5589.65 kJ/kgFe (1335 kcal/kgFe) สำหรับ 1 kgFe ที่อยู่ใน scale

อัตราส่วนของ Fe โดยประมาณการเท่ากับ 75.5% อัตราส่วนของ scale 2%

ค.5) รวมความร้อนเข้า (Qi)

$$Qi = Qc + Qf + Qa + Qfs \quad \text{kJ/ton billet}$$

ง. ความร้อนออก (Qo)

- 1) ปริมาณความร้อนที่ออกไปกับผลผลิต (Qb)

$$\begin{aligned} Q_b &= (b_o) (H_{b0} - H_{bi}) \times 10^3 \\ &= 0.985 (H_{b0} - H_{bi}) \times 10^3 \quad \text{kJ/ton billet} \end{aligned}$$

- 2) ความร้อนสัมผัสของ scale (Qss)

$$\begin{aligned} Q_{ss} &= C_{ps} \times 20 \times (T_{bo} - T_{bi}) \quad \text{kJ/ton billet} \\ &\quad (\text{อัตราการเกิด scale 20\%}) \end{aligned}$$

- 3) ความร้อนสัมผัสของก๊าซเสีย (Qe)

$$Q_e = G_{tb} \times C_{pg} \times (T_g - T_{ref}) \quad \text{kJ/ton billet}$$

- 4) ความร้อนที่ออกไปกับน้ำหล่อเย็น (Qw)

$$\begin{aligned} Q_w &= (W_c) \times 4.187 (T_{wo} - T_{wi}) \quad \text{kJ/ton billet} \\ &\quad (\text{Specific heat ของน้ำ} = 4.187 \text{ kJ / kg } ^\circ\text{C}) \end{aligned}$$

- 5) ปริมาณความร้อนสูญเสียผ่านผนัง (QR) และอื่น ๆ

ปริมาณความร้อนสูญเสียผ่านผนังและอื่นๆ อาจใช้วิธีหาค่าความร้อนออกกับความร้อนเข้า ได้ดังนี้

$$Q_R = Q_i - Q_b - Q_{ss} - Q_e - Q_w \quad \text{kJ/ton billet}$$

อย่างไรก็ตามเพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องขึ้นอีก จะสามารถตรวจวัดหาค่าการสูญเสียความร้อนในแต่ละด้านได้โดยตรง หรือใช้วิธีการวิเคราะห์หาปริมาณความร้อนผ่านผนัง โดยใช้ค่าอุณหภูมิแตกต่างของผิวผนังและอุณหภูมิบรรยากาศ

ในกรณีใช้วิธีการวิเคราะห์โดยใช้ค่าอุณหภูมิแตกต่างของผิวผนังแต่ละด้าน และอุณหภูมิบรรยากาศสามารถได้ดังนี้

$$Q_R (\text{ในแต่ละด้าน}) = Q_r + Q_c$$

โดยมีรายละเอียดตามหัวข้อ ค.1

$$Q_R \text{ รวม} = (Q_{r1} + Q_{r2} + Q_{r3} + \dots + Q_{rn}) / b_i \quad \text{kJ/ton billet}$$

ในกรณีมีค่าความร้อนสูญเสียอื่น ๆ (Qot)

$$Q_{ot} = Q_i - Q_b - Q_{ss} - Q_e - Q_w - Q_R \text{ รวม} \quad \text{kJ/ton billet}$$

- ง.6) รวมความร้อนออก (Qo)

$$Q_o = Q_b + Q_{ss} + Q_e + Q_w + Q_R \quad \text{kJ/ton billet} \quad \text{หรือ}$$

$$Q_o = Q_b + Q_{ss} + Q_e + Q_w + Q_R \text{ รวม} + Q_{ot} \quad \text{kJ/ton billet}$$

ตารางที่ 2.9 ตารางสมดุลความร้อนของเตาเผาเหล็ก (Reheating Furnace)

