

SNSU PK.P-06:2021

Panduan Kalibrasi Balok Ukur



PANDUAN KALIBRASI (BALOK UKUR)

Penyusun:

1. Eka Pratiwi
2. Ardi Rahman
3. Rina Yuniarty
4. Azwar Sabana

Kontributor:

1. A. Praba Drijarkara
2. Ocka Hedrony
3. Nurul Alfiyati
4. Nurlathifah
5. Okasatria Novyanto
6. Istiqomah
7. Achmad Fachrudin
8. Albertus Darmawan
9. Ediyanto
10. Endang Sumirat

Desain sampul: Bagus Muhammad Irvan dan David Nicko Harmanditya - BSN

Direktorat Standar Nasional Satuan Ukuran Mekanika, Radiasi, dan Biologi

Badan Standardisasi Nasional

Hak cipta © Badan Standardisasi Nasional, 2021

Lembar Pengesahan

Panduan Kalibrasi Balok Ukur (SNSU PK.P-06:2021) diterbitkan oleh Badan Standardisasi Nasional sebagai upaya untuk mengharmoniskan pelaksanaan kalibrasi balok ukur 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 dimensi.

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 19 November 2021

Hastori

Deputi Bidang Standar Nasional Satuan Ukuran

Badan Standardisasi Nasional

Daftar isi

1	Pendahuluan	1
2	Lingkup	1
3	Definisi	1
4	Bagian balok ukur	2
5	Prinsip kalibrasi	3
6	Persyaratan kalibrasi	3
7	Prosedur kalibrasi	3
7.1	Persiapan	3
8	Proses kalibrasi	5
8.1	Pengukuran titik tengah balok ukur	5
8.2	Pengukuran variasi panjang balok ukur	6
9	Evaluasi ketidakpastian pengukuran	6
9.1	Model matematis titik tengah	6
9.2	Model matematis variasi panjang	8
9.3	Evaluasi sumber-sumber ketidakpastian	9
9.4	<i>Budget</i> ketidakpastian	11
	Lampiran A Contoh Lembar Kerja	14
	Lampiran B Contoh Laporan Kalibrasi	18
	Lampiran C Pengukuran Kerataan Balok Ukur	19
	Lampiran D Penjelasan Persamaan Ketidakpastian Bentuk Kuadratik ($Q[a,bL]$) dalam Sertifikat Kalibrasi	21
	Lampiran E Penurunan Model Matematis Ketidakpastian Pengukuran untuk Titik Tengah	23
	Lampiran F Penurunan Model Matematis Ketidakpastian Pengukuran untuk Variasi Panjang	27
	Lampiran G Ketidakpastian akibat ketidaktengahan kontak (non-central contacting): $u(d_{center})$	29
	Lampiran H Ketidakpastian dari Koreksi Deformasi Kontak	31
	Bibliografi	33

Panduan Kalibrasi Balok Ukur

1 Pendahuluan

- 1.1 Tujuan dibuatnya panduan kalibrasi balok ukur ini adalah untuk mengharmonisasikan pelaksanaan kalibrasi alat ukur jenis balok ukur yang dilakukan oleh laboratorium yang menerapkan SNI ISO/IEC 17025, *Persyaratan umum kompetensi laboratorium pengujian dan kalibrasi*.
- 1.2 Metode kalibrasi yang diuraikan dalam panduan ini didasarkan pada standar ISO 3650 : 1998. Evaluasi ketidakpastian pengukuran mengacu kepada Metode ISO GUM (JCGM 100:2008) yang diuraikan dalam dokumen EA-4/02.

