



การสอบเทียบเครื่องมือวัดความดันแบบท่อบูร์ดอง

Pressure Gauge Calibration

ชัชวาล พรพัฒน์กุล

สาขาวิชาวิศวกรรมกรรมการวัดและควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

833 ถนนพระราม 1 เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330 โทรศัพท์: 0-2219-3861 E-mail: chatchaval@ptwit.ac.th

บทคัดย่อ

การสอบเทียบเกจวัดความดันที่นำเสนอในบทความนี้เป็น การสอบเทียบเกจวัดความดันแบบใช้อากาศเป็นตัวกลาง โดยใช้เกจวัด ความดันมาตรฐานเป็นเครื่องมือสอบเทียบในระดับที่เรียกว่า working standard ที่ใช้งานกันอยู่ทั่วไปในโรงงานอุตสาหกรรม โดยใช้แนวทางการสอบเทียบของ DKD-R 6-1 ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนของเกจ วัดความดันนั้นจะต้องมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกินค่าความถูกต้องที่ กำหนดมาจากโรงงานผู้ผลิตตลอดย่านการวัด ($\pm 0.5\%$ of span) เมื่อ ศึกษาแหล่งความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้น จำนวนอย่างน้อย 7 ตัวแปร พบว่า มีตัวแปรที่มีผลกระทบกับค่าความไม่แน่นอนขยายอย่างมี นัยสำคัญ เช่น ค่าความไม่แน่นอนของเครื่องมือสอบเทียบมาตรฐาน (u_s) ค่าความไม่แน่นอนของความเร็วในการอ่านค่าของเกจวัด ความดัน UUC (u_{res}) และค่าความไม่แน่นอนของ hysteresis (u_{hys}) นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าความไม่แน่นอนที่ไม่มีผลกระทบต่อความไม่แน่นอนขยาย ซึ่งสามารถนำไปอ้างอิงและตัดทิ้งได้เมื่อนำไปปฏิบัติงานจริงในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น ค่าความไม่แน่นอนของค่าแรงโน้มถ่วงของโลก (u_{gh}) ค่าความไม่แน่นอนของการวัดค่าความแตกต่างของระดับความสูงระหว่าง STD กับ UUC (u_h) ค่าความไม่แน่นอนของจุด ศูนย์ (u_{zero}) และค่าความไม่แน่นอนของการวัดซ้ำค่าเดิม (u_o) จากผล การทดลองพบว่า UUC ที่ใช้ในการทดลองยังมีค่าความคลาดเคลื่อน สูงสุดตลอดย่านการวัด = $+0.0037 \text{ kg/cm}^2$ (maximum error) ที่ ตำแหน่ง 0.5 kg/cm^2 ซึ่งยังคงอยู่ในขอบเขตของค่าความถูกต้อง (accuracy) ที่บริษัทผู้ผลิตกำหนดมาคือ $\pm 0.5\%$ of span = $\pm 0.02 \text{ kg/cm}^2$ และเมื่อรวมค่าความคลาดเคลื่อนดังกล่าวเข้ากับค่าความไม่แน่นอนขยาย (U_{exp}) = $\pm 0.0132 \text{ kg/cm}^2$ ก็ยังคงได้ค่าที่อยู่ใน ขอบเขตของค่าความถูกต้องของบริษัทผู้ผลิต และสามารถออก ใบรับรองการสอบเทียบของ UUC เพื่อนำไปใช้งาน

คำสำคัญ: เครื่องมือวัดความดัน การสอบเทียบเกจวัดความดัน ความไม่แน่นอนขยาย

Abstract

Pressure gauge calibration using air pressure gauge as an intermediary is presented in this paper. The standard pressure gauge is calibrated in the working

standard commonly used in the industry. The calibration method of DKD-R 6-1 is employed, where the error margin in measuring the pressure of the pressure gauge does not exceed the accuracy set by the factory manufacturers throughout the measurement range ($\pm 0.5\%$ of span). At least seven variables are determined. It is found that the value of expanded uncertainty is significantly affected by some certain variables, such as the uncertainty of the calibration standard (u_s), the uncertainty of UUC resolution (u_{res}) and the uncertainty of hysteresis (u_{hys}). Furthermore, it is also found that some uncertainties can be referred and ignored in practical use, as they do not affect the expanded uncertainty. For example, the uncertainty of the local gravity (u_{gh}), the uncertainty of the height difference between the STD and UUC (u_h), the uncertainty of the zero point (u_{zero}) and the uncertainty of repeatability (u_o). The experimental results of the UUC studied in this paper show that the maximum error of measurement is $+0.0037 \text{ kg/cm}^2$ at 0.5 kg/cm^2 , which is in the range of accuracy specified by the manufacturer ($\pm 0.5\%$ of span = $\pm 0.02 \text{ kg/cm}^2$). Moreover, when combining the maximum error of measurement obtained from the experiment with the expanded uncertainty (U_{exp}) = $\pm 0.0132 \text{ kg/cm}^2$, it is also found that the result is still in the accuracy specified by the manufacturer. Therefore, a calibration certificate of UUC can be issued for UUC utilization.

Keywords: Pressure Instrumentation, Calibration of Pressure Gauge, Expanded uncertainty

1. คำนำ

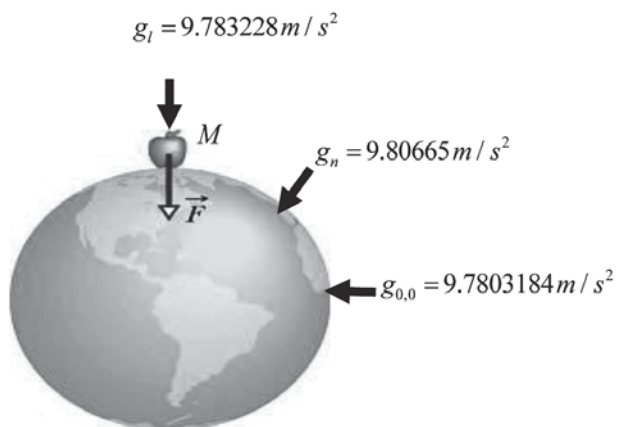
เครื่องมือวัดความดันเป็นเครื่องมือวัดที่มีความสำคัญอย่างยิ่งใน งานอุตสาหกรรมการผลิตทุกชนิดและส่วนใหญ่จะเป็นเกจวัดความดันแบบ เชิงกลที่มีท่อบูร์ดอง (bourdon tube)[1] เป็นเซนเซอร์โดยอาศัยคุณสมบัติ ของวัสดุคือใช้หลักการของการยืดและหดตัว (elastic deformation)