ความร้อนเข้า	kJ/ton billet	~
1. ความร้อนจากการเผาไหม้ (Q_c)		
2. ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิง (Q_f)		
3. ความร้อนสัมผัสของอากาศเผาไหม้ (Q_a)		
4. ความร้อนที่เกิดจากการ formation ของ scale (Q_{fs}) ₁		
รวมความร้อนเข้า		
ความร้อนออก	kJ/ton billet	
1. ความร้อนที่ออกไปกับผลผลิต (Q_b)		
2. ความร้อนสัมผัสของ scale (Q_{ss})		
3. ความร้อนสัมผัสของก๊าซเสีย (Q_e)		
4. ความร้อนที่ออกไปกับน้ำหล่อเย็น (Q_w)		
5. ความร้อนสูญเสียผ่านผนัง (Q_R)		
6. ความร้อนสูญเสียอื่น ๆ (Q_{ot})		
รวมความร้อนออก		

2.5 วิธีการตรวจวัดและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบอบแห้ง

มาตรการอนุรักษ์พลังงาน

การอบเป็นกระบวนการที่ต้องใช้ความร้อนในปริมาณค่อนข้างมาก มาตรการอนุรักษ์พลังงานของเครื่องอบจึงมีความสำคัญมาก ความร้อนสูญเสียที่สำคัญในเครื่องอบมีดังต่อไปนี้

- (1) ความร้อนสัมผัสที่อากาศสำหรับอบนำออกไป
- (2) ความร้อนสูญเสียจากการนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีจากเครื่องอบ
- (3) ความร้อนสูญเสียจากการรั่วของอากาศร้อนจากช่องว่างต่างๆ ของเครื่องอบ

ดังนั้น จึงต้องตรวจสอบการแจกแจงความร้อนของเครื่องอบที่มีอยู่ให้ชัดเจน แล้วดำเนินการลดความร้อนสูญเสียด้วยการหุ้มฉนวน หรือนำไอเสียความดันต่ำกลับมาใช้ประโยชน์ เป็นต้น อย่างไรก็ตาม วิธีการข้างต้นก็ยังมีขีดจำกัด โดยพื้นฐานแล้ววิธีนำความร้อนมาใช้ประโยชน์ควรจะมีการพิจารณาเชิงโครงสร้างตั้งแต่ในขั้นตอนการออกแบบดังต่อไปนี้

(1) ในกรณีที่มีกระบวนการรีดน้ำก่อนนำไปอบ ควรจะรีดน้ำด้วยวิธีเชิงกลให้มีอัตราความชื้นต่ำที่สุดเท่าที่จะทำได้ การรีดน้ำด้วยวิธีเชิงกลแม้ว่าจะมีต้นทุนเครื่องจักรสูง แต่ค่าใช้จ่ายในการเดินเครื่องจะต่ำกว่าการอบมาก

(2) ในช่วงอบด้วยอัตราเร็วคงที่ วัสดุอบจะมีอุณหภูมิต่ำตลอดเวลา และการถ่ายเทความร้อนจึงมีประสิทธิภาพน้อย จึงควรกวหรือเป่าวัสดุอบที่มีลักษณะเป็นผงให้ฟุ้งกระจายไปในลมร้อน เพื่อลดอัตราความชื้นวิกฤตให้มีค่าต่ำลง

(3) พยายามเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนต่อปริมาตรหรือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมให้มีค่าสูงสุดเท่าที่จะทำได้ เมื่อทำเช่นนั้นแล้วตัวกลางให้ความร้อนจะมีอุณหภูมิที่ทางออกต่ำลง ทำให้ประสิทธิภาพความร้อนสูงขึ้น

(4) ในเครื่องอบแบบใช้ลมร้อน ควรนำไอเสียมาหมุนเวียนเท่าที่ปริมาตรของเครื่องอบจะยอมให้ทำได้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพความร้อนให้สูงขึ้น

2.6 สรุป

การตรวจวัด และวิเคราะห์การใช้พลังงานความร้อน มีการพูดถึงขั้นตอนและวิธีการตรวจวัด และวิเคราะห์การใช้พลังงานตามกฎกระทรวง ชนิด และวิธีการใช้อุปกรณ์เครื่องมือวัดพลังงานความร้อน วิธีการตรวจวัดและ วิเคราะห์ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ วิธีการตรวจวัด และวิเคราะห์ประสิทธิภาพของเตาเผาอุตสาหกรรม วิธีการตรวจวัด และวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบอบแห้ง

