หน่วยที่ 1
หน่วยการวัด มิติ และมาตรฐาน

บทนำ

เนื่องจากปริมาณต่าง ๆ ทางไฟฟ้าเราไม่สามารถรับรู้ได้ด้วยประสาทสัมผัสทางกายคือ หู ตา จมูก ลิ้น และผิวหนังได้โดยตรง เนื่องจากอาจทำให้เกิดอันตรายถึงชีวิตได้หากมีปริมาณมากพอ โดยธรรมชาติของไฟฟ้าเป็นสิ่งที่ไม่สามารถมองเห็นได้แต่เราสามารถรับทราบได้โดยอาศัยปรากฏการณ์หรือผลที่ปรากฏให้เห็นเนื่องจากการเปลี่ยนรูปของพลังงานไฟฟ้าเป็นปริมาณหรือพลังงานรูปอื่นที่สามารถรับทราบได้ด้วยประสาทสัมผัส เช่น การเปลี่ยนขนาดของมุมของเข็มชี้ การหมุนของมอเตอร์ในลักษณะของ ความเร็วหรือจำนวนรอบการหมุน เป็นต้น มีการใช้ปรากฏการณ์ต่าง ๆ เหล่านี้มาสร้างเป็นเครื่องมือวัดปริมาณทางไฟฟ้า และนิยมเรียกว่า **เครื่องวัดทางไฟฟ้า** เช่น แอมมิเตอร์ โวลต์มิเตอร์ โดยจะใช้ปริมาณกระแสและแรงดันไฟฟ้า(ตามชื่อของเครื่องมือวัด) เพื่อทำให้เกิดการบ่ายเบนของเข็มชี้หรือการแสดงเป็นการเปลี่ยนแปลงของตัวเลข ซึ่งจะเกิดการเคลื่อนที่หรือการแสดงค่าแปรตามขนาดของกระแสหรือแรงดันไฟฟ้า เป็นต้น

ในที่นี้จะกล่าวถึงวัตถุประสงค์ ความสำคัญ และคำจำกัดความต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการวัดเพื่อให้เห็นภาพรวมทั้งหมดของระบบการวัดตลอดจนใช้เป็นพื้นฐานและแนวทางสำหรับการศึกษาในส่วนย่อย ๆ ของระบบการวัดได้อย่างถูกต้องซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการนำไปใช้งานทางปฏิบัติและการวิเคราะห์การวัดทางไฟฟ้าต่อไป

1.1 ระบบหน่วยวัดสากล (Unit in SI system)

การวัด[1] (Measurement) คือการปฏิบัติการทั้งปวงที่มีวัตถุประสงค์เพื่อการตัดสินค่าของปริมาณ (Set of operations having the object of determining a value of a quantity: VIM 2.1) ผลการวัดจะประกอบด้วยส่วนที่เป็นปริมาณ(รวมถึงความไม่แน่นอนของปริมาณที่วัดได้) และ หน่วยวัด เช่น ตุ้มน้ำหนักมีค่าที่ระบุเป็น 1 กิโลกรัม(kg) อาจประมาณได้เป็น (1,000,001 $\pm$ 0.001) g เป็นต้น

เครื่องมือวัด หมายถึงปริมาณมาตรฐาน (Standard) ซึ่งเป็นตัวแทนของหน่วยวัด โดยที่การวัดเป็นปฏิบัติการทางเทคนิคที่ต้องปฏิบัติตามวิธีการวัดที่กำหนดขั้นตอนไว้แล้ว เพื่อการเปรียบเทียบกันระหว่างปริมาณทางกายภาพใด ๆ ที่ถูกวัด และปริมาณมาตรฐาน โดยผลวัดจะบอกทั้งขนาดและมิติ[2]

---

[1] สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น). **คู่มือการสอบเทียบเครื่องมือวัดอุตสาหกรรม**. กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2546. หน้า 9.

[2] **มิติ**(Dimension) คือตัวแปรกายภาพที่ใช้กำหนดพฤติกรรมหรือธรรมชาติของระบบโดยเฉพาะ เช่น ระยะ **ความยาว** ของวัตถุ

ขนาดมาตรฐานของปริมาณทางกายภาพ คือ **หน่วย** เช่น ขนาดของวิทยุ กว้าง 40 ซม. ยาว 18 ซม. และสูง 10 ซม. ถ้าปราศจากหน่วยแล้วขนาดของวิทยุก็ไม่มีความหมายทางกายภาพ งานด้านวิศวกรรมศาสตร์และวิทยาศาสตร์ แบ่งหน่วยออกเป็น 2 ประเภท คือ**หน่วยวัดพื้นฐานและหน่วยวัดผสม**

1.1.1 หน่วยวัดพื้นฐานและหน่วยวัดผสม

หน่วยวัดพื้นฐานในทางกล คือ ความยาว มวล เวลา ขนาดของหน่วยวัดพื้นฐานอาจจะเป็นเมตร ฟุต กิโลกรัม ปอนด์ ชั่วโมงหรือวินาทีขึ้นอยู่กับสภาพความเหมาะสมในการพิจารณาใช้ สัญลักษณ์แทนมิติของความยาว มวลและเวลา คือ L, M, T ตามลำดับ บางทีเรียกหน่วยวัดพื้นฐานนี้ว่า **หน่วยวัดพื้นฐานปฐมภูมิ**

ขนาดของปริมาณทางกายภาพอื่น ๆ ในทางความร้อน ไฟฟ้า และการส่องสว่าง จะอาศัยกฎเกณฑ์การแทนด้วยหน่วยวัดพื้นฐานเหมือนกัน แต่หน่วยเหล่านี้จะมีใช้เฉพาะในส่วนที่เกี่ยวพันเท่านั้น บางทีเรียกว่า **หน่วยวัดพื้นฐานเพิ่มเติม**

หน่วยวัดผสม หน่วยวัดผสมทุกหน่วยจะมีจุดเริ่มต้นมาจากกฎทางฟิสิกส์ที่ใช้นิยามหน่วยนั้น ๆ เช่น พื้นที่ของสี่เหลี่ยมนิยามว่าคือ ความกว้าง $\times$ ความยาว เมื่อหน่วยความยาวมีหน่วยเป็นเมตร หน่วยของพื้นที่คือ ตารางเมตร หรือ เมตร^2

หน่วยวัดผสมส่วนมากจะแสดงในรูปของมิติ ซึ่งนิยมเขียนเป็นสูตรทางคณิตศาสตร์ที่สมบูรณ์ เช่น มิติของหน่วยวัดผสมของพื้นที่ คือ L^2, ปริมาตร คือ L^3, แรงคือ MLT^{-2}

มิติของหน่วยวัดผสม จะมีประโยชน์ในการใช้เปลี่ยนหน่วยจากระบบหนึ่งไปสู่อีกระบบหนึ่ง และเพื่อความสะดวกในการเรียกจะมีการกำหนดหน่วยวัดผสมขึ้นใหม่ เช่น แรงในระบบ SI เรียกว่า นิวตัน (N) แทนเทอมของแรงที่มีหน่วยและมิติเป็น kg.m/s^2 (LMT^{-2}) เป็นต้น จะเห็นว่าทำให้ใช้ง่ายขึ้น

ระบบหน่วยของการวัด

ระบบอังกฤษ เป็นระบบที่เกิดขึ้นเพื่อใช้ในทางการค้า หน่วยวัดพื้นฐานสำหรับความยาว มวล และเวลา คือ ฟุต (ft), ปอนด์มวล (lb) และวินาที (s) เราสามารถแปลงหน่วยวัดผสมในระบบอังกฤษเป็นระบบ SI ได้ ง่าย ๆ โดยแทนด้วยมิติของหน่วยพื้นฐานลงในหน่วยวัดผสมต่าง ๆ เช่น

หน่วยของความดัน lb/ft^2 (ML^{-2})

หน่วยของแรง lbs (LML^{-2}) เรียกว่า เปาน์แดล

หน่วยของงานหรือพลังงาน ft–lbs เรียก ฟุต–เปาน์แดล

หน่วยปริมาตร ft^3 (L^3) โดย

หน่วยของระบบนี้จะสับสนกับของระบบชาติอื่น ๆ เช่น หน่วยปริมาตรของอังกฤษ (แกลลอน) จะมากกว่าแกลลอนของอเมริกา ประมาณ 17%

ระบบเมตริก รัฐบาลฝรั่งเศส (ปี 1790) ได้สนับสนุนให้มีการค้นคว้าและจัดตั้งระบบการวัดเพื่อใช้แทนระบบชั่งตวงวัดให้ได้มาตรฐานเป็นที่ยอมรับ และใช้ร่วมกันได้ทั่วไปโดยกำหนดพื้นฐานไว้ 3 ประการ คือ

ก. เป็นระบบการชั่ง ตวง วัด ใช้ได้ทั่วโลก โดยไม่ขึ้นกับการเอาบุคคลมาเป็นมาตรฐาน ควรจะขึ้นอยู่กับการวัดที่แน่นอนจากธรรมชาติ

ข. หน่วยอื่นๆ ทุกหน่วยควรจะสืบทอดมาจากหน่วยวัดพื้นฐาน คือ ความยาว (เมตร) มวล (กรัม) และเวลา (วินาที)

ค. ตั้งระบบการเขียนแทนซึ่งยังมีการนำมาใช้จนถึงปัจจุบันนี้ แสดงไว้ในตารางที่ 1 คือ คำที่ใช้เติมหน้าหน่วยในกรณีที่เป็นทศนิยม หรือยกกำลังลบ เช่น

$1\ cm^3 = (10^{-2}m)^3 \quad = 10^{-6}m^3$

$1\ \mu s^{-1} = (10^{-6}s)^{-1} \quad = 10^{6}s^{-1}$ เป็นต้น

ตารางที่ 1 สัญลักษณ์ที่ใช้เขียนหน้าหน่วย และตัวคูณเป็นเลขยกกำลัง

ตัวคูณของหน่วย	คำเติมหน้า	
	ชื่อ	สัญลักษณ์
10^{12}	tera	T
10^{9}	giga	G
10^{6}	mega	M
10^{3}	kilo	k
10^{2}	hecto	h
10	deca	da
10^{-1}	deci	d
10^{-2}	centi	c
10^{-3}	milli	m
10^{-6}	micro	μ
10^{-9}	nano	n
10^{-12}	pico	p
10^{-15}	femto	f
10^{-18}	atto	a

ในช่วงระยะเวลาเดียวกัน (ปี 1873) ประเทศอังกฤษได้มีการจัดระบบของหน่วยทางไฟฟ้าโดยตั้งเป็นระบบ CGS สมบูรณ์ขึ้นโดยให้ความยาวเป็นเซนติเมตร มวลเป็นกรัมและเวลาเป็นวินาที ระบบ CGS สมบูรณ์เริ่มมีความยุ่งยากขึ้นเมื่อนำไปใช้ในการวัดทางไฟฟ้า และทางแม่เหล็กเพราะต้องมีหน่วยอื่นเพิ่มขึ้นในระบบ ดังนั้นจึงมีการแยกเป็น 2 ระบบย่อย คือ

ก. ระบบ CGS ทางไฟฟ้าสถิต โดยใช้หน่วยวัดผสมทางไฟฟ้าจากเซนติเมตร กรัมและวินาที โดยให้ค่าเพอร์มีติวิตีของอวกาศอิสระมีค่าเท่ากับ 1 (ในกฎของคูลอมบ์สำหรับหาแรงระหว่างประจุไฟฟ้า)

ข. ระบบ CGS ทางแม่เหล็กไฟฟ้า โดยมีหน่วยวัดพื้นฐานเหมือนกันและหน่วยของกำลังขั้วแม่เหล็กจะถูกสืบทอดจากหน่วยวัดพื้นฐานเช่นกัน โดยให้ค่าเพอร์มีบิลิตีของอวกาศอิสระมีค่าเท่ากับ 1 (ในสูตรหาค่าของแรงระหว่างขั้วแม่เหล็ก)

หน่วยวัดผสมสำหรับกระแสไฟฟ้าและศักดาไฟฟ้า ในทางปฏิบัติจะใช้แอมแปร์และโวลต์ รวมทั้งหน่วยวัดผสมอื่น เช่น คูลอมบ์ โอห์ม เฮนรี่ ฟารัด ถูกรวบรวมเข้าไว้ในระบบที่สามเรียกว่า **ระบบปฏิบัติ**

1.1.2 หน่วย SI สำหรับปริมาณทางไฟฟ้าและแม่เหล็ก

หน่วย CGS ทางไฟฟ้าสถิต (CGSe) เป็นหน่วยที่ได้จากกฎการทดลองของคูลอมบ์เกี่ยวกับแรงระหว่างประจุไฟฟ้า คือ

$$F = k\frac{Q_1 Q_2}{r^2} \qquad (1.1)$$

เมื่อ F = แรงที่เกิดระหว่างประจุ ($g \cdot \frac{cm}{s^2} = dyne$)

k = ค่าคงที่

Q_1Q_2 = ประจุไฟฟ้า (คูลอมบ์)

r = ระยะทางระหว่างประจุ (เซนติเมตร)

คูลอมบ์พบว่า ค่า k จะขึ้นอยู่กับตัวกลางและแปรผกกลับกับค่าเพอร์มิติวีตี (ε) ของมันเอง (ซึ่งฟาราเดย์เรียก เพอร์มิติวิตี ว่าเป็นตัวคงที่ไดอิเล็กตริก) ซึ่งจะได้

$$F = \frac{Q_1 Q_2}{\varepsilon r^2} \qquad (1.2)$$

ค่า ε มีค่าขึ้นอยู่กับตัวกลาง จึงกำหนดให้ $\varepsilon_0 = 1$ ในอวกาศอิสระ และให้ ε_0 เป็นหน่วยวัดพื้นฐานที่ 4 ของระบบ CGSe

จากกฎของคูลอมบ์หน่วยของประจุไฟฟ้าได้ถูกกำหนดจากหน่วยวัดพื้นฐานทั้ง 4 ซึ่งจะได้

$$dyne = g \cdot \frac{cm}{s^2} = \frac{Q^2}{(\varepsilon_0 = 1)cm^2}$$

ดังนั้นมิติของ Q = $cm^{3/2}\ g^{1/2}\ s^{-1}$ เรียกว่าคูลอมบ์

จากนิยามของ กระแสไฟฟ้า คือ การไหลของประจุต่อหน่วยเวลา จะเขียนสมการกระแสได้คือ

กระแส (I) = $\frac{Q}{t}$ = คูลอมบ์/วินาที และกำหนดชื่อใหม่เรียกว่า **แอมแปร์**

ส่วนหน่วยอื่นๆ ทางไฟฟ้า เช่น ความเข้มสนามไฟฟ้า (E), ความต่างศักย์ (V) ค่าความจุ (C) ก็สามารถสืบทอดได้โดยวิธีคล้าย ๆ กัน (โดยการใช้นิยามของปริมาณทางกายภาพนั้นๆ)

หน่วย CGS ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (CGSm) มีพื้นฐานมาจากกฎการทดลองของคูลอมบ์เกี่ยวกับแรงระหว่างขั้วแม่เหล็ก คือ

$$F = k\frac{m_1 m_2}{r^2} \qquad (1.3)$$

เมื่อ F = แรงที่เกิดระหว่างขั้วแม่เหล็ก, ดายน์

k = ค่าคงที่โดย $k = \frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_0} = 1$ ในอวกาศอิสระ

ซึ่ง μ_0 = ค่าเพอร์มิบิลิตีของเหล็ก

m_1, m_2 = ขั้วแม่เหล็ก

r = ระยะห่างระหว่างขั้วแม่เหล็ก, เซนติเมตร

จากกฎของคูลอมบ์ หน่วยของแรงระหว่างขั้วแม่เหล็ก ได้กำหนดนิยามจากหน่วยวัดพื้นฐานทั้ง 4 โดยความสัมพันธ์ จะได้

$$\text{dyne} = g \cdot \frac{cm}{s^2} = \frac{m^2}{(\mu_0 = 1)cm^2}$$

ดังนั้นมิติของ $m = cm^{3/2}\, g^{1/2}\, s^{-1}$ และสามารถหาหน่วยของค่าอื่น ๆ ทางแม่เหล็กโดยใช้ค่านิยามของตัวมันเอง

ระบบ CGS ทั้งสองถูกเชื่อมเข้าหากันโดยการทดลองของฟาราเดย์ซึ่งพบว่า แม่เหล็กเคลื่อนที่จะสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไหลในตัวนำ หรือ เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลในตัวนำจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้น

ระบบมาตรฐานนานาชาติหรือระบบสากล มาจากงานค้นคว้าของวิศวกรชาวอิตาลี (Giorgi (ปี 1903) ซึ่งเป็นผู้แสดงให้เห็นว่า ระบบปฏิบัติซึ่งมีหน่วยวัดพื้นฐานของความยาวเป็นเมตร มวลเป็นกิโลกรัมและ เวลาเป็นวินาที และให้หน่วยวัดพื้นฐานที่สี่ คือ เพอร์มีบิลิตีของอวกาศอิสระเป็น $4\pi \times 10^{-7}$ แล้วระบบปฏิบัตินี้จะสามารถใช้ได้ทั้งในแม่เหล็กไฟฟ้าและไฟฟ้าสถิต

ต่อมาปี 1948 ที่ประชุมการวัดนานาชาติได้กำหนดให้กระแส ในหน่วย แอมแปร์ เป็นหน่วยวัดพื้นฐานตัวที่สี่ ของระบบเมตริก คือ ระบบ MKSA ต่อมาปี 1954 ได้ตกลงกำหนดรูปแบบที่จำเพาะของระบบ MKSA ขึ้นและเรียกระบบนี้ว่า SI (International System of Unit) โดยระบบ SI แบ่งหน่วยวัดพื้นฐานออกเป็น 2 ส่วน ดังแสดงในตารางที่ 2 พร้อมนิยามของหน่วย

ตารางที่ 2 หน่วยวัดพื้นฐาน (Basic units) และหน่วยวัดเพิ่มเติม

ปริมาณ (Quantity)	**หน่วย(Unit)**	**สัญลักษณ์ (Symbol)**
หน่วยวัดพื้นฐาน (Basic units)		
Length	meter	M
Mass	kilogram	Kg
Time	second	S
Electric current	ampere	A
Temperature	kelvin	K
Luminous intensity	candela	Cd
Amout of substance	Mole	Mol

ตารางที่ 2 (ต่อ) หน่วยวัดพื้นฐาน (Basic units) และหน่วยวัดเพิ่มเติม

ปริมาณ (Quantity)	หน่วย(Unit)	สัญลักษณ์ (Symbol)
หน่วยวัดเพิ่มเต็ม (Supplement units)		
Plane angle	Radian	Rad
Solid angle	Steradian	Sr

1.1.3 การเปลี่ยนหน่วยอื่นเป็นหน่วย SI

ในการคำนวณหาค่าต่าง ๆ บางครั้งจำเป็นต้องเปลี่ยนหน่วยของปริมาณทางกายภาพจากระบบหนึ่งไปเป็นอีกระบบหนึ่ง วิธีในการเปลี่ยนหน่วย คือ การกำหนดปริมาณนั้น ๆ ด้วยตัวเลขที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยวัดพื้นฐานของระบบทั้งสอง ใช้เป็นตัวคูณ ดังตารางที่ 3 และ ตารางที่ 4

ตารางที่ 3 หน่วยในระบบ SI , CGS, และระบบหน่วยอังกฤษ

Quantity	SI	CGS	English
Length	1 meter	100 centimeters	3.28 feet
Mass	1 kilogram	10^3 grams	0.0685 slugs
Time	1 second	1 second	1 second
Force	1 newton	10^5 dynes	0.2248 pounds
Energy	1 joule	10^7 ergs	0.7376 ft-lb
pressure	1 pascal	10 dyne/cm^2	1.45×10^{-4} lb/in^2

ตารางที่ 4 การเปลี่ยนหน่วยจากระบบอังกฤษเป็นระบบ SI

	English unit	symbol	Metric equivalent	Reciprocal
Length	1 foot	ft	30.48 cm	0.0328084
	1 inch	in.	25.4 mm	0.0393701
Area	1 square foot	ft^2	9.29030×102 cm^2	0.0107639×10^{-2}
	1 square inch	$in.^2$	6.4516×102 mm^2	0.155000×10^{-2}
Volume	1 cubic foot	ft^3	0.0283168 m^3	35.3147
Mass	1 pound (avdp)	lb	0.45359237 kg	2.20462
Density	1 pound per cubic foot	lb/ft^3	16.0185 kg/m^3	0.062428
Velocity	1 foot per second	ft/s	0.3048 m/s	3.28084
Force	1 poundal	pdl	0.138255 N	7.23301
Work, energy	1 foot-poundal	ft pdl	0.0421401 J	23.7304
Power	1 horsepower	hp	745.7 W	0.00134102
temperature	degree F	$^\circ F$	$5(t - 32) /9^\circ C$	-

