



บทที่ 1

เครื่องมือวัดทางความร้อน (Thermal Measurement)

ความสำคัญของเนื้อหาวิชา

การตรวจวัดการใช้พลังงานของระบบต่างๆ ในอาคารหรือโรงงานอุตสาหกรรมเป็นขั้นตอนหนึ่งในระบบจัดการพลังงานที่มีความสำคัญไม่น้อยไปกว่าขั้นตอนอื่น ผู้ดำเนินการตรวจวัดพลังงานจำเป็นต้องมีความรู้ความเข้าใจ และที่สำคัญ คือ ทักษะในการใช้เครื่องมือวัด เพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลที่มีความถูกต้อง แม่นยำ และเชื่อถือได้ ในบทนี้เราจะกล่าวถึง อุปกรณ์และเครื่องมือวัดทางความร้อนต่างๆ ที่จำเป็นสำหรับการตรวจวัดการใช้พลังงาน

วัตถุประสงค์

1. ทราบประเภทของเครื่องมือวัดทางความร้อน
2. สามารถเลือกใช้เครื่องมือวัดได้อย่างเหมาะสมสำหรับงานแต่ละประเภท
3. เข้าใจความสำคัญของการวัดค่าพลังงานและความถูกต้องเที่ยงตรงของข้อมูล
4. สามารถตรวจวัดและบอกค่าทางความร้อนที่จำเป็นสำหรับใช้วิเคราะห์เพื่อการอนุรักษ์พลังงาน

1.1 บทนำ

เนื้อหาในบทนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับชนิดของเครื่องมือวัดทางความร้อนและวิธีใช้งาน การเลือกใช้เครื่องมือวัดให้เหมาะสมกับงานแต่ละประเภท รวมถึงความถูกต้องเที่ยงตรงของการวัดข้อมูล ค่าทางความร้อนเป็นข้อมูลที่สำคัญและจำเป็นสำหรับการประเมินทั้งการใช้พลังงานและการอนุรักษ์พลังงานของระบบต่างๆ ในอาคารและโรงงานอุตสาหกรรม โดยทั่วไปแล้ว ปริมาณการใช้พลังงานความร้อนมักแสดงในหน่วยของ ตัน ถ่านหิน ลิตรเชื้อเพลิง กิโลจูล บีทียูต่อชั่วโมง ฯลฯ ซึ่งบ่อยครั้งไม่สามารถตรวจวัด (ในหน่วยดังกล่าว) ได้โดยตรง อย่างไรก็ตาม เรายังสามารถตรวจวัดโดยทางอ้อมในรูปของอุณหภูมิ ความชื้น ความดัน และอัตราการไหลค่าเหล่านี้สามารถนำมาคำนวณเพื่อแสดงปริมาณการใช้พลังงานความร้อนได้ สำหรับเครื่องมือวัดที่เกี่ยวข้องกับความร้อนและพบเห็นใช้งานกันอย่างแพร่หลาย มีดังนี้

- เครื่องมือวัดอุณหภูมิ
- เครื่องมือวัดความชื้นสัมพัทธ์
- เครื่องมือวัดความเร็ว
- เครื่องมือวัดอัตราการไหล
- เครื่องมือวัดความดัน
- เครื่องมือวัดสภาพความเป็นกรดหรือด่าง
- เครื่องวัดสภาพการนำไฟฟ้าของน้ำ
- เครื่องมือวัดการเผาไหม้
- เครื่องมือวัดกับดักไอน้ำ

1.2 เครื่องมือวัดอุณหภูมิ

อุณหภูมิแสดงถึงระดับของพลังงานความร้อนในวัตถุ มาตรฐานอุณหภูมิในระบบ SI (International System of Units) คือ องศาเซลเซียส ($^{\circ}\text{C}$) และสำหรับระบบอังกฤษ คือ องศาฟาเรนไฮต์ ($^{\circ}\text{F}$) มาตรฐานอุณหภูมิมักกำหนดอ้างอิงกับจุดอ้างอิงสองจุด คือ จุดเยือกแข็ง (Freezing point) และจุดเดือด (Boiling point) ของน้ำ โดยในสเกลองศาเซลเซียสกำหนดให้จุดเยือกแข็ง และจุดเดือดของน้ำมีระดับอุณหภูมิ 0°C และ 100°C ตามลำดับ ในขณะที่สเกลองศาฟาเรนไฮต์กำหนดให้เป็น 32°F และ 212°F ตามลำดับ สมการคณิตศาสตร์สำหรับแปลงหน่วยระหว่างอุณหภูมิสเกลต่างๆ มีดังนี้

$$\text{Fahrenheit } (^{\circ}\text{F}) \quad F = (1.8 \times C) + 32 \quad (1.1)$$

$$\text{Celsius } (^{\circ}\text{C}) \quad C = (F - 32) / 1.8 \quad (1.2)$$

$$\text{Kelvin (K)} \quad K = C + 273.15 \quad (1.3)$$

$$\text{Rankine } (^{\circ}\text{R}) \quad R = F + 459.67 \quad (1.4)$$

ในปัจจุบัน เครื่องมือวัดอุณหภูมิมีหลากหลายรูปแบบ ซึ่งแต่ละแบบก็มีความเหมาะสมแตกต่างกันไปตามสภาวะแวดล้อมของการวัดและการประยุกต์ใช้งาน

เครื่องมือวัดอุณหภูมิที่ใช้กันอยู่ทั่วไป

- เทอร์โมมิเตอร์แบบหลอดแก้ว (Liquid-in-Glass Thermometers)
- เทอร์โมมิเตอร์แบบดิจิตอล (Digital Thermometer)
- เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple)
- เทอร์โมมิเตอร์ความต้านทาน (Resistance Thermometers - RTDS)
- เครื่องวัดอุณหภูมิแบบเทอร์มิสเตอร์ (Thermistor)
- เครื่องวัดอุณหภูมิจากการแผ่รังสี (Radiation Pyrometer)
- กล้องอินฟราเรด (Infrared Camera)

1.2.1 เทอร์โมมิเตอร์แบบหลอดแก้ว

เทอร์โมมิเตอร์ชนิดหลอดแก้ว เป็นเทอร์โมมิเตอร์ซึ่งมีของเหลวบรรจุอยู่ภายในหลอดแก้ว ที่ปลายล่างของหลอดแก้วมีกระเปาะที่เรียกว่า หลอดคาพิลลารี (Capillary Tube) ตัวหลอดแก้วมีสเกลแสดงค่าอุณหภูมิ (Scale) และปลายบนของหลอดแก้วอาจมีกระเปาะเล็กๆ ทำหน้าที่รับของเหลวส่วนที่ล้น เมื่อเกินช่วงวัดอุณหภูมิ ขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น ของเหลวในหลอดแก้วจะขยายตัวทำให้ระดับของเหลวในหลอดคาพิลลารีสูงขึ้น ความสูงของระดับของเหลวใช้สำหรับการบอกอุณหภูมิ ปริมาตรด้านบนเหนือของเหลว อาจเป็นสุญญากาศหรือเติมด้วยอากาศหรือก๊าซอย่างอื่น สำหรับช่วงอุณหภูมิสูงๆ จะใช้ก๊าซเฉื่อยเติมด้วยความดันเริ่มต้นที่ควบคุมค่าหนึ่งเพื่อที่จะทำให้ของเหลวมีจุดเดือดสูงขึ้น และเพิ่มช่วงการวัดในการใช้งาน นอกจากนี้ ความดันในส่วนนี้จะทำให้ลดโอกาสการแยกส่วนของลำของเหลวที่อยู่ภายใน

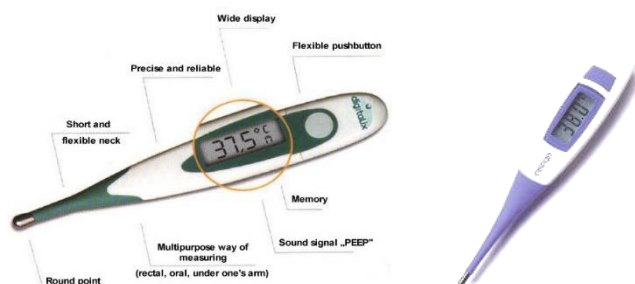
ในช่วงวัดอุณหภูมิใช้งานทั่วไป โปรทเป็นของเหลวที่ดีที่สุดสำหรับเทอร์โมมิเตอร์หลอดแก้ว และใช้งานทั่วไปในเครื่องมือระดับสูง แอลกอฮอล์ใช้งานได้ระดับน้ำพอใจ ส่วนของเหลวอย่างอื่นส่วนใหญ่จะใช้ในกรณีต้องการยืดช่วงการวัดไปที่อุณหภูมิต่ำๆ รูปที่ 1.2-1 แสดงลักษณะของเทอร์โมมิเตอร์แบบหลอดแก้ว



รูปที่ 1.2-1 เทอร์โมมิเตอร์แบบหลอดแก้ว

1.2.2 เทอร์โมมิเตอร์แบบดิจิตอล

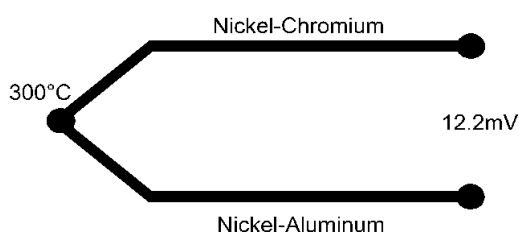
เทอร์โมมิเตอร์แบบดิจิตอลดังแสดงในรูปที่ 1.2-2 เป็นเทอร์โมมิเตอร์ที่เริ่มมีการนำมาใช้งานมากขึ้น เพื่อทดแทนการใช้เทอร์โมมิเตอร์ชนิดหลอดแก้ว โดยทั่วไป เทอร์โมมิเตอร์แบบดิจิตอลจะเป็นแบบพกพาได้ และสามารถวัดค่าเป็นจุดได้ทั้งของแข็งและของเหลว นอกจากนี้ เทอร์โมมิเตอร์แบบดิจิตอลยังให้ค่าละเอียดที่สูงกว่า 1°C



รูปที่ 1.2-2 เทอร์โมมิเตอร์แบบดิจิตอล

1.2.3 เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple)