การตรวจสอบและวิเคราะห์การใช้พลังงานเบื้องต้นในเครื่องจักร และอุปกรณ์ตลอดจนระบบต่างๆ ในโรงงานควบคุมอย่างน้อยให้ดำเนินงานดังต่อไปนี้ ตรวจสอบข้อมูลเกี่ยวกับการผลิต ระบบการใช้พลังงาน ระบบการใช้เครื่องจักร และอุปกรณ์ รายละเอียดทั่วไปของโรงงาน การตรวจวัดข้อมูลรายละเอียดการทำงาน การใช้พลังงาน และการสูญเสียพลังงานของเครื่องจักร เช่น การสูญเสียการเผาไหม้เชื้อเพลิงของอุปกรณ์ที่ใช้เชื้อเพลิง การสูญเสียพลังงานจากผิวผนังเตา หม้อไอน้ำ และอุปกรณ์ใช้ความร้อนอื่นๆ รวมทั้งการสูญเสียความร้อนจากท่อไอน้ำและท่อส่งความร้อนอื่นๆ การสูญเสียไฟฟ้าเนื่องจากระบบแสงสว่าง ระบบปรับอากาศ ตลอดจนจากประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องจักร และอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ไฟฟ้า รวมถึงการมีตัวประกอบ กำลังไฟฟ้า (Power factor) ต่ำกว่าปกติ การสูญเสียอื่นๆ การตรวจวัดการใช้พลังงานและการสูญเสียพลังงาน สำหรับข้อมูลเบื้องต้นของการหาศักยภาพในการใช้พลังงานรูปแบบอื่น และประเมินศักยภาพในเบื้องต้นของการอนุรักษ์พลังงานในด้านเทคนิค และการลงทุนของเครื่องจักร อุปกรณ์ และระบบต่างๆ ในเรื่องดังต่อไปนี้ การปรับปรุงประสิทธิภาพการเผาไหม้เชื้อเพลิง การป้องกันการสูญเสียพลังงาน การนำพลังงานที่เหลือจากการใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ การเปลี่ยนไปใช้พลังงานอีกประเภทหนึ่ง จากการปรับปรุงการใช้ไฟฟ้าด้วยวิธีปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้า การลดความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดในช่วงความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบ การใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าที่เหมาะสมกับภาระ และวิธีการอื่น การใช้เครื่องจักรหรืออุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพสูง ตลอดจนระบบควบคุมการทำงาน และวัสดุที่ช่วยในการอนุรักษ์พลังงาน การอนุรักษ์พลังงานโดยวิธีอื่น

เครื่องมือวัดพลังงานความร้อนประกอบด้วย เครื่องมือวัดอุณหภูมิ เครื่องมือวัดอัตราการไหล เครื่องมือวัดอุณหภูมิประกอบด้วย เครื่องมือวัดอุณหภูมิแบบเทอร์โมคัปเปิลที่อาศัยหลักการการเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าจากความร้อน เครื่องมือวัดอุณหภูมิแบบความต้านทานซึ่งอาศัยการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของโลหะ และอโลหะ เครื่องวัดอุณหภูมิแบบการแผ่รังสี และเครื่องมือวัดอุณหภูมิแบบอื่นๆ เช่น เครื่องวัดอุณหภูมิแบบแก้ว เครื่องวัดอุณหภูมิแบบ Filled system เครื่องวัดอุณหภูมิแบบ Bimetal เครื่องวัดของไหลความร้อน เป็นต้น

