

SNSU PK.M-06-2024

Panduan Kalibrasi *Pressure Gauge*



SNSU PK.M-06: 2024

PANDUAN KALIBRASI *PRESSURE GAUGE*

Penyusun: 1. Fahmy Munawar Cholil
 2. Ian Rizki Ramadhan
 3. Bumi Hera Rihlatu
 4. Fanfan Budi Mulya
 5. Mochamad Kurniawan

Kontributor: 1. Gigin Ginanjar
 2. Albertus Darmawan
 3. FX. Cahyo Purnomo
 4. Renanta Hayu K
 5. Heri Sutanto
 6. Bambang L. Putro
 7. Toto Sugiharto
 8. Feizar Mahendra
 9. Arif Rahman H.
 10. Nurmaliya Afiyani
 11. Luthfiati Aprilia S.
 12. Fadhli Ihsan
 13. Ahmad Badrus Soleh

Desain sampul: Direktorat SNSU MRB

Direktorat Standar Nasional Satuan Ukuran Mekanika, Radiasi dan Biologi

Badan Standardisasi Nasional

Hak cipta © Badan Standardisasi Nasional, 2024

Lembar Pengesahan

Panduan kalibrasi *Pressure Gauge* (SNSU PK.M 06:2024) diterbitkan oleh Badan Standardisasi Nasional sebagai upaya untuk mengharmoniskan pelaksanaan kalibrasi *pressure gauge* di laboratorium kalibrasi maupun institusi lain yang berkepentingan dengan pengukuran yang perlu dijamin keabsahannya. Panduan ini mencakup definisi umum, langkah-langkah kalibrasi, serta evaluasi ketidakpastian pengukuran. Panduan ini disusun berdasarkan acuan metode internasional, nasional, maupun sumber ilmiah lainnya melalui proses pembahasan internal di Direktorat Standar Nasional Satuan Ukuran Mekanika, Radiasi, dan Biologi serta dengan mempertimbangkan masukan dari para ahli di bidang metrologi massa dan besaran turunannya.

Dokumen ini diterbitkan secara bebas dan tidak untuk diperjualbelikan secara komersial. Bagian dari dokumen ini dapat dikutip untuk keperluan edukasi atau kegiatan ilmiah dengan menyebutkan sumbernya, namun tidak untuk keperluan komersial.

Disahkan tanggal 13 Desember 2024

Deputi Bidang Standar Nasional Satuan Ukuran



Yustinus Kristianto Widiwardono, MIT

DAFTAR ISI

1. PENDAHULUAN	1
2. RUANG LINGKUP	1
3. DEFINISI	1
4. KETERTELUSSURAN	2
5. JENIS DAN TIPE <i>PRESSURE GAUGE</i>	2
6. PERSIAPAN	3
6.1. Standar Yang Digunakan	3
6.2. Uji Fungsi.....	3
6.3. Pengondisian	3
7. PROSEDUR KALIBRASI	4
7.1. Umum	4
7.2. Pemanasan.....	4
7.3. Pengambilan Data	4
8. ANALISIS DATA KALIBRASI	7
8.1. Model Matematis	7
8.2. Evaluasi Ketidakpastian.....	8
8.3. Komponen Ketidakpastian Dari Standar	8
8.4. Komponen Ketidakpastian Dari UUT	9
8.5. Derajat Kebebasan Efektif (u_{eff}).....	11
8.6. Faktor Cakupan (k)	12
8.7. Ketidakpastian Bentangan (U_p).....	12
8.8. Model Matematis Dengan Koreksi Perbedaan Tinggi.....	12
8.8. Model Matematis dengan Menggunakan DWT sebagai Standar	12
9. STUDI KASUS	15
10.DAFTAR PUSTAKA	20

1. PENDAHULUAN

Panduan kalibrasi ini disusun untuk mengharmoniskan pelaksanaan kalibrasi alat ukur *pressure gauge* yang dilakukan oleh laboratorium yang menerapkan SNI ISO/IEC 17025: 2017, Persyaratan umum kompetensi laboratorium pengujian dan laboratorium kalibrasi [1].

Metode kalibrasi yang diuraikan dalam petunjuk ini mengacu pada dokumen standar DKD-R 6-1:2014 *revision* 3 [2] atau standar lain yang relevan dan termutakhir [3]. Evaluasi ketidakpastian kalibrasi mengacu kepada dokumen JCGM 100: 2008 [4].

2. RUANG LINGKUP

Panduan kalibrasi ini digunakan untuk mengkalibrasi *pressure gauge* hidrolik dan *pressure gauge* pneumatik, baik analog atau digital, pada mode *gauge* positif ataupun negatif. Kalibrasi dilakukan menggunakan metode perbandingan langsung dengan *Dead Weight Tester (DWT) / test gauge /* manometer digital sebagai standar.

Rentang ukur pneumatik -95 kPa s.d. 0 kPa (negatif *gauge*), dan 0 MPa s.d. 2 MPa. Rentang ukur hidrolik 0 MPa s.d. 120 MPa.

Pedoman kalibrasi ini juga menetapkan prosedur evaluasi ketidakpastian pengukuran yang terkait dengan kalibrasi *pressure gauge*.