ตัวอย่างที่ 1.1 พื้นที่ของห้องเรียนขนาด 30 ฟุต $\times$ 24 ฟุต ซึ่งเป็นหน่วยในระบบอังกฤษ ต้องการทราบพื้นที่ในหน่วย SI ว่าเป็นเท่าไร

วิธีคิด พื้นที่ = $30\ \text{ft} \times 24\ \text{ft} = 720\ \text{ft}^2 = 720\ \text{ft}^2 \times \left(\frac{1}{3.28\text{ft}}\right)^2 = 67.3\ \text{m}^2$

โดยพื้นที่ 1 ตารางเมตรมีค่าเท่ากับพื้นที่ 3.28 ตารางฟุต

ตัวอย่างที่ 1.2 ความเร็วของแสงในอวกาศอิสระมีค่า 2.997925×10^8 m/s ต้องการทราบความเร็วแสงเป็น km/hr

วิธีคิด $C = 2.997925 \times 10^8\ \text{m/s} \times \frac{1\text{km}}{10^3\ \text{m}} \times \frac{3.6 \times 10^3\ \text{s}}{1\text{hr}} = 10.79 \times 10^8$ km/hr

1.1.4 มิติของปริมาณทางไฟฟ้าและแม่เหล็กไฟฟ้า

สิ่งที่ต้องระวังไม่ให้สับสนคือหน่วย และมิติ ความหมายของมิติคือตัวแปรที่ใช้บอกถึงพฤติกรรมหรือธรรมชาติโดยจำเพาะของระบบ เช่น ความยาวของแท่งกลมคือมิติของแท่งกลมอย่างหนึ่ง เมื่อเรากล่าวถึงความยาวของแท่งกลมว่ายาวกี่เมตร จะเป็นการกำหนดหน่วยที่เราเลือกใช้ในการวัดมิติ การใช้มิติจะมีประโยชน์ในการเขียนหน่วยใหม่ซึ่งได้จากการแปลงหน่วยวัดพื้นฐานต่างๆ เพื่อความชัดเจนมากขึ้น สามารถแสดงความสัมพันธ์ของหน่วยไฟฟ้าที่แปลงได้จากหน่วยทางกลโดยใช้มิติของหน่วยวัดพื้นฐานช่วยดังต่อไปนี้

หน่วยวัดพื้นฐาน : ความยาว(meter) มวล(Kg) เวลา(s)

มิติ : L M T

การเขียนมิติของหน่วยของปริมาณต่าง ๆ ทางไฟฟ้า

ในที่นี้จะเริ่มจากความเร็วในเทอมของหน่วยวัดพื้นฐานดังต่อไปนี้

จากนิยามของความเร็ว คือ ระยะทางที่เคลื่อนที่ได้ต่อเวลาที่ใช้ไปในการเคลื่อนที่ให้ได้ระยะทางนั้น

ความเร็ว (v) = ระยะทาง / เวลา

= L / T

เมื่อแทนมิติของระยะคือ L ด้วยสัญลักษณ์ของหน่วยเป็น m และแทนมิติของเวลาคือ T ด้วยสัญลักษณ์ s จะได้หน่วยของความเร็วที่แปลงจากหน่วยวัดพื้นฐานเป็น เมตร / วินาที หรือ m/s นั่นเอง ดังนั้นเราสามารถเขียนหน่วยทางกลอื่น ๆ แทนด้วยมิติและชื่อหน่วยใหม่ในระบบ SI ได้ในทำนองเดียวกันคือ

ความเร่ง (a) = ความเร็ว / เวลา $= (L / T) / T = L / T^2$ เขียนหน่วยได้คือ m/s^2

แรง (F) = มวล (M) x ความเร่ง (a) $= M \times (L / T^2)$ เขียนหน่วยได้คือ kg.m/s^2

= นิวตัน (Newton : N)

งาน(w) = แรง (F) x ระยะทาง (D) $= M \times (L / T^2)\ L$

$= M \times (L^2 / T^2)$ เขียนหน่วยได้ $\text{kg.m}^2/\text{s}^2 = \text{Nm}$

กำหนดชื่อใหม่ในระบบ SI ได้ งาน(w) = J (joule) และเขียนหน่วยของกำลังได้คือ

กำลัง(Power) = งาน(w) / เวลา(s) $= M \times (L^2 / T^2) / T = [M\ L^2\ T^{-3}] = \text{J/s} = \text{watt : w}$

ปริมาณทางไฟฟ้า

กระแสไฟฟ้า (Current)

กระแสไฟฟ้า คืออิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ในวงจรโดยการขับเคลื่อนของแรงดันไฟฟ้า ใช้สัญลักษณ์ I แทน และมีหน่วยเป็น แอมแปร์ (A) กระแสมีความสัมพันธ์กับประจุที่เกิดจากการที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่านจุด ๆ หนึ่ง ในเวลา 1 วินาที เขียนเป็นสมการได้เป็นการเปลี่ยนแปลงของประจุต่อเวลา ดังสมการ (1.4)

$$i = \frac{dq}{dt} = \frac{q}{t} \qquad (1.4)$$

เมื่อ i = กระแสไฟฟ้า (Ampere:A)

q = ประจุไฟฟ้า (Coulomb:C)

t = เวลา (second:s)

โดยที่อิเล็กตรอนเป็นอนุภาคไฟฟ้าที่มีประจุไฟฟ้าเป็นลบ (-) ดังนั้นอิเล็กตรอน 1 ตัว มีประจุไฟฟ้า 1.602×10^{-19} คูลอมบ์ ดังนั้นประจุ 1 คูลอมบ์จะได้จากอิเล็กตรอนจำนวน $1/(1.602 \times 10^{-19}) =$ 62421 ล้านล้าน ตัว (6.24×10^{18}) เพื่อความสะดวกจะนิยมใช้กระแสในหน่วยแอมแปร์ ดังนั้นจากสมการ (4) กระแส 1 แอมแปร์ จะกำหนดได้จาก ประจุ 1 คูลอมบ์ที่ไหลผ่านจุด ๆ หนึ่ง ในเวลา 1 วินาทีนั่นเอง

ดังนั้นหน่วยของกระแสและประจุไฟฟ้าคือ คูลอมบ์ต่อวินาที (1 C / s) และเพื่อเป็นเกียรติแก่ผู้ค้นพบความสัมพันธ์ของกระแสนี้ จึงกำหนดให้มีชื่อหน่วยเรียกว่า **แอมแปร์(A)** ใช้สัญลักษณ์ **I** แทนมิติของกระแส

แรงดันไฟฟ้า (Voltage :V)

แรงดันไฟฟ้า คือความสามารถในการเคลื่อนประจุ 1 คูลอมบ์จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งโดยถ้าใช้พลังงานไป 1 จูล (Joule) นิยามให้เป็นแรงดันไฟฟ้า 1 โวลต์ (นอกจากนี้ยังเรียกแรงดันนี้ว่า มีความต่างศักดิ์ 1 โวลต์) และนิยมใช้อักษร E แทนแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย และอักษร V แทนแรงดันที่ตกคร่อมอุปกรณ์ในวงจร เขียนสมการแรงดันจากนิยามได้คือ

$$v = \frac{w}{q} = \frac{\text{Joule}}{\text{Coulomb}} \qquad (1.5)$$

ดังนั้นจะได้ $1\ v = 1\ J / 1\ C$

ถ้าเคลื่อนอิเล็กตรอนเพียง 1 อิเล็กตรอน ผ่านแรงดัน 1 โวลต์จะต้องใช้พลังงาน 1 อิเล็กตรอนโวลต์ (electron volts :eV) นั่นคือ

$$1\ eV = \frac{1}{6.24 \times 10^{18}}\ \text{Joule}$$

ซึ่งอิเล็กตรอนโวลต์นิยมใช้ในกรณีของระดับพลังงานต่ำ ๆ เกี่ยวกับอิเล็กตรอนในวงโคจรรอบนิวเคลียสของอะตอม

จากสมการ (1.5) เขียนแทนหน่วยวัดพื้นฐานเป็นมิติจะได้เป็น

$$V = [(M L^2 T^{-2}) / IT] = [M L^2 T^{-3} I^{-1}] \qquad (1.6)$$

กำลังไฟฟ้า (Power: w)

จากนิยามของกำลังทางกล คืออัตราการทำงานในหน่วยเวลา (จูล /วินาที) หรือพิจารณาจากแหล่งจ่ายแรงดัน E ซึ่งทำให้เกิดมีแรง F กระทำต่อประจุจำนวนน้อย ๆ dq ทำให้สามารถเคลื่อนประจุไปได้เป็นระยะทางสั้น ๆ ds คือการทำงานในเวลาสั้น ๆ dt เขียนเป็นความสัมพันธ์ของงานและ กำลังได้ดังสมการที่ (1.7) ถึง (1.10) ดังนี้

$$dw = F \cdot ds = dq\, E \cdot ds \tag{1.7}$$

และกำลังที่ใช้ $$dp = \frac{dw}{dt} = \frac{dq\, E \cdot ds}{dt} = iE \cdot ds \tag{1.8}$$

แทน E ds ด้วยความต่างศักย์หรือแรงดัน dv = dw/ dq และ i=dq/dt ในสมการ (1.8) ได้

$$dp = \frac{dq}{dt}\frac{dw}{dq} = \frac{dw}{dt} = \frac{j}{s} = w(watt) \tag{1.9}$$

จากสมการ (1.8) สามารถเขียนสมการกำลังไฟฟ้าสัมพันธ์กับกระแสและแรงดันได้เป็น

$$p = iV \tag{1.10}$$

จากสมการที่ (1.10) เมื่อแทนมิติของกำลัง P ด้วยมิติของหน่วยวัดพื้นฐานทางกล $[M\,L^{2}\,T^{-3}]$ และมิติของกระแสด้วย I จะได้

$[M\,L^{2}\,T^{-3}] = [I]\,V$

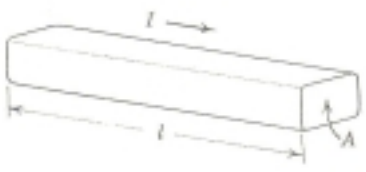
ดังนั้นจะได้หน่วยของแรงดันเหมือนกับสมการที่ (1.6) เป็น

$$V = [M\,L^{2}\,T^{-3}\,I^{-1}] = kg\,m^{2}\,s^{-3}/A$$

ในปีคศ.1826 Georg Ohm ได้เผยแพร่การวัดปริมาณทางไฟฟ้าข้างต้น สรุปเป็นความสัมพันธ์ของกระแส (I) และ แรงดัน (V) โดยใช้ค่าคงที่ของวงจรที่เรียกว่า ความต้านทาน (R) ซึ่งกฎของโอห์มกล่าวถึงความสัมพันธ์ของกระแสไหลที่ผ่านวัสดุตัวนำ (เช่น สายไฟ) กับแรงดันระหว่างด้านต้นและด้านปลายของวัสดุโดยเขียนเป็นสมการดังนี้

$$v = Ri \tag{1.11}$$

R เรียกว่า ความต้านทานของวัสดุตัวนำ จะมีค่าคงที่**ไม่ขึ้นกับกระแส**ในโลหะและตัวนำไฟฟ้าอื่น ๆ ส่วนในวัสดุบางชนิดที่รู้จักในชื่อสารกึ่งตัวนำค่า R จะไม่คงที่ ซึ่งมีใช้ในการเรียงกระแส วงจรขยาย ทรานซิสเตอร์ กับดักฟ้าผ่า เซลล์แสงอาทิตย์ และอื่น ๆ ส่วนในตัวนำสามารถคำนวณหาความต้านทานโดยพิจารณาจากรูปที่ 1.1 จะได้



รูปที่ 1.1

$$R = \rho\frac{\lambda}{A} \tag{1.12}$$

R = ค.ต.ท. หน่วย โอห์ม

ρ= ความต้านทานจำเพาะของวัสดุ (เมตร-โอห์ม)

λ = ความยาวตัวนำ (เมตร)

A= พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ (ตารางเมตร)

เช่น ความนำเฉพาะของทองแดงหลอมแล้วปล่อยให้เย็น ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส มีค่า 1.7241×10^{-8} เมตร-โอห์ม นั่นคือมีค่าความต้านทาน 0.17241 โอห์ม ได้จากตัวนำยาว 1 เมตร และมีพื้นที่หน้าตัด 1 ตารางมิลลิเมตร

เมื่อเขียนแทนความต้านทานด้วยมิติของหน่วยวัดพื้นฐานและกฎของโอห์มร่วมกันจะได้

$$R = [M L^2 T^{-3} I^{-1}] / [I] = [M L^2 T^{-3} I^{-2}] = kg\ m^2\ s^{-3} / A^2 \qquad (1.13)$$

และกำหนดให้เป็นหน่วย โอห์ม เพื่อเป็นเกียรติแก่ Georg Ohm

ความนำไฟฟ้า (Conductance: G)

ความนำไฟฟ้า เป็นส่วนกลับของความต้านทานคือ G = 1 / R มีหน่วยเป็นซีเมนต์(seimens) หรือโมห์ (mho) ใช้กับความต้านทานต่ำ ๆ ซึ่งจะบอกถึงความสามารถในการนำกระแสได้มากน้อยเพียงใดนั่นเอง เป็นต้น

จะเห็นว่าหน่วยแปลงหรือหน่วยวัดผสมที่กล่าวข้างต้นมีความสัมพันธ์กันกับหน่วยวัดพื้นฐานทั้งสิ้น

ตัวประกอบหน่วยทางไฟฟ้า

ปริมาณทางไฟฟ้านิยมจะใช้เลขยกกำลังของ 10 เขียนนำหน้าหน่วย เช่น กิโลวัตต์ (kilowatt) คือ 1,000 วัตต์ มิลลิแอมป์ เท่ากับ 0.001 แอมแปร์ ซึ่งตัวเลขที่นิยมใช้ มีดังนี้คือ

Giga	$= 10^9$
Mega	$= 10^6$
Kilo	$= 10^3$
Milli	$= 10^{-3}$
Micro	$= 10^{-6}$
Nano	$= 10^{-9}$
Pico	$= 10^{-12}$

นอกจากนี้วิทยาการด้านไฟฟ้ายังนิยมแทนเลขยกกำลังต่าง ๆ ด้านซ้ายนี้ด้วยตัวอักษรย่อหน้าสัญลักษณ์ของหน่วย เช่น 1000 โอห์ม แทนด้วย 1 **KΩ** , 1 มิลลิแอมแปร์ แทนด้วย 1 **m**A เป็นต้น

ปริมาณทางแม่เหล็ก

สนามแม่เหล็ก คือบริเวณที่มีอำนาจการกระทำที่เกิดจากแม่เหล็ก อำนาจการกระทำที่ส่งออกมาจากแม่เหล็กนี้มีลักษณะเป็นเวคเตอร์ใช้อักษร B เป็นสัญลักษณ์ หรืออาจเรียกว่าอำนาจแม่เหล็กชักนำ ซึ่งเป็นอำนาจของเส้นแรงชักนำ และลักษณะที่เป็นเวคเตอร์นี้จะเรียกว่า เส้นแรงแม่เหล็กหรือฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic flux) ใช้สัญลักษณ์เป็น **Φ** มีหน่วยในการวัดเป็นเวเบอร์(Weber)[3] โดยนิยามเส้นแรงแม่เหล็ก 1 เวเบอร์ คือเส้นแรงแม่เหล็กที่คล้องเกี่ยวขดลวด 1 รอบ แล้วทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำ 1 โวลต์ ขณะที่เส้นแรงแม่เหล็กลดลงเป็นศูนย์ด้วยอัตราคงที่ในเวลา 1 วินาที เขียนเป็นสมการได้เป็น

$$V = -N \frac{d\Phi}{dt} \qquad (1.14)$$

หรือ $d\Phi = V\,dt \qquad (N = 1)$

[3] 1 weber /m^2 = 10^4 gauss (หน่วย cgs)

นั่นคือ Φ $= [M\,L^{2}\,T^{-3}\,I^{-1}]\,[T] = [M\,L^{2}\,T^{-2}\,I^{-1}] = kg.\,m^{2}\,s^{-2}/A$

ความหนาแน่นเส้นแรงเป็นการวัดสนามแม่เหล็กว่ามีความเข้มของจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กต่อหน่วยพื้นที่เขียนเป็นความสัมพันธ์ได้คือ

$$B = \frac{\Phi}{A} \quad \text{เวเบอร์ /ตารางเมตร} \qquad (1.15)$$

$$= [M\,L^{2}\,T^{-2}\,I^{-1}] / [L^{2}] = [M\,T^{-2}\,I^{-1}] = kg.\,s^{-2}/A = \text{เทสลา (T)}$$

ความเหนี่ยวนำ (Inductance :L)

ความเหนี่ยวนำ คือสมบัติเฉพาะของขดลวดต่าง ๆ ซึ่งคุณสมบัตินี้เกิดจากการที่ให้กระแสไหลเข้าไปในขดลวดนั้น ๆ แล้วเกิดสนามแม่เหล็กขึ้น สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะชักนำตัวเอง(Self Induction) ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าในขดลวดนั้น เรียกว่าแรงดันเหนี่ยวนำตัวเอง (Self induced electromotive force) มีทิศทางตรงข้ามกับแรงดันไฟฟ้าเดิม ค่าของการต่อต้านนี้เรียกว่า ค่าความเหนี่ยวนำ ใช้อักษร L แทนความเหนี่ยวนำและมีหน่วยเป็น เฮนรี่ (Henry) โดยนิยามความเหนี่ยวนำของวงจรหรือขดลวด 1 เฮนรี่ จะได้จากอัตราการเปลี่ยนแปลงกระแส 1 แอมแปร์/วินาที แล้วทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำ 1 โวลต์ที่ขั้วขดลวด เขียนเป็นสมการได้เป็น

$$V = L\,\frac{di}{dt} \qquad (1.16)$$

หรือ $L = \frac{V}{di}\,dt$

หากแทนด้วยหน่วยวัดพื้นฐานจะได้ เป็นมิติและหน่วยในระบบ SI ในหน่วยวัดผสมหรือหน่วยแปลง คือ

$$L = [M\,L^{2}\,T^{-3}\,I^{-1}]\;[T] / I = [M\,L^{2}\,T^{-2}\,I^{-2}] = kg.\,m^{2}\,s^{-2}/A^{2} \qquad (1.17)$$

$$= H \;\text{(Henry)}$$

ความจุไฟฟ้า(Capacitance : F)

ความจุไฟฟ้าเป็นคุณสมบัติหรือแฟคเตอร์ของตัวเก็บประจุ มีความสามารถในการเก็บสะสมประจุต่างชนิดกันไว้ที่แผ่นเพลตของตัวเก็บประจุ โดยที่ประจุไฟฟ้า q จะเป็นสัดส่วนกับแรงดันแตกต่างระหว่างแผ่นเพลต เขียนเป็นสมการได้เป็น

$$q = Cv \qquad (1.18)$$

เมื่อ q = ประจุไฟฟ้า (คูลอมบ์ : C)

C = ความจุไฟฟ้า (ฟารัด : F)

v = แรงดันแตกต่างระหว่างเพลต (โวลต์ :V)

ในวงจรไฟฟ้าเราจะสนใจความสัมพันธ์ของแรงดันระหว่างขั้วและกระแสของตัวเก็บประจุ ซึ่งเขียนเป็นสมการเชิงอนุพันธ์ได้คือ

$$i = \frac{dq}{dt} = \frac{dCv}{dt} \qquad (1.19)$$

หรือ $C = i\,\frac{dt}{dv}$

แทนหน่วยวัดพื้นฐานในเทอมด้านขวามือจะได้มิติและหน่วยในระบบ SI ดังนี้

$$\begin{aligned} C &= [I][T]/[M\,L^{2}\,T^{-3}\,I^{-1}] \\ &= [M^{-1}\,L^{-2}\,T^{4}\,I^{-2}] = kg^{-1}\,m^{-2}\,s^{4}/A^{2} \\ &= F \text{ (Farad)} \end{aligned} \qquad (1.20)$$

มาตรวัดอุณหภูมิในระบบ SI : เซลเซียส เคลวิน

ในระบบ SI จะใช้เซลเซียส(°C)และเคลวิน (K) สเกล สำหรับวัดอุณหภูมิ โดยสเกลเซลเซียสแบ่งระหว่างอุณหภูมิแข็งตัวกับอุณหภูมิที่จุดเดือดของน้ำโดยแบ่งออกเป็น 100 ส่วนเท่า ๆ กันเรียกแต่ละส่วนว่า องศา (degree) คิดที่ความดันบรรยากาศนั่นคือจุดเยือกแข็งของน้ำกำหนดให้เป็น 0 °C และเดือดที่ 100 °C