ส่วนการวัดอัตราการไหล ซึ่งโดยทั่วไปจะวัด ของเหลว ก๊าซ และไอระเหย ที่ไหลอยู่ในท่อ โดยปริมาณที่วัดได้นั้นเป็นอัตราการไหลโดยปริมาตร อัตราการไหลสะสมโดยปริมาตร และอัตราการไหลโดยมวล อุปกรณ์หรือเครื่องมือวัดอัตราการไหล ได้แก่ เครื่องวัดอัตราการไหลแบบผลต่างความดัน เครื่องวัดอัตราการไหลแบบแม่เหล็กไฟฟ้า เครื่องวัดอัตราการไหลแบบอัลตราโซนิก เครื่องวัดอัตราการไหลแบบปริมาตร เครื่องวัดอัตราการไหลแบบของไหลวน เครื่องวัดอัตราการไหลแบบเทอร์โบเน่ เครื่องวัดอัตราการไหลแบบแรงโคริโอลิส เครื่องวัดอัตราการไหลแบบความร้อน เครื่องวัดความเร็วของไหล เป็นต้น

2.7 กิจกรรม (Activity)

2.6.1 ตัวอย่างการวิเคราะห์การสมดุลความร้อนของหม้อไอน้ำ

ข้อมูลทั่วไป		หน่วย		คำอธิบาย
	ชื่อโรงงาน		A	ระบุผู้ผลิต / Model / หมายเลข
	หม้อไอน้ำลูกที่		1	
	ประเภท/แบบ		Fire tube	
	ขนาดหม้อน้ำ กำลังการผลิตติดตั้งไอน้ำที่ผลิต	ton/h	10.0	ตาม Name Plate ของหม้อ ไอน้ำ
	ความดันไอน้ำสูงสุด	Bar	8	
	เวลาการทำงาน	hr/y	8,640	
ข้อมูลเชื้อเพลิง				
	ชนิดของเชื้อเพลิง	Fuel Oil	C	ระบุชนิดของเชื้อเพลิง
	ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงต่อปี	l/hr	631	อ่านจากมิเตอร์ในช่วงตรวจวัด
	อุณหภูมิไอน้ำเข้าเตาด้วย	ไฟฟ้า/ไอน้ำ		
	อุณหภูมิไอน้ำเข้าเตา ก่อนอุ่น	°C	30	
	อุณหภูมิไอน้ำเข้าเตา หลังอุ่น	°C	80	
	ชนิดของเชื้อเพลิงที่ใช้อุ่น	Fuel Oil	1	Fuel Oil C = 1, Fuel Oil A = 2, Diesel= 3
	ราคาเชื้อเพลิงเฉลี่ย	B/l	4.89	
	ความหนาแน่นของน้ำมันที่ 15 °C	kg/l	0.93	
	ความหนาแน่นที่จุดวัด	kg/l	0.89	
	ค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิง	kcal/kg : Gh	10,434	
	ค่าความร้อนขั้นต่ำของเชื้อเพลิง	kcal/kg : Lh	9,849	
	ค่าความร้อนจำเพาะของเชื้อเพลิง	kcal/kg- °C : Cp	0.45	
	อุณหภูมิอ้างอิง	Tref °C	35.5	
ขนาดหม้อไอน้ำทรงกระบอก				
	เส้นผ่านศูนย์กลาง	m	4.2	
	ยาว	m	6.3	
	พื้นที่ผิวหม้อไอน้ำ-ด้านหน้า-ด้านหลัง	sq.m	13.9	
	ด้านข้าง	sq.m	83.1	
	อุณหภูมิผิวหม้อไอน้ำ/ค่า	emissivity	ε	
	ด้านหน้า		0.8	
	ด้านข้าง		0.8	
	ด้านหลัง		0.8	
	อุณหภูมิแวดล้อมหม้อไอน้ำ	°C	35.5	
ข้อมูลจากการบันทึกข้อมูล				
	ปริมาณ CO ในก๊าซไอเสีย : pCO	ppm	16	
	ปริมาณออกซิเจนในก๊าซเสีย : O ₂	%	3.7	
	อุณหภูมิของก๊าซไอเสีย : Tg	°C	274	
	EffG จากเครื่องวัด	%	83.6	
	น้ำมันที่ใช้ : Fh	l/h	631.4	
	ปริมาณโบลวดวาร์น : B	kg/h	1%	
	อุณหภูมิผิวหม้อไอน้ำ			
	อุณหภูมิผิวของหม้อไอน้ำด้านหน้า Tsf	°C	65	