ของวัตถุเนื่องจากความดันที่กระทำกับวัตถุนั้น โดยทั่วไปมักมีเข็มเป็นเครื่องบอกปริมาณของความดันที่ได้รับ โดยปริมาณของความดันจะอ่านได้จากค่าของสเกลที่อยู่บนหน้าปัทม์ของ เกจวัดความดัน มักใช้ทั่วไปในงานวัดความดัน ทั้งแบบก๊าซหรือแบบลมและแบบที่ใช้กับน้ำมัน ดังนั้นในบทความนี้จะนำเสนอวิธีการสอบเทียบเกจวัดความดันแบบลมโดยใช้เกจวัดความดันมาตรฐานแบบลมเป็นเครื่องมือมาตรฐานในการสอบเทียบ โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่มที่มีความจำเป็นและสำคัญมากที่ต้องใช้เกจวัดความดันแบบลมในกระบวนการผลิต จะไม่สามารถใช้เกจวัดความดันแบบใช้น้ำมันได้ ดังนั้นในการสอบเทียบเกจวัดความดันจึงต้องคำนึงถึงผู้ใช้งานว่านำไปใช้กับกระบวนการอะไร ถ้าเกจวัดความดันแบบลมที่ใช้ในกระบวนการอุตสาหกรรมอาหารหรือเครื่องดื่มแต่ถูกนำมาสอบเทียบกับเครื่องมือมาตรฐานแบบน้ำมัน จะทำให้น้ำมันเข้าไปตกค้างอยู่ในท่อปอร์ตของเกจวัดความดันแบบลม เมื่อผู้ใช้งานนำไปติดตั้งในกระบวนการผลิตเดิม น้ำมันที่ตกค้างอยู่จะไหลย้อนกลับเข้าไปในกระบวนการผลิตทำให้เกิดความเสียหายต่อผลิตภัณฑ์ได้ ดังนั้นการนำเอาเครื่องมือวัดความดันไปใช้งานต้องคำนึงถึงย่านการวัดความดันต่ำสุดและสูงสุด ตัวกลางที่จะนำไปวัดว่าเป็นแบบก๊าซหรือน้ำมัน สภาพแวดล้อม และต้องมั่นใจว่าเครื่องมือวัดความดันมีค่าความคลาดเคลื่อนรวมกับค่าความไม่แน่นอนขยายยังคงอยู่ในค่าความถูกต้องของบริษัทผู้ผลิตที่กำหนดมาโดยอาศัยการสอบเทียบตามแนวทางของ Guideline DKD-R 6-1 Calibration of Pressure Gauges[2]

2. หลักการทั่วไปของความดัน

2.1 นิยามของความดัน[3]

ขนาดของความดัน 1 Pascal (Pa) คือ แรง 1 นิวตัน (N) ที่กระทำต่อหน่วยพื้นที่ 1 ตารางเมตร (m^2) ซึ่งกระทำ ณ พื้นผิวใดก็ได้ โดยที่ แรง 1 N คือแรงที่กระทำให้มวล 1 kg เคลื่อนที่ไปด้วยอัตราเร่ง $1m \cdot s^{-2}$ มวล ความยาว และ เวลา คือหน่วยพื้นฐานของความดัน (base unit) เนื่องจากแรง F เกิดจากน้ำหนักของมวล m ในทิศทางของ g_l ทิศทางของ g_l จะเข้าสู่ศูนย์กลางของโลก



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่าง แรง มวล และแรงโน้มถ่วงของโลก [1]

$$p = \frac{F}{A} = \frac{m \cdot g_l}{A} = \frac{kg \cdot m \cdot s^{-2}}{m^2} = \frac{N}{m^2} = Pascal(Pa) \quad (1)$$

p คือ pressure ความดันมีหน่วยเป็น Pascal ; Pa

F คือ force แรงที่กระทำ มีหน่วยเป็น Newton ; N

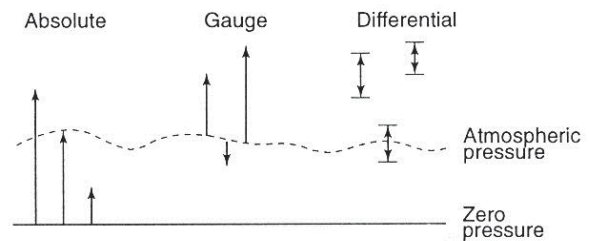
m คือ mass มวล มีหน่วยเป็น กิโลกรัม ; kg

A คือ area พื้นที่ที่ถูกแรงกระทำ มีหน่วยเป็นตารางเมตร ; m^2

g_n คือ standard gravity ค่าแรงโน้มถ่วงของโลกมาตรฐาน($9.80665 m/s^2$)

g_l คือ local gravity ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก ณ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน ($9.783228 m/s^2$)

$g_{0,0}$ คือ ค่าแรงโน้มถ่วงของโลกที่ได้จากการคำนวณที่เส้นศูนย์สูตรของโลก และระดับน้ำทะเลเฉลี่ยปานกลาง $9.7803184 m/s^2$



รูปที่ 2 ช่วงต่างๆของความดัน[1]

Atmospheric Pressure (p_{atm}) คือ ความดันบรรยากาศ ณ จุดใดๆบนพื้นโลก จะแตกต่างกัน $\pm 5\%$

Gauge Pressure (p_g) คือ ความดันที่สูงกว่าความดันบรรยากาศขึ้นไป เรียกว่าความดันเกจ

Negative Gauge Pressure (p_n) คือ ความดันที่ต่ำกว่าความดันบรรยากาศลงมาเรียกว่าความดันเกจลบ

Vacuum Pressure (p_v) คือความดันที่ต่ำกว่าความดันบรรยากาศลงมาจนถึงจุดศูนย์ความดันสัมบูรณ์

Zero Absolute Pressure (p_0) คือความดันต่ำที่สุด เรียกว่า จุดศูนย์ความดันสัมบูรณ์

Absolute Pressure (p_{abs}) คือความดันที่เริ่มจากจุดศูนย์ความดันสัมบูรณ์ขึ้นไปเรียกว่าความดันสัมบูรณ์

Differential Pressure ($p_d, \Delta p$) คือความดันที่เกิดความแตกต่างระหว่างความดันเกจสองจุด

$$p_{abs} = p_g + p_{atm} \quad (2)$$

วิธีการคำนวณค่าความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก ณ ตำแหน่งที่ทำการสอบเทียบ (local gravity) ซึ่งแนะนำโดย International Association of Geodesy (IAG) เป็นวิธีการที่ให้ค่าความถูกต้อง แม่นยำถึง 50 ppm (part per million ; $1/10^6$) ซึ่งเพียงพอต่อความต้องการของภาคอุตสาหกรรม

$$g_{\phi,h} = g_{0,0} (1 + \beta_1 \sin^2 \phi - \beta_2 \sin^2 2\phi) - 3.086 \times 10^{-6} h \quad (3)$$