3. DEFINISI

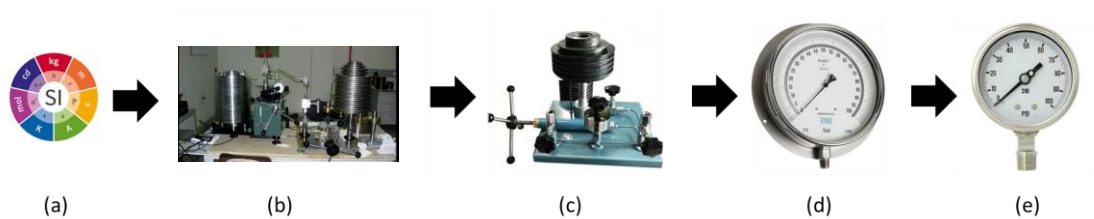
Untuk keperluan interpretasi dalam panduan ini, berlaku istilah dan definisi yang diberikan dalam DKD-R 6-1:2014 *revision* 3 [2]. Definisi istilah lain yang ada di panduan ini dijelaskan pada Tabel 1.

Tabel 1. Definisi istilah

<i>Pre-loading</i>	Pemberian tekanan maksimum dalam proses pemanasan
Seri	Satu rangkaian pengambilan data berurutan naik atau turun
Siklus	Dua kali seri pengambilan data (1 naik dan 1 turun)
<i>Warm up</i>	Proses pengondisian alat dalam keadaan menyala

4. KETERTELUSSURAN

Ketertelusuran pengukuran merupakan sifat dari hasil pengukuran yang dapat dihubungkan ke acuan tertentu, melalui rantai kalibrasi yang tak terputus yang terdokumentasi, yang masing-masing berkontribusi terhadap ketidakpastian pengukuran [5]. Ketertelusuran kalibrasi *pressure gauge* dapat dipahami secara sederhana melalui Gambar 1.



Gambar 1. Ketertelusuran *Pressure gauge*

Keterangan:

- (a). Satuan Sistem Internasional (SI)
- (b). *National pressure balance / dead weight tester* (standar utama Lab. SNSU)
- (c). *Industrial pressure balance / dead weight tester* (standar utama laboratorium)
- (d). *Test gauge* (standar kerja laboratorium)
- (e). *Pressure gauge*

5. JENIS DAN TIPE *PRESSURE GAUGE*

Dilihat dari jenis fluidanya, *pressure gauge* dibagi menjadi dua, yaitu *pressure gauge* hidrolik (menggunakan media oli, air, atau alkohol) dan *pressure gauge* pneumatik (menggunakan media udara, nitrogen, atau oksigen). Dari indikator pembacanya, terdapat *pressure gauge* tipe digital dan tipe analog.

6. PERSIAPAN

6.1. Standar yang digunakan

Kalibrasi dilakukan secara perbandingan langsung, menggunakan standar yang tertelusur ke SI, baik secara langsung ataupun tidak langsung. Ketidakpastian dari standar yang digunakan direkomendasikan lebih kecil dari 1/3 ketidakpastian yang diharapkan.

6.2. Uji Fungsi

Uji fungsi dilakukan sebelum kalibrasi / pengambilan data dilakukan. Uji fungsi meliputi:

- a. Inspeksi visual kerusakan (*pointer*, ulir, *channel pressure*)
- b. Inspeksi kontaminasi dan kebersihan
- c. Inspeksi visual terhadap label, keterbacaan indikator
- d. Ketersediaan dokumen (data teknis, buku manual)
- e. Kebocoran pada instalasi sistem kalibrasi dan *unit under test* (UUT)
- f. Kemampuan fungsi elektrikal
- g. Fungsi tombol-tombol / elemen pengontrol (misal: penyetel nol)
- h. Elemen *adjustment*
- i. Pengaruh torsi saat pemasangan

Uji fungsi menentukan apakah UUT dapat dilakukan kalibrasi atau tidak.

6.3. Pengondisian

Kalibrasi dilakukan setelah temperatur UUT, standar, dan kondisi lingkungan homogen dan stabil. Rentang temperatur yang diizinkan adalah 18 °C s.d. 28 °C. Rekomendasi variasi temperatur selama kalibrasi dibatasi pada ± 1 °C untuk kelas akurasi di bawah 0,1 %; $\pm 1,5$ °C untuk kelas akurasi 0,1 % s.d. 0,6 %; dan ± 2 °C untuk kelas akurasi di atas 0,6 %.

Pemanasan pada UUT harus turut dipertimbangkan sebelum kalibrasi. Lama pemanasan (*warm-up*) dilakukan tergantung spesifikasi dari manufaktur dan pengalaman personil.

7. PROSEDUR KALIBRASI

7.1. Umum

Proses kalibrasi *pressure gauge* dapat dilakukan setelah tahap pengondisian terpenuhi dan dilakukan pemanasan. Kalibrasi sebaiknya dilakukan pada titik pengukuran yang terdistribusi secara merata di seluruh rentang kalibrasi (Contohnya pada tiap 10% atau 20% dari rentang maksimal UUT). Proses kalibrasi dilakukan secara perbandingan langsung antara standar dengan UUT, dan dapat dilakukan dengan dua cara:

1. Pengaturan tekanan sesuai dengan pembacaan standar, lalu mencatat pembacaan UUT. Contohnya pada kalibrasi *pressure gauge* menggunakan DWT sebagai standar. DWT diberikan tekanan sesuai dengan nominal titik ukur, kemudian dilakukan pembacaan pada UUT.
2. Pengaturan tekanan sesuai dengan pembacaan UUT, lalu mencatat pembacaan standar. Contohnya pada kalibrasi *pressure gauge* menggunakan *test gauge*. *Pressure gauge* diberikan tekanan sesuai dengan nominal titik ukur, kemudian dilakukan pembacaan pada *test gauge* (standar).