ตอนที่ 3 บทที่ 2 การตรวจวัดวิเคราะห์การใช้พลังงานความร้อน

อุณหภูมิผิวของหม้อไอน้ำด้านข้าง Tss	°C	50	
อุณหภูมิผิวของหม้อไอน้ำด้านหลัง Tsb	°C	82	
สารละลายของน้ำป้อน	ppm	TDSw	
อุณหภูมิของก๊าซไอเสีย	°C	Tg	
สารละลายของน้ำโบลดาวน์	ppm	TDSb	
ความดันของไอน้ำ	Kg/sq.cm		8.0
อุณหภูมิของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้	°C		36.5
ปริมาณน้ำป้อน	1/h	Fw	8,356.46
อุณหภูมิน้ำป้อน	°C	Tw	68
อุณหภูมิของโบลดาวน์	°C	Tb	175
Enthalpy ของน้ำอุณหภูมิอ้างอิง	Kcal/kg	href	176.6
Enthalpy ของน้ำโบลดาวน์	Kcal/kg	hb	485.4
Enthalpy ของไอน้ำ	Kcal/kg	Hg	662.0
pH ของน้ำป้อน			9.6
PH ของน้ำโบลดาวน์			12.0
TDS ของน้ำป้อน			11.0
TDS ของน้ำโบลดาวน์			1,015.0
การคำนวณ			
ความร้อนเข้า			
ความร้อนของเชื้อเพลิง	Kcal/hr	Qc	5,539,113
$Qc = F_h \times D \times L_h$			
ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิง	Kcal/h	Qs	11,262
$Qs = F_h \times D \times C_p \times (T_f - T_{ref})$			
ความร้อนสัมผัสของน้ำป้อน	Kcal/h	Qw	271,585
$Qw = F_w \times (T_w - T_{ref})$			
ความร้อนเข้า	Kcal/h	Qinput	5,821,961
$Q_{input} = Qc + Qs + Qw$			
ความร้อนออก			
ความร้อนสูญเสียในก๊าซเสีย			
ปริมาณอากาศเชิงทฤษฎี	Nm ³ /kg	Ao	10.83
$Ao = (12.38 \times L_h / 10,000) - 1.36$			
ปริมาณอากาศของก๊าซเสียเชิงทฤษฎี	Nm ³ /kg	Go	11.60
$Go = (15.75 \times LGH / 10,000) - 3.91$			
อัตราส่วนของอากาศ		M	1.21
$M = 21 / (21 - O_2)$			
ปริมาณอากาศจริงของก๊าซเสีย	Nm ³ /kg	G	13.92
$G = Go + Ao (M - 1)$			
ความร้อนสูญเสียของก๊าซเสีย	Kcal/h	Qe	616,108
$Qo = F \times D \times G \times .33 \times (T_g - T_{ref})$			

ความร้อนสูญเสียจากโบลตาว์น	Kcal/h	Qb	11,789
$Q_o = F_w \times B \times (h_b - h_{f_{at\ Tref}})$			
ความร้อนสูญเสียผ่านผนังหม้อน้ำ	Kcal/h	Qr	11,375
$Q_r = \text{Convection} + \text{Radiation}$			
ความร้อนของไอน้ำ	Kcal/hr	Qst	5,182,688
$Q_{st} = Q_{input} - Q_e - Q_b - Q_r$			
รวมความร้อนออก		Qoutput	5,821,961
$Q_{output} = Q_e + Q_b + Q_r + Q_{st}$			
ปริมาณของไอน้ำที่ผลิต	Kg/hr	E	8,273
$E = Q_{st}/(h_g - t_{ref})$			
อัตราส่วนการระเหย	Kg_steam/kg_oil	14.7	
$\text{Evap ratio} = E/(F \times D)$			
ค่าใช้จ่ายเชื้อเพลิงในการผลิตไอน้ำ	Baht/kg	0.373	
$\text{Steam cost} = (1/\text{Evap_ratio}) \times \text{fuel price}$			
ประสิทธิภาพหม้อน้ำ ความร้อนต่ำ	Eff_N	89.0%	
$\text{EFF}_N = Q_{st}/Q_{input}$			
ประสิทธิภาพหม้อน้ำ ความร้อนสูง	Eff_G	84.3%	
$\text{Eff}_G = Q_{st}/(GH \times F \times D + Q_s + Q_w)$			
ปริมาณน้ำป้อน	Kg/hr	Fw	8,356
$F_w = Q_{st}/(1 - B)$			
การสมดุลพลังงาน			