สำหรับอุณหภูมิในสเกลเคลวิน หรือเรียกว่า องศาสัมบูรณ์ โดยจุดเริ่มต้นจะอยู่ที่ –273.15 °C ดังนั้น 0 ° C จะเท่ากับ 273.15 K และ 100 °C มีค่าเท่ากับ 373.15 K ขนาด 1 องศาเคนวินจะเท่ากับอุณหภูมิแตกต่างกัน 1 °C ในสเกลเซลเซียส สามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ระหว่างทั้งสองสเกลได้คือ

$$T(K) = T(^{\circ}C) + 273.15 \qquad (1.21)$$

แม้ว่าปัจจุบันจะใช้การวัดอุณหภูมิเป็นระบบ SI ก็ตาม ในเครื่องมือหรือตำราวิชาการต่าง ๆ ยังคงมีการใช้สเกลอุณหภูมิในหน่วยอังกฤษ เป็นฟาเรนไฮต์ (°F) และอุณหภูมิสัมบูรณ์เป็นสเกลแรงคิน (R) ให้เห็นอีกด้วย ซึ่งเขียนความสัมพันธ์ระหว่างองศาฟาเรนไฮต์กับแรงคินได้คือ

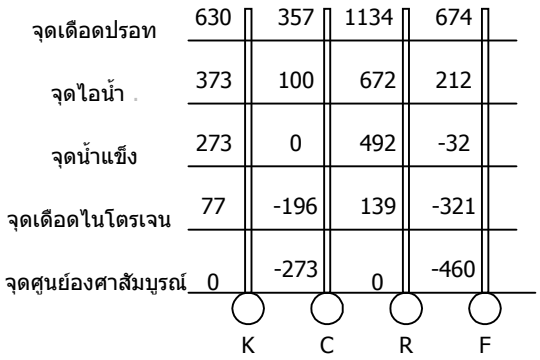
$$T(R) = T(^{\circ}F) + 459.67 \qquad (1.22)$$

ซึ่งหากจำเป็นต้องแปลงให้อยู่ในระบบ SI หรือกลับกันสามารถใช้ความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$T(R) = 1.8\,T(K) \qquad (1.23)$$

$$T(^{\circ}F) = 1.8\,T(^{\circ}C) + 32 \qquad (1.24)$$

ในรูปที่ 1.2 แสดงการเปรียบเทียบสเกลอุณหภูมิทั้งสี่ (K, R, C, F) ในย่านต่าง ๆ ค่าที่อยู่บนแต่ละสเกลเป็นจุดมาตรฐานหลักทั้งหมดทุกจุด



รูปที่ 1.2 เปรียบเทียบสเกลอุณหภูมิ

สเกลอุณหภูมิทางปฏิบัติสากล (International Practical Temperature Scale)

เพื่อให้เหมาะกับการใช้งานในภาคอุตสาหกรรมและงานด้านวิทยาศาสตร์ หน่วยงาน International Committee on Weights and Measures ได้พัฒนาและกำหนดให้ใช้สเกลอุณหภูมิทางปฏิบัติขึ้นในปี 1968 เขียนย่อ

เป็น IPTS-68 โดยกำหนดย่านของอุณหภูมิจุดหลัก ๆ ไว้เป็นจำนวนมาก แบ่งออกเป็นจุดหลักปฐมภูมิ (primary fixed point) และจุดหลักทุติยภูมิ (secondary fixed point) และสำหรับอุณหภูมิจุดหลักปฐมภูมิคือ

1. จุดสามสถานะของไฮโดรเจนสมดุล	-259.34 °C
2. จุดเดือดของไฮโดรเจนสมดุลที่ 25/76 atm (33.33 kPa)	-256.108 °C
3. จุดเดือดปกติของไฮโดรเจนสมดุล (ที่ 1 atm)	-252.87 °C
4. จุดเดือดปกติของนีออน	-246.048 °C
5. จุดสามสถานะของออกซิเจน	-218.789 °C
6. จุดเดือดปกติของออกซิเจน	-182.962 °C
7. จุดสามสถานะของน้ำบริสุทธิ์	0.01 °C
8. จุดเดือดปกติของน้ำบริสุทธิ์	100 °C
9. จุดแข็งตัวปกติของสังกะสี	419.58 °C
10.จุดแข็งตัวปกติของเงิน	961.93 °C
11.จุดแข็งตัวปกติของทองคำ	1064.43 °C
12.จุดแข็งตัวปกติของดีบุก	231.9681 °C

อุณหภูมิของสาร ณ จุดต่าง ๆ นี้ใช้เป็นจุดอ้างอิงมาตรฐานสำหรับสอบเทียบสเกลของเครื่องมือวัดอุณหภูมิ โดยเครื่องมือวัดมาตรฐานที่ใช้วัดอุณหภูมิตั้งแต่ –259.34 ถึง 630.74 °C จะเป็นเทอร์โมมิเตอร์ชนิดความต้านทานที่ทำด้วยพลาตินัม สำหรับอุณหภูมิที่จะวัดในย่านตั้งแต่ 630.74 ถึง 1064.43 °C จะใช้เทอร์โมมิเตอร์แบบเทอร์โมคับเปิลที่ได้จากพลาตินัมกับโรเดียม และอุณหภูมิที่มีย่านสูงกว่า 1064.43 °C จะวัดโดยใช้หลักการแผ่รังสีของแพลงค์ (Planck's radiation law) โดยการกำหนดจุดหลักของ IPTS-68 (ปัจจุบันเป็น IPTS-90) เป็นมาตรฐานที่เกือบทุกประเทศนำไปใช้

มาตรฐาน (Standards) และชนิดของมาตรฐาน (Standard Classifications)

มาตรฐานการวัดไฟฟ้า เช่น ความต้านทานค่าเที่ยงตรงสูง ตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำ แหล่งจ่ายแรงดันและแหล่งจ่ายกระแส ซึ่งสามารถใช้ในการเปรียบเทียบเมื่อทำการวัดปริมาณทางไฟฟ้า เช่น สามารถวัดความต้านทานได้ถูกต้องมาก ๆ โดยใช้วีทสโตนบริดจ์ที่ใช้ความต้านทานมาตรฐาน ทำนองเดียวกันตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำก็สามารถนำมาใช้ในวงจรการวัดแบบบริดจ์ (หรือวงจรอื่น) เพื่อวัดค่าความจุ และความเหนี่ยวนำได้ด้วย

มาตรฐานการวัดเป็นปัจจัยสำคัญในระบบการวัด หน่วยวัดที่เป็นที่ยอมรับกันระหว่างประเทศรวมกับมาตรฐานการวัดที่เท่าเทียมกัน จะมีความสำคัญต่อระบบการค้าและความร่วมมือระหว่างประเทศ ระดับความเชื่อมั่นในความเท่าเทียมกันของมาตรฐานการวัดได้จากการเปรียบเทียบระหว่างกัน (Intercomparison) และความสามารถของผู้ปฏิบัติการที่ทำการวิจัยอยู่ในห้องปฏิบัติการต่าง ๆ ซึ่งผลคือความเชื่อถือในมาตรฐานการวัดเหล่านี้สามารถถ่ายทอดมาสู่ผู้ใช้งานได้โดยผ่านห่วงลูกโซ่ของการสอบกลับได้ (Chain of Traceability) การจัดลำดับชั้นของมาตรฐานในที่นี้ได้จาก International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology: VIM ซึ่งได้นิยามไว้ดังนี้

มาตรฐานการวัดระหว่างชาติ (International measurement standards) คือมาตรฐานที่เป็นที่ยอมรับโดยความตกลงร่วมกันระหว่างประเทศ เพื่อเป็นฐานในการกำหนดค่าของมาตรฐานอื่นทั้งหมดที่เกี่ยวข้องระหว่างประเทศ (Standard recognized by an international agreement to serve internationally as the basis for assigning values to other standards of the quantity concerned: VIM 6.2) เก็บรักษาไว้ที่สำนักชั่งตวงวัดระหว่างชาติ (International Bureau of Weights and Measures: BIPM[4]) กรุงปารีสในประเทศฝรั่งเศส เป็นมาตรฐานที่มีความถูกต้องมากที่สุดเท่าที่วิธีการทางวิทยาศาสตร์ขณะนั้นจะสามารถกำหนดได้ ใช้สำหรับการเปรียบเทียบเป็นมาตรฐานชั้นต้น (primary standards) โดยไม่นำไปใช้งานอย่างอื่น

มาตรฐานการวัดแห่งชาติ (National Measurement Standards) คือ มาตรฐานที่เป็นที่ได้รับการกำหนดโดยทางราชการ เพื่อใช้เป็นรากฐานในการกำหนดค่าของมาตรฐานอื่นทั้งหมดของปริมาณที่เกี่ยวข้องในประเทศ (Standard recognized by a national decision to serve, in a country, as the basis for assigning values to other standards of the quantity concerned: VIM 6.3) สำหรับประเทศไทยคือสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ซึ่งมีหน้าที่รักษามาตรฐานทางมาตรวิทยาขั้นสูงสุดของประเทศ เป็นแหล่งที่มาของความสามารถสอบกลับได้ มาตรฐานการวัดแห่งชาติถือได้ว่ามีความเทียบเท่ามาตรฐานปฐมภูมิหรือสามารถสอบกลับได้โดยตรงกับหน่วยวัด SI หากสถาบันมาตรวิทยามีความสามารถถึงขั้นที่นำหน่วยวัดจากนิยามมาทำให้เป็นจริงได้ กรณีที่มีความสามารถไม่ถึงขั้นทำให้เป็นจริงได้ จะกระทำให้มั่นใจว่าสามารถสอบกลับได้ถึงหน่วยวัด SI โดย**การถ่ายทอด**จากประเทศอื่น

สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติมีหน้าที่ทำให้มั่นใจได้ว่ามาตรฐานปฐมภูมิที่รักษาไว้สามารถเปรียบเทียบได้ในระดับนานาชาติ และมีหน้าที่รับผิดชอบในการกระจายค่ามาตรฐานสู่ผู้ใช้งาน ได้แก่ ห้องปฏิบัติการสอบเทียบ หน่วยงานของรัฐ และภาคอุตสาหกรรม

มาตรฐานชั้นต้นหรือมาตรฐานปฐมภูมิ (Primary standards) หมายถึงมาตรฐานที่ได้กำหนดไว้หรือเป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวางว่ามีคุณสมบัติทางมาตรวิทยาสูงสุด และมีค่าเป็นที่ยอมรับโดยปราศจากการอ้างอิงถึงมาตรฐานอื่นที่เป็นปริมาณเดียวกัน (Standards that is designated or widely acknowledge as having the highest metrological qualities and whose value is accepted without reference to other standards of the same quantity: VIM 6.4) เป็นมาตรฐานที่เก็บรักษาไว้ในแต่ละประเทศทั่วโลก เช่น สำนักชั่งตวงวัดแห่งชาติที่วอชิงตัน (National Bureau of Standards in Washington) สร้างขึ้นโดยให้มีความถูกต้องมากเท่าที่จะทำได้ และใช้ทำหน้าที่ตรวจสอบความถูกต้องของมาตรฐานชั้นรอง (Secondary standards)

มาตรฐานชั้นรองหรือมาตรฐานทุติยภูมิ (Secondary standards) เป็นมาตรฐานที่ได้ค่ามาจากการเปรียบเทียบกับมาตรฐานปฐมของปริมาณเดียวกัน (Standard whose value is assigned by comparison with a primary standard of the same quantity:VIM 6.5) ใช้เป็นอ้างอิงในอุตสาหกรรมสำหรับปรับเทียบอุปกรณ์และส่วนประกอบที่มีความถูกต้องสูง และใช้ตรวจสอบความถูกต้องของมาตรฐานขั้นใช้งาน เมื่อมีการใช้งานไปได้ระยะหนึ่งตามกำหนดเวลา จะต้องนำมาตรฐานนี้ไปตรวจเช็คกับสถาบันที่เก็บรักษามาตรฐานชั้นต้นอีกทอดหนึ่ง

---

[4] BIPM เป็นคำย่อจากภาษาฝรั่งเศสคือ Bureau International des Poidset Mesures

มาตรฐานอ้างอิง(Reference Standard) คือมาตรฐานที่โดยทั่วไปมีคุณสมบัติทางมาตรวิทยาสูงสุดมีไว้ ณ จุดใช้งานหรือในหน่วยงาน ซึ่งการวัดที่กระทำในหน่วยงานได้มาจากมาตรฐานนี้ (Standard, generally having the highest metrological quality available at a given location or in a given organization, from which measurements made there are derived: VIM 6.6)

มาตรฐานใช้งาน(Working Standards) คือมาตรฐานที่ใช้สำหรับการสอบเทียบ หรือการตรวจสอบกับวัสดุวัด เครื่องมือวัด หรือวัสดุอ้างอิง (Standard that is used to calibrate or check material measures, measuring instruments or reference materials: VIM 6.7) ใช้เป็นมาตรฐานในการอ้างอิงวันต่อวันโดยปกติจะพบในห้องทดลองทางอิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ เช่น ความต้านทานมาตรฐาน ตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำ เป็นต้น ซึ่งสามารถจำแนกได้ว่าเป็นมาตรฐานเกี่ยวกับการใช้งาน (Working standards) ความต้านทานมาตรฐานนี้ตามธรรมดาทำมาจากแมงกานิน หรือวัสดุอื่น ๆ ที่คล้ายกัน เนื่องจากมีสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนค่าเนื่องจากอุณหภูมิต่ำมาก สามารถหาค่าใช้ได้ได้ตั้งแต่ความต้านทานค่าต่ำในย่าน 0.01 โอห์ม ถึง 1 เมกกะโอห์ม โดยมีความถูกต้องเป็น $\pm$ 0.01 % ถึง $\pm$ 0.1 % ส่วนตัวเก็บประจุมาตรฐานอาจเป็นชนิดมีอากาศเป็นไดอิเล็กตริก หรืออาจทำด้วยไมกาชุบเงิน สามารถหามาใช้ได้ตั้งแต่ค่าต่ำ ๆ 0.001 ถึง 1 ไมโครฟารัด มีความถูกต้องอยู่ในช่วง $\pm$ 0.02 % สำหรับตัวเหนี่ยวนำมาตรฐานจะมีค่าที่หาใช้ได้ตั้งแต่ 100 ไมโครเฮนรี่ ถึง 10 เฮนรี่ ที่ความถูกต้อง $\pm$ 0.1 % ส่วนตัวปรับเทียบ (Calibrators) ก็จะใช้แรงดันและกระแสมาตรฐานในการสอบเทียบโวลต์ และแอมป์มิเตอร์

มาตรฐานขั้นใช้งานจะสอบเทียบกับมาตรฐานอ้างอิงเสมอ และ**มาตรฐานใช้งานนี้อาจใช้สำหรับงานประจำ** เพื่อให้มั่นใจว่าการวัดที่กระทำเป็นไปอย่างถูกต้อง บางครั้งก็เรียกว่า มาตรฐานสำหรับตรวจสอบ (Check Standard)

สรุป มาตรฐานชั้นรองจะมีความถูกต้องมากกว่ามาตรฐานใช้งาน จึงนิยมใช้ในอุตสาหกรรมสำหรับตรวจสอบมาตรฐานใช้งาน และสอบเทียบอุปกรณ์ที่มีความถูกต้องสูง ส่วนมาตรฐานชั้นต้นมีความถูกต้องมากกว่ามาตรฐานชั้นรอง ซึ่งมาตรฐานชั้นต้นจะถูกรักษาให้มีความถูกต้องสูงสุดเท่าที่จะทำได้โดยสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ในฐานะเป็นอ้างอิงสำหรับการสอบเทียบมาตรฐานชั้นรอง ส่วนมาตรฐานระหว่างชาติถูกเก็บรักษาโดยข้อตกลงระหว่างชาติและใช้สำหรับตรวจสอบมาตรฐานชั้นต้น

1.2 ค่าผิดพลาดของการวัด

ค่าผิดพลาด หมายถึง ปริมาณหรือตัวเลขแสดงความแตกต่างระหว่างค่าที่แท้จริงของสิ่งที่เราวัด (Expected Value) และค่าที่อ่านได้จากเครื่องวัด (Measured Value) ค่าผิดพลาดอาจจำแนกเป็นประเภทได้หลายวิธีตามวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกัน

1.2.1 ชนิดและสาเหตุของค่าผิดพลาดของการวัด

ในที่นี้แบ่งค่าผิดพลาดเป็น 3 ประเภท คือ

1. ค่าผิดพลาดโดยผู้วัด (Gross Errors)

เป็นค่าผิดพลาดที่เกิดจากขณะใช้เครื่องวัด เช่น การอ่านค่าจากเครื่องวัดผิดพลาด บันทึกข้อมูลในการทดสอบผิดพลาด หรือใช้เครื่องวัดผิดวิธี

2. ค่าผิดพลาดเชิงระบบ (Systematic Errors)

เป็นค่าผิดพลาดที่เกิดจากองค์ประกอบต่าง ๆ ในกระบวนการใช้เครื่องวัดประกอบด้วย

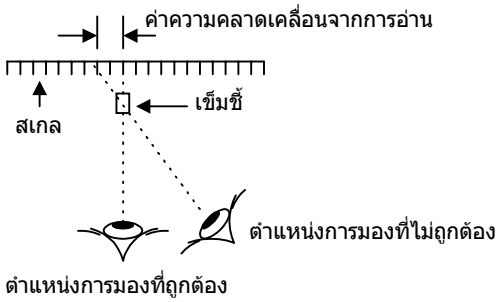
ค่าผิดพลาดในเครื่องวัด (Instrument Errors)

ค่าผิดพลาดเช่นนี้อาจเกิดจากการเสียดสีภายในของเดือยกับแบริ่งหรือการคลายตัวหรือการตึงตัวของสปริงก้นหอย เป็นต้น ค่าผิดพลาดประเภทนี้สามารถลดได้โดยการบำรุงรักษาเครื่องวัดอย่างถูกวิธี

ค่าผิดพลาดจากสภาพแวดล้อม (Environment Errors)

ค่าผิดพลาดชนิดนี้เกี่ยวกับสภาพแวดล้อมขณะใช้เครื่องวัด เช่น บริเวณที่มีอุณหภูมิสูง บริเวณที่มีความชื้นไม่เหมาะสม บริเวณที่มีอำนาจสนามแม่เหล็ก เป็นต้น สภาพแวดล้อมเหล่านี้อาจทำให้การทำงานของเครื่องวัดเกิดค่าผิดพลาดได้

ค่าผิดพลาดในการสังเกตเพื่ออ่านค่าจากสเกล (Observation Errors)



รูปที่ 1.3

ค่าผิดพลาดชนิดนี้เกิดจากการสังเกตของผู้อ่านค่า มองไม่ตั้งฉากกับเข็มและสเกล (ดูรูปที่ 1.3) การแก้ไขค่าผิดพลาดประเภทนี้ทำได้โดยใช้กระจกหรือแถบสะท้อนแสงติดอยู่ในระนาบเดียวกับสเกล สำหรับการอ่านค่าที่ถูกต้องจะต้องมองเห็นเข็มกับภาพของเข็ม (ที่เกิดในกระจกหรือแถบสะท้อนภาพ) ทับกันสนิทพอดี

3. ค่าผิดพลาดสุ่มหรือไร้ระบบ (Random Errors)

ค่าผิดพลาดชนิดนี้เป็นค่าผิดพลาดที่มีค่าต่ำมาก เมื่อเทียบกับค่าผิดพลาดโดยผู้วัดและค่าผิดพลาดเชิงระบบ เราจะทราบว่ามีความผิดพลาดชนิดนี้เมื่อทำการวัดปริมาณที่ทำการวัดซ้ำแล้วได้ค่าที่เปลี่ยนแปรไปโดยมีลักษณะที่ไม่อาจคาดเดาได้ จะมีความสำคัญเฉพาะกรณีที่ต้องการความถูกต้องในการวัดสูง ๆ เท่านั้น การปรับแก้ค่าผิดพลาดไร้ระบบนี้ไม่สามารถทำได้ แต่สามารถ**ทำให้ลดน้อยลงได้โดยการวัดซ้ำหลาย ๆ ครั้ง** สำหรับการคำนวณหาค่าค่าผิดพลาดประเภทนี้ต้องใช้วิธีการทางสถิติช่วย

1.2.2 การคำนวณค่าผิดพลาดของเครื่องมือวัด

ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์และเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน

(Absolute, Relative and Percentage errors)

ในการคำนวณค่าผิดพลาดในการวัด จะนิยมใช้ความแตกต่างระหว่างค่าที่อ่านได้จากเครื่องวัดกับค่าที่แท้จริงของสิ่งที่วัด (ค่ามาตรฐาน) เรียกว่า **ค่าผิดพลาดสัมบูรณ์** เมื่อเทียบอัตราส่วนระหว่างค่าผิดพลาดสัมบูรณ์กับค่าแท้จริงของสิ่งที่วัด จะเรียกว่า ค่าผิดพลาดสัมพัทธ์ และเมื่อนำค่าผิดพลาดสัมพัทธ์คูณด้วย 100 % จะได้เป็นเปอร์เซ็นต์ค่าผิดพลาด ดังสมการและตัวอย่างต่อไปนี้