โดยที่

$g_{\phi,h}$ คือค่าแรงโน้มถ่วงของโลกที่ได้จากการคำนวณที่ latitude ϕ และความสูง h , (ณ อาคารสมโชค สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน)

$g_{0,0}$ คือค่าความเร่งที่จากการคำนวณที่เส้นศูนย์สูตรของโลกและระดับน้ำทะเลเฉลี่ยปานกลาง 9.7803184 m/s^2

h คือความสูงเหนือระดับน้ำทะเลเฉลี่ยปานกลาง ; m

β_1 คือค่าคงที่มีค่าเท่ากับ 0.0053024

β_2 คือค่าคงที่มีค่าเท่ากับ 0.0000059

พิกัดทางภูมิศาสตร์ของสถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน ค่า Latitude ϕ เท่ากับ $13^\circ 44' 50'' \text{ N} = 13 + (44/60) + (50/60 \times 60) = 13.74721888^\circ \text{N}$ โดยที่ $1^\circ = 60'$; $1' = 60''$

ค่า Longitude $100^\circ 31' 31''$ ตะวันออก แต่ค่านี้ไม่มีผลกระทบต่อแรงโน้มถ่วงของโลกจึงไม่ต้องนำมาคำนวณ

ความสูงเหนือระดับน้ำทะเลเฉลี่ยปานกลาง $h = 2 \text{ m}$ แทนค่าต่างๆในสมการ (3) จะได้ค่า local gravity ณ อาคารสมโชค สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน ดังนี้

$$g_{13.7,2} = 9.7803184 \left(\frac{1 + 0.0053024 \sin^2 13.747218}{-0.0000059 \sin^2 27.494436} \right) - 3.086 \times 10^{-6} \times 2$$

$$= 9.783228 \text{ m/s}^2$$

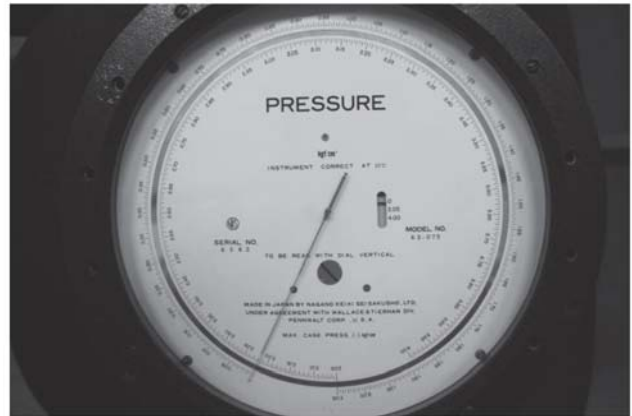
2.2 โครงสร้างของเครื่องมือวัดความดันแบบเชิงกล (Mechanical deformation instrument)



รูปที่ 3 โครงสร้างของเกจวัดความดัน

ท่อยูร์ดอง (Bourdon tube) มีลักษณะโครงสร้างเป็นท่อกลวง โค้งเป็นรูปตัว C มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปวงรี ปลายด้านหนึ่งปิด เมื่อได้รับความดัน ความโค้งท่อยูร์ดองรูปตัว C จะเหยียดออกและด้วยกลไกทางกลที่ต่อเชื่อมกับเข็ม (mechanical amplifier) จะทำให้สามารถเห็นการเคลื่อนไหวได้ชัดเจนและอ่านค่าความดันที่วัดได้จากสเกลที่อยู่บนหน้าปัทม์

2.3 การแบ่งประเภทของเกจวัดความดันตามการใช้งาน[4]



รูปที่ 4 เกจวัดความดันมาตรฐานแบบลม

จากรูปที่ 4 เป็นเกจวัดความดันมาตรฐานที่จะนำมาใช้เป็นเครื่องมือมาตรฐานในการสอบเทียบในบทความนี้ บนหน้าปัทม์ของเกจวัดความดันแบบต่างๆจะบอกรายละเอียดไว้เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับนำไปสอบเทียบดังนี้

- ก. ย่านการวัด $0-4.00 \text{ kg/cm}^2$ โดยแบ่งสเกลเป็น 2 ช่วงแบบอัตโนมัติ โดยที่สเกลนอกจะมีย่านการวัดที่ $0-2.05 \text{ kgf/cm}^2$ เมื่อมีค่าความดันเกินกว่า 2.05 kgf/cm^2 จะเปลี่ยนไปใช้สเกลในที่ย่านการวัด $2.05-4.00 \text{ kgf/cm}^2$ โดยอัตโนมัติ (โดยทั่วไปเกจวัดความดันจะบอกหน่วยเป็น kg/cm^2 โดยที่จะไม่มี f ; force ละไว้ในฐานที่เข้าใจ)
- ข. Division หรือ interval scale คือช่องของสเกลที่ขีดบนหน้าปัทม์ที่เล็กที่สุดในที่นี้มีค่าเท่ากับ 0.005 kg/cm^2
- ค. Resolution คือความสามารถในการอ่านค่าบนหน้าปัทม์ในกรณีที่เข็มชี้บอกระหว่างช่องของสเกล ตามแนวทางของ DKD-R 6-1 ข้อ 8.6.1.1 หน้า 24 กำหนดให้ผู้อ่านค่าเป็นผู้ตัดสินใจในการแบ่งช่องของสเกลด้วยสายตาตนเองโดยขึ้นอยู่กับเงื่อนไข 2 ประการคือ 1. ความห่างของช่องสเกลที่เล็กที่สุด 2. ความหนาของเข็ม เมื่อประเมินเงื่อนไขทั้งสองประการแล้วให้ผู้อ่านค่าตัดสินใจว่าจะแบ่งสเกลด้วยสายตาออกเป็น 2 ส่วน 5 ส่วนหรือ 10 ส่วน (ยิ่งแบ่งละเอียดเท่าไรก็จะทำให้ค่าความผิดพลาดในการวัดลดลงด้วยแต่ก็ต้องคำนึงถึงเงื่อนไขสองประการเป็นหลัก) ในกรณีนี้ผู้เขียนดูเงื่อนไขแล้วประเมินว่าเกจวัดความดันมาตรฐานเครื่องนี้สามารถแบ่งได้ 5 ส่วน ดังนั้นค่า Resolution มีค่าเท่ากับ $\text{division}/2 = 0.005/2 = 0.0025 \text{ kg/cm}^2$ ส่วน UUC จะมีค่า Resolution จะมีค่าเท่ากับ $\text{division}/5 = 0.05/5 = 0.01 \text{ kg/cm}^2$
- ง. เกจวัดความดันมาตรฐานจะมีกระดกติดตั้งได้สเกลหรือระหว่างสเกลเพื่อการอ่านค่าที่ถูกต้องโดยจะต้องอ่านค่าที่วัดได้ผ่านเข็มโดยไม่ต้องไม่เห็นเงาของเข็มในกระดก
- จ. “TO BE READ WITH DIAL VERTICAL” เกจวัดความดันจะต้องกำหนดมาจากบริษัทผู้ผลิตว่าจะให้ทำการติดตั้งในลักษณะใดเช่นในห้องบังคับการบินส่วนมากเกจจะติดตั้งในลักษณะเอียงเป็นมุม