ตารางที่ 2.10 สมดุลพลังงาน

รายการ		Total
ความร้อนเข้า		
ความร้อนของเชื้อเพลิง	Mcal/hr %	5,539.1 95.1%
ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิง	Mcal/hr %	11.3 0.2%
ความร้อนสัมผัสของน้ำป้อน	Mcal/hr %	271.6 4.7%
รวม	Mcal/hr %	5,822.0 100.0%
ความร้อนออก		
ความร้อนสูญเสียของก๊าซเสีย	Mcal/hr %	616.1 10.6%
ความร้อนสูญเสียจากโบลตาว์น	Mcal/hr %	11.8 0.2%
ความร้อนสูญเสียผ่านผนังหม้อน้ำ	Mcal/hr %	11.4 0.2%
ความร้อนของไอน้ำ	Mcal/hr %	5,182.7 89.0%
รวม	Mcal/hr %	5,822.0 100.0%

2.6.2 ตัวอย่างการคำนวณสมดุลความร้อนของเตาเผาเหล็ก

ตัวอย่างการคำนวณในที่นี้ได้จากผลปฏิบัติงาน ในการตรวจสอบ และวิเคราะห์การใช้พลังงานในโรงงานเหล็กแห่งหนึ่งในประเทศไทย ในโครงการ The study (After – Care) one the Energy Conservation Project in the Kingdom of Thailand โดยมีผลจากการตรวจสอบ และวิเคราะห์ ดังนี้

ข้อมูลของเตาและข้อมูลทั่วไป

ชื่อ / หมายเลขเตา เตา 3

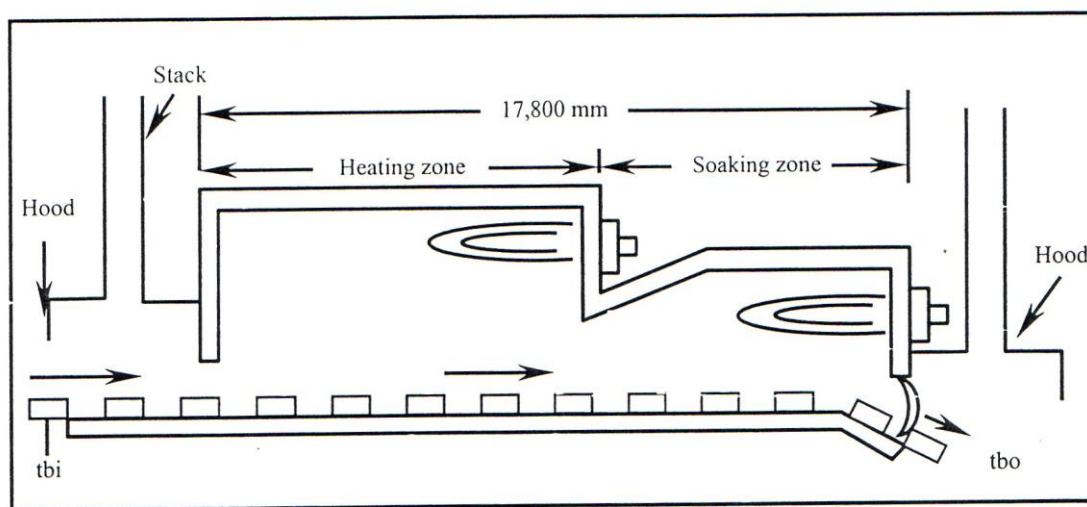
กำลังผลิต 20 ton / hr

ขนาดเตา

กว้าง 3,800 mm

ยาว 17,800 mm

สูง



รูปที่ 2.30 ลักษณะและรูปร่างของเตา

การตรวจสอบข้อมูลในการจัดทำสมดุลความร้อนของเตาเผาเหล็ก ได้ดำเนินการในช่วง 4 ชั่วโมง จาก 13.00 น. ถึง 17.00 น. เดือนกรกฎาคม