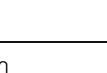
เทอร์โมคัปเปิลเป็นโลหะ 2 ชนิดต่างกัน ที่นำมาเชื่อมปลายเข้าด้วยกันที่ด้านหนึ่งซึ่งเป็นด้านที่ใช้วัดอุณหภูมิ ส่วนอีกด้านหนึ่งต่อเข้ากับอุปกรณ์ใช้งาน เทอร์โมคัปเปิลสามารถใช้สำหรับการวัดอุณหภูมิแบบติดตั้งถาวร และในบริเวณพื้นที่จำกัด เทอร์โมคัปเปิลนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจาก **ราคาถูก มีความคงทน ติดตั้งง่าย และให้ผลตอบสนองที่รวดเร็ว** ใช้งานได้หลากหลาย สามารถใช้วัดได้ทั้งอากาศ ก๊าซ และน้ำได้ ข้อเสียของเทอร์โมคัปเปิล คือ แรงดันต่ำ ความผิดพลาดของค่าที่ตรวจวัดอาจเกิดขึ้นได้สำหรับการใช้งานบางประเภทที่ต้องการความถูกต้องแม่นยำ ซึ่งอาจจำเป็นต้องใช้โคลด์จังก์ชัน (Cold Junction) รูปที่ 1.2-3 แสดงเครื่องวัดอุณหภูมิแบบเทอร์โมคัปเปิล



รูปที่ 1.2-3 เครื่องวัดอุณหภูมิแบบเทอร์โมคัปเปิล

เทอร์โมคัปเปิลที่ขายในท้องตลาดมีอยู่ด้วยกันหลายชนิด ซึ่งอาจจำแนกได้ตามช่วงของอุณหภูมิ และลักษณะการใช้งาน ตารางที่ 1.2-1 แสดงประเภทของเทอร์โมคัปเปิลและช่วงของอุณหภูมิการใช้งาน และตารางที่ 1.2-2 แสดงสภาวะแวดล้อมในการใช้งานเทอร์โมคัปเปิลแบบมาตรฐานโดยไม่ต้องใช้ Protecting Tube

ตารางที่ 1.2-1 ประเภทของเทอร์โมคัปเปิลและอุณหภูมิใช้งาน

ชนิด	ส่วนผสม	ย่านอุณหภูมิใช้งาน		โค้ดสีตามมาตรฐาน			แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ได้ mV
		°C	°F	IEC	BS	ANSI	
B	แพลทินัม - 30% โรเดียม / แพลทินัม - 6% โรเดียม	0 to 1820	32 ถึง 3310	ไม่มีกำหนด	ไม่มีกำหนด	ไม่มีกำหนด	0 ถึง 13.814
R	แพลทินัม / 13% โรเดียม	-50 to 1768	-60 ถึง 3210			-	-0.26 ถึง 21.108
S	แพลทินัม / 10% โรเดียม	-50 to 1768	-60 ถึง 3210	-		-	-0.236 ถึง 18.698
J	แพลทินัม	-210 to 760	-350 ถึง 1400				-8.096 ถึง 42.922
K	เหล็ก/คอนสแตนแตน	-270 to 1372	-450 ถึง 2500				-6.458 ถึง 54.875
T	โครเมล/อะลูเมล	-270 to 400	-450 ถึง 750				-6.258 ถึง 20.865
E	ทองแดง/คอนสแตนแตน	-270 to 1000	-450 ถึง 1830				-9.835 ถึง 76.358
	โครเมล/คอนสแตนแตน						

- แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ได้จากการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่วัดกับจุดเยือกแข็งของน้ำ

ตารางที่ 1.2-2 สภาวะแวดล้อมในการใช้งานเทอร์โมคัปเปิลแบบมาตรฐานโดยไม่ต้องใช้ Protecting Tube

ความเหมาะสมในการใช้งาน							
ชนิด	บรรยากาศ Oxidizing	บรรยากาศ Reducing	บรรยากาศ Inert	Vacuum	บรรยากาศ Sulferous	อุณหภูมิ < 0°C	มีไอของโลหะ
B	ได้	ไม่ได้	ได้	ได้ในช่วงสั้น ๆ	ไม่ได้	ไม่ได้	ไม่ได้
R	ได้	ไม่ได้	ได้	ไม่ได้	ไม่ได้	ไม่ได้	ไม่ได้
S	ได้	ไม่ได้	ได้	ไม่ได้	ไม่ได้	ไม่ได้	ไม่ได้
J	ได้	ได้	ได้	ได้	ไม่ได้ถ้า > 500 °C	ไม่ได้	ได้
K	ได้*	ไม่ได้	ได้	ไม่ได้	ไม่ได้	ได้	ได้
T#	ได้	ได้	ได้	ได้	ไม่ได้	ได้	ได้
E	ได้	ไม่ได้	ได้	ไม่ได้	ไม่ได้	ได้	ได้

* ใช้งานได้ดีกว่าแบบ E, J และ T เมื่ออุณหภูมิ > 550°C
 # โดยเฉพาะกับอุณหภูมิ < 0°C
Oxidizing : กระบวนการทางเคมีที่ดึงออกซิเจนจากภายนอกเข้าไปทำปฏิกิริยากับสารนั้น
Reducing : กระบวนการทางเคมีที่ออกซิเจนถูกดึงออกจากสารนั้นเพื่อไปทำปฏิกิริยากับสารภายนอก
Vacuum : ค่าความดันที่ต่ำกว่าบรรยากาศจนถึงสภาวะสุญญากาศ
Inert : สภาวะเฉื่อยที่ไม่เกิดปฏิกิริยาเคมี

ที่มา: <http://www.eng-temperature.com/thermocouple.html>

1.2.4 เทอร์โมมิเตอร์แบบไบเมทัลล (Bimetallic Thermometer)

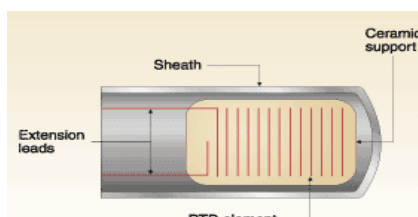
การทำงานของเทอร์โมมิเตอร์นี้ใช้หลักการขยายตัวของของแข็งสองชนิดเมื่อได้รับความร้อน โดยของแข็งหรือโลหะทั้งสองมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวและคุณสมบัติการนำความร้อนแตกต่างกัน



รูปที่ 1.2-4 เทอร์โมมิเตอร์แบบไบเมทัลล

1.2.5 เทอร์โมมิเตอร์ความต้านทาน (Resistance Thermometer - RTD)

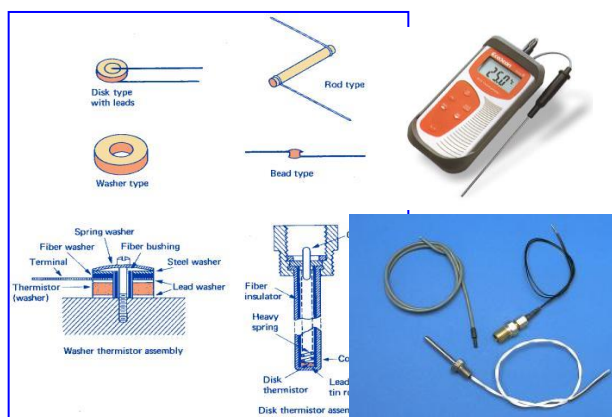
เทอร์โมมิเตอร์ความต้านทานหรืออาร์ทีดี (RTD) ทำจากโลหะที่มีความยาวค่าหนึ่ง ซึ่งทำให้เกิดความต้านทานที่ต้องการ ณ อุณหภูมิ 0°C ลวดโลหะนี้จะพันอยู่บนแกนที่เป็นฉนวนไฟฟ้าและมีสมบัติทนต่อความร้อน แกนที่ใช้เป็นวัสดุจำพวกเซรามิกหรือแก้ว ขดลวดนี้มีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและการสั่นสะเทือน ทั้งนี้เพราะเมื่อขดลวดได้รับความร้อนจะเกิดการขยายตัว และเมื่อเย็นลงก็จะหดตัว แกนที่ใช้พันจึงต้องมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวสัมพันธ์กับการขยายตัวของขดลวด อาร์ทีดีอาศัยหลักการทำงานของค่าความต้านทานไฟฟ้าในเส้นลวดโลหะที่จะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ ข้อได้เปรียบของการใช้อาร์ทีดี คือ มีความเป็นเชิงเส้นตลอดพิสัยการใช้งานดี มีพิสัยของอุณหภูมิใช้งานกว้าง มีเสถียรภาพที่ดีที่อุณหภูมิสูง และมีความถูกต้องแม่นยำสูง แต่ข้อเสีย คือ มีราคาแพง และต้องการไฟเลี้ยง



รูปที่ 1.2-5 หัววัดอุณหภูมิแบบความต้านทาน RTD

1.2.6 เครื่องวัดอุณหภูมิแบบเทอร์มิสเตอร์ (Thermistor)

เทอร์มิสเตอร์เป็นอุปกรณ์วัดอุณหภูมิที่อาศัยการเปลี่ยนแปลงความต้านทานเช่นเดียวกับ อาร์ทีดี แต่เทอร์มิสเตอร์จะใช้คาร์บอนและสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) พวกออกไซด์ของโลหะ เช่น นิเกิล เหล็ก ทองแดง แมงกานีส เป็นต้น โดยปกติ เทอร์มิสเตอร์ทำจากออกไซด์ของแมงกานีสกับทองแดง หรือออกไซด์ของ นิเกิลกับทองแดง ที่ให้สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานสูง



รูปที่ 1.2-6 รูปแบบของเทอร์มิสเตอร์ที่ใช้กันทั่วไป

ประเภทของเทอร์มิสเตอร์ จำแนกได้ดังนี้

ก) NTC (Negative Temperature Coefficient)

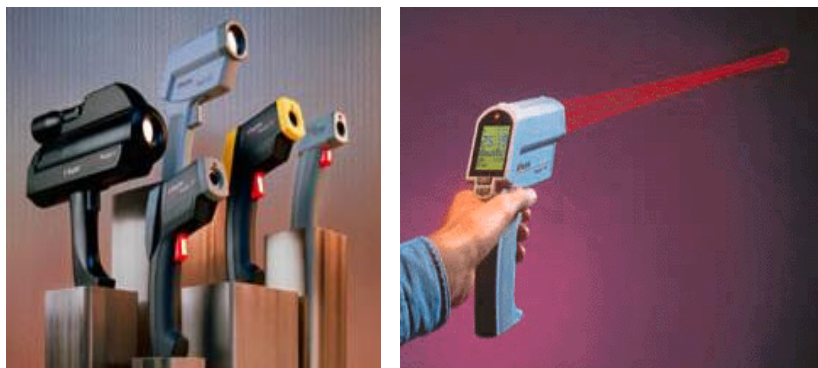
- ค่าความต้านทานลดลง เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น
- ใช้ในระบบป้องกันกระแสเกินสำหรับวงจรไฟฟ้า, อุตสาหกรรมประกอบรถยนต์ เช่น วัดอุณหภูมิของ Coolant หรือน้ำมันเครื่องเพื่อส่งข้อมูลให้ ECU