7.2. Pemanasan

Sebelum dilakukan pengambilan data kalibrasi, perlu dilakukan pemanasan (*pre-loadings*) pada UUT dan standar dengan memberikan tekanan di titik 100% atau rentang maksimum. Pemanasan dilakukan dengan ketentuan yaitu, sebanyak 3 kali apabila kita melakukan kalibrasi dengan sekuens A, 2 kali pada sekuens B, dan 1 kali pada sekuens C (lihat Tabel 2).

7.3. Pengambilan Data

Setelah dilakukan pemanasan dan setelah nilai pembacaan dari UUT stabil, dilakukan penyetelan nol pada UUT (jika UUT memiliki fitur penyetelan nol) dalam kondisi *vent* (*pressure relief valve* terbuka). Pencatatan data pertama pada titik nol dilakukan segera setelahnya. Lalu berikan tekanan dengan pompa hingga mencapai titik ukur berikutnya. Waktu di antara perubahan tekanan sebaiknya sama dan tidak kurang dari 30 detik. Pembacaan sebaiknya dilakukan minimal 30 detik sejak awal perubahan tekanan.

Lanjutkan pada titik ukur berikutnya hingga mencapai titik atau rentang maksimum dari UUT. Jumlah titik ukur menyesuaikan dengan target ketidakpastian yang ingin dicapai sesuai dengan yang tertera di Tabel 2.

Pada rentang negatif, pencatatan data pertama pada titik nol dilakukan pada kondisi *vent*. Lalu atur tekanan dengan pompa hingga mencapai titik ukur berikutnya yaitu tekanan di bawah nol *gauge*. Lanjutkan pada titik ukur berikutnya hingga mencapai titik maksimum pada rentang negatif dari UUT.

Setelah mencapai titik ukur di rentang maksimumnya dan dilakukan pencatatan, jaga tekanan pada titik tersebut dan tunggu hingga 2 menit (5 menit untuk *pressure gauge* analog), lalu dilakukan pencatatan kembali. Pengukuran dilanjutkan dengan seri tekanan turun hingga menuju titik nol. Jumlah seri dan siklus pengukuran mengikuti sekuens yang digunakan (lihat Tabel 2). Satu siklus pengukuran terdiri dari satu seri pengukuran naik dan satu seri pengukuran turun. Ilustrasi untuk pengambilan data ditunjukkan pada Gambar 2.

Pada *pressure gauge* analog atau *bourdon tube*, UUT dapat diketuk secara perlahan pada setiap perubahan tekanan untuk meminimalkan efek gesekan dari jarum penunjuk. Perbedaan ketinggian antara UUT dan standar harus diminimalkan, atau diperhitungkan jika tidak memungkinkan.

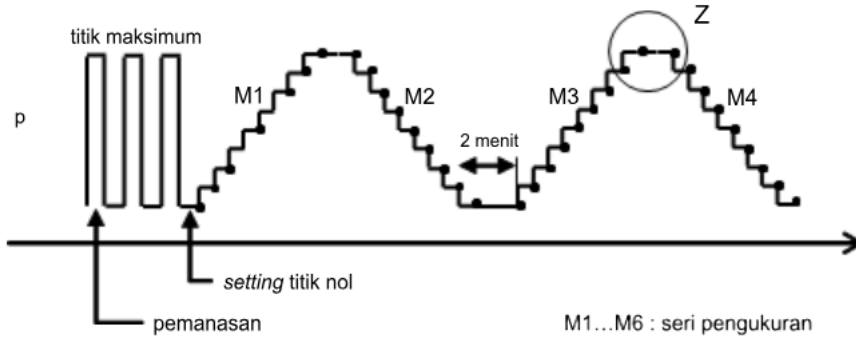
Tabel 2. Sekuens kalibrasi [2]

Sekuens kalibrasi	Target ketidakpastian pengukuran dalam %	Jumlah titik pengukuran minimal	Jumlah pemanasan	Perpindahan tekanan + waktu tunggu	Waktu tunggu di titik maksimal	Jumlah seri pengukuran	
						Naik	Turun
	*	dengan titik nol naik / turun		Detik	Menit **		
A	< 0,1	9	3	> 30	2	2	2
B	0,1 ~ 0,6	9	2	> 30	2	2	1
C	> 0,6	5	1	> 30	2	1	1

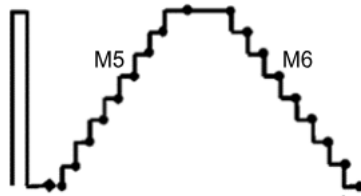
(*) Tabel 2 juga dapat digunakan apabila spesifikasi UUT menampilkan nilai akurasi.

(**) Untuk *pressure gauge* analog atau *bourdon tube*, waktu tunggu 5 menit.