กำหนดให้

E_a = ค่าผิดพลาดของเครื่องวัด (Absolute Value)

Y_n = ค่าที่แท้จริงของสิ่งที่วัด (Expected Value)

X_n = ค่าที่อ่านได้จากเครื่องวัด (Measured Value)

$$E_a = X_n - Y_n \tag{1.25}$$

เมื่อเทียบ E_a กับ Y_n จะได้เป็นค่าผิดพลาดสัมพัทธ์ (Relative Error) หาได้จาก

$$E_r = \frac{E_a}{Y_n} \tag{1.26}$$

แทนค่าสมการ (1.25) ลงในสมการ (1.26) และคูณด้วย 100 จะได้เปอร์เซ็นต์ค่าผิดพลาด (Percent error)

$$E_p = \left|\frac{X_n - Y_n}{Y_n}\right|(100) \tag{1.27}$$

ความถูกต้องและความเที่ยงของการวัด (Accuracy and Precision)

ความถูกต้องบางครั้งใช้คำว่าความแม่นของการวัด หมายถึงความถูกต้องใกล้เคียงกัน ระหว่างผลของการวัดกับค่าที่เป็นจริงของปริมาณที่วัด เขียนสมการได้ดังนี้

$$A = 1 - \left|\frac{X_n - Y_n}{Y_n}\right| \tag{1.28}$$

$$a = 100\% - E_p = A \times 100 \tag{1.29}$$

เมื่อกำหนดให้

A = แม่นของการวัด

a = เปอร์เซ็นต์ของความแม่น

ความเที่ยงของการวัด หมายถึงความใกล้เคียงของค่าที่ได้จากาการวัดตัวแปรเดียวกันแต่ละครั้ง (จากการวัดซ้ำหลาย ๆ ครั้ง) กับค่าเฉลี่ยของการวัดทุกครั้ง เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\text{ความเที่ยง} = 1 - \left| \frac{X_n - \overline{X}_n}{\overline{X}_n} \right| \qquad (1.30)$$

$$\overline{X}_n = \frac{\text{ผลรวมของค่าที่วัดได้แต่ละครั้ง}}{\text{จำนวนครั้งที่ทำการวัด}} \qquad (1.31)$$

เมื่อ X_n = ค่าที่วัดได้แต่ละครั้ง

$\overline{X}_n$ = ค่าเฉลี่ยของการวัด

ความแม่นและความเที่ยงมีความสัมพันธ์กัน คือ ถ้าการวัดใด ๆ มีความถูกต้องสูงก็ย่อมมีความเที่ยงสูงเสมอ แต่การวัดที่มีความเที่ยงสูงไม่ได้แสดงว่ามีความแม่นสูงเสมอไป ดังนั้น**ไม่ควร**ใช้คำว่า ความเที่ยง แทนความแม่น

สมมติให้มีเครื่องวัด 2 เครื่อง คือ A และ B เครื่องวัด A มีความแม่นสูง ส่วนเครื่องวัด B มีความเที่ยงสูง อาจกล่าวได้ว่า เครื่องวัด A ดีกว่าเครื่องวัด B เนื่องจากมีความแม่นสูงย่อมมีความเที่ยงสูงด้วย และเป็นไปไม่ได้ที่เครื่องวัดจะมีความแม่นสูง แต่ขาดความเที่ยง ส่วนเครื่องวัด B ซึ่งมีความเที่ยงสูง แต่อาจมีความแม่นต่ำก็ได้ เมื่อเป็นเช่นนี้ค่าที่วัดได้จากเครื่องวัด B จึงมีค่าผิดพลาด สามารถแก้ไขได้โดยนำเครื่องวัดนี้ไปทำการสอบเทียบ (calibration) ใหม่

ความแม่นและความเที่ยงของการวัดมิได้ขึ้นอยู่กับคุณภาพของเครื่องวัดเพียงอย่างเดียว แต่ขึ้นอยู่กับบุคคลที่ใช้เครื่องวัดด้วย ถ้าเครื่องวัดมีคุณภาพดี แต่ผู้ใช้ขาดทักษะหรือขาดความระมัดระวังขณะใช้เครื่องวัดนั้น ก็อาจเกิดค่าผิดพลาดทางกายภาพได้ เช่น มุมที่มองการเบี่ยงเบนของเข็มไม่ถูกต้อง (ดังรูปที่ 1.3) เป็นต้น

ตัวอย่างที่ 1.3 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าขนาด 50 V เมื่อนำโวลต์มิเตอร์ไปวัดปรากฏว่าอ่านค่าได้ 49 V จงหาค่าต่อไปนี้

ก) ค่าผิดพลาดของโวลต์มิเตอร์

ข) เปอร์เซ็นต์ค่าผิดพลาด

ค) ความแม่นของโวลต์มิเตอร์

ง) เปอร์เซ็นต์ความแม่น

วิธีคิด ก) จากสมการ (1.25)

$$E_a = X_n - Y_n$$

$$E_a = 49\,V - 50\,V = -1\,V$$

ข) จากสมการ (1.27)

$$\text{เปอร์เซ็นต์ค่าผิดพลาด} = \left| \frac{49\,V - 50\,V}{50\,V} \right| \times 100\%$$

$$= \frac{1}{50} \times 100\%$$

$$= 2\,\%$$

ค) จากสมการ (1.28)

$$A = 1 - \left| \frac{49V - 50V}{50V} \right|$$

$$= 1 - \frac{1}{50} \qquad = 1 - 0.02$$

$$= 0.98$$

ง) จากสมการ (1.29)

$$a = 100\% - \text{Percent error}$$

$$= 100\% - 2\% \qquad = 98\%$$

$$= A \times 100 \qquad = 0.98 \times 100$$

$$= 98\ \%$$

ชั้นของเครื่องวัดไฟฟ้า (Class)

ทางปฏิบัติความความแม่นระบุเป็นชั้น(Class) เป็นตัวเลขบอกถึงความถูกต้องเที่ยงตรงของตัวเครื่องมือวัด นอกจากนี้ยังใช้สำหรับหาค่าผิดพลาดสัมบูรณ์ของเครื่องวัดแต่ละย่านวัดโดยคิดจากค่าเต็มสเกลอีกด้วย เป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง แต่อาจเนื่องจากตัวเลขที่ใช้มีค่ามากซึ่งอาจทำให้ผิดพลาดหรือสับสนได้ (ที่ถูกต้องจริงๆ ควรเป็นไปตามที่คำนวณได้ดังตัวอย่างที่ 1.3 ข้างต้น) การแบ่งชั้นเครื่องวัดเพื่อความสดวกตามลักษณะการใช้งาน แบ่งได้ 8 ชั้น(class) 4 หมู่[5] คือ

1. ชั้น 0.05, 0.1, 0.2
   - ใช้สำหรับห้องปฏิบัติการ เป็นมาตรฐานชั้นรอง
   - ใช้ทำการทดลองที่ละเอียดหรือตรวจสอบเครื่องวัดอื่น ๆ
2. ชั้น 0.5
   - ใช้สำหรับการวัดละเอียด
   - เครื่องวัดแบบหิ้วติดตัวไปได้ (portable) แบบธรรมดา
3. ชั้น 1.0
   - ใช้เป็นเครื่องมือวัดแบบหิ้วติดตัวไปได้ขนาดเล็ก
   - ติดตั้งบนแผงสวิตช์ขนาดใหญ่
   - ติดตั้งบนแผงหน้าปัทม์
4. ชั้น 1.5, 2.5, 5
   - พบในเครื่องมือที่ไม่ต้องการความละเอียดเที่ยงของเครื่องวัดมากนัก

จากทั้งสี่หมู่หลักและชั้นต่าง ๆ เครื่องมือวัดจะมีความถูกต้องเที่ยงตรงเรียงจากสูงลงมา เมื่อนำมาใช้ในช่วงวัดเดียวกัน หรืออาจกล่าวได้ว่าเครื่องมือวัดที่มีชั้นสูง ๆ จะมีความคลาดเคลื่อนมากกว่าชั้นต่ำ ๆ

---

[5] **อาภร เก่งพล**. การวัดและเครื่องวัดไฟฟ้า. 2539.

ตัวอย่างที่ 1.4 ตารางต่อไปนี้แสดงค่าที่ได้จากการวัด 10 ครั้งในห้องทดลอง จงหาค่าความเที่ยงของการวัดครั้งที่ 4

ครั้งที่วัด	ค่าที่วัดได้	ครั้งที่วัด	ค่าที่วัดได้
1	98	6	103
2	102	7	98
3	101	8	106
→ 4	→ 97	9	107
5	100	10	99

วิธีคิด จากสมการ (1.31)

$$\overline{X}_n = \frac{\text{ผลรวมของค่าที่วัดได้แต่ละครั้ง}}{\text{จำนวนครั้งที่ทำการวัด}}$$

$$= \frac{98+102+101+97+100+103+98+106+107+99}{10}$$

$$= 101.1$$

จากสมการ (1.30)

$$\text{ความเที่ยง} = 1-\left|\frac{X_n-\overline{X}_n}{\overline{X}_n}\right| = 1-\left|\frac{97-101.1}{101.1}\right|$$

$$= 1-|-0.04|$$

ค่า $1-|-0.04|$ จะคิดเฉพาะขนาด

$\therefore$ ความเที่ยง = 1 – 0.04 = 0.96

ตัวอย่างที่ 1.5 ตารางต่อไปนี้แสดงค่ามุมซึ่งเกิดจากการเบี่ยงเบนของเข็มในเครื่องวัด (Output displacement) ขณะวัดตัวแปรตัวหนึ่ง โดยจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าเครื่องวัด (Input current) 10 μA จำนวน 8 ครั้ง จงหาค่าความเที่ยงที่ต่ำสุดของการวัด

กระแสไฟฟ้า (μA)	มุม (องศา)
10	20.10
10	20.00
10	20.20
10	19.80
→ 10	→ 19.70
10	20.00
10	20.30
10	20.10

จากสมการ (1.31) $\overline{X}_n = \dfrac{\text{ผลรวมของค่าที่วัดได้แต่ละครั้ง}}{\text{จำนวนครั้งที่ทำการวัด}}$

$$= \frac{20.1 + 20.0 + 20.2 + 19.8 + 19.7 + 20.0 + 20.3 + 20.1}{8}$$

$$= 20.02^\circ$$

จากค่าที่วัดได้จากครั้งที่ 5 มีความแตกต่างไปจากค่าเฉลี่ยมากที่สุด ดังนั้นความเที่ยงต่ำที่สุดจึงหาได้จากการวัดครั้งที่ 5 นี้

จากสมการ (1.30)

$$\text{ความเที่ยง} = 1 - \left|\frac{X_n - \overline{X}_n}{\overline{X}_n}\right| = 1 - \left|\frac{19.70 - 20.02}{20.02}\right|$$

$$= 1 - |-0.016|$$

คิดเฉพาะขนาดของค่า $|-0.016|$

$\therefore$ ความเที่ยงต่ำที่สุดของการวัดทั้งหมด = 1 – 0.016 = 0.984

ตัวอย่างที่ 1.6 โวลท์มิเตอร์มีค่าแรงดันไฟฟ้าขณะเข็มเบี่ยงเบนเต็มสเกล 300 V และมีค่าความแม่น $\pm$ 2% จงหาเปอร์เซ็นต์ค่าผิดพลาดขณะใช้เครื่องวัดนี้วัดแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าขนาด 120 V

วิธีคิด ค่าผิดพลาดมีค่าเป็น

$$\frac{\pm 2}{100} \times 300\,\text{V} = \pm 6\,\text{V}$$

จากสมการ (1.26)

$$\text{เปอร์เซ็นต์ค่าผิดพลาด} = \frac{E_a}{Y_n}(100)\,\%$$

$$= \frac{6}{120} \times 100\% = 5\,\%$$

ตัวอย่างที่ 1.7 โวลท์มิเตอร์และแอมป์มิเตอร์มีค่าความแม่น ขณะเข็มเบี่ยงเบนเต็มสเกลเป็น $\pm$ 1% เท่ากัน ถ้านำเครื่องวัดทั้งสองไปวัดค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในตัวต้านทานตัวหนึ่ง โวลท์มิเตอร์อ่านค่าได้ 80 V ที่ย่านการวัด 150 V และแอมป์มิเตอร์อ่านค่าได้ 70 mA ที่ย่านการวัด 100 mA จงหาเปอร์เซ็นต์ค่าผิดพลาดในค่ากำลังไฟฟ้าซึ่งได้จากการนำค่าที่อ่านได้จากเครื่องวัดทั้งสองมาคูณกัน (P = VI)

วิธีคิด ค่าผิดพลาดของโวลต์มิเตอร์

$$\frac{\pm 1}{100} \times 150\,\text{V} = 1.5\,\text{V}$$

ค่าผิดพลาดที่ 80 V หาได้จากสมการ (25)

$$\text{เปอร์เซ็นต์ค่าผิดพลาด} = \frac{E_a}{Y_n} \times 100\,\%$$

$$= \frac{1.5}{80} \times 100\% \quad = 1.87\ \%$$

ค่าผิดพลาดของแอมป์มิเตอร์ $\frac{\pm 1}{100} \times 100\text{mA}$ $= 1\ \text{mA}$

เปอร์เซ็นต์ค่าผิดพลาดที่ 70 mA หาได้จากสมการ (1.26)

เปอร์เซ็นต์ค่าผิดพลาด $= \frac{1}{70} \times 100\% \quad = 1.43\ \%$

เมื่อนำค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่อ่านได้จากเครื่องวัดมาคูณกัน เพื่อให้ได้ค่ากำลังไฟฟ้า ในการหาค่าผิดพลาดรวม จะต้องนำค่าผิดพลาดของเครื่องวัดแต่ละเครื่องมารวมกัน

$\therefore$ ค่าผิดพลาดในค่ากำลังไฟฟ้า = 1.87 % + 1.43 % = 3.3 %

ตัวอย่างที่ 1.8 แอมมิเตอร์มีค่ากระแสไฟฟ้า ขณะเข็มเบี่ยงเบนเต็มสเกล 10 mA และมีความแม่น $\pm$ 3 % ถ้านำเครื่องวัดนี้ไปวัดค่ากระแสไฟฟ้าขนาด 1 mA, 5mA และ 10 mA จงหาค่าต่อไปนี้

ก) ค่าผิดพลาดของเครื่องวัด (หน่วยเป็น mA)

ข) ค่ากระแสไฟฟ้าที่แอมมิเตอร์อ่านได้

ค) เปอร์เซ็นต์ค่าผิดพลาด

วิธีคิด ก) ค่าค่าผิดพลาดของเครื่องวัด $= \frac{\pm 3}{100} \times 10\text{mA} \quad = \pm 0.3\ \text{mA}$

ข) ขณะวัดกระแสไฟฟ้า 1 mA เครื่องวัดอ่านค่าได้ในช่วง

$1 \pm 0.3\ \text{mA}$ = 0.7 ถึง 1.3 mA

ขณะวัดกระแสไฟฟ้า 5 mA เครื่องวัดอ่านค่าได้ในช่วง

$5 \pm 0.3\ \text{mA}$ = 4.7 ถึง 5.3 mA

ขณะวัดกระแสไฟฟ้า 10 mA เครื่องวัดอ่านค่าได้ในช่วง

$10 \pm 0.3\ \text{mA}$ = 9.7 ถึง 10.3 mA

ค) จากสมการ (1.26)

เปอร์เซ็นต์ค่าผิดพลาด $= \frac{E_a}{Y_n} \times 100\%$

ขณะวัดกระแสไฟฟ้า 1 mA

เปอร์เซ็นต์ค่าผิดพลาด $= \frac{0.3\text{mA}}{1\text{mA}} \times 100\% \quad = 30\ \%$

ขณะวัดกระแสไฟฟ้า 5 mA

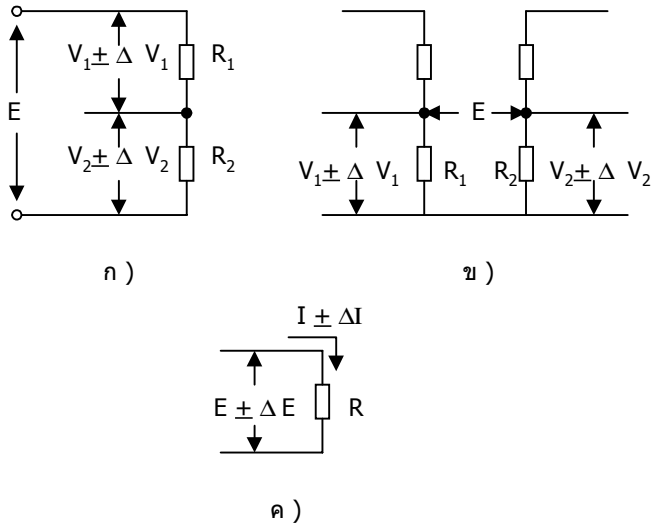
เปอร์เซ็นต์ค่าผิดพลาด $= \frac{0.3\text{mA}}{5\text{mA}} \times 100\% \quad = 6\ \%$

ขณะวัดกระแสไฟฟ้า 10 mA

เปอร์เซ็นต์ค่าผิดพลาด $= \frac{0.3\text{mA}}{10\text{mA}} \times 100\% \quad = 3\ \%$

ค่าผิดพลาดจากการวัดด้วยเครื่องวัดหลายเครื่อง (Measurement error combinations)

ปริมาณที่คำนวนได้จากการวัดด้วยเครื่องมือวัดตั้งแต่สองเครื่องขึ้นไป ค่าผิดพลาดของค่าที่ได้รวมจะคำนวณจากความไม่ถูกต้องมากสุดที่เป็นไปได้ของเครื่องวัด ค่าผิดพลาดที่ได้จะมากกว่าค่าผิดพลาดของเครื่องวัดแต่ละเครื่อง ซึ่งมีแนวทางในการคำนวณได้ดังนี้



รูปที่ 1.4 ค่าผิดพลาดรวมของปริมาณที่วัด

การรวมปริมาณที่วัด (Sum of Quantities)

ปริมาณที่ได้จากค่าผลรวมของสองการวัด ค่าผิดพลาดรวมหาได้จากผลรวมของค่าผิดพลาดสัมบูรณ์ในแต่ละการวัด แสดงให้เห็นได้ชัดในรูปที่ 1.4 ก) และเขียนสมการค่าผิดพลาดรวมได้ดังนี้

$$E = (V_1 \pm \Delta V_1) + (V_2 \pm \Delta V_2)$$

$$E = (V_1 + V_2) \pm (\Delta V_1 + \Delta V_2) \qquad (1.32)$$

ตัวอย่างที่ 1.9 จงคำนวนหาเปอร์เซ็นต์ค่าผิดพลาดสูงสุดที่ได้จากการวัดแรงดันด้วยโวลต์มิเตอร์สองเครื่องวัดค่าได้ดังนี้ $V_1 = 100\ V \pm 1\ \%$ และ $V_2 = 80\ V \pm 5\ \%$

วิธีคิด

$V_1 = 100\ V \pm 1\ \% = 100\ V \pm 1\ V$

$V_2 = 80\ V \pm 5\ \% = 80\ V \pm 4\ V$

$E = V_1 + V_2$

$= (100\ V \pm 1\ V) + (80\ V \pm 4\ V)$

$= 180\ V \pm (1\ V + 4\ V)$

$= 180\ V \pm 5\ V$

$= 180 \pm 2.8\ \%$

จากตัวอย่างที่ 1.9 สังเกตได้ว่าเปอร์เซ็นต์ค่าผิดพลาดในขั้นสุดท้าย ไม่ใช่ค่าที่คำนวณโดยตรงจากค่าเปอร์เซ็นต์ค่าผิดพลาดของปริมาณที่วัดได้ทั้งสองค่า

ปริมาณที่วัดได้สองปริมาณหรือมากกว่าเมื่อนำมารวมกันแล้ว จะต้องนำค่าค่าผิดพลาดสัมบูรณ์มารวมกันด้วยเพื่อหาความผิดพลาดรวม

ผลต่างของปริมาณที่วัด (Difference of Quantities)

จากรูปที่ 1.4 ข) เป็นการหาแรงดันแตกต่างของการวัด เราจะนำค่าค่าผิดพลาดมารวมกันเช่นเดียวกันกับการบวก ดังนี้

$$E = V_1 - V_2$$

$$= (V_1 \pm \Delta V_1) - (V_2 \pm \Delta V_2)$$

$$E = (V_1 - V_2) \pm (\Delta V_1 + \Delta V_2) \qquad (1.33)$$

ตัวอย่างที่ 1.10 จงคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดของผลต่างของแรงดันที่วัดได้จาก $V_1 = 100\ V \pm 1\ \%$ และ $V_2 = 80 \pm 5\ \%$