ที่กำหนดมาจากคู่มือการใช้งาน หรือแบบในรูปที่ 5 กำหนดให้ติดตั้งแบบนอน (USE HORIZONTAL) สำหรับกรณีนี้ในรูปที่ 4 กำหนดให้ติดตั้งในลักษณะตั้งฉากกับพื้นและจะต้องไม่เอียงไปทางซ้ายหรือขวาเกิน 3 องศา

- ฉ. จากคู่มือการใช้งาน MODEL 62-075 กำหนดให้ใช้กับลมหรือก๊าซเท่านั้น
- ช. “INSTRUMENT CORRECT AT 20° C” หมายถึงควรนำไปใช้งานใน การสอบเทียบที่อุณหภูมิห้อง 20° C จะได้ค่าที่ถูกต้องมากที่สุด
- ซ. บอกค่าความถูกต้องหรือ Class เช่นในรูปที่ 5 กำหนดให้มีความถูกต้อง $\pm 0.25\%$ หมายความว่าเกจวัดความดันมาตรฐานเครื่องนี้มีความถูกต้องอยู่ที่ $\pm 0.25\%$ of span $= \pm 0.25\%$ of 20 psi $= \pm (0.25 \times 20) / 100 = \pm 0.05$ psi
- ณ. กรณีที่มีจุดหยุดเข็ม (pointer stop) จะมีผลในการสอบเทียบโดยที่ไม่ต้องทำการสอบเทียบที่ตำแหน่งหยุดเข็มซึ่งส่วนมากจะอยู่ที่ตำแหน่ง 0 เช่นในรูปที่ 6 จุดหยุดเข็มจะอยู่ที่ 0 bar ซึ่งเวลาสอบเทียบเครื่องนี้ก็จะไม่ต้องทำการสอบเทียบที่ 0 bar ให้เริ่มทำการสอบเทียบที่ 5 bar เป็นจุดแรก



รูปที่ 5 เกจวัดความดันมาตรฐานแบบลมติดตั้งแบบนอน



รูปที่ 6 เกจวัดความดันมาตรฐานแบบมีจุดหยุดเข็ม

ญ. ในกรณีที่ต้องการจะสอบเทียบความดันที่ต่ำกว่าความดันบรรยากาศ จำเป็นต้องใช้เกจวัดความดันมาตรฐานแบบลบหรือ Vacuum gauge) ตามรูปที่ 7 มีหน่วยเป็น InHg มีค่าความละเอียดในการอ่าน 0.1 InHg มีค่าความถูกต้อง ACCURACY GRADE 3A $\pm 0.25\%$ of SPAN ซึ่ง $SPAN = MAX\ Range - Min\ Range = (-30\ InHg) - (0\ InHg) = -30\ InHg$; เกจวัดความดันมาตรฐานเครื่องนี้มีความถูกต้องอยู่ที่ $\pm 0.25\%$ of SPAN $= \pm 0.25\%$ of 30 InHg $= \pm (0.25 \times 30) / 100 = \pm 0.075$ InHg



รูปที่ 7 เกจวัดความดันมาตรฐานแบบความดันลบ

ฎ. จากรูปที่ 8 เป็นเกจวัดความดันแบบ Compound gauge สามารถวัดความดันที่สูงและต่ำกว่าความดันบรรยากาศได้ สำหรับการสอบเทียบ เกจวัดความดันแบบนี้จะต้องทำการสอบเทียบโดยเริ่มต้นที่ 0 ก่อนเท่านั้น แล้วจึงทำการสอบเทียบไปทางด้านใดด้านหนึ่งและหลังจากนั้นให้เปิดความดันออกสู่บรรยากาศจึงจะเริ่มทำการสอบเทียบอีกด้านหนึ่งได้โดยเริ่มจาก 0 เช่นเดียวกัน



รูปที่ 8 เกจวัดความดันแบบ Compound gauge

ฏ. Dual Scale Gauge เป็นเกจวัดความดันที่มี 2 สเกลที่มีความสัมพันธ์กันของ 2 หน่วยความดันซ้อนกันอยู่สามารถอ่านค่าได้ครั้งเดียว 2 หน่วยพร้อมๆ กันเช่นในรูปที่ 9 ถ้าสมมุติว่าเมื่อป้อนความดันแล้วเข็ม

ชี้ที่ 2.0 kg/cm² ในขณะเดียวกันก็สามารถที่จะอ่านค่าได้เป็น 28.3 psi ด้วย



รูปที่ 9 เกจวัดความดันแบบ 2 สเกล

ในระบบได้ จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อป้องกันความเสียหายเนื่องจากความดันเกินชั่วขณะที่อาจเกิดขึ้นได้ในระบบตามรูปที่ 12

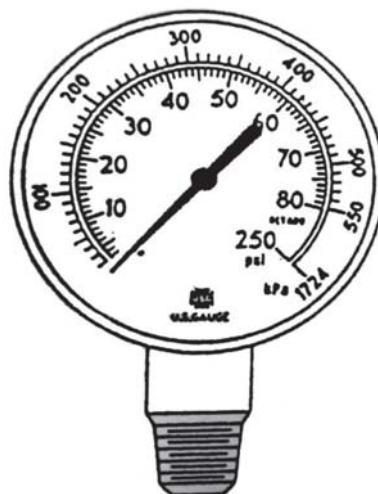


รูปที่ 11 เกจวัดความดันแบบป้องกันการสั่นสะเทือน

ฐ. เกจวัดความดันแบบ 2 เข็ม เป็นมีเข็มหลักและเข็มที่อ่านค่าละเอียด ส่วนมากจะใช้กับการวัดความดันค่าต่ำๆสังเกตเห็นว่าหน่วยวัดความดันจะเป็น mmH₂O ตามรูปที่ 10