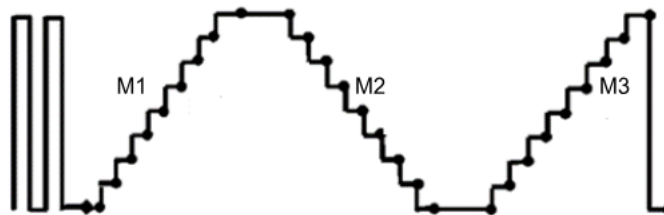
Sequence A



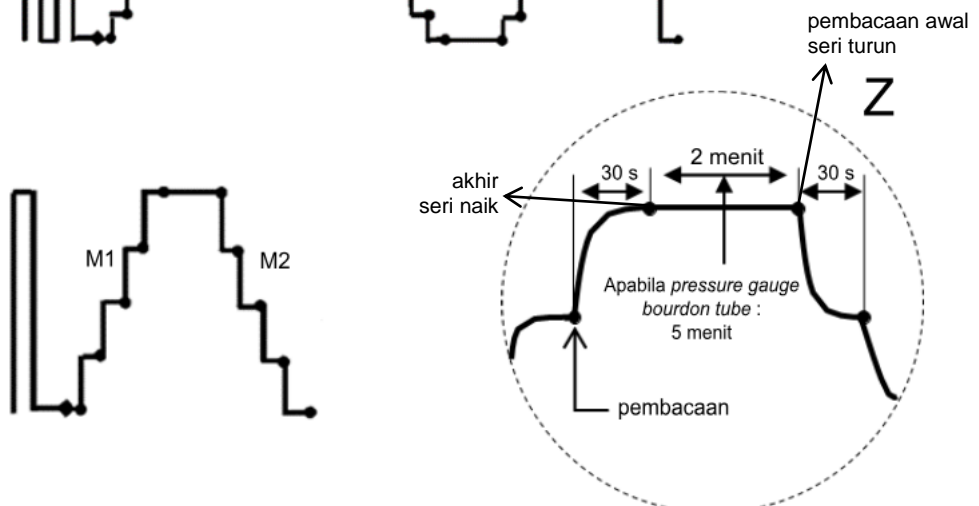
Penambahan reproduibilitas pengukuran apabila dilakukan pemasangan kedua



Sequence B



Sequence C



Gambar 2. Ilustrasi sekuens kalibrasi [2]

Catatan: Saat mencapai tekanan puncak, tidak direkomendasikan untuk memberikan tekanan tambahan.

8. ANALISIS DATA KALIBRASI

8.1. Model Matematis

Pemodelan matematis bagi kalibrasi *pressure gauge* dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$E = p_{uut} - p_{std} \quad (1)$$

atau

$$K = p_{std} - p_{uut} \quad (2)$$

dengan:

E	=	<i>Error</i> atau Deviasi
K	=	Koreksi
p_{uut}	=	Pembacaan UUT
p_{std}	=	Tekanan standar pada titik ukur

Pembacaan UUT merupakan rata-rata dari nilai yang didapatkan dari pengambilan data yang dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$\overline{x_{mean}} = \frac{\overline{x_{naik,j}} + \overline{x_{turun,j}}}{2} \quad (3)$$

dengan

$$\overline{x_{naik,j}} = \frac{1}{l} \cdot \sum_m (x_{m,j} - x_{m,0}) \quad (4)$$

$$\overline{x_{turun,j}} = \frac{1}{l} \cdot \sum_m (x_{m,j} - x_{(m-1),0}) \quad (5)$$

Variabel l merupakan jumlah seri pengukuran naik / turun. Indeks j merupakan nilai nominal dari tekanan yang diukur ($j = 0$: titik nol) dan indeks m menunjukkan seri pengukuran (seri pengukuran ke-2: $m = 2$).

Persamaan (3) digunakan jika pada pelaporan hasil kalibrasi digabungkan antara seri naik dengan seri turun. Persamaan (4) digunakan untuk $m = 1, 3, \text{ dan } 5$ (seri naik) dan tiap-tiap titik harus dikoreksi pada titik nol di seri yang sama. Persamaan (5) digunakan

untuk $m = 2, 4,$ dan 6 (seri turun) dan tiap-tiap titik harus dikoreksi pada titik nol di seri sebelumnya.

8.2. Evaluasi Ketidakpastian

Nilai *error* atau koreksi hasil kalibrasi hanya merupakan perkiraan (*approximation* atau *estimate*), maka akan lengkap hanya jika disertai nilai ketidakpastian hasil kalibrasinya. Ketidakpastian hasil kalibrasi *pressure gauge* dapat dievaluasi menggunakan persamaan berikut:

$$U_p = k \sqrt{(c_1 \cdot u_{std})^2 + (c_2 \cdot u_{res})^2 + (c_3 \cdot u_{zero})^2 + (c_4 \cdot u_{repeat})^2 + (c_5 \cdot u_{repro})^2 + (c_6 \cdot u_{hys})^2} \quad (6)$$

dengan:

U_p	=	Ketidakpastian bentangan
k	=	Faktor cakupan
u_{std}	=	Ketidakpastian baku standar
u_{res}	=	Ketidakpastian baku resolusi
u_{zero}	=	Ketidakpastian baku <i>zero deviation</i>
u_{repeat}	=	Ketidakpastian baku <i>repeatability</i>
u_{repro}	=	Ketidakpastian baku <i>reproducibility</i>
u_{hys}	=	Ketidakpastian baku <i>hysteresis</i>
$c_1 \dots c_6$	=	Koefisien sensitivitas

8.3. Komponen Ketidakpastian dari Standar

Nilai dan ketidakpastian baku dari standar yang digunakan diambil dari sertifikat kalibrasi. Nilai koreksi pada sertifikat juga harus diperhitungkan ketika menghitung nilai tekanan standar.