วิธีคิด

$$V_1 = 100\ V \pm 1\ \% = 100\ V \pm 1\ V$$

$$V_2 = 80\ V \pm 5\ \% = 80\ V \pm 4\ V$$

$$E = V_1 - V_2$$

$$= (100\ V \pm 1\ V) - (80\ V \pm 4\ V)$$

$$= (100\ V - 80\ V) \pm (1\ V + 4\ V)$$

$$= 20\ V \pm 5\ V = 20\ V \pm 25\ \%$$

จากตัวอย่างที่ 1.10 เปอร์เซ็นต์ผิดพลาดของผลต่างมีขนาดใหญ่ ถ้าผลต่างมีค่าเล็ก ๆ เปอร์เซ็นต์จะมีค่ามาก สังเกตเราควรหลีกเลี่ยงระบบการวัดที่ต้องหาผลต่าง

ผลการคูณ (Product of Quantities)

การคำนวณที่ได้จากปริมาณที่มีการคูณกันของปริมาณสองปริมาณหรือมากว่าสองปริมาณขึ้นไป (พิจารณาได้จากรูป 1.4 c))

$$P = EI$$

$$= (E \pm \Delta E)(I \pm \Delta I)$$

$$= EI \pm E\,\Delta I \pm I\Delta E \pm \Delta E\,\Delta I$$

เมื่อ $\Delta E\,\Delta I$ มีค่าต่ำมาก ๆ

$$P \simeq EI \pm (E\,\Delta I + I\Delta E)$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ผิดพลาด} = \frac{E\Delta I + I\Delta E}{EI} \times 100\%$$

$$= \left(\frac{E\Delta I}{EI} + \frac{I\Delta E}{EI} \right) \times 100\%$$

$$= \left(\frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta E}{E} \right) \times 100\%$$

% ความผิดพลาด = (% ผิดพลาดของ I) + (% ผิดพลาดของ E) (1.34)

เช่น เมื่อแรงดันที่วัดได้มีความแม่น ±1% และกระแสที่วัดได้มีความแม่น ±2 % ค่ากำลังที่คำนวณได้จะมีความแม่นเป็น ±3%

ผลการหาร (Quotient of Quantities)

สำหรับเปอร์เซ็นต์ค่าผิดพลาดของผลหารของปริมาณหาได้จากผลรวมของเปอร์เซ็นต์ค่าผิดพลาดของปริมาณแต่ละตัวที่นำมาหารกัน พิจารณาจากรูป 1.4 c) จะได้สมการดังนี้

% ความผิดพลาดของ E/I = (% ผิดพลาดของ E) + (% ผิดพลาดของ I) (1.35)

ปริมาณยกกำลัง(Quantity Raised to a Power)

กรณีปริมาณ A ยกกำลัง B แล้วเปอร์เซ็นต์ค่าผิดพลาดของ A^B สามารถหาได้จากสมการ

% ความผิดพลาดของ A^B = B(% ผิดพลาดของ A) (1.36)

เช่น กระแส I มีความแม่น ±3% ค่าผิดพลาดของ I^2 คือ 2(±3%) = ±6%

ตัวอย่างที่ 1.11 กระแส 10 มิลลิแอมป์ไหลผ่านความต้านทาน 820 โอห์ม ± 10 % ใช้อนาลอกแอมมิเตอร์ย่านวัด 25 มิลลิแอมป์ มีความแม่น ± 2 % ของค่าเต็มสเกล จงคำนวณหากำลังสูญเสียในความต้านทานและค่าความแม่นของผลลัพธ์ที่ได้

วิธีคิด

$P = I^2R$

$P = (10\ mA)^2 \times 820\ \Omega = 82\ mW$

ค่าผิดพลาดของ R = ± 10 %

ค่าผิดพลาดของ I = ± 2 % ของ 25 mA

= ± 0.5 mA

$= \frac{\pm 0.5 mA}{10 mA} \times 100\%$

= ± 5 %

% ค่าผิดพลาดของ I^2 = 2 (±5%)

= ± 10 %

% ค่าผิดพลาดของ P = (% ผิดพลาดของ I) + (% ผิดพลาดของ R)

= ± (10 % + 10 %)

= ± 20 %

1.2.3 สถิติเบื้องต้นสำหรับวิเคราะห์ค่าผิดพลาดในการวัด

ค่าเฉลี่ยเลขคณิต (Arithmetic Mean Value)

เมื่อทำการวัดหลาย ๆ ครั้งแล้วค่าที่ทำการวัดไม่เท่ากัน การประมาณค่าเพื่อให้ได้ค่าที่เป็นตัวแทนการวัดหลาย ๆ ครั้งนี้หาได้โดยการคำนวณหาค่าเฉลี่ย หรือค่าเฉลี่ยเลขคณิตของผลที่ได้จากการวัดแต่ละครั้ง สำหรับค่าที่ทำการวัดมาได้เป็น $x_1, x_2, x,..., x_n$ เขียนเป็นสมการได้คล้ายกับสมการ (1.26) ดังนี้

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + ... + x_n}{n} \qquad (1.37)$$

เมื่อ $\bar{x}$ = ค่าเฉลี่ยเลขคณิตของค่าที่ทำการวัดแต่ละครั้ง

n = จำนวนครั้งที่ทำการวัด

การหาค่าเฉลี่ยของการวัดโดยทั่วไปแล้วเป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ลดผลของค่าผิดพลาดสุ่ม ซึ่งเกิดจากสิ่งที่ไม่คาดคิดหรือคาดเดาไม่ได้ว่าจะเกิดเมื่อไร อาจเกิดจากผู้ใช้มีความล้า หรือเป็นผลจากแรงดันกระชากในระบบไฟฟ้า กระแสสลับ การเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วของอุปกรณ์ หรือการแปรเปลี่ยนความถี่ เป็นต้น

เมื่อทำการหาค่าเฉลี่ยของค่าที่ได้จากการอ่าน อาจพบว่ามีค่าหนึ่ง หรือสองค่าของการวัดที่ต่างไปจากค่าเฉลี่ยมากกว่าค่าอื่น ๆ มากผิดสังเกต ในกรณีนี้**แก้ได้โดยตัดค่าที่อ่านได้ดังกล่าวที่ดูเหมือนไม่ถูกต้องนี้ออก** แล้วทำการคำนวณค่าเฉลี่ยจากค่าข้อมูลที่เหลือต่อไป หรือจะต้องทำการวัดอีกครั้งหากมีค่าที่อ่านได้ต่างจากค่าเฉลี่ยหลายค่าเกินไป

การเบี่ยงเบน (Deviation)

ความแตกต่างระหว่างค่าที่วัดได้จากค่าเฉลี่ยเลขคณิต เรียกว่าการเบี่ยงเบน การเบี่ยงเบนอาจเป็นค่าบวกหรือลบก็ได้ ทำให้ได้ผลรวมของการเบี่ยงเบนมีค่าเท่ากับศูนย์เสมอ การเบี่ยงเบนเฉลี่ย (Average deviation) คำนวณได้จากค่าสัมบูรณ์ของการเบี่ยงเบน(ไม่คิดเครื่องหมาย) ถ้าค่าที่วัดได้มีค่าคงที่ การเบี่ยงเบนเฉลี่ยอาจพิจารณาใช้เป็นตัวชี้แสดงความเที่ยงของการวัดได้ (ดังตัวอย่างที่ 1.12) สมการที่ใช้หาการเบี่ยงเบนเฉลี่ยคือ

$$D = \frac{|d_1| + |d_2| + |d_3| + ... + |d_n|}{n} \qquad (1.38)$$

ตัวอย่างที่ 1.12 ผู้ใช้ตรวจสอบความแม่นของดิจิตอลมิเตอร์โวลต์มิเตอร์ โดยใช้วัดค่าแรงดันมาตรฐาน 1.0000 โวลต์ จากเครื่องมือสอบเทียบ โวลต์มิเตอร์อ่านค่าได้ดังนี้ $V_1 = 1.001$, $V_2 = 1.002$, $V_3 = 0.999$, $V_4 = 0.998$ และ $V_5 = 1.000$ โวลต์ ตามลำดับ จงคำนวณค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ยที่ได้จากการวัด ?

วิธีคิด จากสมการ (1.37)

$$V_{av} = \frac{V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5}{5}$$

$$= \frac{1.001V + 1.002V + 0.999V + 0.998V + 1.000V}{5}$$

$$= 1.000\ V$$

$$d_1 = V_1 - V_{av} = 1.001\ V - 1.000\ V = 0.001\ V$$

$$d_2 = V_2 - V_{av} = 1.002\ V - 1.000\ V = 0.002\ V$$

$d_3 = V_3 - V_{av} = 0.999\ V - 1.000\ V = -0.001\ V$

$d_4 = V_4 - V_{av} = 0.998\ V - 1.000\ V = -0.002\ V$

$d_5 = V_5 - V_{av} = 1.000\ V - 1.000\ V = 0\ V$

จากสมการ (1.37)

$$D = \frac{|d_1| + |d_2| + |d_3| + |d_4| + |d_5|}{5}$$

$$= \frac{|0.001V| + |0.002V| + |-0.001V| + |-0.002V| + |0V|}{5}$$

$$= \frac{0.001V + 0.002V + 0.001V + 0.002V + 0V}{5}$$

$$= 0.0012\ V$$

จากตัวอย่างที่ 1.12 ค่าเฉลี่ยของแรงดันที่วัดได้คือ 1.000 โวลต์ และการเบี่ยงเบนเฉลี่ยเป็น 1.2 มิลลิโวลต์ การคำนวณแบบนี้สามารถใช้หาค่าความถูกต้องของการวัดที่ได้จากเครื่องวัด 5 เครื่องได้ด้วย

การเบี่ยงเบนมาตรฐานและค่าผิดพลาดที่น่าจะเป็นไปได้ (Standard Deviation and Probable Error)

ผลการวัดสามารถวิเคราะห์โดยการหาค่าเฉลี่ยเลขคณิตของจำนวนครั้งที่ใช้วัดปริมาณค่าเดียวกัน และโดยการหาการเบี่ยงเบน และการเบี่ยงเบนเฉลี่ย ค่าเฉลี่ยของค่ายกกำลังสองของการเบี่ยงเบน (Mean-squared value) หาได้จากการยกกำลังสองของค่าการเบี่ยงเบนแต่ละค่าแล้วนำมาหาคาเฉลี่ยจะได้ค่าความแปรปรวน (Variance) และนำมาหารากที่สอง(square root) จะได้ค่าประสิทธิผล (root mean squared (rms)) ทางสถิติเรียกว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (σ) เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\sigma = \sqrt{\frac{d_1^2 + d_2^2 + d_3^2 + ... + d_n^2}{n}} \qquad (1.39)$$

ในกรณีจำนวนการวัดมาก ๆ ซึ่งจะปรากฏค่าผิดพลาดสุ่ม สามารถแสดงให้เห็นได้ว่าความน่าจะเป็นที่เกิดค่าผิดพลาดในการวัดหนึ่ง ๆ นั้นคือ 0.6745 เท่าของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน นั่นคือ

$$\text{probable error} = 0.6745\ \sigma \qquad (1.40)$$

ตัวอย่างที่ 1.13 จากข้อมูลตัวอย่างที่ 1.12 จงหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานและค่าผิดพลาดน่าจะเป็น ?

วิธีคิด จากสมการ (1.39) σ

$$= \sqrt{\frac{d_1^2 + d_2^2 + d_3^2 + d_4^2 + d_5^2}{5}}$$

$$= \sqrt{\frac{0.001^2 + 0.002^2 + 0.001^2 + 0.002^2 + 0^2}{5}} = 0.0014\ V$$

จากสมการ (1.40)

$$\text{probable error} = 0.6745\ \sigma = (0.6745)(1.4\ mV) = 0.94\ mV$$

1.3 ระบบการวัด (Measurement system)

การวัดมีวัตถุประสงค์คือ เพื่อแสดงค่าเป็นตัวเลขที่สอดคล้องกับตัวแปรที่ทำการวัด โดยทั่วไปค่าที่แสดงหรือวัดได้จะไม่เท่ากับค่าตัวแปรที่แท้จริงเลยทีเดียว เช่น การวัดอัตราการไหล (flow rate) ของของไหลในท่อเมื่อใช้เครื่องวัดแบบเข็มชี้ อาจได้ผลดังนี้คือ

ค่าที่เครื่องวัดแสดง อัตราการไหล = **11.0** ลูกบาศก์เมตร / ชั่วโมง ($m^3\ hr^{-1}$)

อัตราการไหลจริง อัตราการไหล = **11.2** ลูกบาศก์เมตร / ชั่วโมง ($m^3\ hr^{-1}$)

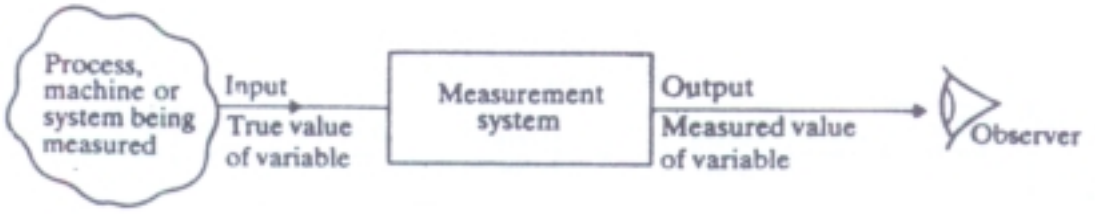
กรณีความเร็วการหมุนของเครื่องจักรเช่น มอเตอร์ไฟฟ้า เป็นต้น อาจได้ผลดังนี้คือ

ค่าที่เครื่องวัดแสดง ความเร็ว = **3140** รอบ / นาที หรือ(r.p.m)

ค่าความเร็วที่แท้จริง ความเร็ว = **3133** รอบ / นาที หรือ (r.p.m)

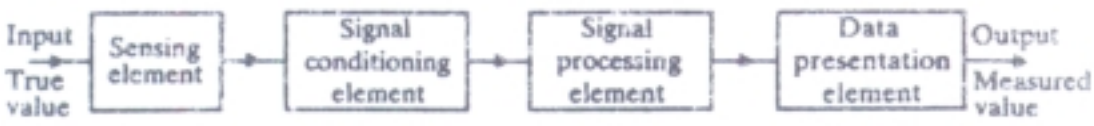
จากตัวอย่างข้างบนนี้แสดงให้เห็นว่าการวัดคือการแก้**ปัญหาหรือกล่าวได้ว่าการวัด** คือ การพยายามที่จะให้ได้มาซึ่งค่าแท้จริงของตัวแปร โดยคาดหวังให้เครื่องวัดแสดงค่าแท้จริงของตัวแปรที่ด้านเข้าของระบบการวัดได้ถูกต้อง ปัจจุบันเราสามารถที่จะทำให้ค่าที่ด้านเข้าของระบบการวัดกับค่าที่แสดงที่ด้านออกเป็นค่าเดียวกันกับค่าของตัวแปรด้านเข้าอย่างแท้จริงได้ จะทำให้สามารถแสดงขนาดหรือปริมาณของตัวแปรที่ต้องการทราบ(วัด)ได้ถูกต้องมากขึ้น (พิจารณาได้จากรูปที่ 1.5)

โดยนัยแล้วการวัดทางไฟฟ้าคือการเปลี่ยนปริมาณต่าง ๆ ทั้งที่เป็นปริมาณไฟฟ้าและไม่เป็นปริมาณทางไฟฟ้าที่ต้องการทราบไปเป็นปริมาณทางไฟฟ้า เช่น ปริมาณความดัน อัตราการไหลของของไหลต่าง ๆ แล้วแสดงออกมาเป็นขนาดกระแสไฟฟ้าหรือแรงดันที่แปรตามตัวแปรที่ทำการวัด เป็นต้น ต่อจากนั้นทำการปรับเทียบค่าที่ได้กับค่ามาตรฐาน นั่นคือเราสามารถสรุปได้ว่าการวัด คือ การเปรียบเทียบปริมาณที่ต้องการทราบกับปริมาณมาตรฐานนั่นเอง



รูปที่ 1.5 วัตถุประสงค์หรือเป้าหมายของการวัด

1.3.1 ส่วนประกอบและหน้าที่ของระบบการวัด



รูปที่ 1.6 โครงสร้างของระบบการวัดทั่ว ๆ ไป

ระบบการวัดประกอบด้วยอุปกรณ์พื้นฐานต่าง ๆ แบ่งได้ 4 ส่วนดังรูปที่ 1.6 แต่สำหรับบางระบบการวัดอาจมีอุปกรณ์พื้นฐานเพียงส่วนเดียวเดี่ยว ๆ หรือมีองค์ประกอบไม่ครบทั้ง 4 ส่วนก็ได้ โดยยังถือว่าเป็นระบบการวัดได้ เราจะให้นิยามองค์ประกอบของระบบการวัดแต่ละส่วนย่อย ๆ ได้ดังนี้ คือ

อุปกรณ์ตรวจจับ (Sensing element) เป็นส่วนที่สัมผัสกับกระบวนการหรือตัวแปรที่เราทำการวัดโดยตรง ให้ผลลัพธ์ด้านออกของตัวตรวจจับแปรตามสภาวะทางกายภาพของตัวแปรด้านเข้า ดังตารางที่ 1.5

ตารางที่ 1.5 อุปกรณ์ตรวจจับ ตัวแปร ข้อมูลที่ได้รับออกมาที่ด้านออก

อุปกรณ์ตรวจจับ	ตัวแปร	ผลด้านออก
เทอร์โมคับเปิล (Thermocouple)	อุณหภูมิ (Temperature)	แรงดันเป็นมิลลิโวลต์ (millivolt)
สเตรนเกจ (Strain gauge)	ความเครียดทางกล (mechanical strain)	การเปลี่ยนค่าความต้านทาน
แผ่นออริฟิช (Orifice plate)	อัตราการไหล (flow rate)	ความดันแตกต่าง (Pressure drop)

อุปกรณ์ตรวจจับในระบบการวัดอาจมีมากกว่าหนึ่งตัว ซึ่งอุปกรณ์ที่สัมผัสโดยตรงกับกระบวนการ (Process) จัดได้ว่าเป็นอุปกรณ์ตรวจจับปฐมภูมิ (Primary element) และกรณีที่ไม่มีการสัมผัสโดยตรงเราเรียกว่าอุปกรณ์ตรวจจับทุติยภูมิ (Secondary element)

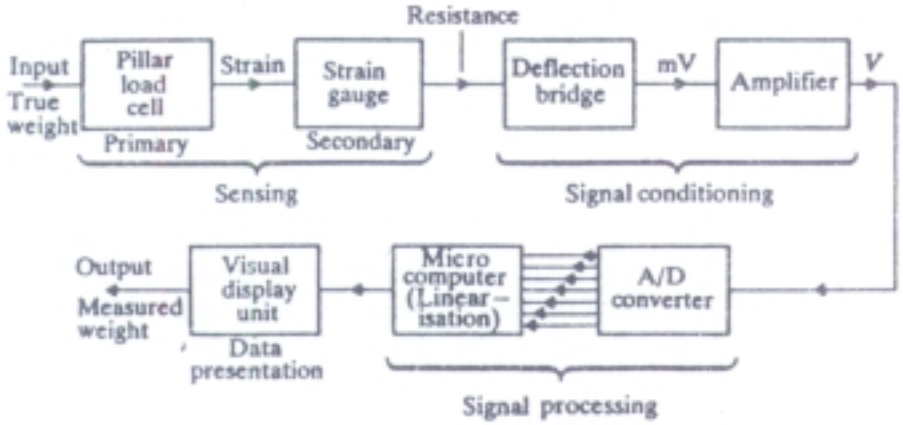
อุปกรณ์ปรับแต่งสัญญาณ (Signal Condition element) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้แปลงผลด้านออกของอุปกรณ์ตรวจจับให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมสำหรับการประมวลผล ตามปกติจะเป็นแรงดันและกระแสไฟตรง หรือสัญญาณที่มีความถี่ ดังตารางที่ 1.6

ตารางที่ 1.6 ตัวแปร อุปกรณ์ปรับแต่งสัญญาณ และผลด้านออก

ตัวแปร	อุปกรณ์ปรับแต่งสัญญาณ	ผลด้านออก
อิมพีแดนซ์ (Impedance)	บริดจ์แบบเข็มชี้แสดงค่า	การเปลี่ยนแปลงของแรงดัน
แรงดันมิลลิโวลต์ (millivolt)	วงจรขยาย (Amplifier)	แรงดัน (Volt)
อิมพีแดนซ์	ออสซิลเลเตอร์ (Oscillator)	แรงดันที่มีความถี่เปลี่ยนแปลง