รูปที่ 10 เกจวัดความดันแบบ 2 เข็ม



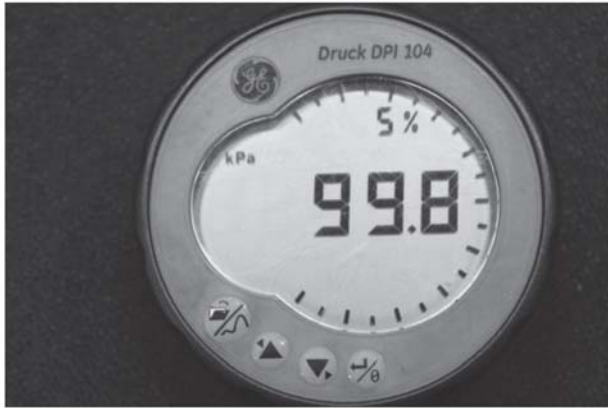
รูปที่ 12 เกจวัดความดันแบบ Retard gauge [1]

- ท. จากรูปที่ 11 เป็นเกจวัดความดันแบบป้องกันการสั่นสะเทือน จำเป็นต้องติดตั้งสำหรับเครื่องจักรที่มีการสั่นสะเทือนมาก โดยเกจวัดความดันลักษณะเช่นนี้จะเติมของเหลวประเภทกลีเซอรินที่มีคุณสมบัติหนืด ใส ไม่มีสี ไม่มีกลิ่นเข้าไปด้านในหน้าปัดเพื่อลดการสั่นของเข็มทำให้อ่านค่าได้ถูกต้องมากขึ้นและยังช่วยในการป้องกันเรื่องของอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงได้อย่างดี
- ฅ. Retard gauge มีสเกลและระบบการวัดความดันที่เป็นแบบเชิงเส้น ไม่ตลอดสเกลประมาณ 0-80% ของช่วงสเกล ส่วนที่เหลือจะเป็นสเกลแบบไม่เชิงเส้น ซึ่งอาจไม่มีขีดของสเกลบอกค่าของความดันจนถึงค่าความดันสูงสุด ดังนั้นเกจชนิดนี้จะใช้ได้แม่นยำเฉพาะช่วงที่เป็นสเกลเชิงเส้นเท่านั้น ค่าความดันที่สูงกว่าปกติอาจเกิดขึ้น

ณ. เกจวัดความดันแบบดิจิตอล เป็นเกจวัดความดันที่ใช้เซนเซอร์เป็นแบบ pressure transducer ข้อดีของเกจแบบดิจิตอลคืออ่านค่าได้ง่าย เปลี่ยนหน่วยได้ตามต้องการมีค่าความถูกต้องและความแม่นยำสูง ค่าฮิสเตอร์รีซิสชั่นน้อยมากจนไม่มีนัยสำคัญต่อความผิดพลาดในการวัด แต่ราคาสูง จากรูปที่ 13 เป็นการสอบเทียบเกจวัดความดันแบบดิจิตอล ที่มีค่าความละเอียดในการวัด (resolution) = 0.1 kPa โดยการป้อนความดันมาตรฐานที่ 100.00 kPa อ่านค่าเฉลี่ยได้ 99.8 kPa มีค่าแก้ (correction) = +0.2 kPa ตามแนวทางของ DKD-R 6-1 ข้อ 8.6.1.2 หน้า 24 กรณีที่เป็นเกจวัดความดันแบบดิจิตอลให้พิจารณาค่าความละเอียดในการอ่านที่หลักสุดท้ายในนี้เท่ากัน 0.1 kPa และในการคำนวณหาความไม่แน่นอนที่เกิดจากความละเอียดของเครื่องมือวัดความดันแบบดิจิตอล กำหนดให้ใช้ค่าครึ่งหนึ่งของค่าความละเอียด $a = r/2$ ซึ่งกำหนดให้เป็นครึ่งหนึ่งของการกระจาย

ความน่าจะเป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (half-width of rectangular distribution) ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนอันเนื่องมาจากความละเอียดในการอ่านค่าของเกจแบบดิจิตอล (uncertainty due to resolution of UUC)

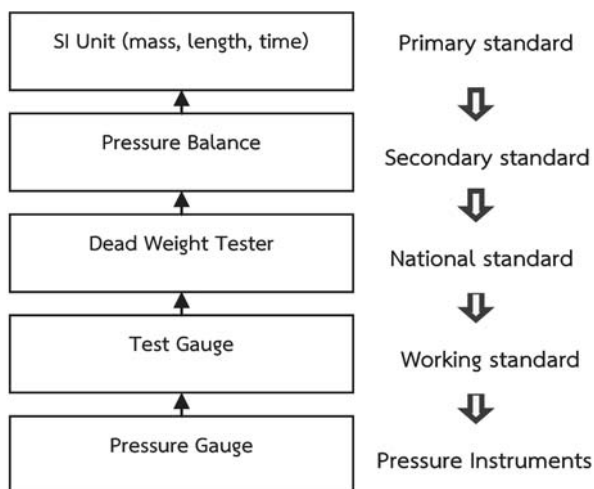
$$u_{p,res} = \frac{a}{2\sqrt{3}} = \frac{0.1}{2\sqrt{3}} = 0.028 \text{ kPa}$$



รูปที่ 13 เกจวัดความดันแบบดิจิตอล

2.4 ความสอบย้อนกลับได้ของเครื่องมือวัดความดัน

ระบบความสอบย้อนกลับได้ (traceability system) เป็นข้อกำหนดมาตรฐานคุณภาพของ ISO 9000 ที่กำหนดให้เครื่องมือวัดที่ใช้ในกระบวนการผลิตที่มีผลต่อคุณภาพของสินค้าจะต้องได้รับการสอบเทียบจากเครื่องมือมาตรฐานที่สามารถสอบย้อนกลับได้จนถึง primary standard หรือ SI unit โดยจะต้องไม่มีการขาดช่วง (unbroken chain) ซึ่งเรียกกันโดยทั่วไปว่า forward/reverse traceability เป็นการสอบย้อนกลับจากด้านล่างขึ้นไปยังด้านบนตามรูปที่ 14 เครื่องมือมาตรฐานที่ใช้สำหรับสอบเทียบเกจวัดความดันต้องสามารถสอบย้อนกลับไปยังมาตรฐานแห่งชาติ หรือมาตรฐานระหว่างประเทศจนถึง SI Unit ได้



รูปที่ 14 ความสอบย้อนกลับได้ของเครื่องมือวัดความดัน

3. การสอบเทียบเกจวัดความดัน

3.1 ขั้นตอนการสอบเทียบ[5]

