

SNSU PK.W-02:2023

Panduan Kalibrasi Tachometer Non-Kontak (Optik)



SNSU PK.W-02:2023

PANDUAN KALIBRASI TACHOMETER NON-KONTAK (OPTIK)

Penyusun:

1. A.M. Boynawan
2. Ratnaningsih
3. Yulita Ika Pawestri
4. Brillyana Githanadi
5. Reggi Aryunadi
6. Marizsa Rahima Indra

Penelaah:

1. Hastori

Kontributor Eksternal:

1. Gusnaedi Said
2. Tri Surowidodo

Direktorat Standar Nasional Satuan Ukuran Termoelektrik dan Kimia
Badan Standardisasi Nasional

Hak cipta © Badan Standardisasi Nasional, 2023

Lembar Pengesahan

Panduan Kalibrasi Tachometer Non-Kontak (Optik) (SNSU PK.W-02:2023) diterbitkan oleh Badan Standardisasi Nasional sebagai upaya untuk mengharmoniskan pelaksanaan kalibrasi Tachometer Non-Kontak (Optik) di laboratorium kalibrasi maupun institusi lain yang berkepentingan dengan pengukuran yang perlu dijamin keabsahannya. Panduan ini mencakup metode kalibrasi, ketidakpastian pengukuran, serta pelaporan hasil. Panduan ini disusun berdasarkan acuan internasional, nasional, maupun sumber ilmiah lainnya melalui proses pembahasan internal di Direktorat Standar Nasional Satuan Ukuran Termoelektrik dan Kimia serta dengan mempertimbangkan masukan dari para ahli di bidang metrologi waktu dan frekuensi.

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, 23 November 2023
Deputi Bidang Standar Nasional Satuan Ukuran

Badan Standardisasi Nasional

Yustinus Kristianto Widiwardono



**BADAN
STANDARDISASI
NASIONAL**

SNSU PK.W-02:2023

PANDUAN KALIBRASI TACHOMETER NON-KONTAK (OPTIK)

Direktorat SNSU Termoelektrik dan Kimia

Badan Standardisasi Nasional

2023

DAFTAR ISI

1. Pendahuluan.....	5
2. Ruang Lingkup	5
3. Istilah dan Definisi.....	5
4. Metode Kalibrasi	5
5. Persiapan Kalibrasi	6
6. Prosedur Kalibrasi menggunakan Metode Pengukuran Langsung	6
7. Prosedur Kalibrasi Tachometer menggunakan Metode Perbandingan.....	8
8. Evaluasi Ketidakpastian Pengukuran	8
Referensi	21

1. Pendahuluan

- 1.1 Panduan ini disusun untuk mengharmoniskan pelaksanaan kalibrasi alat Tachometer Non-Kontak (Optik) yang dilakukan oleh laboratorium, baik yang menerapkan SNI ISO/IEC 17025 maupun yang tidak.
- 1.2 Panduan ini tidak mengklaim sebagai panduan lengkap untuk memperoleh semua rincian aspek kemetrolgian dari suatu Tachometer Non-Kontak (Optik), namun dapat menjadi rekomendasi atau pelengkap prosedur kalibrasi yang dikeluarkan oleh pabrik pembuat alat Tachometer Non-Kontak (Optik).

2. Ruang Lingkup

- 2.1 Tachometer Non-Kontak (Optik) dalam panduan ini adalah instrumen pengukuran bertipe meter yang memiliki kemampuan mengukur kecepatan dalam satuan rpm dengan prinsip kerja optik.
- 2.2 Kalibrasi Tachometer Non-Kontak (Optik) dapat dilakukan menggunakan metode pengukuran langsung dan perbandingan

3. Istilah dan Definisi

- 3.1 rpm atau *Revolutions per Minute* merupakan satuan ukuran kecepatan putaran.
- 3.2 Stroboskop adalah alat atau sistem yang digunakan untuk menghasilkan cahaya berkelip secara periodik yang dapat diatur.
- 3.3 Alat stroboskop berupa stroboskop *handheld*, kalibrator tachometer, atau peralatan lain sejenis yang periode kelipan cahayanya diatur secara langsung dalam satuan rpm
- 3.4 Sistem stroboskop berupa sumber frekuensi yang terhubung dengan sumber cahaya untuk menghasilkan cahaya berkelip.