ข) PTC (Positive Temperature Coefficient)

- ค่าความต้านทานเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น
- ใช้ในระบบป้องกันกระแสเกินสำหรับวงจรไฟฟ้า, Crystal oven เพื่อควบคุมอุณหภูมิ

1.2.7 เครื่องวัดอุณหภูมิจากการแผ่รังสี (Radiation Pyrometer)

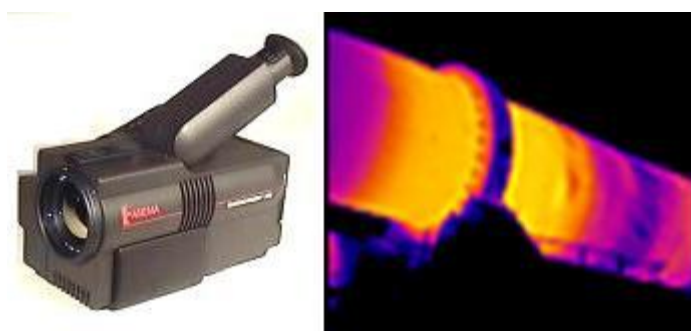
เครื่องวัดอุณหภูมิจากการแผ่รังสีเหมาะสำหรับการใช้งานในช่วงอุณหภูมิสูง (500-1600°C) ปัจจุบันได้รับความนิยมมากขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากสามารถตรวจวัดวัตถุที่มีอุณหภูมิสูงมากได้โดยตรง อีกทั้งให้ค่าที่แม่นยำรวดเร็ว เครื่องนี้มีลักษณะที่พกพาได้สะดวก ข้อเสียของเครื่องวัดชนิดนี้ คือ ราคาแพง และความแม่นยำอาจคลาดเคลื่อน เนื่องจากสภาพของพื้นผิวที่ทำการตรวจวัด อย่างไรก็ตาม อุปกรณ์รุ่นใหม่ได้รับการพัฒนาให้ดีขึ้น เพื่อลดปัญหาดังกล่าวข้างต้น โดยการตรวจวัดค่าการเปล่งรังสีออกจากพื้นผิว



รูปที่ 1.2-7 เครื่องวัดอุณหภูมิจากการแผ่รังสี

1.2.8 กล้องอินฟราเรดตรวจจับอุณหภูมิ (Infrared Camera)

วัตถุทั้งหมดที่มีอุณหภูมิสูงกว่าศูนย์องศาสัมบูรณ์จะมีการแผ่รังสีอินฟราเรดออกมา โดยความยาวคลื่นจะสั้นลงตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น กล้องอินฟราเรดอาศัยหลักการที่ว่านี้ในการวัดความแตกต่างอุณหภูมิในสถานะแวดล้อมหนึ่ง โดยการเปลี่ยนความยาวคลื่นที่ไม่สามารถมองเห็นได้ให้เป็นรูปสี หรือ ขาวดำ



รูปที่ 1.2-8 กล้องอินฟราเรดตรวจจับอุณหภูมิ

กล้องอินฟราเรดมีการใช้กันอย่างแพร่หลายไม่ว่าจะเป็นโรงงานอุตสาหกรรม อาคาร กิจการของตำรวจและทหาร สำหรับงานด้านพลังงาน โดยทั่วไป เราจะใช้กล้องอินฟราเรดในการตรวจวัดคุณสมบัติของฉนวนอาคารผนังหรือพื้นผิวร้อนต่างๆ หรือหม้อไอน้ำและเตาเผา โดยสามารถตรวจวัดจุดร้อนที่เกิดขึ้น และความแตกต่างอุณหภูมิได้ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากอุปกรณ์มีราคาที่สูง เครื่องมือนี้จึงมักใช้ในการตรวจวิเคราะห์การใช้พลังงานโดยละเอียด

1.2.9 อุปกรณ์แสดงผลอุณหภูมิ (Display or Data presentation element)

ทำหน้าที่แปลงสัญญาณที่ได้จากส่วน signal conditioning มาเป็นสิ่งที่จะสื่อความเข้าใจถึงมนุษย์ได้หรือผู้ใช้งานได้ เช่น

- การพิมพ์อักขระบนกระดาษ
- เข็มชี้บนหน้าปัด (analog indicator)
- สัญญาณไฟติด-ดับ
- รูปกราฟ

- ตัวเลขดิจิทัล (digital display)
- tape recorders
- chart recorders

1.2.10 เครื่องบันทึกอุณหภูมิ

เครื่องบันทึกอุณหภูมิ เป็นการบันทึกค่าอุณหภูมิ โดยแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1.2.10.1 เครื่องบันทึกอุณหภูมิโดยใช้กระดาษ (Hybrid Recorder) มีทั้งกระดาษที่เป็นสี่เหลี่ยมหรือ วงกลม แม้กระทั่งทรงกระบอก

1.2.10.2 เครื่องบันทึกอุณหภูมิโดยไม่ใช้กระดาษ (Paperless Recorder) แต่เป็นการเก็บค่าไว้ในหน่วยความจำ เช่น การ์ดหน่วยความจำ (Memory Card) Compact Flash (CF)/Multi Media Card (MMC), SD card, mini Card, หรือ ฮาร์ดดิสค์



รูปที่ 1.2-9 เครื่องบันทึกอุณหภูมิ

1.3 เครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์ (Humidity Sensor)

การคำนวณหรือประเมินปริมาณการใช้พลังงานของระบบปรับอากาศหรือระบบทำความเย็น เรามักจำเป็นต้องตรวจวัดความชื้นร่วมไปกับการตรวจวัดอุณหภูมิ ค่าความชื้นและค่าอุณหภูมิของอากาศที่วัดได้จะทำให้เราสามารถคำนวณค่าเอนทัลปี (Enthalpy) หรือปริมาณความร้อนที่อยู่ในอากาศ ณ ตำแหน่งที่ทำการตรวจวัด

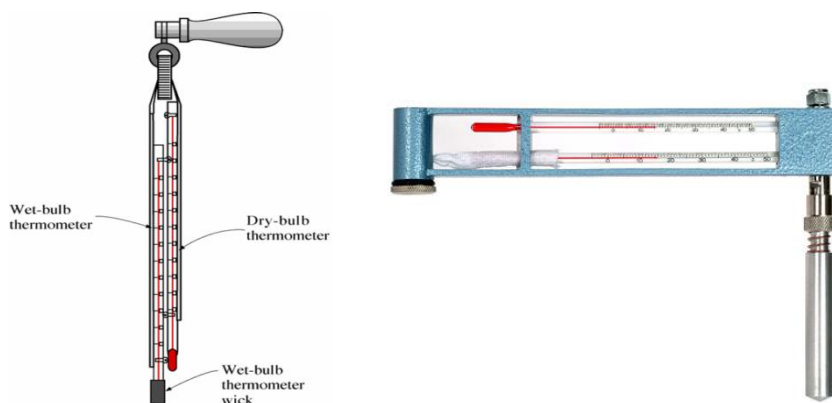
การตรวจวัดความชื้นมักจะแสดงในหน่วยของร้อยละ (%) ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่อุณหภูมิค่าหนึ่ง แสดงถึงปริมาณของไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศขณะนั้นว่ามีค่าเป็นร้อยละเท่าไรของปริมาณไอน้ำสูงสุดที่มีได้ (ปริมาณไอน้ำอิ่มตัว) ที่อุณหภูมินั้นๆ ตัวอย่างเช่น อากาศมีความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 60 ที่อุณหภูมิ 25°C หมายความว่า อากาศในขณะนั้นมีปริมาณไอน้ำอยู่ร้อยละ 60 เมื่อเทียบกับปริมาณไอน้ำอิ่มตัวในอากาศที่อุณหภูมิ 25°C

เครื่องมือวัดความชื้นสัมพัทธ์ที่ใช้กันทั่วไป

- เทอร์โมมิเตอร์กระเปาะเปียกและกระเปาะแห้ง (Wet and Dry Bulb Thermometer)
- เครื่องมือวัดความชื้นสัมพัทธ์แบบอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Relative Humidity Meter)

1.3.1 เทอร์โมมิเตอร์กระเปาะเปียก และกระเปาะแห้ง (Wet-bulb and Dry-bulb Thermometer)

เทอร์โมมิเตอร์กระเปาะเปียก และกระเปาะแห้ง ประกอบด้วย เทอร์โมมิเตอร์ 2 แห่ง โดยที่ปลายของเทอร์โมมิเตอร์แห่งหนึ่งจะถูกหุ้มด้วยผ้าเปียกชุบน้ำกลั่น ส่วนเทอร์โมมิเตอร์อีกแห่งหนึ่งจะใช้วัดอุณหภูมิของอากาศตามปกติ



รูปที่ 1.3-1 เทอร์โมมิเตอร์กระเปาะเปียกและกระเปาะแห้ง

ความชื้นของอากาศจะหาได้จากความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างเทอร์โมมิเตอร์ทั้ง 2 แห่ง โดยอาศัยหลักการการระเหยของน้ำ ซึ่งทำให้อุณหภูมิของเทอร์โมมิเตอร์ที่ปลายหุ้มด้วยผ้าเปียกมีค่าลดลง ในกรณีที่อากาศที่วัดแห้ง อัตราการระเหยของน้ำจะสูงทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของเทอร์โมมิเตอร์ทั้ง 2 แห่งมากกว่า กรณีที่อากาศมีความชื้นสูง ผลต่างของอุณหภูมิทั้งสองจะต่างกันน้อย เทอร์โมมิเตอร์กระเปาะเปียก และกระเปาะแห้งอาจ ติดตั้งอยู่บนก้านหมุน หรือติดตั้งพัดลมขนาดเล็กเพื่อที่จะให้อากาศที่วัดวิ่งผ่านเทอร์โมมิเตอร์ทั้งสอง เทอร์โมมิเตอร์กระเปาะเปียก และกระเปาะแห้งมีความแม่นยำในการตรวจวัดสูง แต่มีข้อเสียในการที่จะต้องชุบน้ำกลั่นก่อนใช้งานทุกครั้ง และต้องใช้เวลาในการตรวจวัดค่าแต่ละครั้ง

1.3.2 เครื่องมือวัดความชื้นสัมพัทธ์แบบอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Relative Humidity Meter)