3.1.1 Accuracy class ของเกจวัดความดัน UUC 0-4 kg/cm² class 0.5 จะเป็นตัวกำหนดจุดสอบเทียบตลอดย่านการวัด ตามแนวทางของ DKD-R 6-1 กำหนดให้ดังนี้ sequence B 0.1.....0.6 % of span ต้องสอบเทียบอย่างน้อย 9 จุด pre-loadings 2 ครั้ง จำนวนรอบการสอบเทียบจากค่าต่ำสุด (0) ไปยังค่าสูงสุด 1 รอบครั้ง แต่ในทางปฏิบัติงานจริงจะทำการสอบเทียบ 2 รอบเช่นเดียวกับ sequence A และไม่มีจุดหยุดเพิ่มจึงต้องเริ่มทำการสอบเทียบที่ 0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5 และ 4.0 kg/cm² จำนวน 9 จุด UUC กำหนด class 0.5 หมายความว่าค่าความถูกต้อง $\pm 0.5\%$ of span = $\pm 0.5\%$ of 4 kg/cm² = $\pm (0.5 \times 4)/100 = \pm 0.02 \text{ kg/cm}^2$

3.1.2 เลือกเกจวัดความดันมาตรฐานที่จะมาทำการสอบเทียบ UUC โดยมีข้อกำหนดดังนี้ พิสัยการวัดจะต้องครอบคลุม UUC ค่าความถูกต้องหรือค่าความไม่แน่นอนขยายจะต้องดีกว่า UUC อย่างน้อย 3 เท่า และเกจวัดความดันมาตรฐานจะต้องเป็นแบบใช้กับอากาศโดยต้องมีหน่วยเหมือนกันเท่านั้น ในบทความนี้เลือกใช้เกจวัดความดันมาตรฐานแบบลมตามรูปที่ 4 พิสัยการวัด 0.00 – 4.00 kg/cm² class 0.1% of span = $\pm 0.1\%$ of 4 kg/cm² = $\pm (0.1 \times 4)/100 = \pm 0.004 \text{ kg/cm}^2$ จะเห็นว่า STD ดีกว่า UUC $0.02/0.004 = 5$ เท่า



รูปที่ 15 การสอบเทียบเกจวัดความดันด้วยเกจมาตรฐานแบบลม

3.1.3 ติดตั้ง UUC ในระบบการสอบเทียบและดำเนินการตามขั้นตอนดังนี้

- ทำความสะอาด UUC ในบริเวณที่สามารถเข้าถึงได้ อย่าให้มีสิ่งสกปรก ปนเปื้อน
- เมื่อติดตั้งระบบการสอบเทียบตามรูปตรวจสอบว่ามีการรั่วซึมหรือไม่
- วัดค่าความสูงที่แตกต่างกันของ STD เทียบกับ UUC ; $\Delta h = - 0.068 \text{ m}$
- วัดค่าอุณหภูมิห้อง ความชื้นสัมพัทธ์ และความดันบรรยากาศ 24.61°C, RH 49.19 %, 1007.05 mbar
- เวลาในการรอสำหรับการ pre-load ที่ความดันสูงสุดและช่วง

- ต่อกันของการ pre-load จะต้องใช้เวลาอย่างน้อย 30 วินาที
- หลังจากการ pre-load และค่าของ UUC อยู่ในสภาวะคงที่ จะต้องมีการปรับศูนย์
- ช่วงเวลาการเปลี่ยนความดันในแต่ละจุดของการสอบเทียบควรรักษาเวลาให้เท่ากันและไม่ควรน้อยกว่า 30 วินาที
- เวลาในการอ่านค่าควรจะทำหลังจากเริ่มเปลี่ยนความดันอย่างน้อย 30 วินาที
- ช่วงจุดสูงสุดของการสอบเทียบหลังจาก 30 วินาทีให้บันทึกค่าที่อ่านได้เป็นค่าสูงสุดของซีรีส์ที่ 1 ก่อนลดความดันลงต้องรอเวลาอีก 5 นาที จึงอ่านค่าแล้วบันทึกลงในซีรีส์ที่ 2 ในกรณีที่ เป็นเกจวัดความดันแบบท่อปอร์ต (กรณีที่เป็น pressure transducer ใช้เวลาในการรอบันทึก ค่า 2 นาที)
- ค่าความดันของจุด “0” ที่จุดสุดท้ายในแต่ละรอบของการสอบเทียบจะต้องบันทึกค่าหลังจากได้มีการปล่อยความดันในระบบสุบรรยาภาศอย่างน้อย 30 วินาที
- การอ่านค่าความดันบนหน้าปัทม์ของเกจวัดความดันแบบท่อปอร์ตจะต้องเคาะเบาๆ ก่อนแล้วจึงอ่านค่าความดัน

ตารางที่ 1 ตารางผลการสอบเทียบ เกจวัดความดัน กลุ่ม B

UUC Reading [kg/cm ²]	STD Input Applied Resolution 0.0025 [kg/cm ²]			
	M1	M2	M3	M4
	up	down	up	down
0.0	0.0025	0.0025	0.0025	0.0025
0.5	0.5025	0.4925	0.4925	0.4975
1.0	1.0025	0.9925	1.0050	0.9950
1.5	1.5050	1.4925	1.5025	1.4950
2.0	2.0075	1.9925	2.0025	1.9950
2.5	2.5050	2.4925	2.5025	2.4950
3.0	3.0050	2.9950	3.0025	2.9975
3.5	3.5025	3.4950	3.5025	3.4975
4.0	4.0025	3.9975	4.0025	3.9975

3.2 การคำนวณค่าความไม่แน่นอน[6]

การคำนวณค่าความไม่แน่นอนที่ตำแหน่ง 4.0 kg/cm²

3.2.1 Uncertainty of Standard Gauge

$$u_s = \frac{(accuracy) \times p}{\sqrt{3}} \quad (4)$$

$$u_s = \frac{0.004}{\sqrt{3}} = 0.0023 \text{ kg / cm}^2$$

3.2.2 Uncertainty of Resolution : ความไม่แน่นอนของความละเอียดในการอ่านค่าของ UUC (เนื่องจากการอ่านค่าที่บันทึกในผลการสอบเทียบเป็นการอ่านค่าจากสเกลของ STD แต่ได้ถูกประเมินความไม่แน่นอนจากการสอบเทียบ STD มาแล้วและเวลานำ UUC ไปใช้งานจะต้องอ่านค่าจาก UUC จึงต้องนำเอาค่าความไม่แน่นอนในการอ่านค่าของ UUC มาคำนวณ)