4. Metode Kalibrasi

- 4.1 Metode Kalibrasi yang digunakan dalam panduan ini adalah metode pengukuran langsung dan metode perbandingan.
- 4.2 Metode pengukuran langsung pada kalibrasi tachometer non-kontak (optik) menggunakan stroboskop sebagai standar.
- 4.3 Metode perbandingan pada kalibrasi tachometer non-kontak (optik) dilakukan dengan membandingkan nilai yang ditunjukkan oleh alat ukur tachometer non-

kontak (optik) sebagai standar yang tertelusur dengan tachometer non-kontak (optik) sebagai UUT.

- 4.4 Standar yang digunakan sebagai acuan kalibrasi harus tertelusur ke Sistem Satuan Internasional (SI).
- 4.5 Hasil kalibrasi yang diperoleh dengan menggunakan panduan ini dapat berupa koreksi penunjukan alat dan ketidakpastian pengukuran.
- 4.6 Model matematis pengukuran disesuaikan dengan hasil kalibrasi.
- 4.7 Standar yang digunakan harus memiliki resolusi lebih baik dari resolusi UUT.

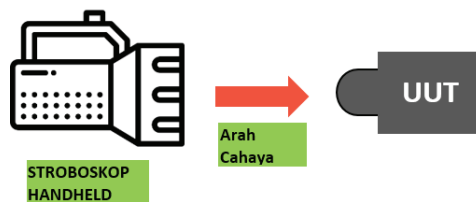
5. Persiapan Kalibrasi

- 5.1 Kegiatan awal yang dilakukan dalam persiapan adalah melakukan verifikasi kondisi fisik dan fungsi dari UUT.
- 5.2 Jika kondisi fisik dan fungsi sudah terverifikasi dengan baik dan tidak didapati adanya kesalahan yang mungkin terjadi saat pengukuran, maka UUT perlu dikondisikan pada ruang yang digunakan untuk memfasilitasi kegiatan kalibrasi
- 5.3 Kondisi lingkungan seperti suhu, kelembapan, dan pencahayaan tempat pelaksanaan kalibrasi harus dijaga agar sesuai dengan kebutuhan operasional berdasar pada spesifikasi dari alat standar dan alat ukur atau sesuai dengan prosedur mutu yang ditetapkan oleh laboratorium. Pekerjaan kalibrasi tidak dapat dilakukan ketika kondisi lingkungan tidak terpenuhi
Catatan: Kondisi lingkungan internal laboratorium dijaga pada suhu 23 ± 3 °C dan kelembapan 55 ± 10 %RH.
- 5.4 Tegangan catu daya yang diterapkan pada standar dan UUT harus sesuai dengan persyaratan teknis peralatan.
- 5.5 *Warming-up* perlu dilakukan untuk menstabilkan jaringan sirkuit internal pada alat, diterapkan sesuai dengan persyaratan teknis yang dipersyaratkan pabrikan atau sesuai dengan prosedur mutu yang ditetapkan oleh laboratorium.

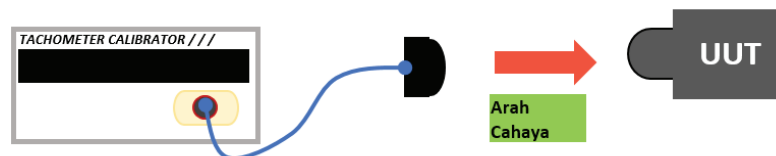
6. Prosedur Kalibrasi menggunakan Metode Pengukuran Langsung

- 6.1 Catat kondisi lingkungan awal sebelum memulai kalibrasi.
- 6.2 Atur rangkaian kalibrasi standar dan UUT seperti ditunjukkan pada gambar 1. Pastikan posisi UUT dan standar sejajar dengan jarak tidak lebih dari 20 cm.