เครื่องมือวัดความชื้นสัมพัทธ์แบบอิเล็กทรอนิกส์ จะวัดค่าความชื้นโดยใช้หัวเซ็นเซอร์แบบตัวเก็บประจุ (Capacitive Sensor) ซึ่งค่าความจุไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับความชื้นของอากาศที่วัด หรือเป็นหัวเซ็นเซอร์ที่ทำด้วยซิลิคอน ซึ่งค่าความนำไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงตามความชื้นของอากาศที่วัดค่า สัญญาณไฟฟ้าจากหัวเซ็นเซอร์จะถูกส่งไปยังหน่วยประมวลผล เพื่อแสดงค่าความชื้นของอากาศที่ตรวจวัด ในปัจจุบันเครื่องมือวัดความชื้นสัมพัทธ์แบบอิเล็กทรอนิกส์ มีความแม่นยำในการตรวจวัดสูง และสะดวกในการพกพาในการนำไปตรวจวัด ณ จุดต่างๆ



รูปที่ 1.3-2 เครื่องมือวัดความชื้นสัมพัทธ์แบบอิเล็กทรอนิกส์

1.3.3 เครื่องบันทึกความชื้น

เป็นเครื่องมือเก็บข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความชื้นของสถานที่หรือบริเวณที่ทำการตรวจวัด สามารถบันทึกข้อมูลแบบต่อเนื่อง และแบบไม่ต่อเนื่องได้



DATE	TIME	Tair(F)	RH(%)	Text(F)
2010-01-01	00:23:00	071.7	46.3	074.1
2010-01-01	00:24:00	071.7	46.0	073.9
2010-01-01	00:25:00	071.7	45.9	073.5
2010-01-01	00:26:00	071.8	45.6	073.1
2010-01-01	00:27:00	071.8	45.6	072.7
2010-01-01	00:28:00	071.8	45.4	072.3
2010-01-01	00:29:00	071.8	45.3	072.1
2010-01-01	00:30:00	071.8	45.3	071.8
2010-01-01	00:31:00	071.7	45.2	071.7
2010-01-01	00:32:00	071.7	45.4	071.5
2010-01-01	00:33:00	071.7	45.5	071.4
2010-01-01	00:34:00	071.7	45.5	071.3
2010-01-01	00:35:00	071.7	45.7	071.3
2010-01-01	00:36:00	071.7	45.5	071.2
2010-01-01	00:37:00	071.7	45.3	071.1
2010-01-01	00:38:00	071.7	45.4	071.1
2010-01-01	00:39:00	071.7	45.6	071.0
2010-01-01	00:40:00	071.6	45.6	071.0
2010-01-01	00:41:00	071.6	45.6	071.0
2010-01-01	00:42:00	071.6	45.5	071.0
2010-01-01	00:43:00	071.6	45.4	070.9
2010-01-01	00:44:00	071.6	45.5	070.9
2010-01-01	00:45:00	071.6	45.6	070.9
2010-01-01	00:46:00	071.5	45.7	070.9

รูปที่ 1.3-3 เครื่องบันทึกความชื้นแบบต่อเนื่อง



รูปที่ 1.3-4 เครื่องบันทึกความชื้นแบบไม่ต่อเนื่อง

1.4 เครื่องมือวัดความเร็ว (Velocity Meter)

ในปัจจุบัน มีการนำเครื่องวัดความเร็วของไหลมาใช้แทนเครื่องวัดอัตราการไหลกันมากขึ้น เนื่องจากเครื่องวัดอัตราการไหลของท่อขนาดใหญ่จะมีราคาสูงมาก หากเราสามารถนำเครื่องวัดความเร็วของไหลมาใช้แทนได้จะลดค่าใช้จ่ายลงได้มาก อย่างไรก็ตาม กรณีที่การกระจายความเร็วของไหลในท่อไม่สม่ำเสมอ หรือมีการเปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลาแล้ว ความเที่ยงตรงในฐานะที่เป็นเครื่องวัดอัตราการไหลจะไม่ค่อยดีนัก

วิธีใช้เครื่องมือวัดความเร็วของไหลในการวัดอัตราการไหลแบ่งเป็น 2 วิธี

1. **เลือกตำแหน่งที่การกระจายความเร็วภายในท่อไม่มีความปั่นป่วน** ติดตั้งเครื่องมือวัดความเร็วของไหล ณ ตำแหน่งที่สามารถวัดได้ความเร็วของไหลเฉลี่ย นำผลลัพธ์ที่ได้มาคูณกับพื้นที่หน้าตัดของท่อจะได้อัตราการไหล อนึ่ง ตำแหน่งที่จะวัดได้ความเร็วของไหลเฉลี่ย โดยประมาณจะอยู่ห่างจากผนังท่อออกมาเป็นระยะ 12% ของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ
2. **วัดความเร็วของไหลหลายๆ จุดบนพื้นที่หน้าตัดที่ซึ่งกำหนดตำแหน่งไว้ก่อนแล้ว** นำมาหาความเร็วของไหลเฉลี่ยภายหลัง หรือติดตั้งเซ็นเซอร์ความเร็วของไหลหลายๆ ตัวพร้อมกัน แล้วนำมาคำนวณหาความเร็วของไหลเฉลี่ย เครื่องวัดบางรุ่นเพียง 1 เครื่องก็มีหน้าที่การทำงานเหมือนกับมีเซ็นเซอร์ความเร็วของไหลจำนวนหลายตัว



รูปที่ 1.4-1 เครื่องมือวัดความเร็ว

1.5 เครื่องมือวัดอัตราการไหล (Flow Meter)

อัตราการไหล (Flow Rate) เป็นอีกข้อมูลหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการประเมินปริมาณพลังงาน การวัดอัตราการไหลมีอยู่ 2 ลักษณะ คือ การวัดปริมาณการไหลซึ่งมีหน่วยเป็นปริมาตร เช่น ลูกบาศก์เมตร (m^3) และการวัดอัตราการไหลซึ่งมีหน่วยเป็นปริมาณการไหลต่อหน่วยเวลา เช่น ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง (m^3/h)

เครื่องมือวัดอัตราการไหลที่นิยมใช้กันทั่วไป
• มาตรวัดอัตราการไหลแบบวัดความดันดิฟเฟอเรนเชียล
• มาตรวัดอัตราการไหลแบบแทนที่ทางปริมาตร (Positive Displacement)
• มาตรวัดอัตราการไหลแบบใบพัด (Turbine Meter) แบบ Single-Jet และ Multi-Jet
• มาตรวัดก๊าซธรรมชาติ (Natural Gas Meter)
• มาตรวัดอัตราการไหลแบบอัลตราโซนิก (Ultrasonic Flow Meter)
• มาตรวัดอัตราการไหลโดยใช้โรตามิเตอร์ (Rotameter)

1.5.1 การวัดอัตราการไหลแบบวัดความดันดิฟเฟอเรนเชียล

หากมีการติดตั้งคอคอดในท่อที่มีของไหลไหลอยู่ จะเกิดผลต่างความดันขึ้นในตำแหน่งก่อนและหลังของคอคอดนั้น เนื่องจากผลต่างความดันนี้สามารถแปลงไปเป็นอัตราการไหลได้โดยอาศัยสมการการไหลแบบต่อเนื่อง และสมการ Bernoulli ดังนั้น เมื่อเราสามารถวัดผลต่างของความดันนี้ได้ เราจะสามารถคำนวณค่าอัตราการไหลได้

เนื่องจากเครื่องมือวัดนี้ทำหน้าที่วัดผลต่างของความดัน เราจึงมักเรียกว่า **เครื่องวัดอัตราการไหลแบบผลต่างความดัน** หรืออาจเรียกอีกอย่างว่า “วิธีวัดอัตราการไหลด้วยกลไกคอคอด” วิธีวัดดังกล่าวนี้มีด้วยกันทั้งหมด 3 ลักษณะ คือ Orifice, Nozzle และ Venturi Tube อย่างไรก็ตามที่นิยมใช้กันมากที่สุดได้แก่ Orifice

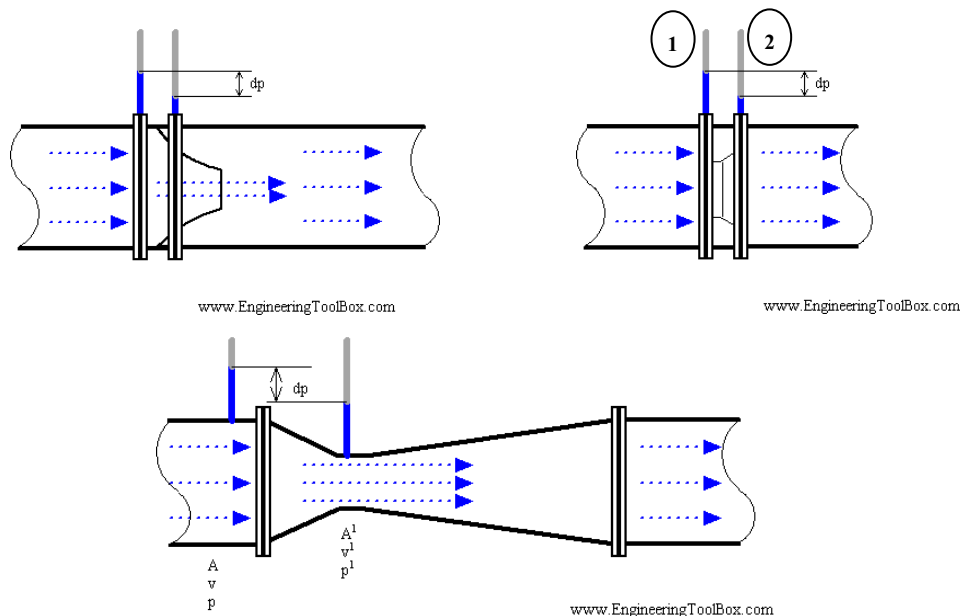
การคำนวณทางทฤษฎี

สมการเบอร์นูลลี (Bernoulli)	$P_1/\rho + V_1^2/2g + Z_1 = P_2/\rho + V_2^2/2g + Z_2$	
	$(P_1 - P_2)$	$= \rho(V_2^2 - V_1^2)/2g$ (1.5)

กฎทรงมวล	$\rho V_1 A_1 = \rho V_2 A_2$	
	$V_2 = V_1 A_1 / A_2$	(1.6)

แทน (1.6) ใน (1.5) จะหา V_1 และ V_2 ได้

และ อัตราการไหล = VA



รูปที่ 1.5-1 การวัดอัตราการไหลด้วยกลไกคอคอด Orifice, Nozzle และ Venturi Tube

1.5.2 การวัดอัตราการไหลแบบแทนที่ทางปริมาตร (Positive Displacement)