$$u_{res} = \frac{resolution}{\sqrt{3}} \quad (5)$$

ค่าความละเอียดในการอ่านค่าของ UUC ใช้แนวทางของ DKD-R 6-1 หน้า 24 ข้อ 8.6.1.1 UUC มีค่า interval scale หรือ division = 0.05 kg/cm² ต่อ 1 ช่องที่เล็กที่สุด เข็มของ UUC มีความบางพอที่จะวางลงในช่องเล็กได้ 5 เข็ม (สามารถใช้สายตาประมาณได้ว่า 2 เข็ม , 5 เข็ม หรือ 10 เข็ม) ในที่นี้ประมาณว่าวางได้เพียง 5 เข็ม จะได้ค่าความละเอียดในการอ่านค่าเท่ากับ interval scale / 5 = 0.05/5 = 0.01 kg/cm²

$$u_{res} = \frac{0.01}{\sqrt{3}} = 0.006 \text{ kg / cm}^2$$

3.2.3 Uncertainty of acceleration due to gravity : ค่าแรงโน้มถ่วงของโลกในแต่ละพื้นที่ที่คำนวณได้ มีค่าความไม่แน่นอนแตกต่างกันไม่เกิน ±50 ppm ห้องปฏิบัติการสอบเทียบความดันของสถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน มีค่าเท่ากับ 9.783228 m/s² ± 50 ppm = 9.783228 × 50 × 10⁻⁶; U(g) = 0.0004892 m/s²

$$u_{gh} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times \rho_a \times U(g) \times \Delta h \quad (6)$$

$$u_{gh} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times 1.2 \times 0.0004892 \times (-0.068)$$

$$u_{gh} = 2.304 \times 10^{-5} \text{ Pa}$$

$$u_{gh} = 2.304 \times 10^{-5} \times (1.019716 \times 10^{-5}) \text{ kg / cm}^2$$

$$u_{gh} = 0.2349 \times 10^{-9} \approx 0 \text{ kg / cm}^2$$

(ในทางปฏิบัติทั่วไปในห้องปฏิบัติการสอบเทียบของโรงงานอุตสาหกรรม ถือว่าค่านี้น้อยมาก สามารถตัดทิ้งได้)

3.2.4 Uncertainty of difference in altitude : เนื่องจากใช้ ฟุตเหล็กในการวัดความสูงของ STD เทียบกับ UUC เกิดความแตกต่างกัน Δh = -0.068 m โดยที่ฟุตเหล็กมีค่าความไม่แน่นอนจากการอ่านค่าด้วยสายตา ± 5 มิลลิเมตร ; U(h) = ± 0.005 m

$$u_h = \frac{1}{\sqrt{3}} \times \rho_a \times g_l \times U(h) \quad (7)$$

$$u_h = \frac{1}{\sqrt{3}} \times 1.2 \times 9.783228 \times 0.005 = 0.03389 \text{ Pa}$$

$$u_h = 0.03389 \times (1.019716 \times 10^{-5}) \text{ kg/cm}^2$$

$$u_h = 0.034558 \times 10^{-5} \approx 0 \text{ kg/cm}^2$$

3.2.5 Uncertainty of Hysteresis :

$$u_{hys} = \frac{1 \times \{[(x_{2,j} - x_{1,0}) - (x_{1,j} - x_{1,0})] + [(x_{4,j} - x_{3,0}) - (x_{3,j} - x_{3,0})]\}}{n \times 2\sqrt{3}} \quad (8)$$

n คือ จำนวน cycle ในที่นี้ทำการสอบเทียบ 2 cycle หรือ 4 series M1 คือ 1 series , M1 ถึง M2 คือ 1 cycle , M1 ถึง M4 คือ 2 cycle ดังนั้น n = 2 และ j คือจุดสอบเทียบที่ 4 kg/cm² (จุดที่ 9)

$x_{2,j}$ คือ ค่าที่อ่านได้ตำแหน่งที่ j ใน series ที่ 2 (M2)

$x_{1,0}$ คือ ค่าที่อ่านได้ตำแหน่งที่ 0 ใน series ที่ 1 (M1)

$x_{1,j}$ คือ ค่าที่อ่านได้ตำแหน่งที่ j ใน series ที่ 1 (M1)

$x_{4,j}$ คือ ค่าที่อ่านได้ตำแหน่งที่ j ใน series ที่ 4 (M4)

$x_{3,0}$ คือ ค่าที่อ่านได้ตำแหน่งที่ 0 ใน series ที่ 3 (M3)

$x_{3,j}$ คือ ค่าที่อ่านได้ตำแหน่งที่ j ใน series ที่ 3 (M3)

$$(x_{2,9} - x_{1,0}) = (3.9975 - 0.0025) = 3.9950 \text{ kg/cm}^2$$

$$(x_{1,9} - x_{1,0}) = (4.0025 - 0.0025) = 4.0000 \text{ kg/cm}^2$$

$$(x_{4,9} - x_{3,0}) = (3.9975 - 0.0025) = 3.9950 \text{ kg/cm}^2$$

$$(x_{3,9} - x_{3,0}) = (4.0025 - 0.0025) = 4.0000 \text{ kg/cm}^2$$

$$u_{hys} = \frac{1 \times \{[(3.9950) - (4.0000)] + [(3.9950) - (4.0000)]\}}{2 \times 2\sqrt{3}}$$

$$u_{hys} = 1.4433 \times 10^{-3} \text{ kg/cm}^2$$

3.2.6 Uncertainty of Zero deviation

$$u_{zero} = \frac{\text{Max}\{[(x_{2,0} - x_{1,0})], [(x_{4,0} - x_{3,0})]\}}{2\sqrt{3}} \quad (9)$$

$$(x_{2,0} - x_{1,0}) = (0.0025 - 0.0025) = 0.0000 \text{ kg/cm}^2$$

$$(x_{4,0} - x_{3,0}) = (0.0025 - 0.0025) = 0.0000 \text{ kg/cm}^2$$

$$u_{zero} = 0.0000 \text{ kg/cm}^2$$

3.2.7 Uncertainty of Repeatability

$$u_{a(up,j)} = \frac{[(x_{3,j} - x_{3,0}) - (x_{1,j} - x_{1,0})]}{2\sqrt{3}} \quad (10)$$

$$(x_{3,9} - x_{3,0}) = (4.0025 - 0.0025) = 4.0000 \text{ kg/cm}^2$$

$$(x_{1,9} - x_{1,0}) = (4.0025 - 0.0025) = 4.0000 \text{ kg/cm}^2$$

$$u_{a(up,9)} = \frac{[(4.0000) - (4.0000)]}{2\sqrt{3}} = 0 \text{ kg/cm}^2$$

$$u_{a(down,j)} = \frac{[(x_{4,j} - x_{4,0}) - (x_{2,j} - x_{2,0})]}{2\sqrt{3}} \quad (11)$$