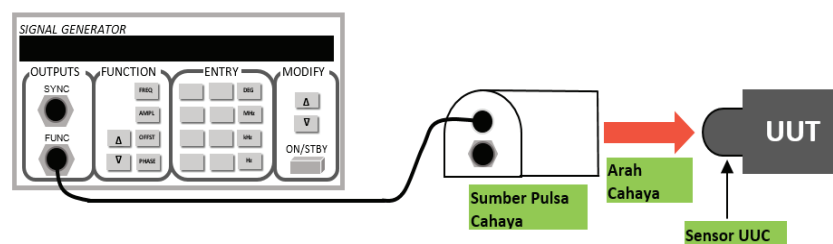
- 6.3 Bila standar yang digunakan adalah sumber frekuensi, level sinyal harus disesuaikan dengan kebutuhan sumber cahaya.
- 6.4 Atur titik ukur sesuai permintaan konsumen atau berdasarkan kemampuan rentang alat ukur.
- 6.5 Tunggu pembacaan UUT stabil, kemudian rekam hasil pengukuran pada lembar kerja.
- 6.6 Lakukan pengulangan sebanyak 5 kali untuk setiap titik ukur.
- 6.7 Ulangi langkah 6.3 sampai dengan 6.5 untuk titik ukur yang lain.
- 6.8 Catat kondisi lingkungan akhir setelah kalibrasi.



(a) Kalibrasi menggunakan standar stroboskop handheld



(b) Kalibrasi menggunakan standar kalibrator tachometer

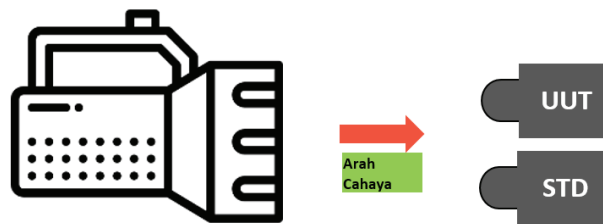


(c) Kalibrasi menggunakan standar sumber cahaya dan sumber frekuensi

Gambar 1. Rangkaian Kalibrasi dengan Metode Pengukuran Langsung

7. Prosedur Kalibrasi Tachometer menggunakan Metode Perbandingan

- 7.1 Catat kondisi lingkungan awal sebelum memulai kalibrasi.
- 7.2 Atur rangkaian kalibrasi standar, UUT dan objek ukur seperti ditunjukkan pada gambar 2a. Pastikan posisi UUT dan standar sejajar dengan objek ukur pada jarak tidak lebih dari 20 cm.
- 7.3 Atur titik ukur sesuai permintaan konsumen atau berdasarkan kemampuan rentang alat ukur.
- 7.4 Tunggu pembacaan stabil, kemudian rekam hasil pengukuran pada lembar kerja. Data yang direkam sebaiknya diambil pada saat yang sama antara UUT dan standar.
- 7.5 Lakukan pengulangan sebanyak 5 kali untuk setiap titik ukur.
- 7.6 Ulangi langkah 7.3 sampai dengan 7.5 untuk titik ukur yang lain.
- 7.7 Catat kondisi lingkungan akhir setelah kalibrasi.



Gambar 2. Rangkaian Kalibrasi dengan Metode Perbandingan

8. Evaluasi Ketidakpastian Pengukuran

8.1 Metode Pengukuran Langsung

8.1.1 Model Matematis

Secara umum, model matematis koreksi pengukuran pada kalibrasi tachometer ditentukan dengan persamaan:

$$C = T_s - T_m$$

C = Koreksi pengukuran

T_s = Nilai pengukuran standar yang telah dikoreksi

T_m = Nilai pengukuran UUT

8.1.2 Sumber-sumber ketidakpastian

- Ketidakpastian Tipe A

Ketidakpastian Tipe A merupakan data yang terkumpul hasil pengukuran. Data yang terkumpul diproses secara statistik menggunakan persamaan simpangan baku:

$$S_X = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

Persamaan simpangan baku tersebut diubah menjadi nilai ketidakpastian pengulangan dengan asumsi nilai ketidakpastian terdistribusi secara normal, melalui persamaan:

$$u_{rep} = \frac{S_X}{\sqrt{n}}$$

dimana:

S_X = Simpangan Baku

n = Jumlah data

x_i = Data ke-i

\bar{x} = Rata-rata dari semua data

u_{rep} = Ketidakpastian pengulangan (*repeatability*)

- Ketidakpastian Kemampuan Pembacaan UUT

Ketidakpastian kemampuan pembacaan UUT didapatkan dari resolusi pembacaan UUT yang diestimasi memiliki *semi range* $a = \pm 0,5$ kali resolusi UUT. Dengan asumsi nilai ketidakpastian terdistribusi secara persegi panjang, maka ketidakpastian baku kemampuan pembacaan dari UUT didapatkan melalui persamaan:

$$u_{res} = \frac{UUT_{resolution}}{2\sqrt{3}}$$

dimana:

u_{res} : Ketidakpastian kemampuan pembacaan alat

$UUT_{resolution}$: Resolusi pembacaan UUT.