Ketidakpastian baku tekanan standar, dapat dituliskan sebagai berikut:

$$u_{std} = \frac{U_{sert}}{k} \quad (7)$$

dengan:

U_{sert}	=	Ketidakpastian bentangan dari standar pada sertifikat
k	=	Faktor cakupan

Jika standar yang digunakan mengalami perubahan nilai (dalam kurun waktu 1 tahun), ketidakpastian akibat *drift* standar dapat diperhitungkan.

$$u_{drift} = \frac{drift}{\sqrt{3}} \quad (8)$$

Dengan *drift* dapat diestimasi sebesar 10% dari selisih maksimal nilai koreksi pada sertifikat kalibrasi tahun sekarang dan tahun yang lalu.

$$drift = (\max \text{ koreksi tahun sekarang} - \max \text{ koreksi tahun lalu}) * 10\% \quad (9)$$

8.4. Komponen ketidakpastian dari UUT

8.4.1 Resolusi atau kemampuan baca (u_{res})

Pada resolusi digital digunakan skala terkecil dari indikator, sehingga kontribusi ketidakpastiannya adalah setengah nilai resolusi ($a = \text{resolusi} / 2$) dan ditetapkan ke setengah lebar dari distribusi persegi.

Pada resolusi analog, digunakan rasio lebar jarum penunjuk terhadap jarak antara 2 skala. Daya baca operator (DBO) sebaiknya menggunakan rasio pembagi 1/2, 1/4, 1/5, atau 1/10, dikalikan dengan resolusi. Lebar skala harus lebih besar dari 2,5 mm untuk rasio pembagi 1/10. Ketidakpastian resolusi menggunakan lebar dari distribusi persegi ($a = \text{DBO}$).

$$u_{res} = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (10)$$

8.4.2 Zero deviation (u_{zer})

Titik nol dapat diatur (*zero setting*) di setiap awal siklus pengukuran. Ketidakpastian baku *zero deviation* dapat dinyatakan dengan persamaan berikut

$$u_{zero} = \frac{f_0}{2\sqrt{3}} \quad (11)$$

dengan

$$f_0 = \max\{|x_{2,0} - x_{1,0}|, |x_{4,0} - x_{3,0}|, |x_{6,0} - x_{5,0}|\} \quad (12)$$

Nilai *zero deviation* didapatkan dari nilai pembacaan titik nol pada seri pengukuran 1 hingga 6, indeks 1-6 merupakan seri pengukuran.

8.4.3 Repeatability (u_{repeat})

Repeatability merupakan pengulangan (dengan pemasangan tidak berubah), yang ditentukan dari selisih nilai-nilai dari seri pengukuran yang sesuai (setelah dikoreksi terhadap titik nol). Pada sekuens A dan B, nilai *repeatability* merupakan perbandingan antara siklus 1 dan siklus 2. Sedangkan untuk sekuens C, *repeatability* tidak diperhitungkan.

$$u_{repeat} = \frac{b'_{mean,j}}{2\sqrt{3}} \quad (13)$$

dengan

$$b'_{naik,j} = |(x_{3,j} - x_{3,0}) - (x_{1,j} - x_{1,0})| \quad (14)$$

$$b'_{turun,j} = |(x_{4,j} - x_{3,0}) - (x_{2,j} - x_{1,0})| \quad (15)$$

$$b'_{mean,j} = \max\{b'_{naik,j}, b'_{turun,j}\} \quad (16)$$

Indeks j merupakan nilai nominal dari titik ukur ($j = 0$: titik nol).

8.4.4 Hysteresis (u_{hys})

Ketika data yang dinyatakan pada hasil kalibrasi adalah nilai rata-rata seri naik dan seri turun, maka *hysteresis* ditentukan dari perbedaan nilai pengukuran antara seri naik dan turun (setelah dikoreksi titik nol pada pengukuran seri naik masing-masing siklus). Jika dilaporkan secara terpisah antara seri naik dengan seri turun, maka nilai *hysteresis* tidak diperhitungkan.

$$u_{hys} = \frac{h_{mean,j}}{2\sqrt{3}} \quad (17)$$

dengan

$$h_{mean,j} = \frac{1}{n} \cdot \{ |(x_{2,j} - x_{1,0}) - (x_{1,j} - x_{1,0})| + |(x_{4,j} - x_{3,0}) - (x_{3,j} - x_{3,0})| \\ + |(x_{6,j} - x_{5,0}) - (x_{5,j} - x_{5,0})| \} \quad (18)$$

Indeks j merupakan nilai nominal dari titik ukur ($j = 0$: titik nol) dan indeks n merupakan jumlah siklus yang terdiri dari seri naik dan turun.