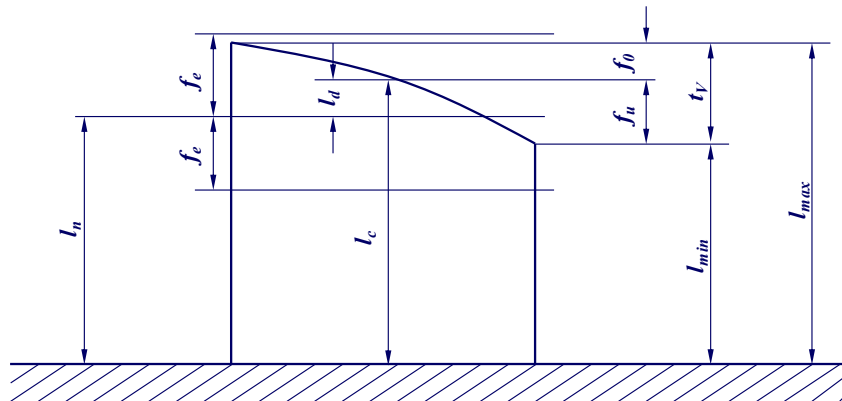
2 Lingkup

- 2.1 Panduan ini menguraikan prosedur metode kalibrasi balok ukur *rectangular* rentang ukur 0,5 mm s.d. 100 mm berbahan baja (*steel*) dengan menggunakan metode komparasi (*mechanical comparison*), meliputi :
 - a) Pengecekan kualitas muka ukur balok ukur
 - b) Pengukuran titik tengah balok ukur
 - c) Pengukuran variasi panjang balok ukur
- 2.2 Panduan ini digunakan untuk kalibrasi balok ukur dengan panjang nominal balok ukur yang sama antara standar dan tes, dimana keduanya memiliki jenis bahan yang sama.
- 2.3 Panduan ini menetapkan prosedur evaluasi ketidakpastian pengukuran yang terkait dengan kalibrasi balok ukur.

3 Definisi

- 3.1. Balok ukur adalah ukuran material penampang persegi panjang, terbuat dari bahan tahan aus dengan sepasang bidang datar, muka ukur yang saling paralel, yang dapat di-*wringing* ke muka ukur dari balok ukur lain untuk membuat rakitan komposit, atau ke muka ukur panjang.
- 3.2. Panjang balok ukur adalah jarak tegak lurus antara titik tertentu dari muka ukur dan muka planar dari pelat bantu dari bahan yang sama dan tekstur muka yang telah di-*wringing* muka ukur lainnya.
- 3.3. Variasi panjang balok ukur adalah perbedaan antara panjang maksimum l_{max} dan panjang minimum l_{min} .
- 3.4. Penyimpangan dari kerataan adalah jarak minimum antara dua bidang paralel di mana semua titik terletak dari muka ukur.

- 3.5 *Wringing* adalah kemampuan dari permukaan ukur suatu balok ukur yang dapat digabungkan pada permukaan ukur dari balok ukur lain atau permukaan yang memiliki ikatan molekul sama.



Gambar 1. Definisi balok ukur

Keterangan :

l_n : panjang nominal balok ukur

l_c : titik tengah balok ukur

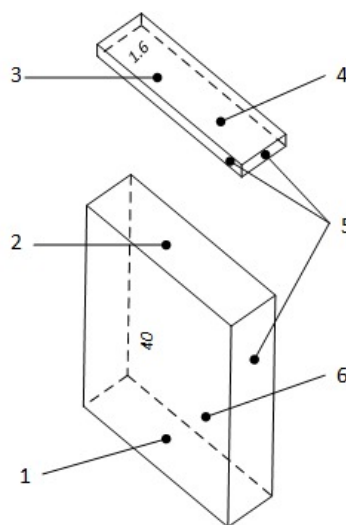
l_d : penyimpangan dari titik tengah balok ukur

v : variasi panjang balok ukur dengan $= l_{max} - l_{min} = f_o + f_u$

f_e : batas deviasi yang diijinkan pada tiap titik ukur

4 Bagian balok ukur

Nama bagian-bagian utama balok ukur diuraikan dalam Gambar 2.



Gambar 2. Bagian balok ukur

Keterangan :

1. Muka ukur sisi kiri
2. Muka ukur sisi kanan
3. Bagian balok ukur yang tidak diberi tanda
4. Bagian balok ukur yang diberi tanda (nominal)
5. Bagian balok ukur samping
6. Bagian balok ukur samping yang ditandai

5 Prinsip kalibrasi

Pengukuran penyimpangan balok ukur dilakukan dengan pengukuran komparatif, dimana balok ukur standar dan tes diletakkan berdampingan.

6 Persyaratan kalibrasi

Kalibrasi dilakukan dalam suhu $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan kelembaban relatif kurang dari 65%. Jika suhu ruang pengukuran di luar rentang tersebut, kalibrasi dapat dilakukan asalkan pengaruh suhu terhadap ketidakpastian pengukuran diperhitungkan dan sebaiknya batas suhu ditetapkan berdasarkan nilai ketidakpastian yang diharapkan.

7 Prosedur kalibrasi

Secara umum, kalibrasi balok ukur dilakukan dengan pengukuran komparatif (perbandingan) menggunakan komparator balok ukur, antara balok ukur standar yang sudah diketahui nilainya dan balok ukur (tes), dimana balok ukur standar dan tes diletakkan berdampingan.

7.1 Persiapan

7.1.1 Membersihkan balok ukur

Berikut ini adalah prosedur ringkas pembersihan balok ukur. Untuk informasi lebih lengkap mengenai pembersihan balok ukur, lihat SNSU PK.P-05.

Balok ukur standar dan tes harus dibersihkan terlebih dahulu sebelum pengukuran dilakukan.