- Ketidakpastian Standar

Ketidakpastian standar didapatkan berdasarkan alat standar yang digunakan. Nilai ketidakpastian ini didapatkan dari hasil kalibrasi yang tertelusur ke SI diasumsikan terdistribusi normal. Nilai ketidakpastian standar dinyatakan dengan persamaan:

$$u_{std} = \frac{u_{95}}{k}$$

Jika standar merupakan sumber frekuensi, nilai ketidakpastian dengan satuan frekuensi (Hz) perlu diubah terlebih dahulu menjadi satuan kecepatan (rpm).

$$u_{std(rpm)} = u_{std(Hz)} \times 60$$

dimana:

u_{std} : Ketidakpastian standar

u_{95} : Ketidakpastian standar dengan tingkat kepercayaan 95%

k : Faktor cakupan

$u_{std(rpm)}$: Ketidakpastian standar dalam satuan rpm

$u_{std(Hz)}$: Ketidakpastian standar dalam satuan Hz

- Ketidakpastian *Drift* Standar

Ketidakpastian *drift* standar didapatkan dari stabilitas jangka panjang atau *historical* standar. Perkiraan stabilitas tersebut dapat ditentukan berdasarkan nilai numerik minimal dari dua nilai koreksi kalibrasi terakhir dalam suatu interval kalibrasi. Ketidakpastian baku yang bersumber dari kestabilan jangka panjang standar dievaluasi dengan cara membagi setengah perkiraan penyimpangan tersebut dengan faktor pembagi. Faktor pembagi ditentukan berdasarkan jenis sebaran. Jika nilai numerik dari dua kalibrasi terakhir tidak dapat diperoleh, dapat digunakan nilai stabilitas yang tersedia pada spesifikasi alat untuk tahun pertamanya.

8.1.3 Perhitungan Ketidakpastian Pengukuran

Perhitungan ketidakpastian kalibrasi tachometer dijelaskan dengan studi kasus berikut ini:

- Sebuah tachometer non-kontak (optik) dikalibrasi menggunakan sebuah stroboskop sebagai standar acuan yang telah dikalibrasi dengan nilai ketidakpastian terentang pada tingkat kepercayaan 95% dengan $k=2$ adalah 0,0003 rpm. Pengkondisian dalam laboratorium dijaga sesuai dengan prosedur mutu yang telah ditetapkan. Tachometer sebagai UUT diposisikan tegak lurus dengan stroboskop pada posisi 20 cm. UUT memiliki resolusi 0,001 rpm pada 60 rpm. Pengulangan pengambilan data dilakukan sebanyak 5 kali pengukuran.
- Dari hasil pengukuran berulang, diperoleh hasil pengukuran seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Data hasil pengukuran berulang metode pengukuran langsung

Nominal Standar	Pembacaan UUT (rpm)					Rata-rata
	1	2	3	4	5	
60 rpm	60,032	60,033	60,032	60,034	60,033	60,033

- Stroboskop standar yang digunakan memiliki riwayat kalibrasi sebanyak 2 kali dengan nilai *drift* sama dengan 0,0001 rpm

Dari studi kasus di atas, perhitungan ketidakpastian pengukuran dihitung sebagai berikut:

- Koreksi pengukuran (C)
Nilai koreksi pembacaan UUT diperoleh dari nilai nominal standar dikurangi rata-rata pembacaan UUT.

$$C = T_s - T_m$$

Pada studi kasus ini didapatkan nilai koreksi – 0,033 rpm

- Ketidakpastian dari pengukuran berulang (u_{rep})

Nilai ketidakpastian dari pengukuran berulang merupakan bagian dari ketidakpastian Tipe A. Nilai ini didapatkan dari nilai simpangan baku dibagi dengan akar jumlah data.

$$u_{rep} = \frac{S_x}{\sqrt{n}}$$
$$u_{rep} = \frac{8,4 \times 10^{-4}}{\sqrt{5}}$$
$$u_{rep} = 3,7 \times 10^{-4}$$

Jenis distribusi ketidakpastian pengukuran berulang diasumsikan normal.