อุปกรณ์ประมวลผลสัญญาณ (Signal processing element) เป็นส่วนที่แปลงผลจากด้านออกของอุปกรณ์ปรับแต่งสัญญาณให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมเพื่อนำไปแสดงผลหรือนำไปใช้ตามต้องการต่อไป เช่น ตัวแปลงแรงดันอนาลอกเป็นแรงดันดิจิตอล (Analogue to digital converter) จะเปลี่ยนแรงดันให้อยู่ในรูปแบบของสัญญาณดิจิตอลเพื่อส่งให้คอมพิวเตอร์หรือไมโครคอมพิวเตอร์ โดยใช้ข้อมูลดิจิตอลจากตัวแปลง A/D ตัวอย่างได้แก่ การคำนวณมวลรวมของการผลิตแกสจากอัตราการไหลและความหนาแน่นของแกส การหาผลรวมค่ายอดของโครมาโตรกราฟเพื่อให้ได้เป็นส่วนประกอบของแกสที่ไหล การแก้ความไม่เป็นเชิงเส้นของอุปกรณ์ตรวจจับตัวแปร เป็นต้น

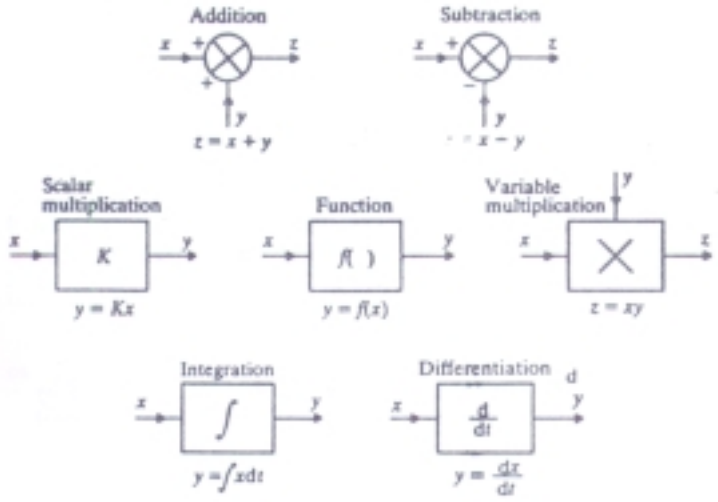
อุปกรณ์แสดงผลข้อมูล (Data presentation element) เป็นส่วนแสดงค่าในรูปแบบที่ง่ายต่อการสังเกต เช่น เครื่องวัดแบบเข็มชี้ เครื่องบันทึกกราฟ จอแสดงผลแบบตัวเลข หน่วยแสดงผลแบบเห็นภาพเหมือนจริง รูปที่ 1.7 แสดงระบบที่ใช้วัด(ชั่ง)น้ำหนักซึ่งมีการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่กล่าวข้างต้น



รูปที่ 1.7 ระบบการวัด(ชั่ง)น้ำหนัก

เรานิยมใช้คำว่า “**ทรานสดิวเซอร์** (Transducer)” เมื่อใช้กับระบบการวัดและเครื่องมือวัด โดยผู้ผลิตจะจัดรวมส่วนต่าง ๆ เข้าเป็นชุดเดียวกันโดยให้มีแรงดันด้านออกที่แปรสอดคล้องกับตัวแปรด้านเข้า เช่น ความดัน หรือความเร่ง นั่นคือทรานสดิวเซอร์แต่ละแบบอาจประกอบด้วยส่วนตรวจจับและส่วนปรับแต่งสัญญาณประกอบรวมอยู่ในชุดเดียวกัน เช่น ทรานสดิวเซอร์ที่ใช้สำหรับเครื่องชั่งน้ำหนัก จะถูกจัดให้ทำงานร่วมกับอุปกรณ์ส่วนที่ 1 ใน 4 ส่วนดังแสดงในรูปที่ 1.6 นอกจากนี้สิ่งที่สำคัญคือระบบการวัดอาจประกอบด้วยระบบอย่างง่าย ๆ ของส่วนประกอบดังกล่าว

เพื่อให้ง่ายต่อการศึกษาลักษณะสมบัติของอุปกรณ์และระบบการวัด สามารถใช้แผนภาพแทนอุปกรณ์หรือส่วนของระบบการวัดดังรูปที่ 1.8 ซึ่งแสดงสัญลักษณ์ของแผนภาพหลัก ๆ ที่มีใช้ในเนื้อหาที่จะกล่าวถึงต่อไป



รูปที่ 1.8 สัญลักษณ์ของแผนภาพ

1.3.2 ลักษณะสมบัติของระบบการวัด

ลักษณะคงตัวของอุปกรณ์ในระบบการวัด

การศึกษาเกี่ยวกับคุณลักษณะคงตัวของอุปกรณ์ในระบบการวัดที่สำคัญคือความสัมพันธ์ระหว่างด้านออกและด้านเข้าของอุปกรณ์ **เมื่อ**ด้านเข้ามีค่าคงที่หรือมีการเปลี่ยนแปลงอย่างค่อยเป็นค่อยไป(ช้า ๆ)

ลักษณะเชิงระบบ (Systematic characteristics)

ลักษณะเชิงระบบคือสิ่งที่สามารถหาได้จริงจากวิธีทางคณิตศาสตร์หรือวิธีกราฟ วิธีเหล่านี้แตกต่างจากคุณลักษณะทางสถิติ ที่สำคัญ ๆ มีดังนี้คือ

1. ย่านวัด (Range) คือช่วงที่กำหนดค่าต่ำสุดและสูงสุด ของเครื่องวัดซึ่งพิจารณาทั้งด้านขาเข้า (I) และด้านขาออก (O) **ตัวอย่าง** เช่น ทรานสดิวเซอร์สำหรับวัดความดันมีย่านวัดด้านเข้าตั้งแต่ 0 ถึง 10^4 ปาสคาล(Pa) มีย่านด้านออก 4 ถึง 20 มิลลิแอมป์ เทอร์โมคับเปิลมีย่านวัดด้านเข้าเป็น 100 ถึง 250 องศาเซลเซียส และย่านด้านออกเป็น 4 ถึง 10 มิลลิโวลต์

2. สแปน (Span) คือช่วงการเปลี่ยนแปลงได้สูงสุดของด้านเข้าหรือด้านออก เช่น ด้านเข้ามีสแปนเป็น I_{max}- I_{min} และด้านออกมีสแปนเป็น O_{max}- O_{min} จากตัวอย่างในเรื่องย่านวัดข้างบน จะได้ว่าทรานสดิวเซอร์มีแปนด้านเข้าเป็น 10^4 Pa (คิดได้จาก10^4 – 0) และมีสแปนด้านออกเป็น 16 มิลลิแอมป์ (คิดได้จาก 20 – 4) เทอร์โมคับเปิลมีสแปนด้านเข้า 150 องศาเซลเซียส (คิดได้จาก 250 - 100) และมีสแปนด้านออก 6 มิลลิโวลต์ (ได้จาก 10 – 4)

3. ความเป็นเชิงเส้นตรง (Ideal straight line) อุปกรณ์ที่เป็นเชิงเส้นจะมีความสัมพันธ์ของด้านเข้าและด้านออกมีลักษณะเป็นเส้นตรงที่ลากต่อระหว่างจุดต่ำสุดกับจุดสูงสุดของด้านเข้าและด้านออก เขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ (1.41)

$$O - O_{min} = \left[\frac{O_{max} - O_{min}}{I_{max} - I_{min}}\right](I - I_{min}) \qquad (1.41)$$

นั่นคือ $$O_{ideal} = KI + a \qquad (1.42)$$

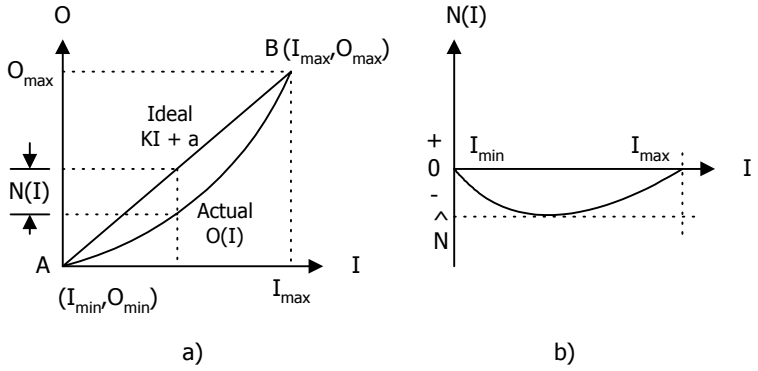
เมื่อ $$K = \text{ความชันของเส้นตรง} = \left[\frac{O_{max} - O_{min}}{I_{max} - I_{min}}\right]$$

และ $$a = \text{จุดตัดเส้นตรงอุดมคติ} = O_{min} - KI_{min} \qquad (1.43)$$

ตัวอย่างที่ 1.14 จงเขียนสมการเชิงเส้นตรงของทรานสดิวเซอร์สำหรับวัดความดันซึ่งมีย่านวัดด้านเข้าตั้งแต่ 0 ถึง 10^4 ปาสคาล(Pa) มีย่านด้านออกเป็นกระแส 4 ถึง 20 มิลลิแอมป์

วิธีคิด จากสมการ (42) และ (43) เขียนสมการได้คือ $O = 1.6 \times 10^{-3} + 4.0 \times 10^{-3}$

4.**ความไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linearity)** คือความสัมพันธ์ของด้านเข้ากับด้านออกไม่เป็นแบบเชิงเส้นตรงตามความสัมพันธ์ของสมการ (42) และ (43) เรานิยามความไม่เชิงเส้นได้ในเทอมของฟังชัน N(I) โดยพิจารณาจากรูปที่ 1.9



รูปที่ 1.9 นิยามของความไม่เป็นเชิงเส้นตรง

ซึ่งได้จากความแตกต่างของค่าตามความเป็นจริงและเส้นตรงอุดมคติ นั่นคือ

$$N(I) = O(I) - (KI + a) \quad \text{หรือ} \quad O(I) = KI + a + N(I) \tag{1.44}$$

ความไม่เป็นเชิงเส้นมักนิยมหาจากเทอมของความไม่เป็นเชิงเส้นสูงสุด $\hat{N}$ คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของการเบี่ยงเบนสุดสเกล (f.s.d) นั่นคือเปอร์เซ็นต์ของสแปน เขียนเป็นสมการได้ดังสมการ(1.45) ดังนี้

$$\text{ความไม่เป็นเชิงเส้นสูงสุดเป็นเปอร์เซ็นต์ของf.s.d.} = \frac{\hat{N}}{O_{max} - O_{min}} \times 100\% \tag{1.45}$$

ในหลายกรณี O(I) และ N(I) สามารถแทนด้วยสมการโพลิโนเมียลของ I นั่นคือ

$$O(I) = a_0 + a_1 I + a_2 I^2 + \ldots + a_q I^q + \ldots + a_m I^m = \sum_{q=0}^{q=m} a_q I^q \tag{1.46}$$

ตัวอย่างที่ 1.15 รอยต่อของโลหะสองชนิดคือทองแดงและคอนสแตนแตนสร้างเป็นเทอร์โมคับเปิลชนิด T(Type T) มีแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากความร้อนที่รอยต่อเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ เขียนความสัมพันธ์ของแรงดัน E(T) ในหน่วย μV และอุณหภูมิที่รอยต่อ (T °C) ในรูปโพลิโนเมียล 4 เทอมแรกได้ดังสมการ (1.47 a) คือ

$$E(T) = 38.74T + 3.319 \times 10^{-2} T^2 + 2.071 \times 10^{-4} T^3 - 2.195 \times 10^{-6} T^4 + \text{เทอมที่มีกำลังสูงถึง} T^8 \tag{1.47a}$$

สำหรับย่าน 0-400 °C เมื่อแรงดัน E=0 μV ที่ T = 0 °C และ E = 20 869 μV ที่อุณหภูมิ T = 400 °C เมื่อใช้สมการเชิงเส้นตรงอุดมคติจะได้

$$E_{ideal} = 52.17\ T \tag{1.47b}$$

และฟังชันแก้ความไม่เป็นเชิงเส้นคือ

$$N(T) = E(T) - E_{ideal} \tag{1.48c}$$

$$N(T) = -13.43\ T + 3.319 \times 10^{-2} T^2 + 2.071 \times 10^{-2} T^3 - 2.195 \times 10^{-2} T^4 + \text{เทอมที่มีกำลังสูง}$$

ในบางกรณีจะใช้สูตรอื่นที่สอดคล้องมากกว่าสมการโพลิโนเมียล ตัวอย่างเช่น เทอร์มิสเตอร์ที่อุณหภูมิ T °C มีความต้านทาน R(T) โอห์ม ได้จากสมการคือ

$$R(T) = 0.04 \exp\left(\frac{3300}{T + 273}\right)$$

5. ความไว (Sensitivity) คืออัตราการเปลี่ยนแปลงของด้านออก O เทียบกับด้านเข้า I นั่นคือ

$$\frac{dO}{dI} = K + \frac{dN}{dI}$$

ซึ่งสำหรับอุปกรณ์อุดมคติ

$$\frac{dO}{dI} = K$$

ดังนั้นสำหรับทรานสดิวเซอร์(หน่วยที่ 5) ตรวจจับความดันในตัวอย่างที่ 1.14 จะมีความไวคือ

$$\frac{dO}{dI} = 1.6 \times 10^{-3} \qquad mA/Pa$$

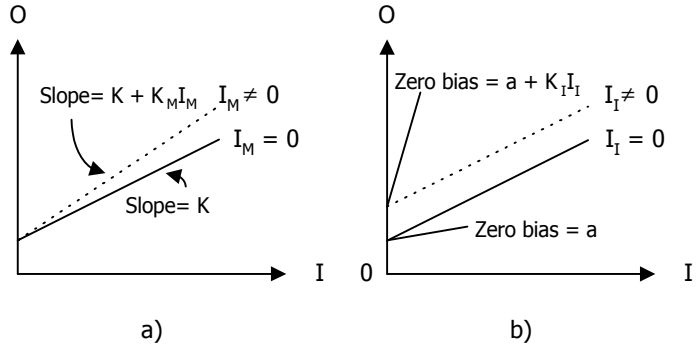
สำหรับเทอร์โมคับเปิลชนิด T จะมีความไว $\frac{dE}{dT}$ ที่อุณหภูมิ T °C กำหนดได้จาก

$$\frac{dE}{dT} = 38.74 + (6.638 \times 10^{-2} T) + (6.213 \times 10^{-4} T^2) - (8.780 \times 10^{-6} T^3) + \text{เทอมกำลังสูงๆ} \qquad (1.48)$$

ซึ่งมีค่าโดยประมาณ = 50 μV/ °C ที่อุณหภูมิ 200 °C

6. ผลจากสภาพแวดล้อม

โดยทั่วไปนอกจากด้านขาเข้าแล้วด้านขาออกยังขึ้นกับสภาพแวดล้อมด้วย เช่น อุณหภูมิ ความดันบรรยากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ แรงดันแหล่งจ่าย ฯลฯ ดังนั้นถ้าสมการ (1.44) เพียงพอที่จะแทนพฤติกรรมของอุปกรณ์ภายใต้เงื่อนไขแวดล้อมที่เป็น "มาตรฐาน" เช่น ที่อุณหภูมิแวดล้อม 25 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ 1000 มิลลิบาร์ ความชื้นสัมพัทธ์ 80 เปอร์เซ็นต์ แรงดันแหล่งจ่าย 10 โวลต์ เป็นต้น หากเงื่อนไขของสภาพแวดล้อมเปลี่ยนไปจากมาตรฐานจะต้องนำเอาสภาพแวดล้อมนั้นมาคิดด้วยโดยปรับปรุงสมการที่ใช้ ให้มีส่วนของสภาพแวดล้อมเพิ่มเข้าในสมการ ซึ่งโดยทั่วไปสภาพแวดล้อมด้านเข้าหลัก ๆ ที่ต้องคำนึงถึงมีสองชนิดคือ ก.**ความไวที่เป็นเชิงเส้นตรง**ของแต่ละอุปกรณ์ที่เปลี่ยนไป



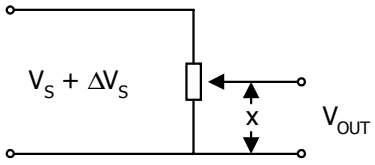
รูปที่ 1.10 ผลของความไว และการรบกวนด้านเข้า a) การเปลี่ยนแปลงความไว b) การรบกวน

ดังนั้นถ้า I_M เป็นค่าด้านเข้าที่เปลี่ยนไปจากสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนไปจากสภาพมาตรฐาน ($I_M = 0$ ที่เงื่อนไขมาตรฐาน) แล้วทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความไวเชิงเส้นตรงจาก K เป็น $K + K_M I_M$ (รูปที่ 1.10 a)) และ

ข.**การรบกวนด้านเข้า** ที่เกิดจากจุดตัดหรือการไบอัสเริ่มต้น (zero bias) ของแต่ละส่วนมีค่าเปลี่ยนไป ดังนั้นถ้า I_I เป็นค่าเปลี่ยนไปจากสภาพแวดล้อมมาตรฐาน ($I_I = 0$ ที่สภาวะมาตรฐาน) ผลอันนี้ทำให้ไบอัสเริ่มเปลี่ยนไปจาก a เป็น $a + K_I I_I$ (รูปที่ 10 b)) K_M, K_I เรียกว่า ค่าคงที่การเชื่อมโยงหรือความไวต่อสภาพแวดล้อม ดังนั้นเราต้องแก้สมการ (1.44) โดยแทน K_I ด้วย $(K + K_M I_M)I_I$ และแทน a ด้วย $a + K_I I_I$ ทำให้ได้สมการใหม่เป็น

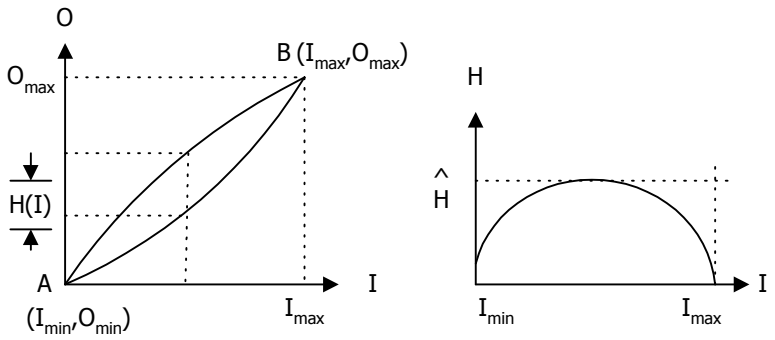
$$O = KI + a + N(I) + K_M I_M I + K_I I_I \qquad (1.49)$$

ตัวอย่างของการเปลี่ยนแปลงด้านขาเข้าคือ ΔV_S ของแรงดันแหล่งจ่าย V_S จากตัวตรวจจับระยะการเลื่อนของตัวตรวจจับที่แสดงดังรูปที่ 1.11 และตัวอย่างของการรบกวนด้านเข้าเกิดได้จากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่รอยต่อ T_2 ของโลหะคู่ควบ



รูปที่ 1.11

7. ฮิสเตอรีซีส (Hysteresis) สำหรับค่าด้านขาเข้า I ที่กำหนดให้ ที่ด้านขาออก O อาจมีค่าแตกต่างกันเมื่อด้านขาเข้ามีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลง นั่นคือความแตกต่างระหว่างขาออกขณะที่มีด้านขาเข้าเพิ่มขึ้นและขาออกขณะที่ด้านขาเข้าลดลง(รูปที่ 1.12)



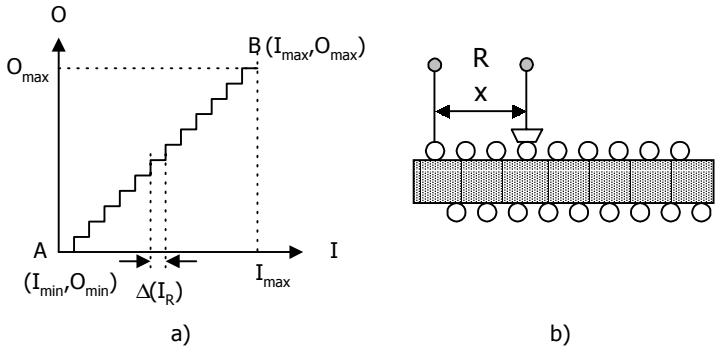
รูปที่ 1.12

นั่นคือ ฮีสเตอรีซิส $H(I) = O(I)_{I\downarrow} - O(I)_{I\uparrow}$ (1.50)

ตามปกติจะระบุฮีสเตอรีซีสในเทอมของค่าสูงสุด $\hat{H}$ เป็นเปอร์เซ็นต์ของการเบี่ยงเบนเต็มสเกลนั่นคือสแปน ดังนั้นเขียนสมการได้คือ

$$\text{ค่าฮีสเตอรีซีสเป็นเปอร์เซ็นต์ของค่าเต็มสเกล} = \frac{\hat{H}}{O_{max} - O_{min}} \times 100\% \qquad (1.51)$$

8. ความจำแนกแยกชัด (Resolution) คือความสามารถของอุปกรณ์ชี้บอกที่สามารแยกค่าได้ชัดเจนระหว่างค่าที่ใกล้เคียงกันของปริมาณที่ชี้บอก หรือเมื่อปริมาณด้านเข้าเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นแล้วทำให้มีการเปลี่ยนแปลงด้านออกดังรูปที่ 1.13 หรืออีกนัยหนึ่งอาจนิยามได้ว่าความจำแนกชัด คือการเปลี่ยนแปลงด้านเข้า I มากสุดที่ไม่ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงด้านออก O เช่นในรูปที่ 1.13



รูปที่ 1.13 ตัวอย่างความจำแนกชัดของโพเทนติโอมิเตอร์ (ความต้านทานปรับค่าได้)

พิจารณาในลักษณะของความกว้างมากสุด ΔI_R ของขั้นการปรับค่าความต้านทาน เมื่อแทนค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของค่าเต็มสเกลจะได้

$$\text{ความจำแนกชัด} = \frac{\Delta I_R}{I_{MAX} - I_{MIN}} \times 100\%$$

1.3.4 การสอบเทียบระบบการวัด (Calibration)[6]

นิยามของ การสอบเทียบ คือชุดของการดำเนินการเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ชี้บอกโดยเครื่องมือวัด หรือระบบการวัด หรือค่าที่แสดงโดยเครื่องวัดที่เป็นวัสดุกับค่าสมนัยที่รู้ของปริมาณที่วัดภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดไว้ (Set of operations that establish, under specified conditions, the relationship between values of quantities indicate by a measuring instrument or measuring system, or values represented by a material measure or a reference material, and the corresponding values realized by standards: VIM 6.11)

การสอบเทียบ หมายถึง การตัดสินและทำเอกสารแสดงความบ่ายเบนของค่าชี้บอกของเครื่องมือวัดหรือค่าที่ระบุของวัสดุวัดจากค่าจริงที่ยอมรับได้ (Conventional true value) ของปริมาณที่ถูกวัด ค่าจริงที่ยอมรับได้คือค่าจริงที่มีความไม่แน่นอนของการวัดที่เหมาะสมกับการใช้งาน ซึ่งในที่นี้คือ ค่ามาตรฐานที่สามารถสอบกลับได้สู่มาตรฐานแห่งชาติ หรือมาตรฐานระหว่างชาติ

การสอบเทียบ ประกอบด้วยปัจจัยหลักดังต่อไปนี้

ก) ตัดสินความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ชี้บอกของเครื่องมือวัดกับค่ามาตรฐานภายใต้สภาวะที่กำหนด และ ณ วัน เวลาที่ระบุ

---

[6] สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น). **คู่มือการสอบเทียบเครื่องมือวัดอุตสาหกรรม**. 2546.