$$(x_{4,9} - x_{4,0}) = (3.9975 - 0.0025) = 3.9950 \text{ kg/cm}^2$$

$$(x_{2,9} - x_{2,0}) = (3.9975 - 0.0025) = 3.9950 \text{ kg/cm}^2$$

$$u_{a(down,9)} = \frac{[(3.9950) - (3.9950)]}{2\sqrt{3}} = 0 \text{ kg/cm}^2$$

$$u_{a(max)} = \text{Max}[U_{a(up,j)}, U_{a(down,j)}] = 0.0000 \text{ kg/cm}^2$$

3.2.8 Combined Uncertainty (เป็นการกระจายความน่าจะเป็นแบบปกติที่ความเชื่อมั่นประมาณ 68 % , normal distribution)

$$u_c = \sqrt{u_s^2 + u_{res}^2 + u_{gh}^2 + u_h^2 + u_{hys}^2 + u_{zero}^2 + u_a^2} \quad (12)$$

$$u_c = \sqrt{0.0023^2 + 0.006^2 + (0)^2 + (0)^2 + (1.4433 \times 10^{-3})^2 + (0)^2 + (0)^2}$$

$$u_c = 6.58164 \times 10^{-3} \text{ kg/cm}^2$$

3.2.9 Expanded Uncertainty เป็นการกระจายความน่าจะเป็นแบบปกติ , normal distribution DKD-R 6-1 กำหนดให้ใช้ coverage factor ; K = 2 ที่ค่าความเชื่อมั่นประมาณ 95%

$$U_{exp} = \pm 2 \times u_c \quad (13)$$

$$U_{exp} = \pm 2 \times (6.58164 \times 10^{-3}) = \pm 0.0132 \text{ kg/cm}^2$$

ทั้งนี้ค่าจำกัดของความไม่แน่นอน (limiting values for uncertainty statements) DKD-R 6-1 กำหนดไว้ดังนี้

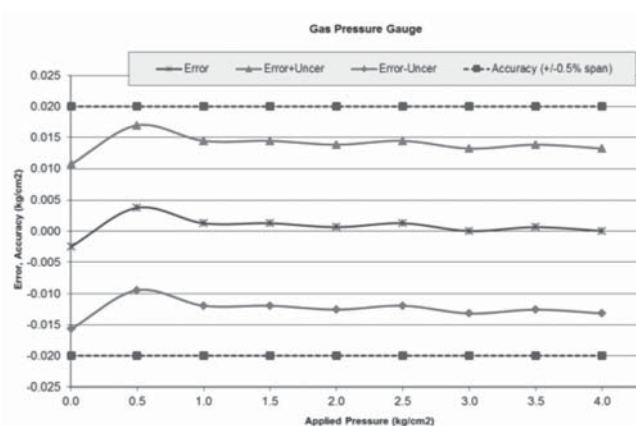
กลุ่ม B ค่าความไม่แน่นอนจะต้องไม่น้อยกว่า 0.04% of span

$$= \pm 0.0016 \text{ kg/cm}^2$$

ตารางที่ 2 ตารางคำนวณหาความไม่แน่นอน ผลการสอบเทียบ

เกจวัดความดัน กลุ่ม B (with Hysteresis) ; kg/cm²

UUC	STD (avg)	Error	Error+Uncer	Error-Uncer
0.0	0.00250	-0.0025	+0.0107	-0.0157
0.5	0.49625	+0.0037	+0.0170	-0.0095
1.0	0.99875	+0.0012	+0.0145	-0.0120
1.5	1.49875	+0.0012	+0.0145	-0.0120
2.0	1.99938	+0.0006	+0.0138	-0.0126
2.5	2.49875	+0.0013	+0.0145	-0.0119
3.0	3.00000	0.0000	+0.0132	-0.0132
3.5	3.49938	+0.0006	+0.0138	-0.0126
4.0	4.00000	0.0000	+0.0132	-0.0132



รูปที่ 16 ค่าความคลาดเคลื่อนรวมค่าความไม่แน่นอนขยายอยู่ในขอบเขตของค่าความถูกต้อง

4. สรุป

จากการสอบเทียบเกจวัดความดัน UUC ค่าย เกจมาตรฐาน STD โดยใช้แนวทางการสอบเทียบของ DKD-R 6-1 ผลการทดลองสรุปได้ว่าค่าความคลาดเคลื่อนของเกจวัดความดันรวมกับค่าความไม่แน่นอนขยายจะมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกินค่าความถูกต้องที่กำหนดมาจากโรงงานผู้ผลิตตลอดย่านการวัด

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณนักศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุมที่ได้ดำเนินการเก็บข้อมูลจากการสอบเทียบรวมถึงขอขอบคุณศูนย์บริการวิชาการและสอบเทียบที่เอื้อเพื่อเครื่องมือมาตรฐานและเครื่องมือวัดในการเก็บข้อมูลเพื่อการเขียนบทความวิชาการในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] British Standards Institution, "Pressure gauge Part 1 Boundon tube pressure gauges-Dimensions", metrology requirements and testing, BS EN 837-1:1998.
- [2] Deutscher Kalibriedienst DKD, Kalibrierung von druckmeferaten, "Pressure gauge calibration", DKD R 6-1, March 2003.
- [3] N. Bignell, R. R. Cook, D. G. S. Groeneveld, E. C. Morris, D. B. Prowse, "Pressure measurement and calibration for industrial laboratories", Course on pressure measurement, CSIRO Division of Applied Physics, NML, 1986.
- [4] Philip W. Harland, "Pressure gauge handbook", Ametek U.S Gauge Division, Sellersville, Pennsylvania.
- [5] ชัชวาล พรพัฒน์กุล, "เครื่องมือวัดความดันและการสอบเทียบ", สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน, กรุงเทพฯ, 2552

- [6] ธวัช ช่างปั้น ลิขิต ไสหนุ ชัชวาล พรพัฒน์กุล, "เอกสารประกอบ การบรรยายหลักสูตรการสอบเทียบเครื่องมือวัดความดันขั้นพื้นฐาน", 2554

ประวัติผู้เขียนบทความ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชัชวาล พรพัฒน์กุล สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี ภาควิชาเทคโนโลยีการวัดและควบคุมทางอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ระดับประกาศนียบัตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และระดับปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปัจจุบันดำรงตำแหน่งหัวหน้าศูนย์บริการวิชาการและสอบเทียบ และอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

งานวิจัยที่สนใจ Metrology & Calibration, measurement systems