- Ketidakpastian dari standar yang digunakan (u_{std})

Sesuai dengan sertifikat kalibrasi standar terakhir yaitu 0,0003 rpm dengan nilai $k=2$, diperoleh nilai ketidakpastian standar sebagai berikut:

$$u_{std} = \frac{0,0003}{2} = 0,00015 \text{ rpm}$$

Ketidakpastian standar yang digunakan diasumsikan terdistribusi normal.

- Ketidakpastian resolusi pembacaan UUT (u_{res})

Dengan resolusi pembacaan UUT terkecil 0,001, maka *semi-range* dari resolusi pembacaan UUT adalah 0,0005 dan diasumsikan ketidakpastian resolusi pembacaan UUT memiliki distribusi ketidakpastian persegi panjang. Sehingga nilai ketidakpastian resolusi pembacaan UUT sebagai berikut:

$$u_{res} = \frac{0,0005}{\sqrt{3}} = 0,00029 \text{ rpm}$$

- Ketidakpastian dari *drift* standar (u_{drift})

Nilai ketidakpastian *drift* adalah 0,0001, dan diasumsikan ketidakpastian resolusi pembacaan UUT memiliki distribusi ketidakpastian persegi panjang. Sehingga nilai ketidakpastian *drift* standar sebagai berikut:

$$u_{res} = \frac{0,0001}{\sqrt{3}} = 0,000058 \text{ rpm}$$

- Ketidakpastian gabungan

Persamaan ketidakpastian gabungan pada kalibrasi tachometer metode pengukuran langsung dinyatakan dengan:

$$u_{comb} = \sqrt{(u_{rep} \cdot c_{rep})^2 + (u_{std} \cdot c_{std})^2 + (u_{res} \cdot c_{res})^2 + (u_{drift} \cdot c_{drift})^2}$$

Dimana:

- u_{comb} = Ketidakpastian gabungan
- u_{rep} = Ketidakpastian pengukuran berulang
- c_{rep} = Koefisien sensitivitas pengukuran berulang
- u_{std} = Ketidakpastian standar
- c_{std} = Koefisien sensitivitas standar
- u_{res} = Ketidakpastian kemampuan pembacaan UUT
- c_{res} = Koefisien sensitivitas kemampuan pembacaan UUT
- u_{drift} = Ketidakpastian *drift*
- c_{drift} = Koefisien sensitivitas *drift*

Dengan c sebagai turunan pertama dari kuantitas output terhadap kuantitas input, yang disebut koefisien sensitivitas. Nilai c_{rep} , c_{std} , c_{res} , dan c_{drift} bernilai sama dengan 1 (satu).

Semua nilai ketidakpastian kemudian dihitung dan ditampilkan pada tabel bujet ketidakpastian pada Tabel 2.

Tabel 2. Bujet ketidakpastian kalibrasi metode pengukuran langsung

Kontributor	Satuan	Distribusi	U	Pembagi	v_i	u_i	c_i	$u_i c_i$	$(u_i c_i)^2$	$\frac{(u_i c_i)^2}{v_i}$
u_{rep}	rpm	Normal	3,7E-04	1,00	4	3,7E-04	1	3,7E-04	1,4E-07	4,7E-15
u_{std}	rpm	Normal	3,0E-04	2,00	60	1,5E-05	1	1,5E-05	2,3E-10	8,5E-22
u_{res}	rpm	Rect	5,0E-04	1,73	60	2,9E-04	1	2,9E-04	8,5E-08	1,2E-16
u_{drift}	rpm	Rect	1,0E-04	1,73	60	5,8E-05	1	5,8E-05	3,4E-09	1,9E-19
Sums								2,3E-07	4,8E-15	
Ketidakpastian baku gabungan, u_c								4,7E-04		
Derajat kebebasan efektif, v_{eff}								1,1E+01		
Faktor cakupan, k -student's untuk v_{eff} dan CL 95 %								2,2E+00		
Ketidakpastian bentangan, $U = k \cdot u_c$								1,1E-03		rpm

8.1.4 Pelaporan Hasil Kalibrasi

Laporan hasil kalibrasi tachometer mengikuti SNI ISO/IEC 17025:2017 klausul 7.8. Contoh laporan data kalibrasi dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Contoh laporan data kalibrasi metode pengukuran langsung