ข้อมูลการตรวจสอบ	ปริมาณ	หน่วย	สัญลักษณ์
- ชนิดของเชื้อเพลิง		น้ำมันเตา A	
- ปริมาณการใช้ที่จุดวัด	813.75	l/h	Fh
- ค่าความร้อนต่ำ	41,037	kJ/kg	H _L
		(9,801 kcal/kg)	
- ค่าความร้อนจำเพาะของเชื้อเพลิง	1.884	kJ/kg ^o C	C _{pf}
- อุณหภูมิเชื้อเพลิง	41.8	°C	T _f
- ความหนาแน่น 15 °C	0.95	kg/l	D _{f1}
- ความหนาแน่นที่จุดวัด D _{f2} =D _{f1} -0.00065 (t _r -15)	0.932	kg/l	D _{f2}
- อุณหภูมิอ้างอิง	37	°C	T _{ref}
- อุณหภูมิอากาศเผาไหม้	50	°C	T _a
- ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศ	1.30	kJ/Nm ³ °C	C _{pa}
- ปริมาณออกซิเจนในก๊าซเสีย	6.65	%	O ₂
- อุณหภูมิก๊าซเสีย	596.20	°C	T _g
- ค่าความร้อนจำเพาะเฉลี่ยของก๊าซเสีย	1.982	kJ/Nm ³ °C	C _{pg}
- ปริมาณชิ้นเหล็ก (billet) ที่ป้อนเข้า	14	ton/hr	bi
- ปริมาณชิ้นเหล็กออกจากเตา		ton/hr	bo
- อุณหภูมิของ billet			
- เข้าเตา	37	°C	T _{bi}
- ออกจากเตา	1,328	°C	T _{bo}
- ปริมาณความร้อนใน Billet			
- เข้าเตา	17.33	kJ/kg	H _{bi}
- ออกจากเตา	902.30	kJ/kg	H _{bo}
- ปริมาณน้ำหล่อเย็น	165.094	m ³ /h	We
- อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น			
- เข้า	30	°C	T _{wci}
- ออก	34.5	°C	T _{wco}
- อัตราการเกิด scale	2	%	S
(โดยทั่วไปประมาณ 1.5-2% ของชิ้นเหล็กที่ป้อนเข้า)			
- ความร้อนที่เกิดจาก Scale		kJ/kgFe	Q _{fs}

ค่าความร้อนที่เกิดจากการ Oxidizing และ Scale เหล็กโดยประมาณการ ซึ่งแนะนำ โดยผู้ชำนาญสาขาอุตสาหกรรมเหล็กของ ECCJ ประเทศญี่ปุ่น ประมาณเท่ากับ 5,589.65 kJ/kgFe (1335 kcal/kgFe)

- ค่าความร้อนจำเพาะของ scale 0.9 kJ/kg-°C C_{ps}

แนะนำโดยผู้เชี่ยวชาญสาขาอุตสาหกรรมเหล็ก ECCJ ประเทศญี่ปุ่น = 0.215 (kcal/kg^oC) x 4.187 kJ/kg^oC

ตารางที่ 2.11 อุณหภูมิผิวเฉลี่ยและพื้นที่ในแต่ละด้าน (จากการตรวจสอบและตรวจวัด)

		tw อุณหภูมิผิวเฉลี่ย (°C)	พื้นที่ (m ²)
Heating zone	ด้านซ้าย	107.1	27.078
	ด้านขวา	106.55	27.076
	เพดาน	105.42	62.64
Soaking zone	ด้านซ้าย	131.80	11.16
	ด้านขวา	106	11.16
	เพดาน	129	36.793
ด้านประตูออก Discharging	ด้านบน	88.6	4.742
	ประตูเตา	390	3.952
ด้านประตูเข้า Charging		362	7.059