8.4.5 *Reproducibility* (u_{repro})

Reproducibility merupakan pengulangan dengan pemasangan berbeda. Nilainya ditentukan dari perbedaan selisih nilai-nilai seri pengukuran yang sesuai (setelah dikoreksi titik nol). Pada sekuens A, nilai *reproducibility* merupakan perbandingan antara siklus 1 dengan siklus 3. Sedangkan untuk sekuens B dan C, *reproducibility* tidak diperhitungkan.

$$u_{repro} = \frac{b_{mean,j}}{2\sqrt{3}} \quad (19)$$

dengan

$$b_{naik,j} = |(x_{5,j} - x_{5,0}) - (x_{1,j} - x_{1,0})| \quad (20)$$

$$b_{turun,j} = |(x_{6,j} - x_{5,0}) - (x_{2,j} - x_{1,0})| \quad (21)$$

$$b_{mean,j} = \max\{b_{naik,j}, b_{turun,j}\} \quad (22)$$

Indeks j merupakan nilai nominal dari titik ukur ($j = 0$: titik nol)

8.5. Derajat Kebebasan Efektif (v_{eff})

Derajat kebebasan efektif diperlukan sebagai salah satu komponen untuk menghitung nilai faktor cakupan (k). Derajat kebebasan efektif dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$v_{eff} = \frac{u_c^4}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4}{v_i}} \quad (23)$$

dengan u_i dan v_i adalah ketidakpastian baku dan derajat kebebasan untuk masing-masing sumber ketidakpastian. N adalah jumlah komponen ketidakpastian.

8.6. Faktor Cakupan (k)

Faktor cakupan (k) merupakan faktor numerik yang digunakan sebagai pengali dari ketidakpastian baku gabungan untuk mendapatkan ketidakpastian bentangan. Faktor cakupan dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$k = 1,95996 + 2,37356/v_{eff} + 2,818745/v_{eff}^2 + 2,546662/v_{eff}^3 + 1,761829/v_{eff}^4 + 0,245458/v_{eff}^5 + 1,000764/v_{eff}^6 \quad (24)$$

Nilai faktor cakupan juga dapat dilihat dari tabel Distribusi-T Student berdasarkan derajat kebebasan efektif.

8.7. Ketidakpastian Bentangan (U_p)

Ketidakpastian bentangan dihitung berdasarkan ketidakpastian baku gabungan dan faktor cakupan menggunakan persamaan berikut:

$$U_p = k \sqrt{(c_1 \cdot u_{std})^2 + (c_2 \cdot u_{res})^2 + (c_3 \cdot u_{zero})^2 + (c_4 \cdot u_{repeat})^2 + (c_5 \cdot u_{repro})^2 + (c_6 \cdot u_{hys})^2} \quad (25)$$

dengan nilai c_1 sampai c_6 adalah 1.

8.8. Model Matematis dengan Koreksi Perbedaan Tinggi

Jika terdapat beda ketinggian level acuan pada UUT dan standar, maka nilai p_{std} dikoreksi terhadap nilai tekanan akibat beda ketinggian.

$$p_{std} = p_{sert} + \Delta\rho \cdot g \cdot \Delta h \quad (26)$$

Sehingga persamaan (2) menjadi

$$K = (p_{sert} + \Delta\rho \cdot g \cdot \Delta h) - p_{uut} \quad (27)$$

dengan:

$$\Delta\rho = \rho_{\text{fluida}} - \rho_{\text{udara}}$$

ρ_{fluida} adalah densitas fluida yang digunakan sebagai media
 ρ_{udara} adalah densitas udara

$$g = \text{Nilai percepatan gravitasi}$$

$$\Delta h = h_{\text{std}} - h_{\text{uut}}$$

Nilai koefisien sensitivitas $\Delta\rho$, g , dan Δh tertera pada Tabel 3.

Tabel 3. Nilai koefisien sensitivitas dan ketidakpastian baku $\Delta\rho$, g , dan Δh

Besaran	Simbol	Koefisien sensitivitas c_i	Ketidakpastian baku $u_i(y)$
Perbedaan densitas	$\Delta\rho$	$c_{\Delta\rho} = g \cdot \Delta h$	$u_{\Delta\rho} = c_{\Delta\rho} \cdot u(\Delta\rho)$
Percepatan Gravitasi	g	$c_g = \Delta\rho \cdot \Delta h$	$u_g = c_g \cdot u(g)$
Perbedaan Tinggi	Δh	$c_{\Delta h} = \Delta\rho \cdot g$	$u_{\Delta h} = c_{\Delta h} \cdot u(\Delta h)$

Sebagai contoh, nilai ketidakpastian perbedaan densitas diestimasi sebesar 10% dari perbedaan densitas, nilai ketidakpastian percepatan gravitasi diestimasi sebesar 5 s.d. 50 ppm (*part per million*), dan nilai ketidakpastian perbedaan tinggi diestimasi sebesar $5 \cdot 10^{-3}$ m.

Catatan: Satuan untuk tekanan akibat beda ketinggian adalah $\frac{kg}{m} \cdot s^2$ atau Pa. Jika satuan berbeda perlu dikonversi terlebih dahulu.