Nominal Standar <i>Standard Nominal</i>	Penunjukan Alat <i>Instrument Indication</i>	Koreksi <i>Correction</i>	Ketidakpastian <i>Uncertainty</i>
60 <i>rpm</i>	60,033 <i>rpm</i>	- 0,033 <i>rpm</i>	0,001 <i>rpm</i>

8.2 Metode Perbandingan

8.2.1 Model Matematis

Secara umum, model matematis pada kalibrasi tachometer ditentukan dengan persamaan:

$$C = T_s - T_m$$

C = Koreksi pengukuran

T_s = Nilai nominal standar

T_m = Nilai pengukuran UUT

Nilai nominal standar perlu terlebih dahulu dikoreksi menggunakan nilai koreksi yang tertera pada sertifikat terakhir.

8.2.2 Sumber-sumber ketidakpastian

- Ketidakpastian Tipe A

Ketidakpastian Tipe A merupakan data yang terkumpul hasil pengukuran. Data yang terkumpul diproses secara statistik menggunakan persamaan simpangan baku:

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

Persamaan simpangan baku tersebut diubah menjadi nilai ketidakpastian pengulangan dengan asumsi nilai ketidakpastian terdistribusi secara normal, melalui persamaan:

$$u_{rep} = \frac{S_x}{\sqrt{n}}$$

dimana:

S_X = Simpangan Baku

n = Jumlah data

x_i = Data ke-i

\bar{x} = Rata-rata dari semua data

u_{rep} = Ketidakpastian pengulangan (*repeatability*)

- Ketidakpastian Kemampuan Pembacaan Standar

Ketidakpastian kemampuan pembacaan standar didapatkan dari resolusi pembacaan standar yang diestimasi memiliki *semi range* $a = \pm 0,5$ kali resolusi standar. Dengan asumsi nilai ketidakpastian terdistribusi secara persegi panjang, maka ketidakpastian kemampuan pembacaan dari standar didapatkan melalui persamaan:

$$u_{resStd} = \frac{Std_{resolution}}{2\sqrt{3}}$$

Dimana:

u_{resStd} : Ketidakpastian kemampuan pembacaan standar

$Std_{resolution}$: Resolusi pembacaan standar

- Ketidakpastian Kemampuan Pembacaan UUT

Ketidakpastian kemampuan pembacaan UUT didapatkan dari resolusi pembacaan UUT yang diestimasi memiliki *semi range* $a = \pm 0,5$ kali resolusi UUT. Dengan asumsi nilai ketidakpastian terdistribusi secara persegi panjang, maka ketidakpastian kemampuan pembacaan dari UUT didapatkan melalui persamaan:

$$u_{resUUT} = \frac{UUT_{resolution}}{2\sqrt{3}}$$

Dimana:

u_{resUUT} : Ketidakpastian kemampuan pembacaan UUT

$UUT_{resolution}$: Resolusi pembacaan UUT

- Ketidakpastian Standar

Ketidakpastian standar didapatkan berdasarkan alat standar yang digunakan. Nilai ketidakpastian ini didapatkan dari hasil kalibrasi yang tertelusur ke SI diasumsikan terdistribusi normal. Nilai ketidakpastian standar dinyatakan dengan persamaan:

$$u_{std} = \frac{u_{95}}{k}$$

dimana:

u_{std} : Ketidakpastian standar

u_{95} : Ketidakpastian standar dengan tingkat kepercayaan 95%

k : Faktor cakupan

- Ketidakpastian *Drift* Standar

Ketidakpastian *drift* standar didapatkan dari stabilitas jangka panjang atau *historical* standar. Perkiraan stabilitas tersebut dapat ditentukan berdasarkan nilai numerik dari dua kalibrasi terakhir dalam suatu interval kalibrasi. Ketidakpastian baku yang bersumber dari kestabilan jangka panjang standar dievaluasi dengan cara membagi setengah perkiraan penyimpangan tersebut dengan faktor pembagi. Faktor pembagi ditentukan berdasarkan jenis sebaran.

Jika nilai numerik dari dua kalibrasi terakhir tidak dapat diperoleh, dapat digunakan nilai stabilitas yang tersedia pada spesifikasi alat untuk tahun pertamanya.