มาตรวัดการไหลของของไหลแบบแทนที่ทางปริมาตร หรือ “โพสิทีฟดิสเพลสเมนต์” เป็นมิเตอร์ที่นิยมใช้กันมากที่สุด การวัดอาศัยหลักการของการเคลื่อนที่ของไดอะแฟรมที่แปรผันโดยตรงกับปริมาตรของการไหลในท่อ มิเตอร์แบบนี้มักใช้กับการตรวจวัดของไหล เช่น น้ำ น้ำมันเชื้อเพลิง และแอลกอฮอล์ มิเตอร์สามารถต่อเข้ากับท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 6–80 mm. และสามารถวัดอัตราการไหลได้ตั้งแต่ 80 mm³/h จนถึง 24 m³/h

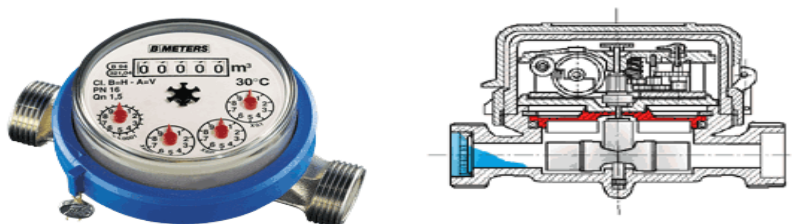


รูปที่ 1.5-2 มิเตอร์วัดน้ำมันแบบโพสิทีฟดิสเพลสเมนต์

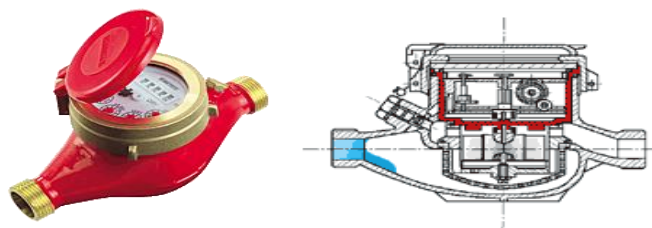
1.5.3 มาตรวัดอัตราการไหลแบบใบพัด (Turbine Meter) แบบ Single-Jet และ Multi-Jet

มิเตอร์วัดอัตราการไหลแบบใบพัดอาศัยหลักการทำงานของใบพัดที่จะหมุนไปตามกระแสการไหล โดยความเร็วของกระแสการไหลเป็นตัวกำหนดความเร็วรอบของการหมุนของใบพัด คือ เมื่อของไหลมีกระแสการไหลเร็วใบพัดก็จะหมุนเร็ว และจะถ่ายทอดการหมุนผ่านกลไก และชุดเฟืองสู่เครื่องบันทึกปริมาณการไหล มาตรวัดการไหลมีอยู่หลายลักษณะ เช่น

- มาตรใบพัดแบบช่องรับน้ำช่องเดียว (Single- Jet Meters)
- มาตรใบพัดแบบช่องรับน้ำหลายช่อง (Multi- Jet Meters)
- มาตรวัดน้ำแบบติดตั้งใบพัดแนวนอน



รูปที่ 1.5-3 มาตรใบพัดแบบช่องรับน้ำช่องเดียว (Single- Jet Meters)



รูปที่ 1.5-4 มาตรใบพัดแบบช่องรับน้ำหลายช่อง (Multi- Jet Meters)

1.5.4 มิเตอร์วัดก๊าซธรรมชาติ (Natural Gas Meter)

มิเตอร์วัดก๊าซธรรมชาติ สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทหลัก ตามการทำงานที่แตกต่างกัน คือ

1. **ไดอะแฟรมมิเตอร์** ซึ่งเป็นแบบโพสิทีฟดิสเพลสเมนต์ที่มีห้องการวัดปริมาตรคงที่ ความดันที่ตกคร่อมมิเตอร์จะทำให้เกิดการหมุน โดยจะมีก๊าซเข้าและออกจากห้องของมิเตอร์สลับกันไปมา จำนวนรอบการหมุนจะเป็นตัววัดปริมาตรของก๊าซ
2. **เทอร์ไบน์มิเตอร์** มีส่วนของโรเตอร์อยู่ภายใน ซึ่งหมุนเป็นอัตราส่วนของความเร็วที่แปรผันกับอัตราการไหลของก๊าซ

การเลือกว่ามิเตอร์ใดเหมาะสมที่สุดสำหรับการตรวจวัดก๊าซ จะขึ้นอยู่กับ

- ความดันของก๊าซที่วัด
- อัตราการไหลสูงสุดของก๊าซที่วัด
- อัตราการไหลต่ำสุดของก๊าซที่วัด

การพิจารณาขั้นต้นในการเลือกชนิดมิเตอร์วัดก๊าซ คือความดันของก๊าซ โดยทั่วไปไดอะแฟรมมิเตอร์จะใช้กับความดันไม่เกิน 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้วเกจ ขณะที่เทอร์ไบน์มิเตอร์จะใช้กับงานที่ความดันสูงกว่า 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้วเกจ

เราควรเลือกใช้มิเตอร์วัดก๊าซธรรมชาติแบบไดอะแฟรมสำหรับใช้งานที่ความดันต่ำกว่า 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้วเกจ และอัตราการไหลสูงสุดไม่เกิน 850 ลูกบาศก์ฟุตมาตรฐาน-ชั่วโมง และเลือกใช้มิเตอร์วัดก๊าซธรรมชาติประเภทเทอร์ไบน์สำหรับอัตราการไหลที่สูงกว่า 50,000 ลูกบาศก์ฟุตมาตรฐาน-ชั่วโมง

เราสามารถพิจารณาใช้มิเตอร์ได้ทั้ง 2 แบบ หากอัตราการไหลอยู่ระหว่าง 850-50,000 ลูกบาศก์ฟุตมาตรฐาน-ชั่วโมง และที่ความดันต่ำกว่า 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้วเกจ

มิเตอร์วัดก๊าซธรรมชาติรุ่นใหม่จะมีค่าความแม่นยำอยู่ที่ 1% ของค่าการอ่านตลอดช่วงการใช้งาน อนึ่ง ลูกบาศก์ฟุตมาตรฐาน (Standard Cubic Foot) หมายถึง ปริมาตรของก๊าซที่สภาวะมาตรฐาน ความดัน 14.7 psi และอุณหภูมิ 60°F



รูปที่ 1.5-5 มิเตอร์วัดก๊าซธรรมชาติ

มิเตอร์วัดอัตราการไหลก๊าซรุ่นใหม่บางรุ่นสามารถแสดงค่าอัตราการไหลของก๊าซตามสภาวะที่วัดจริงในรูปของอัตราการไหลที่สภาวะมาตรฐาน (ความดัน 14.7 psi และอุณหภูมิ 60°F) อย่างไรก็ตาม ในกรณีมิเตอร์ที่แสดงได้เฉพาะอัตราการไหลที่สภาวะจริง เราสามารถแปลงค่าอัตราการไหลจริงของก๊าซนั้นให้เป็นอัตราการไหลที่สภาวะมาตรฐาน โดยใช้สมการข้างล่างนี้

$$Q_s = Q_a \times (P_a / P_s) \times (T_s / T_a)$$

เมื่อ	Q_s	=	อัตราการไหลก๊าซที่สภาวะมาตรฐาน (SCFM)
	Q_a	=	อัตราการไหลก๊าซที่สภาวะตรวจวัด (ACFM)
	P_s	=	ความดันสมบูรณ์ที่สภาวะมาตรฐาน (psi)
	P_a	=	ความดันสมบูรณ์ที่สภาวะตรวจวัด (psi)
	T_s	=	อุณหภูมิที่สภาวะมาตรฐาน ($^{\circ}\text{R}$)
	T_a	=	อุณหภูมิที่สภาวะตรวจวัด ($^{\circ}\text{R}$) (เมื่อ $^{\circ}\text{R} = ^{\circ}\text{F} + 459.67$)

ตัวอย่างที่ 1 มิเตอร์วัดอัตราการไหลของก๊าซได้ 1,000 ACFM ที่ความดันเกจ 87 psi อุณหภูมิ 95 $^{\circ}\text{F}$ จงคำนวณอัตราการไหลของก๊าซที่สภาวะมาตรฐาน (ความดัน 14.7 psi และอุณหภูมิ 60 $^{\circ}\text{F}$)

$$\begin{aligned} Q_s &= Q_a \times (P_a / P_s) \times (T_s / T_a) \\ &= 1,000 \times (87+14.7) / (14.7) \times (60 + 459.67) / (95 + 459.67) \\ &= 6,481.1 \quad \text{SCFM} \end{aligned}$$

1.5.5 การวัดอัตราการไหลแบบอัลตราโซนิก (Ultrasonic Flow Meter)

การวัดอัตราการไหลแบบอัลตราโซนิกมีหลักการวัดคืออาศัยคลื่นความถี่เหนือเสียง โดยอาศัยการสะท้อนกลับของคลื่นความถี่เมื่อส่งไปกระทบกับอนุภาคของสารที่ปะปนมากับของเหลว เนื่องจากอนุภาคของสารมีความเร็วเท่ากับของไหล ดังนั้น ความเร็วในการสะท้อนกลับจะต่างไปจากค่าที่ส่งออกไป ค่าความถี่ที่เปลี่ยนไปนี้จะแปรผันตรงกับความเร็วในการไหลของของไหล เราจึงสามารถทราบค่าอัตราการไหลของของไหลได้



รูปที่ 1.5-6 การวัดอัตราการไหลแบบอัลตราโซนิก

1.5.6 การวัดอัตราการไหลโดยใช้โรตاميเตอร์ (Rotameter)

ตัวมิเตอร์เป็นแก้วใสซึ่งด้านในเป็นรูปกรวยเรียว และมีลูกลอย ซึ่งออกแบบพิเศษบรรจุอยู่ภายในของไหลที่ต้องการวัดไหลผ่านเข้ามาทางด้านล่างของลูกลอย ลูกลอยถูกยกขึ้นด้วยเฮดความเร็ว (Velocity Head) ตำแหน่งของลูกลอยจะขึ้นอยู่กับที่เมื่อเกิดสมดุลระหว่าง เฮดความเร็ว กับ น้ำหนักของลูกลอย เมื่อลอยสูงขึ้น พื้นที่สำหรับให้ของไหลไหลผ่านก็จะมากขึ้น เป็นการรักษาความดันตกคร่อมตัววัดให้คงที่ เนื่องจากเฮดความเร็วกับอัตราการไหลจะแปรเปลี่ยนไปตามกัน ดังนั้น ตำแหน่งของลูกลอยจะบอกค่าอัตราการไหลได้