8.9. Model Matematis dengan Menggunakan DWT sebagai Standar

Nilai tekanan standar (p_{std}) dan ketidakpastian standar (u_{std}) DWT ditentukan berdasarkan informasi yang tercantum dalam sertifikat kalibrasi (misalnya sertifikat dari Lab SNSU). Nilai tekanan standar didapatkan dari persamaan berikut:

$$p_{std} = \frac{M \left(1 - \frac{\rho u}{\rho m} \right) g + m_e g + c \sigma}{A_{0,20} (1 + b P_0 + \alpha (t_p - 20))} \quad (28)$$

dengan:

- P_e : Tekanan efektif pada dasar piston pada suhu piston 20 °C, bar
 M : Massa total dari *weight* termasuk piston, kg
 m_e : Koreksi massa, kg
 ρ_u : Densitas udara, 1,2 kg·m⁻³
 ρ_m : Densitas beban, 8000 kg·m⁻³
 g : Percepatan gravitasi, m·s⁻²
 c : Keliling lingkaran piston, m.
 σ : Tegangan permukaan Oli, N·m⁻¹.
 $A_{0,20}$: Luas efektif piston-silinder pada tekanan nol *gauge* dan suhu 20 °C, m².
 b : Koefisien distorsi tekanan dari piston-silinder
 α : Koefisien ekspansi termal dari piston-silinder, °C⁻¹.
 t_p : Suhu piston pada saat kalibrasi, °C.
 P_0 : Nilai estimasi tekanan nominal, Pa, yang dapat dihitung dari :

$$P_0 = \frac{M \left(1 - \frac{1,2}{8000}\right) g + m_e g}{A_{0,20}} \quad (29)$$

Nilai koefisien sensitivitas tertera pada Tabel 4.

Tabel 4. Nilai koefisien sensitivitas dan ketidakpastian baku

Besaran	Simbol	Koefisien sensitivitas c_i	Ketidakpastian baku $u_i(y)$
Suhu piston	t_p	$c_{t_p} = -2 \cdot \alpha \cdot P_0$	$u_{t_p} = c_{t_p} \cdot u(t_p)$
Koefisien ekspansi termal dari piston-silinder	α	$c_\alpha = -2 \cdot (t_p - 20) \cdot P_0$	$u_\alpha = c_\alpha \cdot u(\alpha)$
Percepatan gravitasi	g	$c_g = P_0/g$	$u_g = c_g \cdot u(g)$
Koefisien distorsi tekanan dari piston-silinder	b	$c_b = -P_0^2$	$u_b = c_b \cdot u(b)$

Dalam praktiknya, ketidakpastian tekanan standar DWT dapat diperoleh dari sertifikat kalibrasi DWT. Sebagai contoh, sertifikat kalibrasi yang dikeluarkan oleh Lab SNSU memuat informasi sebagai berikut

$$U(p) = A + B \cdot p + C \cdot p^2 \quad (30)$$

Dengan koefisien sensitifitas ketidakpastian tekanan standar adalah 1 ($c = 1$).

9. STUDI KASUS

Kalibrasi sebuah *pressure gauge* hidrolis dengan kelas akurasi 0,5 %. Rentang ukur maksimum adalah 40 bar dan menggunakan sekuens B. Kalibrasi dilakukan dengan mengatur tekanan nominal sesuai dengan pembacaan standar, lalu mencatat pembacaan UUT.

Tabel 5. Data UUT dan standar

Nama Alat	: Pressure gauge	Nama Standard	: Test Gauge
Merk	: Palmer	Merk	: SIKA
No.Seri	: 6-09085	No. Seri	: 1132632
Satuan	: bar	Satuan	: bar
Rentang ukur	: 40 bar	Rentang ukur	: 40 bar
Nilai Skala Terkecil	: 0,2 bar	Nilai Skala Terkecil	: 0,01 bar
Daya baca	: 0,05 bar		
Akurasi	: 0,5 %		
Mode	: Gauge		

Tabel 6. Data sertifikat standar

Instrument Reading (bar)	Standard Reading (bar)	Koreksi (bar)	U_{ex} (bar)
0,00	0,000	0,000	0,041
4,00	4,045	0,045	0,041
8,00	8,033	0,033	0,041
12,00	12,021	0,021	0,041
16,00	16,039	0,039	0,041
20,00	20,031	0,031	0,041
24,00	24,040	0,040	0,041
28,00	28,020	0,020	0,041
32,00	32,031	0,031	0,041
36,00	36,025	0,025	0,041
40,00	40,039	0,039	0,041