8.2.3 Perhitungan Ketidakpastian Pengukuran

Perhitungan ketidakpastian kalibrasi tachometer dijelaskan dengan studi kasus berikut ini:

- Sebuah tachometer non-kontak (optik) dikalibrasi menggunakan sebuah tachometer standar yang telah terkalibrasi dengan nilai ketidakpastian terentang pada tingkat kepercayaan 95% adalah 0,001 dengan nilai koreksi pada titik 60 rpm adalah -0,033 rpm. Pengkondisian dalam laboratorium dijaga sesuai dengan prosedur mutu yang telah ditetapkan. Tachometer UUT dan tachometer standar diposisikan tegak lurus dengan stroboskop sebagai objek ukur pada posisi 20 cm. UUT memiliki resolusi 0,01 rpm pada 60 rpm. Pengulangan pengambilan data dilakukan sebanyak 5 kali pengukuran.
- Dari hasil pengukuran berulang pada 60 rpm, diperoleh hasil pengukuran sebagai berikut:

Tabel 4. Data hasil pengukuran berulang metode perbandingan

Pembacaan Tachometer	1	2	3	4	5	Rata-rata
Standar	60,032	60,033	60,032	60,034	60,033	60,033
UUT	60,52	60,52	60,52	60,52	60,51	60,52

- Tachometer standar yang digunakan memiliki riwayat kalibrasi sebanyak 2 kali dengan nilai *drift* sama dengan 0,001 rpm

Dari studi kasus diatas, perhitungan ketidakpastian pengukuran dihitung sebagai berikut:

- Koreksi pengukuran (C)

Nilai koreksi pengukuran diperoleh dari rata-rata pembacaan standar dikurangi nilai rata-rata pembacaan UUT

$$C = T_s - T_m$$

Pada studi kasus ini, didapatkan nilai koreksi pengukuran sebesar -0,52 rpm.

- Ketidakpastian dari pengukuran berulang (u_{rep})

Nilai ketidakpastian dari pengukuran berulang merupakan bagian dari ketidakpastian Tipe A. Nilai ini didapatkan dari nilai simpangan baku dibagi dengan akar jumlah data.

$$u_{rep} = \frac{S_x}{\sqrt{n}}$$

$$u_{rep} = \frac{4,4 \times 10^{-3}}{\sqrt{5}}$$

$$u_{rep} = 0,002$$

Jenis distribusi ketidakpastian pengukuran berulang diasumsikan normal.

- Ketidakpastian dari standar yang digunakan (u_{std})

Sesuai dengan sertifikat kalibrasi standar terakhir yaitu 0,001, diperoleh nilai ketidakpastian standar sebagai berikut:

$$u_{std} = \frac{0,001}{2} = 0,0005 \text{ rpm}$$

Ketidakpastian standar yang digunakan diasumsikan terdistribusi normal.

- Ketidakpastian resolusi standar (u_{resStd})

Dengan resolusi pembacaan standar terkecil 0,001, setengah dari ketidakpastian adalah 0,0005 dan kemudian diasumsikan ketidakpastian resolusi pembacaan standar memiliki distribusi ketidakpastian persegi panjang. Sehingga nilai ketidakpastian resolusi standar sebagai berikut:

$$u_{resStd} = \frac{0,0005}{\sqrt{3}} = 0,00029 \text{ rpm}$$

- Ketidakpastian resolusi pembacaan UUT (u_{resUUT})

Dengan resolusi pembacaan UUT terkecil 0,01, setengah dari ketidakpastian adalah 0,005 dan kemudian diasumsikan ketidakpastian resolusi pembacaan UUT memiliki distribusi ketidakpastian persegi panjang. Sehingga nilai ketidakpastian resolusi pembacaan UUT sebagai berikut:

$$u_{resUUT} = \frac{0,005}{\sqrt{3}} = 0,0029 \text{ rpm}$$

- Ketidakpastian dari *Drift* standar (u_{drift})

Nilai ketidakpastian *drift* adalah 0,001, dan diasumsikan ketidakpastian drift memiliki distribusi ketidakpastian persegi panjang. Sehingga nilai ketidakpastian *drift* standar sebagai berikut:

$$u_{drift} = \frac{0,001}{\sqrt{3}} = 0,00058 \text{ rpm}$$

- Ketidakpastian gabungan

Persamaan ketidakpastian gabungan pada kalibrasi tachometer dinyatakan dengan:

$$u_{comb} = \sqrt{(u_{rep} \cdot c_{rep})^2 + (u_{std} \cdot c_{std})^2 + (u_{resStd} \cdot c_{resStd})^2 + (u_{resUUT} \cdot c_{resUUT})^2 + (u_{drift} \cdot c_{drift})^2}$$