รูปที่ 1.5-7 การวัดอัตราการไหลโดยใช้โรตاميเตอร์ (Rotameter)

1.6 เครื่องมือวัดความดัน (Pressure Meter)

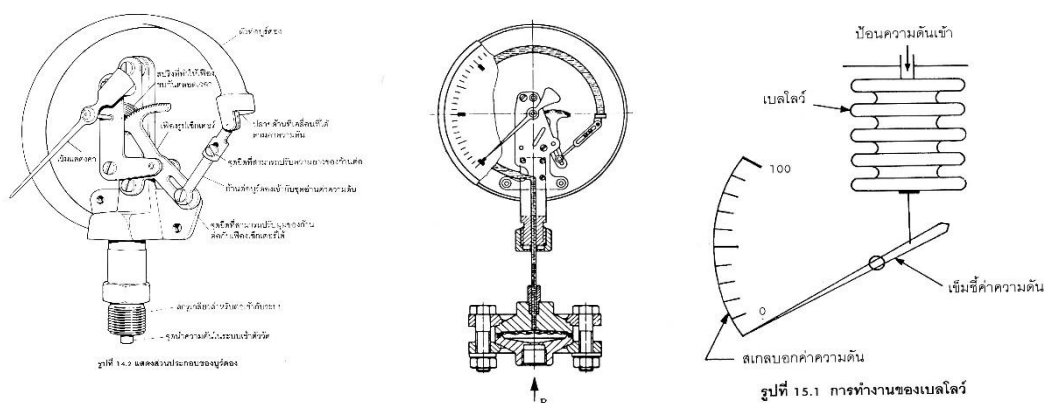
การตรวจวัดความดันเป็นสิ่งสำคัญสำหรับสถานประกอบการซึ่งมีการใช้ระบบอากาศอัด หรือใช้ระบบการส่งจ่ายไอน้ำจากส่วนกลาง ระบบดังกล่าวจะมีการสูญเสียความดันเกิดขึ้นในระบบ เนื่องจากผู้ใช้ปลายทาง หรือการรั่วไหล ซึ่งการตรวจวัดความดันของระบบดังกล่าวจะทำให้ทราบถึงการรั่วไหล การใช้งานที่ไม่ถูกต้อง หรือการกำหนดตารางเวลาใช้งานที่ไม่เหมาะสมของไอน้ำหรืออากาศอัด ดังนั้น การใช้อุปกรณ์วัดความดันจะช่วยให้สามารถลดการใช้พลังงานได้ และทำให้การใช้งานมีประสิทธิภาพสูงขึ้น

เครื่องมือวัดความดันที่นิยมใช้กันทั่วไป

- เกจวัดความดัน (Pressure Gauge)
- ทรานสดิวเซอร์ความดัน (Pressure Transducer)

1.6.1 เกจวัดความดัน (Pressure Gauge)

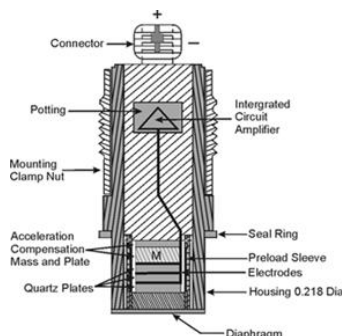
เกจวัดความดันนิยมใช้มากที่สุดในอุตสาหกรรม เพราะเป็นแบบที่มีโครงสร้างง่าย ราคาถูก วัดความดันได้ถึงย่านสูงๆ ความเที่ยงตรงดีเมื่อเทียบกับราคา สามารถแบ่งย่อยได้เป็น 3 แบบ คือ แบบบูร์ดอง แบบเบลโลว์ และแบบไดอะแฟรม



รูปที่ 1.6-1 เกจวัดความดันแบบต่างๆ
(ซ้าย:บูร์ดอง, กลาง:ไดอะแฟรม, ขวา:เบลโลว์)

1.6.2 ทรานสดิวเซอร์ความดัน (Pressure Transducer)

การทำงานของทรานสดิวเซอร์ความดันจะขึ้นอยู่กับความดันของไดอะแฟรม ซึ่งจะมีผลต่อเครื่องกำเนิดความถี่แบบผลึกควอตซ์ การเปลี่ยนแปลงความถี่ของเครื่องกำเนิดความถี่ จะเป็นไปตามความดันที่เข้าอุปกรณ์ ซึ่งอุปกรณ์ประเภทนี้มีขนาดเล็กกะทัดรัด คงทน และราคาไม่สูง เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ติดตั้งภายนอกท่อของก๊าซ อากาศอัด หรือไอน้ำ โดยปกติจะมีค่าความผิดพลาด 0.01% โดยมีอายุการใช้งานนานหลายสิบปี



รูปที่ 1.6-2 ทรานสดิวเซอร์ความดัน

1.7 เครื่องมือวัดสภาพความเป็นกรดหรือด่าง (pH Meter)

สภาพความเป็นกรด-ด่าง วัดโดยการบอกระดับ pH ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 1 ถึง 14 น้ำที่ดี ควรมีสภาพเป็นกลาง คือ มี pH เท่ากับหรือใกล้เคียง 7 สามารถใช้ประโยชน์ เพื่อการอุปโภคบริโภค และเพื่อการเกษตรอุตสาหกรรมได้ องค์การอนามัยโลก กำหนดว่า แม่น้ำ ลำคลองใดๆ ที่ต้องการใช้เป็นแหล่งน้ำดิบ เพื่อผลิตน้ำประปา เพื่อเป็นน้ำดื่ม และน้ำใช้ แหล่งน้ำนั้นควรมีค่า pH อยู่ในช่วง 5-9 ถ้าน้ำมีสภาพเป็นกรด ค่า pH จะลดลง เช่น 1 ถึง 4 เป็นต้น ส่วนน้ำที่เป็นด่าง มีค่า pH สูงกว่า 7 ซึ่งอาจเป็น 10 ถึง 13 เป็นต้น น้ำในแม่น้ำลำคลองมีสภาพเป็นกรด-ด่างมากเกินไป ส่วนใหญ่เกิดจากแม่น้ำ ลำคลองนั้นๆ ปนเปื้อนด้วยน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม



รูปที่ 1.7-1 เครื่องมือวัดสภาพความเป็นกรดหรือด่าง

1.8 เครื่องวัดสภาพการนำไฟฟ้าของน้ำ (Conductivity Meter)

เครื่องมือวัดค่าการนำไฟฟ้าของน้ำ โดยใช้ขั้วไฟฟ้าโลหะ 2 ขั้วแยกกัน โดยมีระยะห่างคงที่ ซึ่งออกแบบให้ใช้มือถือได้และใช้กับแบตเตอรี่โดยไม่ต้องใช้สายไฟ หลักการของเครื่องมือใช้การชดเชยค่าการนำไฟฟ้าอัตโนมัติโดยสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำ ค่าที่วัดได้ควรอยู่ในช่วง 0-1990 ไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร ($\mu\text{S}/\text{cm}$) โดยเครื่องมือนี้ควรทำการตั้งค่ามาตรฐานโดยใช้สารละลายมาตรฐาน

ค่าการนำไฟฟ้าจะถูกใช้เป็นเครื่องมือวัดเพื่อประมาณความเข้มข้นของของแข็งที่ละลายในน้ำความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้า และค่าปริมาณของแข็งที่ละลายอยู่ในน้ำ (Total Dissolved Solids, TDS) เป็นดังนี้

$$\text{TDS (ppm)} = \text{Conductivity } (\mu\text{S}/\text{cm}) \times 0.7$$


รูปที่ 1.8-1 เครื่องมือวัดสภาพการนำไฟฟ้าของน้ำ

1.9 เครื่องมือวัดประสิทธิภาพการเผาไหม้ (Flue Gas Analyzer)

ประสิทธิภาพการเผาไหม้ของหม้อไอน้ำ หรือเตาเชื้อเพลิงจะสามารถวัดได้จากการตรวจวัดส่วนประกอบของก๊าซที่ปล่อยทิ้งออกทางปล่อง โดยปริมาณ O_2 CO หรือ CO_2 ในก๊าซ และอุณหภูมิของก๊าซที่ปล่อยทิ้ง จะใช้ในการคำนวณการสูญเสียความร้อนทางปล่อง และประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตาเชื้อเพลิง ซึ่งเครื่องมือวัดการเผาไหม้สมัยใหม่ จะมีโปรแกรมตรวจวัดที่วัดตัวแปรทั้งหมด และสามารถให้ผู้ใช้งานคุณสมบัติของเชื้อเพลิงได้ ซึ่งเครื่องจะให้ผลการตรวจวัดของก๊าซ และผลการคำนวณประสิทธิภาพการเผาไหม้ออกมาโดยอัตโนมัติ

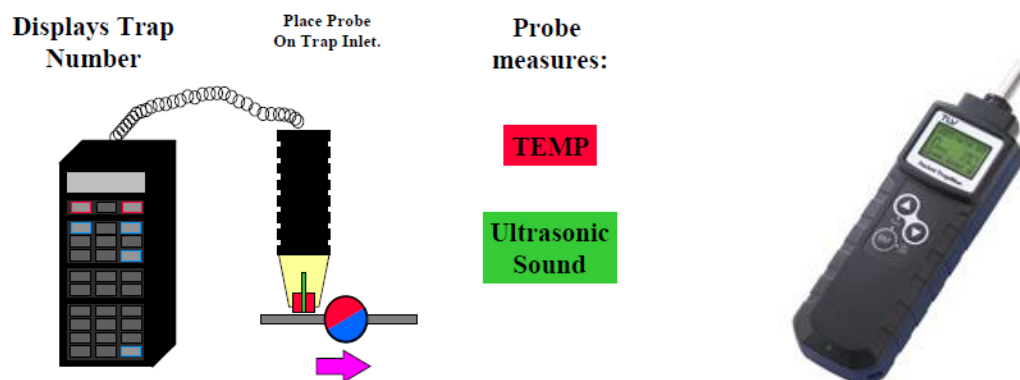


รูปที่ 1.9-1 เครื่องมือวัดประสิทธิภาพการเผาไหม้

1.10 เครื่องมือวัดกับดักไอน้ำ

การตรวจวัดสภาพของ กับดักไอน้ำ เพื่อความปลอดภัยจากปัญหาค้อนน้ำ ประหยัดต้นทุนการผลิต และประหยัดพลังงาน เพิ่มประสิทธิภาพและคุณภาพของขบวนการผลิต และลดปัญหาการชำรุดของกับดักไอน้ำ (Steam trap) ที่เร็วกว่าปกติ ซึ่งควรทำการตรวจวัดเป็นประจำ โดยใช้การฟังเสียง การตรวจวัดอุณหภูมิ หรือการใช้เครื่องมือตรวจวัดกับดักไอน้ำโดยเฉพาะ