ข) ออกใบรายงานผลการสอบเทียบที่รายงานทั้งค่าความบ่ายเบน หรือค่าแก้พร้อมกับความไม่แน่นอนของการวัด

การสอบเทียบมาตรฐานเครื่องมือวัดทางไฟฟ้า

วัตถุประสงค์ของการสอบเทียบ การสอบเทียบมาตรฐานเครื่องมือวัดทางไฟฟ้า เป็นการเปรียบเทียบระหว่างค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดที่นำมาสอบเทียบ (Unit under calibration) กับค่ามาตรฐานที่สร้างขึ้นจากอุปกรณ์มาตรฐานการวัด เช่น Multi Product Calibrator ผลจากการสอบเทียบจะแสดงให้เห็นคุณลักษณะทางมาตรวิทยาของเครื่องมือวัดที่นำมาสอบเทียบ เช่น ค่าความผิดพลาดของเครื่องมือวัด คุณลักษณะทางมาตรวิทยาของเครื่องมือวัดอันได้จากการสอบเทียบมาตรฐานต้องเป็นผลที่เชื่อถือได้ เพื่อสามารถที่จะนำไปตัดสินเครื่องมือวัดที่นำมาสอบเทียบว่าควรจะใช้ต่อไป หรือจำเป็นต้องซ่อมแซม ปรับแต่ง หรือจำหน่ายออกไปจากการใช้งาน

สำหรับเครื่องมือวัดที่สอบเทียบแล้วพบว่าอ่านผิดไปจากเกณฑ์ที่ยอมได้ก็จะได้รับการพิจารณาปรับแต่งหรือซ่อมแซม และปรับแต่งซ้ำ ในกรณีที่ผลการสอบเทียบพบว่าเครื่องมือวัดอ่านได้ผิดจากเกณฑ์ที่กำหนดไว้แต่ไม่สามารถปรับแต่งเครื่องมือวัดได้ ผลการสอบเทียบที่ได้อาจนำไปใช้เป็นค่าปรับแก้ เพื่อนำไปปรับปรุงผลการวัดในอนาคตให้แม่นยำขึ้น การสอบเทียบจึงมักมีวัตถุประสงค์สำคัญ 3 ประการคือ

ก) การสอบเทียบเพื่อตรวจสอบดูลักษณะทางมาตรวิทยาเพื่อประกอบการตัดสินใจว่าเครื่องมือวัดที่ได้รับการสอบเทียบเหมาะสมที่จะใช้ต่อไปหรือไม่

ข) การสอบเทียบเพื่อปรับแต่งให้ผลการวัดเป็นไปตามเกณฑ์การวัดที่ผู้ใช้เครื่องมือวัดกำหนดตลอดช่วงใช้งานในการวัด

ค) การสอบเทียบเทพ่อหาค่าแก้เพื่อนไปใช้ในการวัดให้แม่นยำขึ้น

ความแตกต่างระหว่างขั้นตอนของการสอบเทียบแบบต่าง ๆ โดยทั่วไปรูปแบบของการสอบเทียบมาตรฐานเครื่องมือวัดทางไฟฟ้า จะขึ้นอยู่กับความต้องการสอบเทียบของลูกค้าผู้ใช้เครื่องมือวัด และสภาพของเครื่องมือวัดขณะที่รับมาสอบเทียบมาตรฐาน ซึ่งพอแบ่งออกได้เป็น 3 แบบคือ

1. การสอบเทียบก่อนปรับแต่ง การปรับแต่ง การสอบเทียบหลังการปรับแต่ง
2. การสอบเทียบ
3. การปรับแต่ง การสอบเทียบ

การสอบเทียบแบบที่ 1

เป็นรูปแบบการสอบเทียบที่เป็นมาตรฐาน ประกอบด้วยการสอบเทียบก่อนปรับแต่งเพื่อดูคุณลักษณะทางมาตรวิทยาขงเครื่องมือวัด ในวันที่สอบเทียบซึ่งจะแสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของการวัดค่าของเครื่องมือวัดที่นำมาสอบเทียบจากนั้นจึงทำการบันทึกผลการสอบเทียบ ในกรณีที่พบว่าเครื่องมือวัดที่นำมาสอบเทียบมีค่าการอ่านที่ผิดปกติไปจากเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ให้พิจารณาฉาปรับแต่งเครื่องมือวัดให้สามารถอ่านได้แม่นยำตามเกณฑ์ที่กำนดไว้ จากนั้นจึงทำการสอบเทียบอีกครั้ง หลังการปรับแต่งเพื่อรายงานลักษณะการทำงานหลังการสอบเทียบ

การสอบเทียบแบบที่ 2

เป็นการสอบเทียบที่เครื่องมือวัดที่มีลักษณะการทำงานที่มีค่าความแม่นยำสูง และอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ในวันที่สอบเทียบ การสอบเทียบแบบนี้จึงไม่ต้องมีการปรับแต่ง แต่อย่างไรก็ตาม ผู้สอบเทียบต้องคำนึงถึงอัตราการเลื่อนค่าของเครื่องมือวัดที่สอบเทียบและค่าความผิดพลาดของเครื่องมือวัดในวันที่สอบเทียบ โดยต้องสันฐานได้ว่าเครื่องมือวัดยังคงทำงานเป็นไปตามเกณฑ์ ภายในช่วงระยะเวลาใช้งาน

ตัวอย่างเช่น เครื่องมือวัดที่มีค่าความแม่นยำไม่สูงมาก และมีจุดที่สามารถปรับแกต่งได้ ค่าความเบี่ยงเบนระหว่างค่าอ่านของเครื่องมือวัด และค่าที่ป้อนไม่ควรจะเกินไปกว่า 70 % ของเกณฑ์การยอมรับได้ตามคำแนะนำของบริษัทผู้ผลิตในทุก ๆ จุดที่สอบเทียบาตรฐานการวัดที่ป้อน หรือเบี่ยงเบนไม่เกิน 50 % สำหรับจุดที่มีการปรับแต่งมาแล้ว สำหรับเครื่องมือวัดที่มีค่าความแม่นยำสูง ทุกจุดที่สอบเทียบควรเบี่ยงเบนไม่เกิน 50 % ของคุณลักษณะเฉพาะของเครื่องมือวัดที่แนะนำโดยบริษัทผู้ผลิต การปรับแต่งเครื่องมือวัดวัดที่นำมาสอบเทียบต้องดำเนินไปตามคำแนะนำของบริษัทผู้ผลิต ซึ่งโดยทั่วไปขั้นตอนดังกล่าวจะระบุไว้โดยบริษัทผู้ผลิต

การสอบเทียบแบบที่ 3

เป็นการปรับแต่งเครื่องมือวัด และสอบเทียบเฉพาะหลังการปรับแต่ง การสอบเทียบแบบนี้เหมาะสำหรับเครื่องมือวัดทางไฟฟ้าที่ผ่านการซ่อม และจำเป็นต้องปรับแต่งให้ได้มาตรฐาน ข้อมูลก่อนปรับแต่งสำหรับเครื่องวัดแบบนี้อาจไม่ต้องรายงานเพราะเครื่องมือวัดที่ผ่านการซ้อมและเปลี่ยนชิ้นส่วนจะเปลี่ยนคุณลักษณะทางมาตรวิทยาเดิม จึงมักจะรายงานผลการสอบเทียบหลังการปรับแต่งเท่านั้น

ขั้นตอนการปฏิบัติในการสอบเทียบเครื่องมือวัดทางไฟฟ้า แบ่งเป็น 3 ขั้นตอนใหญ่ ๆ คือ

1.ขั้นตอนการเตรียมการสอบเทียบ

ผู้สอบเทียบเครื่องมือวัดทางไฟฟ้าต้องจัดหาเครื่องมือมาตรฐานการวัด (Measurement Standard) ซึ่งมีย่านการใช้งานครอบคลุมช่วงที่จะสอบเทียบ เครื่องมือมาตรฐานการวัดต้องได้รับการสอบเทียบมาตรฐานและมีหลักฐานแสดงว่าเครื่องมือมาตรฐานนี้สามารถสอบกกลับได้ (Traceability) ถึงหน่วยวัดสากล โดยทั่วไปใบรายงานผลการสอบเทียบจากห้องปฏิบัติการที่ได้รับการรับรองความสามารถตาม มอก. 17025-2543 จะเป็นที่ยอมรับว่าสามารถสอบกลับได้ถึงหน่วยวัดสากล

เมื่อมีเครื่องมือมาตรฐานการวัดแล้ว จึงจัดเตรียมการสอบเทียบโดยการเปิดเครื่องมือมาตรฐานและเครื่องมือที่จะสอบเทียบเพื่อเป็นการอุ่นเครื่องมือวัดให้มีอุณหภูมิเหมาะสมแก่การสอบเทียบ ระยะเวลาอุ่นเครื่องของอุปกรณ์มาตรฐานจะมีคำแนะนำในเอกสารแนะนำการใช้งานของบริษัทผู้ผลิต โดยทั่วไปจะอยู่แระมาณครึ่งชั่วโมงถึงหนึ่งชั่วโมง สำหรับเครื่องมือที่นำมาสอบเทียบก็ต้องมีการอุ่นเครื่องเช่นเดียวกัน โดยดูได้จากคำแนะนำของบริษัทผู้ผลิตเครื่องมือวัด อนึ่งเครื่องมือวัดความแม่นยำสูงขางรุ่นผู้ผลิตแนะนำให้อุ่นเครื่องถึงสี่ชั่วโมงก่อนดำเนินการสอบเทียบ

หลังการอุ่นเครื่องมือมาตรฐานจนได้ระยะเวลาที่กำหนดแล้ว ให้ทำการ Self Test และ Auto Calibration ทั้งในส่วนเครื่องมือมาตรฐานการวัด และเครื่องมือที่นำมาสอบเทียบ การทำ Self Test และ Auto Calibration ไม่ต้องผ่านเกณฑ์ที่ยอมรับให้พิจารณาส่งซ่อม หรือปรับแต่งต่อไป การทำ Auto Calibration สำหรับเครื่องมือวัดความแม่นยำสูงบางรุ่นมีความจำเป็นมาก หากผู้สอบเทียบละเลยไม่ทำ Auto Calibration จะทำให้ผลสอบเทียบไม่

ผ่านเกณฑ์การยอมรับได้ ดังนั้นหากผลการสอบเทียบเครื่องมือวัดทางไฟฟ้าที่มีความแม่นยำสูงบางรุ่น ผลสอบเทียบครั้งแรกไม่ผ่านให้ทดลองทำ Auto Calibration อีกครั้งและสอบเทียบซ้ำอีกครั้ง

ในการเตรียมการสอบเทียบจะรวมถึงการเลือกใช้สายวัดที่เหมาะสมต่อการสอบเทียบ ในกรณีสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Voltage Meter) ที่ระดับแรงดันไฟฟ้าต่ำ เช่น แรงดันไฟฟ้าที่ต่ำกว่า 100 mVdc สายวัดที่บ้ในการต่อระหว่างเครื่องมือมาตรฐานการวัด กับเครื่องมือที่จะนำมาสอบเทียบต้องเลือกใช้สายวัดที่ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเนื่องจากความร้อนระหว่างจุดต่อที่เป็นโลหะต่างชนิดมีค่าต่ำ สายวัดประเภทนี้มักจะเคลือบบริเวณผิวของตัวนำด้วยโลหะพิเศษ หากใช้สายวัดปกติทั่วไปอาจจะก่อให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตรงจุดต่อสายวัดที่เป็นโลหะต่างชนิดถึง 1 mVdc หากวัดแรงดันไฟฟ้าที่มีแรงดัน 100 mV ผลการวัดจะผิดพลาดถึง 1 % เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในสายวัด

การใช้สายวัดชนิดที่ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเนื่องจากความร้อนต่ำก็ยังคงมีแรงดันระหว่างรอยต่อเช่นเดียวกัน แต่โดยทั่วไปจะต่ำประมาณ 1 μVdc หลังจากการต่อสายวัดแบบนี้เข้าเกับเครื่องมือเพื่อการสอบเทียบควรรอให้อุณหภูมิของสายวัดเสถียรเสียก่อนประมาณ 5 นาที จึงเริ่มวัด ในกรณีของการสอบเทียบแรงดันไฟฟ้า AC Voltage ควรเลือกใช้สายวัดที่มีสายตัวนำห่อหุ้มเพื่อป้องกันการแพร่กระจายคลื่น หรือเพื่อป้องกันการรับคลื่นจากภายนอก เช่น สาย Coaxial ที่ใช้ในการวัดย่าน High Frequency หรือ Rf Frequency ในกรณีการวัดค่าความต้านทานสูงเพื่อการสอบเทียบสายวัดที่ใช้ควรเลือกสายวัดที่มีฉนวนที่มีความต้านทานสูง เช่น สายที่มีฉนวนที่ทำด้วยเทปลอนเพื่อลดกระแสรั่วไหลในการสอบเทียบ

การปรับศูนย์ (Zero) ของเครื่องมือวัดก่อนการสอบเทียบเป็นสิ่งที่มีความสำคัญโดยให้ปฏิบัติตามคำแนะนำของบริษัทผู้ผลิตเครื่องมือวัดนั้น โดยทั่วไปโวลต์มิเตอร์กระแสตรง(DC Volt Meter) จะปรับศูนย์ โดยการต่อสายที่ให้แรงดันไฟฟ้าเนื่องจากความร้อนต่ำ ต่อลัดวงจรระหว่างขั้ว Hi และ Lo ของโวลต์มิเตอร์ ขณะที่การสอบเทียบโอห์มิเตอร์ จะลัดวงจรที่ปลายสายวัดเข้าด้วยกัน แล้วจึงปรับเครื่องมือวัดให้อ่านศูนย์จึงเริ่มสอบเทียบ

การลัดวงจรที่ปลายสายวัดจะทำให้มีการชดเชยค่าความต้านทานการวัดขณะวัดค่าความต้านทาน การละเลยการปรับศูนย์ที่ถูกต้องจะทำให้ผลการสอบเทียบโอห์มมิเตอร์ผิดไปมาก บางครั้งอาจจะผิดพลาดถึง 0.2 โอห์ม หมายถึง วัดผิดไปถึง 2 % หากสอบเทียบค่าความต้านทานมาตรฐานที่ค่า 10 โอห์ม การปรับศูนย์สำหรับมิเตอร์วัดกระแสตรง (DC Current Meter) ทำได้โดยการปล่อยขั้วของสายวัดเปิดไว้ แล้วดูที่ค่าที่แสดงต้องเป็นศูนย์

2. การปฏิบัติการสอบเทียบ

เมื่อได้เตรียมการสอบเทียบตามข้อ 1 เรียบร้อยแล้วให้ผู้สอบเทียบปฏิบัติการสอบเทียบ ตามลำดับโดยให้สอบเทียบ Function การวัด และย่านการวัดตามที่ผู้ขอใช้บริการกำหนดให้สอบเทียบ หรือสอบเทียบตามจุดที่บริษัทผู้ผลิตแนะนำ การปฏิบัติการสอบเทียบค่าทางไฟฟ้าก็คือ การสร้างค่าทางไฟฟ้าที่เป็นมาตรฐานขึ้นโดยอุปกรณ์มาตรฐานที่เรียกว่า Calibrator ในปัจจุบันสามารถสร้างค่าทางไฟฟ้าต่าง ๆ ที่มีความแม่นยำสูงได้ง่าย โดยอำนวยความสะดวกให้แก่เจ้าหน้าที่ผู้สอบเทียบเป็นอย่างมาก อย่างไรก็ตามผู้สอบเทียบเครื่องมือวัดทางไฟฟ้าจะต้องคำนึงถึงความไม่แน่นอนของการสอบเทียบเครื่องมือวัดอันเกิดขึ้นจากแหล่งความไม่แน่นอนทั้งจากภายในตัว Calibrator เอง และจากปัจจัยแวดล้อมภายนอก

ขั้นตอนการปฏิบัติในการสอบเทียบ ให้ดำเนินการสอบเทียบทีละ Function จากค่าน้อยไปหามาก จนครบทุกจุดในแต่ละ Function สำหรับการกำหนดจุดสอบเทียบอยู่ที่ความต้องการของผู้ขอใช้บริการเป็นสำคัญ ในกรณีที่ผู้ขอใช้บริการสอบเทียบมิได้กำหนดจุดสอบเทียบมาให้ก็อาจใช้คำแนะนำในคู่มือเครื่องมือวัดเป็นแนวทางก็ได้

ในกรณีที่ไม่มีเอกสารคำแนะนำในการกำหนดจุดสอบเทียบ สามารถดูได้ทั้งจากเอกสารหมายเลข EA-10/15 (คำแนะนำในการสอบเทียบ Digital Multi Meter) หรือใน WWW.European-accreditation.org ขณะปฏิบัติการสอบเทียบให้จ่ายค่ามาตรฐานเข้าสู่เครื่องมือวัดที่นำมาสอบเทียบ ต้องรอจนค่าที่อ่านบนส่วนแสดงผลนิ่งดีแล้วจึงให้บันทึกค่าลงในใบแบบมาตรฐาน

ในการสอบเทียบเครื่องมือวัดตั้งแต่ห้าหลักครึ่งขึ้นไป ควรดำเนินการวัดซ้ำประมาณ 4 ถึง 10 ครั้ง เพื่อหาค่าความทวนซ้ำได้ของการวัด โดยผู้สอบเทียบต้องบันทึกผลการวัดซ้ำแต่ละครั้งไว้ และคำนวณหาค่าเฉลี่ยของผลวัดซ้ำทั้งหมดรายงานเป็นค่าที่อ่านได้ในแต่ละจุด การสอบเทียบแต่ละ Function ของการสอบเทียบไปมา ตัวอย่างเช่น เมื่อทำการสอบเทียบ DC Volt Function ควรทำให้ครบ แล้วจึงเปลี่ยนเป็น AC Volt Meter และ Function อื่น ๆ ต่อไปจนครบ ขณะสอบเทียบผู้สอบเทียบต้องระมัดระวังเรื่องของการต่อสาย Ground และ Guard โดยดูคำแนะนำจากคู่มือของ Calibrator มักจะมีคำแนะนำเรื่องการต่อสาย Ground เพื่อหลีกเลี่ยง Ground Loop