Dimana:

u_{comb} = Ketidakpastian gabungan

u_{rep} = Ketidakpastian pengukuran berulang

c_{rep} = Koefisien sensitivitas pengukuran berulang

u_{std} = Ketidakpastian standar

c_{std} = Koefisien sensitivitas standar

- u_{resStd} = Ketidakpastian kemampuan pembacaan standar
 c_{resStd} = Koefisien sensitivitas kemampuan pembacaan standar
 u_{resUUT} = Ketidakpastian kemampuan pembacaan UUT
 c_{resUUT} = Koefisien sensitivitas kemampuan pembacaan UUT
 u_{drift} = Ketidakpastian *drift*
 c_{drift} = Koefisien sensitivitas *drift*

Dengan c sebagai turunan pertama dari kuantitas output terhadap kuantitas input, yang disebut koefisien sensitivitas. Nilai c_{rep} , c_{std} , c_{resStd} , c_{resUUT} dan c_{drift} bernilai sama dengan 1 (satu). Semua nilai ketidakpastian kemudian dihitung dan ditampilkan pada tabel bujet ketidakpastian pada Tabel 5.

Tabel 5. Bujet ketidakpastian kalibrasi metode perbandingan

Kontributor	Satuan	Distribusi	U	Pembagi	v_i	u_i	c_i	$u_i c_i$	$(u_i c_i)^2$	$\frac{(u_i c_i)^2}{v_i}$
u_{rep}	rpm	Normal	2,0E-03	1,00	4	2,0E-03	1	2,0E-03	4,0E-06	4,0E-12
u_{std}	rpm	Normal	1,0E-03	2,00	60	5E-04	1	5E-04	2,5E-07	1,1E-15
u_{resStd}	rpm	Rect	5,0E-04	1,73	60	2,9E-04	1	2,9E-04	8,5E-08	1,2E-16
u_{resUUT}	rpm	Rect	5,0E-03	1,73	60	2,9E-03	1	2,9E-03	8,5E-06	1,2E-12
u_{drift}	rpm	Rect	1,0E-03	1,73	60	5,8E-04	1	5,8E-04	3,4E-07	1,9E-15
Sums								1,3E-05	5,2E-12	
Ketidakpastian baku gabungan, u_c								3,6E-03		
Derajat kebebasan efektif, v_{eff}								3,2E+01		
Faktor cakupan, k -student's untuk v_{eff} dan CL 95 %								2,0E+00		
Ketidakpastian bentangan, $U = k.u_c$								7,3E-03		rpm

8.2.4 Pelaporan Hasil Kalibrasi

Laporan hasil kalibrasi tachometer mengikuti SNI ISO/IEC 17025:2017 klausul 7.8.

Contoh laporan data kalibrasi dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Contoh laporan data kalibrasi metode perbandingan

Penunjukan Standar		Penunjukan Alat		Koreksi		Ketidakpastian	
<i>Standard Indication</i>		<i>Instrument Indication</i>		<i>Correction</i>		<i>Uncertainty</i>	
60	rpm	60,52	rpm	- 0,52	rpm	0,01	rpm

Referensi

- [1] EA-4/02:M-2022 Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration, April 2022.
- [2] JCGM 100:2008 Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement, September 2008.
- [3] JCGM GUM-6:2020 Guide to the expression of uncertainty in measurement Part 6: Developing and using measurement models
- [4] SNI ISO/IEC 17025:2017 Persyaratan Umum Kompetensi Laboratorium Pengujian dan Kalibrasi, ditetapkan oleh BSN tahun 2018.
- [5] TR 45-02 Criteria For Laboratories Accredited To Calibrate Tachometers, Centrifuges And Measure Rotational Speed, SANAS 2017.
- [6] 8 Sources of Uncertainty in Measurement for Every Uncertainty Budget <https://www.isobudgets.com/shop/product/8-sources-of-uncertainty-in-measurement-for-every-uncertainty-budget/> (diakses pada tanggal 19 Februari 2019)
- [7] SNI 6197:2020 Konservasi Energi pada Sistem Pencahayaan, ditetapkan oleh BSN tahun 2020.