Test a Trap



รูปที่ 1.10-1 เครื่องมือวัด กับดักไอน้ำ

1.11 ความถูกต้องของค่าข้อมูลตรวจวัด

ข้อมูลการใช้พลังงานที่ถูกต้องแม่นยำช่วยให้ทราบถึงสถานการณ์การใช้พลังงานของสถานประกอบการ และช่วยให้การกำหนดมาตรการอนุรักษ์พลังงานเป็นไปอย่างถูกต้อง

องค์ประกอบของความถูกต้องของค่าข้อมูลตรวจวัด
1.11.1 ความคลาดเคลื่อน
ความคลาดเคลื่อน หมายถึง “ผลต่างระหว่างค่าที่วัดได้กับค่าที่แท้จริง” โดยค่าที่แท้จริง หมายถึง “ค่าที่ถูกต้องของปริมาณที่กำลังวัด” อย่างไรก็ตาม เราไม่สามารถทราบค่าที่แท้จริงได้ การวัดต้องกระทำอย่างระมัดระวัง กำจัดสาเหตุของความคลาดเคลื่อน และวัดหลายๆ ครั้งเพื่อนำมาคำนวณค่าเฉลี่ย เพื่อให้ได้ค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่แท้จริงมากที่สุด โดยทั่วไปแล้ว เราจะถือว่าค่าที่วัดได้นี้เป็นค่าที่แท้จริง
สาเหตุของความคลาดเคลื่อนสำหรับการวัด ได้แก่
• ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากหลักการและวิธีการวัด • ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากเครื่องมือวัด • ความคลาดเคลื่อนจากสภาพแวดล้อมในขณะที่วัด
สภาพแวดล้อม อุณหภูมิรอบข้าง ความชื้น การสั่นสะเทือน แรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟ ฯลฯ ส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนจากสภาพแวดล้อมในขณะที่วัด ซึ่งเป็นสิ่งที่ต้องพึงระมัดระวัง การใช้เครื่องมือวัดต้องเป็นไปตามเงื่อนไขที่กำหนดตามมาตรฐานหรือตามผู้ผลิต การใช้เครื่องมือวัดภายใต้สภาพแวดล้อมที่แตกต่างไปจากที่กำหนดจะส่งผลให้ค่าวัดที่ได้มีความคลาดเคลื่อนสูง

ประเภทของความคลาดเคลื่อน

- **ความคลาดเคลื่อนจากระบบ** เป็นความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากสาเหตุที่ทำให้ผลการวัดมีความเอนเอียง และหากเราทราบสาเหตุนั้นก็สามารถชดเชยค่า เพื่อกำจัดความคลาดเคลื่อนนี้ได้ (รูปที่ 1.11-1)
- **ความคลาดเคลื่อนโดยบังเอิญ** เป็นความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากสาเหตุเล็กๆ น้อยๆ ผลของความคลาดเคลื่อนทำให้ค่าที่วัดได้มีการแจกแจงดังรูปที่ 1.11-1 ลักษณะการแจกแจงแบบนี้เรียกว่า การแจกแจงปกติ ซึ่งโดยทั่วไปจะแสดงระดับความไม่สม่ำเสมอด้วย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
- **ความผิดพลาด** เป็นความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากความพลั้งเผลอของผู้วัด

1.11.2 ความเที่ยงตรงกับพิสัยความเที่ยงตรง

ความเที่ยงตรงหรือพิสัยความเที่ยงตรงของเครื่องวัด หมายถึง “ช่วงของความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ยอมให้มีได้ตามข้อกำหนดเฉพาะของแต่ละรุ่นของอุปกรณ์วัด”

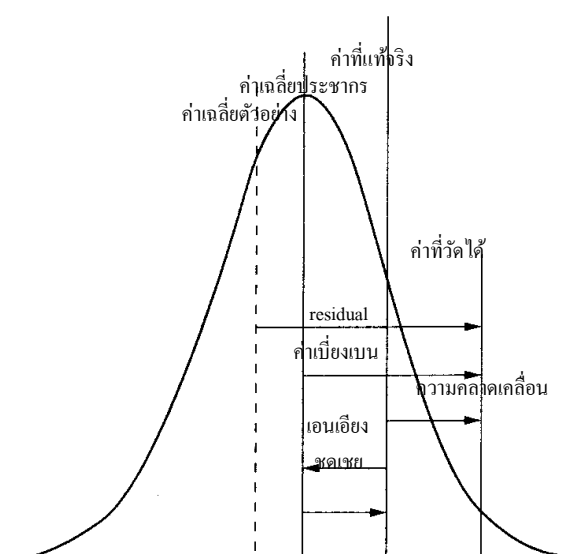
1.11.3 ความไม่แน่นอน

ความไม่แน่นอน นิยามได้ว่าเป็น “ค่าคาดการณ์ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าที่แท้จริงของปริมาณที่วัดนั้นอยู่ในช่วงใด” ความไม่แน่นอนสื่อถึงความเชื่อถือได้ของค่าที่วัดได้ สาเหตุของความไม่แน่นอนเกิดจากความคลาดเคลื่อนจากระบบ และความคลาดเคลื่อนโดยบังเอิญ อย่างไรก็ตาม โดยมากจะมีสาเหตุมาจากประการหลัง ความไม่แน่นอน อาจนิยามว่าเป็น “ช่วงที่มีค่าที่วัดได้เป็นศูนย์กลาง และมีความน่าจะเป็น 95% ที่ค่าที่แท้จริงจะอยู่ในช่วงนั้น”

1.11.4 ช่วงการวัด (Range, Span, Full Scale)

Range คือ “ช่วงของปริมาณที่สามารถวัดได้ด้วยเครื่องวัด” โดยผลต่างระหว่างค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของ Range เรียกว่า **Span** ตัวอย่างเช่น เมื่อ Range เท่ากับ -50°C ถึง 200°C แล้ว Span จะเท่ากับ 250°C สำหรับคำว่า **Full Scale (FS)** โดยทั่วไปจะมีความหมายเช่นเดียวกับ Span

ความเที่ยงตรงหรือพิสัยความเที่ยงตรงนั้น โดยทั่วไปจะแสดงเป็นร้อยละ (%) เทียบกับ Span (หรือ Full Scale) แต่บางครั้งก็แสดงเป็นร้อยละเทียบกับค่าที่วัดได้ ในกรณีแรก ถ้าเราต้องการระบุความหมายให้ชัดเจน จะระบุว่า $\pm () \%$ ของ Span หรือ $\pm () \%$ FS ส่วนในกรณีหลังจะระบุว่า $\pm () \%$ ของค่าที่อ่านได้ เป็นต้น



รูปที่ 1.11-1 การแจกแจงของค่าที่วัดได้

1.11.5 การเลือกใช้เครื่องมือวัดให้เหมาะสม
1. ความน่าเชื่อถือ - มีความสำคัญโดยเฉพาะกับสถานประกอบการที่พนักงานต้องใช้เครื่องมือวัดร่วมกัน 2. ราคา - มีผลต่อการเลือกซื้อเครื่องมือวัด อย่างไรก็ตามต้องคำนึงถึงความน่าเชื่อถือของเครื่องมือวัดด้วย 3. ความถี่ในการใช้งาน - ถ้าเครื่องมือมีการใช้งานน้อยควรพิจารณาเครื่องมือที่ราคาต่ำกว่าและใช้งานง่ายกว่า 4. ค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษา - ควรมีค่าบำรุงรักษาต่ำ และต้องแน่ใจว่าเครื่องมือได้รับการสอบเทียบอย่างสม่ำเสมอ 5. ย่านการตรวจวัด - ต้องมีย่านในการวัดที่รองรับการใช้งานทั้งในปัจจุบันและอนาคต 6. พกพาสะดวก - มีความสำคัญ เมื่อจำเป็นต้องมีการนำเครื่องมือวัดไปใช้ในสถานที่ต่างๆ

1.12 ขั้นตอนการเก็บรวบรวมข้อมูล

การจัดการพลังงานอาจไม่ต้องการความแม่นยำของข้อมูลที่สูงนัก แต่ที่สำคัญมากกว่า คือ กระบวนการเก็บข้อมูลที่ถูกต้อง ซึ่งประเด็นสำคัญที่ต้องพิจารณาในกระบวนการเก็บรวบรวมข้อมูล คือ

กระบวนการเก็บข้อมูลที่ถูกต้อง
1.12.1 การเก็บรวบรวมข้อมูล
1. ใบเสร็จค่าพลังงานรายเดือนบางประเภทจะมีข้อมูลที่ไม่ละเอียดพอที่จะนำไปใช้ในการจัดการพลังงาน 2. การเก็บรวบรวมข้อมูลโดยเจ้าหน้าที่ แม้มีค่าใช้จ่ายต่ำ แต่ความแม่นยำก็น้อยด้วยเช่นกัน 3. การเก็บรวบรวมข้อมูลโดยเจ้าหน้าที่ร่วมกับเครื่องบันทึกข้อมูล จะให้ความแม่นยำสูงขึ้น และสามารถถ่ายข้อมูลที่บันทึกไว้ไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์ได้โดยตรง 4. การเก็บรวบรวมข้อมูลโดยอัตโนมัติทั้งหมดมีข้อดี คือ ความถี่ของการเก็บข้อมูลสูงขึ้น ความผิดพลาดและเวลาการอ่านข้อมูลลดลง แต่ข้อเสีย คือ มีค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสูง
1.12.2 ความถี่ในการเก็บรวบรวมข้อมูล
1. การเก็บรวบรวมข้อมูลที่มากเกินไปทำให้มีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการสูง แต่การเก็บรวบรวมข้อมูลที่ไม่เพียงพอจะทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์การใช้พลังงานได้อย่างครอบคลุม 2. ค่าใช้จ่ายในการเก็บรวบรวมข้อมูลต้องไม่สูงกว่ามูลค่าของพลังงานที่ประหยัดได้