ตัวอย่างการรายงานผลการสอบเทียบเครื่องมือวัดทางไฟฟ้า DC Volt Meter

Function/Range	Applied	Unit under Calibrate Reading	Deviation	Estimate Uncertainty of Measurement
DC Volt 100 mV	0.0000 mV	0.000 mV	0.000 mV	$\pm 20\ \mu$Vdc
	10.0000 mV	10.005 mV	0.005 mV	$\pm 60 \times 10^{-6}$
	90.0000 mV	89.998 mV	0.002 mV	$\pm 60 \times 10^{-6}$
	90.0000 mV	90.001 mV	0.001 mV	$\pm 60 \times 10^{-6}$

ขณะทำการสอบเทียบ ผู้สอบเทียบจะต้องจ่ายค่าและจดบันทึกค่าที่อ่านขณะที่สอบเทียบ ค่าอ่านที่รายงานเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณหาค่าเฉลี่ยจากการวัดซ้ำประมาณ 4-10 ซ้ำ สำหรับค่า Deviation คือค่าความแตกต่างระหว่างค่าที่อ่านจากเครื่องมือที่นำมาสอบเทียบและค่ามาตรฐานที่จ่ายให้คำนวณได้โดยการเอาค่าที่อ่านได้เป็นตัวตั้งและลบด้วยค่ามาตรฐานที่ป้อน

สำหรับค่าความไม่แน่นอนของการวัดโดยประมาณ ให้ผู้สอบเทียบทำการประมาณค่าของความไม่แน่นอนของการวัดโดยทำการประเมินค่าความไม่แน่นอนตามคำแนะนำของ ISO Guide to The Expression of Uncertainty in Measurement 1955 สำหรับตัวอย่างของการประเมินค่าความไม่แน่นอนในการสอบเทียบ Digital Multi Meter สามารถดูได้จากเอกสารชื่อ The Expression of Uncertainty and Confidence in Measurement (M3003) ของ UKAS

3. การประเมินผลและรายงานผลการสอบเทียบ ในกรณีที่การสอบเทียบเครื่องมือวัดเป็นการสอบเทียบภายในหน่วยงาน เพื่อยืนยันคุณลักษณะทางมาตรวิทยาของเครื่องมือวัด ผลการสอบเทียบต้องมีการประเมิน ในการประเมินผลเครื่องมือวัดที่นำมาสอบเทียบนั้นประการแรกผู้ประเมินต้องรู้คุณลักษณะเฉพาะทางมาตรวิทยาของเครื่องมือวัดที่จะประเมิน ข้อมูลนี้สอบถามได้จากผู้ใช้เครื่องมือวัด ตัวอย่าง เช่น ผู้ใช้ต้องการวัดแรงดันไฟฟ้า

กระแสตรง กำหนดให้เครื่องมือวัดที่ใช้ในงานมีค่าความผิดพลาดสูงสุดที่ยอมรับได้(Maximum Permissible Error) ไม่เกิน ± 5 Vdc ที่ย่านการวัด 100 Vdc หากผลการสอบเทียบที่ย่านการวัด 100 Vdc มีผลดังต่อไปนี้

Function/Range	Applied	Unit under Calibrate Reading	Deviation	Estimate Uncertainty of Measurement
DC Volt 100 V	0.0000 V	0.000 V	0.000 V	$\pm 20\ \mu$Vdc
	100.0000 V	100.04 V	0.04 V	$\pm 200 \times 10^{-6}$

จากผลการสอบเทียบ ถ้าประเมินค่าความผิดพลาดเป็น +0.04 V จะเห็นว่าไม่เกินกว่าเกณฑ์ คือ ± 0.05 V ที่กำหนดไว้ ตามที่ผู้ใช้เครื่องมือวัดต้องการ แต่การประเมินผลการสอบเทียบโดยดูเพียงความผิดพลาดเทียบกับเกณฑ์อย่างเดียวจะไม่สมบูรณ์ เนื่องจากไม่มีการสอบเทียบครั้งใดที่สมบูรณ์ ผู้ประเมินผลสอบเทียบจะต้องนำเอาค่าความไม่แน่นอนของการสอบเทียบมาคิดด้วย โดยคาดว่าค่าความผิดพลาดที่เห็นในใบรายงานผลมีโอกาสจะเบี่ยงเบนไปได้เท่ากับค่าความไม่แน่นอนของการสอบเทียบ

ในกรณีตัวอย่างนี้ ค่าความไม่แน่นอนรายงานเป็นค่า $\pm 200 \times 10^{-6}$ เมื่อนำมาคำนวณที่จุดวัด 100 V ค่าความไม่แน่นนอนโดยประมาณ จึงเท่ากับ $\pm 100\ \text{V} \times (200 \times 10^{-6}) = \pm 0.02\ \text{V}$ จากนั้นนำค่าความไม่แน่นอนมาคิดด้วย โดยรวมเข้ากับค่า ความผิดพลาด + 0.04 V

โดยครั้งแรกคำนวณการเบี่ยงเบนด้านบวก(+) ค่าผิดพลาดอาจมีค่าเท่ากับ +0.04 V +(0.02 V) เท่ากับ 0.06 V ซึ่งถือว่าเครื่องมือวัดนี้ไม่เป็นไปตามความต้องการของผู้ใช้ เพราะผู้ใช้เครื่องมือวัดยอมให้ผิดได้ไม่เกิน 0.05 V ครั้งที่สองคำนวณค่าเบี่ยงเบนด้านลบ(–)ค่าผิดพลาดอาจมีค่าเท่ากับ + 0.04 V + (-0.02 V) เท่ากับ 0.02 V ซึ่งถือว่าเครื่องมือวัดนี้เป็นไปตามความต้องการของผู้ใช้ เพราะผู้ใช้เครื่องมือวัดยอมให้ผิดไปไม่เกิน 0.05 การประเมินผลการสอบเทียบเครื่องมือวัดว่าเป็นไปตามคุณลักษณะที่ต้องการหรือไม่จะต้องคำนึงถึงค่าความไม่แน่นอนของการวัดด้วย ดังปรากฏในข้อกำหนด ISO/IEC 17025 :1999 ข้อ 5.10.42

การรายงานผลการสอบเทียบเครื่องมือวัดทางไฟฟ้า หากเป็นการรายงานผลการสอบเทียบเครื่องมือวัดทางไฟฟ้าและเป็นการสอบเทียบภายในบริษัทเดียวกัน การรายงานอาจจัดทำในรูปแบบง่าย ๆ ให้สามารถสื่อความหมายได้ว่าเครื่องมือวัดเหมาะสมต่อการใช้งานหรือไม่ แต่หากเป็นการสอบเทียบเครื่องมือวัดให้แก่หน่วยงานอื่น ๆ เช่นที่ห้องปฏิบัติการสอบเทียบเอกชนซึ่งจะรายงานผลและเก็บค่าบริการสอบเทียบเป็นธุรกิจ

การรายงานผลสอบเทียบต้องรายงานให้ละเอียดและมีข้อมูลที่จำเป็นครบถ้วนหลักสำคัญในการรายงานผลก็คือ ข้อมูลที่รายงานผลต้องแม่นยำชัดเจนเข้าใจง่ายและมีข้อมูลเพียงพอต่อการตีความ ข้อมูลในใบรายงานผลสอบเทียบควรจะประกอบด้วย รายละเอียดอย่างน้อยดังต่อไปนี้

a) หัวกระดาษที่มีคำว่า Test Report หรือคำว่า Calibration Centificate

b) ชื่อ และที่อยู่ของห้องปฏิบัติการสอบเทียบ

c) หมายเลขใบรายงาน และเลขที่หน้าแต่ละหน้าในกรณีใบรายงานนี้มีหลายหน้า และสิ่งชี้บ่งว่าเป็นใบรายงานหน้าสุดท้าย

d) ชื่อ และที่อยู่ของผู้ขอใช้บริการ

e) ระบุ Calibration Procedure ที่ได้ใช้ในการสอบเทียบให้ชัดเจน

f) มีคำบรรยายลักษณะ ของเครื่องมือวัดที่รับมาสอบเทียบอย่างชัดเจน

g) ระบุ วันที่รับเครื่องมือวัด และวันที่สอบเทียบ

h) หากมีการสุ่มตัวอย่างเพื่อนำมาสู่การสอบเทียบต้องมีการระบุแผนและขั้นตอนการสุ่มตัวอย่างด้วย

i) รายงานผลการสอบเทียบอาจเป็นตาราง เป็นกราฟ และระบุหน่วยวัดด้วยหากเหมาะสม

j) ลงนาม และตำแหน่งของผู้มีอำนาจออกใบรายงานผลการสอบเทียบ

k) ในกรณีที่เกี่ยวข้องให้มีการระบุให้ชัดว่าใบรายงานนี้ใช้เฉพาะเครื่องมือวัดนี้เท่านั้น

l) สภาพแวดล้อม ขณะที่สอบเทียบที่กระทบต่อผลการสอบเทียบ เช่น อุณหภูมิ และความชื้น

m) ข้อความแสดงค่าความไม่แน่นอนของการวัด และ/หรือ ข้อความแสดงความเป็นไปตามคุณลักษณะทางมาตรวิทยาที่กำหนดของเครื่องมือวัด

n) หลักฐานแสดงความสอบกลับได้

นอกจากข้อมูลตามที่กล่าวข้างต้นแล้ว หากเป็นการสอบเทียบเครื่องมือวัดที่มีความแม่นยำสูง ผู้รายงานอาจจะต้องรายงานเงื่อนไขต่าง ๆ ในการสอบเทียบให้ชัดเจน ตัวอย่างเช่น การสอบเทียบได้กระทำหลังการอุ่นเครื่อง 4 ชั่วโมง และสอบเทียบ DC Volt Meter โดยการต่อ ขั้ว Lo เข้ากับ Ground หรือการระบุ Sampling Rate ที่ใช้ในการสอบเทียบ ในกรณีที่ผู้สอบเทียบประสงค์จะรายงานความเป็นไปตามคุณลักษณะทางมาตรวิทยาของเครื่องมือวัดที่ได้สอบเทียบจะต้องคิดค่าความไม่แน่นอนของการสอบเทียบ และระบุให้ชัดเจนว่าคุณลักษณะเฉพาะของเครื่องมือวัดที่ใช้ประเมินมีค่าเท่าใด หรือเป็นคุณลักษณะเฉพาะหมายเลขใด

สำหรับเครื่องมือวัดที่มีการปรับแต่งผลการสอบเทียบควรรายงานผลการสอบเทียบทั้งก่อนปรับแต่งและหลังปรับแต่งในใบรายงานผลการสอบเทียบไม่ควรระบุหรือกำหนดวันครบรอบสอบเทียบครั้งหน้า ยกเว้นลูกค้าตกลงให้กำหนดวัน หรือเป็นไปตามกฎเกณฑ์ของหน่วยงานผู้มีอำนาจ

ผู้ใช้ใบรายงานผลสอบเทียบพึงระมัดระวังว่าใบรายงานผลการสอบเทียบบางฉบับเป็นการรายงานผลการสอบเทียบแสดงให้เห็นคุณลักษณะที่แท้จริงของเครื่องมือวัดที่ได้รับการสอบเทียบ มิได้ระบุว่าเครื่องมือวัดนั้นมีคุณลักษณะทางมาตรวิทยาเป็นไปตาม ข้อกำหนดหรือไม่ ผู้ใช้เครื่องมือวัดที่ผ่านการสอบเทียบต้องทวนสอบ (Verification) ให้เห็นว่าเครื่องมือวัดเป็นไปตามต้องการหรือไม่จึงจะนำไปใช้งาน ผู้สอบเทียบเครื่องมือวัดจึงต้องรายงานผลการสอบเทียบที่มีรายละเอียดเพียงพอต่อการที่ผู้ใช้บริการจะนำไปทวนสอบผลการสอบเทียบได้

ความไม่แน่นอนของการวัด (Uncertainty)[7]

นิยาม ของความไม่แน่นอนของการวัด หมายถึงพารามิเตอร์ที่ร่วมมากับผลของการวัดที่บอกลักษณะการกระจายของค่า ซึ่งสามารถอ้างได้อย่างสมเหตุสมผลว่าเป็นของปริมาณที่ถูกวัดนั้น (Parameter, associated with the result of a measurement, that characterizes the dispersion of the values that could reasonably to attributed to the measurand: VIM 3.9)

---

[7] สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น). **คู่มือการสอบเทียบเครื่องมือวัดอุตสาหกรรม**. 2546.

จากนิยามข้างต้นสามารถให้ความหมายของความไม่แน่นอนของการวัดได้ว่า ความไม่แน่นอนของการวัด คือสิ่งที่ชี้บอกความไม่สมบูรณ์ในความรู้ของปริมาณที่ถูกวัด ความไม่แน่นอนของการวัดเกิดขึ้นทุกครั้งในการถ่ายทอดความถูกต้องของการวัด ไม่ว่าจะเป็นขั้นตอนไหนของความสามารถสอบกลับได้ ซึ่งในแต่ละระดับของการวัดจะเกิดความไม่แน่นอนของการวัดสะสมขึ้นเรื่อย ๆ จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความสามารถในการถ่ายทอดการวัดของแต่ละห้องปฏิบัติการ และความไม่แน่นอนอาจเกิดขึ้นจากหลายสาเหตุ เช่น วิธีการวัด เครื่องมือวัด ผู้ปฏิบัติการ และสภาวะแวดล้อมในการวัด เป็นต้น

ความไม่แน่นอนของการวัดจะต้องคำนวณ (ดูภาคผนวก ก) โดยวิธีที่เป็นที่ยอมรับอย่างเป็นสากลและโดยทั่วไปจะต้องรายงานที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % การคำนวณความไม่แน่นอนของการวัด ในแต่ละขั้นตอนของการถ่ายทอดความถูกต้องนั้น จะต้องจัดทำไว้เป็นเอกสารเพื่อให้สามารถทวนสอบความถูกต้องได้โดยผู้เกี่ยวข้อง

เพื่อเป็นการยืนยันความสามารถสอบกลับได้ของการวัดค่าความไม่แน่นอนของการวัดจะถูกรายงานร่วมกับค่าความคลาดเคลื่อนของการวัด ในใบรายงานผลการสอบเทียบโดยห้องปฏิบัติการสอบเทียบและค่าที่รายงานนี้จะเป็นจริงก็เฉพาะ ณ เวลาที่ทำการสอบเทียบและภายใต้เงื่อนไขของการสอบเทียบที่ระบุเท่านั้น การใช้เครื่องมือวัดภายใต้เงื่อนไขเดียวกันกับผลการสอบเทียบ แต่ในเวลาที่ต่างออกไป หรือยิ่งกว่านั้นคือ การใช้เครื่องมือวัดในเงื่อนไขที่ต่างออกไปจากผลการสอบเทียบก็จะยิ่งทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนและความไม่แน่นอนของการวัดยิ่งมีค่ามากเกินกว่าที่ระบุไว้ในรายงานผลการสอบเทียบ ซึ่งบางครั้งอาจจะเกินกว่าที่จะยอมรับได้

ค่าความไม่แน่นอนของการวัดที่ระบุไว้ในใบรายงานผลการสอบเทียบ จะได้รับการยอมรับว่ามีความสัมพันธ์กับมาตรฐานแห่งชาติได้ก็ต่อเมื่อใบรายงานผลการสอบเทียบนั้นออกให้โดยห้องปฏิบัติการที่สามารถแสดงความสามารถโดยผ่านกระบวนการรับรองความสามารถโดยองค์กรที่เป็นที่ยอมรับระหว่างประเทศ

บางครั้งใบรายงานผลการสอบเทียบจะรายงานความเป็นไปตามข้อกำหนดจำเพาะทางมาตรวิทยาของปริมาณที่ถูกวัด ในกรณีเช่นนี้ค่าที่วัดได้เมื่อรวมกับความไม่แน่นอนของการวัดจะต้องไม่ขยายไปเกินกว่าขีดจำกัดหรือเกณฑ์ยอมรับที่ระบุของปริมาณที่ถูกวัดนั้น ๆ

1.4 สรุป

หน่วยนี้กล่าวถึงการวัดว่าเป็นกระบวนการทั้งหมดที่ใช้เป็นเครื่องมือในการศึกษาสิ่งที่มนุษย์สนใจ ขนาดของปริมาณต่าง ๆ ที่วัดได้จะมีการกำหนดโดยการเทียบกับมาตรฐานที่ทราบค่าและเป็นที่ยอมรับกันทั่วไป โดยการทำข้อตกลงให้เป็นแนวทางเดียวกันกำหนดเป็นมาตรฐานระหว่างประเทศ ปริมาณต่าง ๆ จะมีการกำหนดขนาดด้วยหน่วยในระบบ SI และถ่ายทอดมาตรฐานมาใช้เป็นมาตรฐานขั้นต่าง ๆ เครื่องมือวัดตลอดจนอุปกรณ์ประกอบที่ใช้ในการวัดต้องได้รับการสอบเทียบกับมาตรฐานเหล่านี้ โดยสามารถสอบย้อนไปได้ถึงมาตรฐานของหน่วย SI ได้โดยไม่ขาดตอน เครื่องมือวัดดังกล่าวจึงจะมีความมั่นใจได้ว่าสามารถแสดงค่าได้ถูกต้องในขอบเขตที่ยอมรับได้ตามมาตรฐานชั้นต่าง ๆ และเนื่องจากไม่มีการวัดใดที่ไม่มีค่าผิดพลาดเลย จึงกำหนดค่าความแม่นของเครื่องมือวัดในลักษณะของค่าผิดพลาด ความเที่ยงตรง ค่าความไม่แน่นอน ตลอดจนเมื่อทำการวัดแล้วนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ เพื่อให้มีค่าผิดพลาดน้อยที่สุด และจะใช้หลักการรวม การหาผลต่าง การคูณและ การหารปริมาณที่ได้จากการวัด ตลอดจนการนำวิธีการทางสถิติมาใช้ในการทำให้ได้ตัวแทนผลการวัดที่ถูกต้องใกล้เคียงกับค่าที่ควรจะเป็นตามวิธีการคำนวณที่ยึดถือปฏิบัติเป็นแนวทางเดียวกัน

แบบฝึกหัดที่ 1

1. ประจุ ของอิเล็กตรอนมีค่า 1.602×10^{-19} คูลอมป์ (C) จงหาจำนวนอิเล็กตรอนที่ผ่านจุดอ้างอิงในแต่ละ μs ถ้ากระแสที่จุดอ้างอิงเป็น 4.56 แอมแปร์ (A)
2. จงหาความสูงของคนเป็นเซนติเมตร (cm) ถ้าคนสูง 5 ฟุต (ft) 11 นิ้ว (in)
3. รถไฟวิ่งได้ระยะทาง 220 ไมล์ (mi) ในเวลา 2 ชั่วโมง (hr) และ 45 นาที (min) จงหาความเร็วเฉลี่ยของรถไฟคิดเป็นเมตร/วินาที (m/s)
4. หน่วยปฏิบัติของพลังงานไฟฟ้าเป็นกิโลวัตต์ – ชั่วโมง (kwh) พลังงานในระบบ SI มีหน่วยเป็นจูล (J) จงคำนวณหาพลังงานเป็นจูล จากพลังงาน 1 กิโลวัตต์ – ชั่วโมง
5. จงคำนวณหาแรงดันของแบตเตอรี่ ถ้าประจุขนาด 30×10^{-4} คูลอมบ์ ที่ขั้วบวกของแบตเตอรี่ให้พลังงานออกมา 6×10^{-2} จูล
6. จงแสดงให้เห็นว่า $[ML^2T^{-3}I^{-2}]$ เป็นมิติของความต้านทาน R ที่สามารถหาได้จากการผสมมิติของหน่วยวัดพื้นฐานจริง
7. มิเตอร์วัดแรงดันได้ทั้งกระแสตรงและกระแสสลับ วัดแรงดันได้ 220 โวลต์ โดยใช้ย่านวัด 300 โวลต์ บนหน้าปัทม์มิเตอร์ระบุเป็นชั้น (Class) 1 จงหาค่าผิดพลาดสัมพัทธ์ (E_r)
8. มิเตอร์วัดแรงดันมี Class = 1.5 เมื่อใช้ย่านวัด 150 โวลต์ วัดแรงดัน 120 โวลต์ จงหาค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์ (E_R)
9. จงบอกความหมายของมาตรฐานการวัดต่าง ๆ คือ มาตรฐานระหว่างประเทศ มาตรฐานแห่งชาติ มาตรฐานปฐมภูมิ มาตรฐานทุติยภูมิ มาตรฐานขั้นใช้งาน มาให้เข้าใจ
10. จงบอกความหมายของการสอบเทียบเครื่องมือวัดมาพอเข้าใจ