Tabel 7. Analisis Data

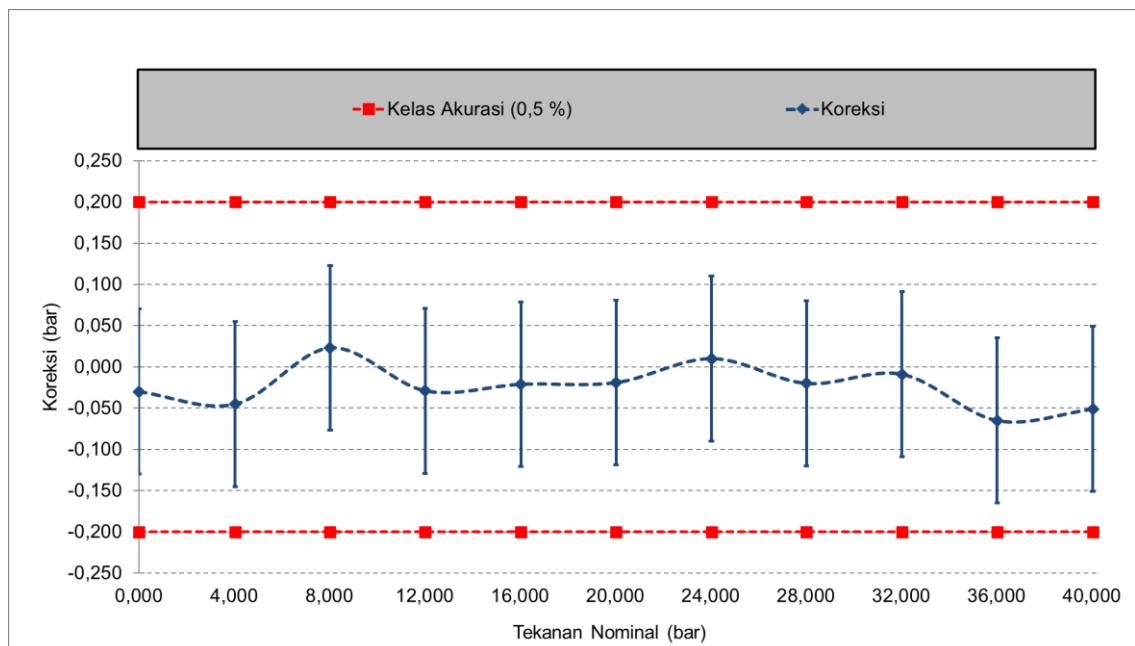
P nominal	P standar	Pembacaan alat			Mean	Zero deviation	Hysteresis	Repeatability	Resolusi	Standard
		M1	M2	M3						
bar	bar	bar	bar	bar	bar	bar	bar	bar	bar	bar
0	0,000	0,00	0,05	0,00	0,03	0,05	0,05	0,00	0,05	0,041
4	4,045	4,05	4,10	4,10	4,09	0,05	0,05	0,05	0,05	0,041
8	8,033	8,05	8,00	8,00	8,01	0,05	0,05	0,05	0,05	0,041
12	12,021	12,05	12,05	12,05	12,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,041
16	16,039	16,05	16,05	16,10	16,06	0,05	0,05	0,05	0,05	0,041
20	20,031	20,00	20,05	20,10	20,05	0,05	0,05	0,10	0,05	0,041
24	24,040	24,05	24,00	24,05	24,03	0,05	0,05	0,00	0,05	0,041
28	28,020	28,00	28,05	28,05	28,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,041
32	32,031	32,00	32,05	32,05	32,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,041
36	36,025	36,05	36,10	36,10	36,09	0,05	0,05	0,05	0,05	0,041
40	40,039	40,05	40,10	40,10	40,09	0,05	0,05	0,05	0,05	0,041

Tabel 8. Budget Ketidakpastian pada Tekanan Nominal 40 bar

Sumber ketidakpastian	Ketidakpastian	Distribusi	Derajat kebebasan	Faktor cakupan	Ketidakpastian baku	Koefisien sensitivitas	$c_i^2 u_i^2$	$c_i^4 u_i^4 / v_i$
	U_i		v_i	k_i	u_i	c_i		
Tekanan std (P_{sert})	0,041 bar	Normal	60	2	0,02	1	$4,20 \cdot 10^{-4}$	$2,94 \cdot 10^{-9}$
Resolusi (daya baca)	0,05 bar	Rata	50	1,73	0,03	1	$8,33 \cdot 10^{-4}$	$1,38 \cdot 10^{-8}$
Zero Deviation	0,05 bar	Rata	50	3,46	0,01	1	$2,08 \cdot 10^{-4}$	$8,68 \cdot 10^{-10}$
Hysteresis	0,05 bar	Rata	50	3,46	0,01	1	$2,08 \cdot 10^{-4}$	$8,68 \cdot 10^{-10}$
Repeatability	0,05 bar	Rata	50	3,46	0,01	1	$2,08 \cdot 10^{-4}$	$8,68 \cdot 10^{-10}$
SUM							$1,87 \cdot 10^{-3}$	$1,94 \cdot 10^{-8}$
Ketidakpastian baku gabungan						$u_{\text{out}} =$	0,043	bar
Derajat kebebasan efektif						$v_{\text{eff}} =$	181,57	
Faktor cakupan pada TK 95%						$k_{95} =$	1,97	
Ketidakpastian bentangan pada TK 95%						$U_p =$	0,09	

Tabel 9. Data Pada Laporan Kalibrasi

Titik ukur	Penunjukan Alat	Koreksi	Ketidakpastian
bar	bar	bar	bar
0	0,03	-0,03	0,1
4	4,09	-0,04	0,1
8	8,01	0,02	0,1
12	12,05	-0,03	0,1
16	16,06	-0,02	0,1
20	20,05	-0,02	0,1
24	24,03	0,01	0,1
28	28,04	-0,02	0,1
32	32,04	-0,01	0,1
36	36,09	-0,07	0,1
40	40,09	-0,05	0,1



Gambar 3. Grafik Hasil Kalibrasi

10. DAFTAR PUSTAKA

- [1] SNI ISO/IEC 17025. (2017). Persyaratan umum kompetensi laboratorium pengujian dan kalibrasi.
- [2] DKD-R 6-1. (2014). *Guideline DKD-R 6-1 – Calibration of Pressure Gauges*
- [3] JCGM 100. (2008). *Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement.*
- [4] EURAMET cg-17. (2021). *Guidelines on the Calibration of Electromechanical and Mechanical Manometers, EURAMET Calibration Guide No. 17.*
- [5] JCGM 200. (2012). *International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM).*



Diterbitkan oleh :

LABORATORIUM STANDAR NASIONAL SATUAN UKURAN BSN

KST B.J. Habibie, Gedung 420, Setu,

Tangerang Selatan 15314 - Banten Indonesia

Telp. 021- 7560533, 7560534, 7560571

Fax. 021-7560568, 7560064

www.bsn.go.id