1.13 การตรวจวัดเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน

ขั้นแรกของการดำเนินการอนุรักษ์พลังงาน คือ การตรวจวัดการใช้พลังงาน โดยเริ่มตั้งแต่แหล่งผลิตพลังงาน เส้นทางนำพลังงาน จนถึงจุดที่มีการใช้พลังงาน การตรวจวัดการใช้พลังงานควรดำเนินการสำหรับแต่ละกระบวนการผลิต หรือแต่ละเครื่องจักร เมื่อตรวจสอบการใช้พลังงานแล้วจะทำให้เราทราบว่าการสูญเสียพลังงานเกิดขึ้นในขั้นตอนใด และสามารถกำหนดเป้าหมายเพื่อลดการสูญเสีย (เป้าหมายการอนุรักษ์พลังงาน) รวมถึงหามาตรการปรับปรุงต่อไปได้

ขั้นตอนการตรวจวัดเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน
1.13.1 การติดตั้งเครื่องวัด
ในโรงงานและอาคาร ข้อมูลที่ควรตรวจวัดอย่างน้อยที่สุดให้เป็นไปตามที่ระบุไว้ในข้อกำหนดของกฎหมายด้านการอนุรักษ์พลังงาน ซึ่งเครื่องมือตรวจวัดที่เกี่ยวข้องกับพลังงานความร้อนมีมากมาย เช่น มาตรวัดอัตราไหล เทอร์โมมิเตอร์ เกจวัดความดัน เครื่องวัด O_2 ในไอเสีย โวลต์มิเตอร์ แอมป์มิเตอร์ วัดค่ามิเตอร์ ฯลฯ โดยควรติดตั้งไปตามความเหมาะสม
1.13.2 การตรวจวัดการไหลของพลังงานในเชิงปริมาณ
การตรวจวัดการไหลของพลังงานด้วยเครื่องวัดทำให้ทราบปริมาณพลังงานที่ใช้และสูญเสียไปในแต่ละขั้นตอนตามกระบวนการผลิตในโรงงานหรือพื้นที่ต่างๆ ในอาคาร
1.13.3 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างการทำงานกับการใช้พลังงาน
สภาพการทำงานในแต่ละโรงงานอาจแตกต่างกันไป แม้ว่าจะผลิต ผลิตภัณฑ์ชนิดเดียวกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบ ปริมาณการผลิต คุณภาพที่ต้องการ และสภาพแวดล้อมโดยรอบ การเก็บข้อมูลการใช้พลังงานในสภาพการทำงานต่างๆ จะทำให้ทราบแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงการใช้พลังงาน และสามารถค้นพบสภาพการทำงานที่มีประสิทธิภาพสูงได้
1.13.4 การบันทึก เรียบเรียง และสร้างกราฟข้อมูลที่วัดได้
ข้อมูลที่จัดเก็บมาได้ ต้องนำมาเรียบเรียงและจัดทำเป็นกราฟหรือตารางเพื่อให้ทราบและเข้าใจแนวโน้มของการใช้พลังงานและการสูญเสียที่เกิดขึ้น ในกรณีที่ข้อมูลถูกบันทึกในคอมพิวเตอร์ ปัจจุบันมีซอฟต์แวร์จำนวนมากที่ช่วยวิเคราะห์ข้อมูล ทำให้การวิเคราะห์ข้อมูลมีความสะดวก รวดเร็ว และมีประสิทธิภาพมาก
1.13.5 การควบคุมการใช้พลังงานต่อหน่วย
ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้พลังงานระหว่างสถานประกอบการต่างๆ ที่มีกิจกรรมหรือผลิตภัณฑ์ลักษณะเดียวกัน โดยทั่วไปจะพิจารณาจากค่าการใช้พลังงานต่อหน่วย ● ในกรณีของโรงงาน การใช้พลังงานต่อหน่วย หมายถึง ปริมาณพลังงานที่ใช้ไปสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์หนึ่งหน่วย และในกรณีของอาคารจะหมายถึงการใช้พลังงานต่อหน่วยพื้นที่ของอาคาร ● การใช้พลังงานหากพลังงานนั้นคือเชื้อเพลิง เราจะเรียกว่า การใช้เชื้อเพลิงต่อหน่วย และหากเป็นไฟฟ้าจะเรียกว่า การใช้พลังงานไฟฟ้าต่อหน่วย ● ในกรณีที่โรงงานหรืออาคารมีการใช้ทั้งพลังงานความร้อนและไฟฟ้า การคำนวณการใช้พลังงานต่อหน่วย จะต้องแปลงพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานปฏุมภูมิแล้ว จึงรวมเข้ากับปริมาณความร้อน เพื่อให้ได้ค่าผลรวมของการใช้พลังงาน ● การเปรียบเทียบการใช้พลังงานต่อหน่วยระหว่างสถานประกอบการ จะต้องเป็นไปอย่างระมัดระวัง เนื่องจากประเภทของกิจการ ผลิตภัณฑ์ รวมถึงวิธีการเก็บข้อมูลมีผลต่อค่าการใช้พลังงานต่อหน่วย แต่อย่างน้อยที่สุดแต่ละโรงงานหรืออาคารควรมีการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงค่าการใช้พลังงานต่อหน่วยของตนเองอยู่เสมอ เช่น เปรียบเทียบค่าการใช้พลังงานต่อหน่วยกับเดือนก่อน หรือปีก่อน หากการใช้พลังงานต่อหน่วยเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัย ก็ต้องวิเคราะห์หาสาเหตุและจัดทำมาตรการปรับปรุง

สรุปเนื้อหาวิชา

1. เครื่องมือที่ใช้วัดพลังงานด้านความร้อน

การตรวจวัดพลังงานด้านความร้อนโดยส่วนใหญ่เป็นการวัดตัวแปรพื้นฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้านความร้อน ซึ่งประกอบไปด้วย อุณหภูมิ ความชื้น อัตราการไหล ความดัน และการเผาไหม้ ตารางข้างล่างแสดงเครื่องมือที่ใช้วัดข้อมูลต่างๆ

ข้อมูล	เครื่องมือวัด
อุณหภูมิ	- เทอร์โมมิเตอร์แบบหลอดแก้ว - เทอร์โมมิเตอร์แบบดิจิตอล - เทอร์โมคัปเปิล - เทอร์โมมิเตอร์ความต้านทาน - เทอร์มิสเตอร์ - เครื่องวัดอุณหภูมิจากการแผ่รังสี - กล้องอินฟราเรด - Bimetallic thermometer
ความชื้นสัมพัทธ์	- เทอร์โมมิเตอร์กระเปาะเปียกและกระเปาะแห้ง - เครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์แบบอิเล็กทรอนิกส์
ความเร็วของของไหล	- เครื่องวัดความเร็วของไหล
อัตราการไหล	- เครื่องวัดอัตราการไหลแบบ Differential pressure - เครื่องวัดอัตราการไหลแบบ Positive displacement - มาตรวัดปริมาณการไหลแบบใบพัด - มิเตอร์วัดก๊าซธรรมชาติ - เครื่องวัดอัตราการไหลแบบอัลตราโซนิก - โรตاميเตอร์
ความดัน	- เกจวัดความดัน - ทรานสดิวเซอร์ความดัน
สภาพความเป็นกรดต่าง	- เครื่องวัดสภาพความเป็นกรดต่าง
สภาพการนำไฟฟ้า	- เครื่องวัดสภาพการนำไฟฟ้า
การเผาไหม้	- เครื่องวัดปริมาณ O₂ CO₂ และ CO

นอกเหนือจากที่จะต้องทราบว่าใช้เครื่องมือใดในการจัดเก็บข้อมูลที่ต้องการ ผู้ใช้ควรต้องเข้าใจหลักการทำงานและใช้งานของเครื่องมืออื่นๆ

2. สาเหตุของความคลาดเคลื่อน
ความถูกต้องและความเที่ยงตรงของข้อมูลก็มีส่วนสำคัญยิ่ง ข้อมูลที่ไม่ถูกต้อง ผิดคลาดเคลื่อนเกินกว่าระดับที่ยอมรับได้ทำให้การวิเคราะห์ด้านพลังงานและอนุรักษ์พลังงานไม่ถูกต้องและสร้างความเสียหายได้มาก ในการตรวจวัดข้อมูล “ความคลาดเคลื่อน” หมายถึง ค่าที่ได้จากค่าที่วัดได้ลบค่าที่แท้จริง โดย “ค่าที่แท้จริง” หมายถึง ค่าที่ถูกต้องของค่าที่วัด สาเหตุของความคลาดเคลื่อน ได้แก่ (1) ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากหลักการ-วิธีการวัด (2) ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากเครื่องวัด (3) ความคลาดเคลื่อนจากสภาพแวดล้อมในขณะที่วัด
3. ประเภทของความคลาดเคลื่อนแบ่งเป็น
(1) ความคลาดเคลื่อนจากระบบ (2) ความคลาดเคลื่อนโดยบังเอิญ (3) ความผิดพลาด ที่เกิดจากความพลั้งเผลอ
4. ปัจจัยที่ต้องคำนึงในการเลือกใช้เครื่องมือวัดให้เหมาะสมกับงานแต่ละประเภท ได้แก่
ความน่าเชื่อถือ ราคา ความถี่ในการใช้งาน ค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษา ย่านการตรวจวัด และพิกพาสะดวก
5. กระบวนการเก็บรวบรวมข้อมูลจะต้องพิจารณาประเด็น
ข้อมูลที่ต้องการเก็บรวบรวม และ ความถี่ในการเก็บรวบรวมข้อมูล

เอกสารอ้างอิง
[1] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, (2547), ตำราฝึกอบรมหลักสูตรผู้รับผิดชอบด้านพลังงาน (ผขพ.) สามัญ
[2] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, (2547), ตำราฝึกอบรมหลักสูตรผู้รับผิดชอบด้านพลังงาน (ผขพ.) อาวุโส ด้านความร้อน
[3] สมาน เสนงาม, การวัดอุณหภูมิ (Temperature Measurements) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
[4] สมศักดิ์ กิริตวิเศษชัย, หลักการและการใช้งานเครื่องมือวัดอุตสาหกรรม สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น)
[5] แคตาล็อกเครื่องมือวัด Portable Ultrasonic Liquid Flow meter, Panometrics, Inc.
[6] http://www.eng-temperature.com/thermocouple.html (ค้นวาคม 2551)
[7] http://www.risinginstru.com/thermometer/glass.htm (ค้นวาคม 2551)
[8] http://www.foreign-trade.com/showcase.cfm?c=meter&cpage=2 (ค้นวาคม 2551)
[9] http://www.exatherm.cz/lekarske/eng/digi.htm (ค้นวาคม 2551)
[10] http://www.EngineeringToolBox.com (ค้นวาคม 2551)
[11] http://www.asianengineering.in/ (ค้นวาคม 2551)