- a. Gunakan sarung tangan untuk menghindari kontak langsung antara jari dengan balok ukur, hal ini dimaksudkan agar tidak terdapat lemak yang berasal dari tangan.
- b. Bersihkan permukaan balok ukur dengan menggunakan cairan alkohol, etanol, aseton, atau bahan pembersih lain yang direkomendasikan oleh produsen balok ukur. Perlu diperhatikan juga tentang resiko bahaya dari penggunaan bahan pembersihnya. Penggunaan aseton tidak disarankan untuk penggunaan rutin pembersihan, hanya dalam kondisi tertentu dimana kotoran sulit dibersihkan dengan menggunakan alkohol atau etanol.

- c. Tuangkan cairan pembersih pada permukaan balok ukur, kemudian usap secara perlahan dengan menggunakan kain bebas serabut, *chamois* atau tissue bebas serabut sehingga permukaan balok ukur bersih sempurna.
- d. Setelah balok ukur selesai dibersihkan, gunakan *air blower* untuk memastikan tidak ada serat kain yang tertinggal pada balok ukur.
- e. Proses pembersihan balok ukur sudah selesai jika balok ukur sudah terlihat seperti cermin, kemudian letakkan balok ukur tersebut di wadah yang bersih. Wadah tersebut sebaiknya dilapisi dengan *chamois*, kain bebas serabut atau tissue bebas serabut yang bersih, dan untuk melindunginya dari debu tutup lagi dengan *chamois* lainnya, tunggu 2 - 4 jam untuk menyeragamkan suhu balok ukur.

7.1.2 Komparator balok ukur

- a. Nyalakan *power* komparator balok ukur dan tunggu sekitar 30 menit untuk pemanasan instrumennya.
- b. Lakukan pengecekan posisi *probe* atas dan bawah.
- c. Periksa apakah komparator balok ukur berfungsi dengan baik.

7.1.3 Pengecekan kualitas muka ukur balok ukur

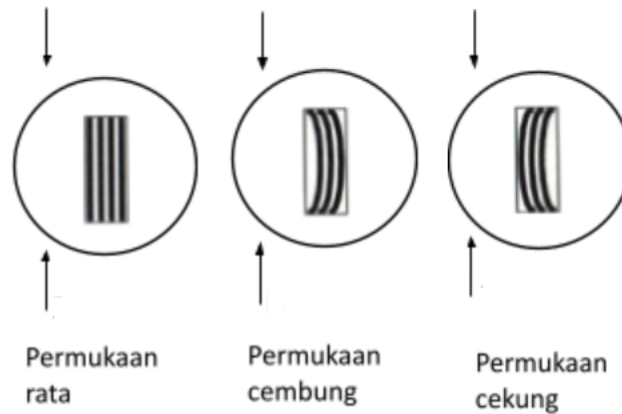
- a. Lakukan pengecekan kualitas muka ukur balok ukur seperti yang tertera pada lampiran C.
- b. Jika hal tersebut tidak dimungkinkan maka dapat dilakukan pengecekan kualitas muka ukur dengan pengamatan sederhana menggunakan *optical flat*.
- c. Gunakan sarung tangan untuk menghindari kontak langsung antara jari dengan balok ukur, hal ini dimaksudkan agar tidak terdapat lemak yang berasal dari tangan.
- d. Letakkan *optical flat* di atas muka ukur balok ukur ukur dengan cahaya dari lampu mengenai *optical flat*.



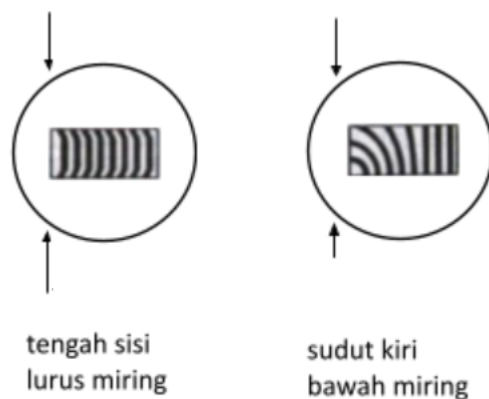
Gambar 3. Cara peletakan *optical flat*

- e. Atur posisinya sedemikian rupa sehingga tampak frinji yang cukup jelas.
- f. Jika frinji terlihat beraturan (gambar 4) maka kalibrasi dapat dilakukan, namun demikian dengan menggunakan cara pada poin b tidak dapat diketahui dengan pasti kerataan muka ukur sesuai dengan tabel kerataan (sesuai ISO 3650) pada lampiran C.

- g. Pengecekan kualitas muka ukur balok ukur dilakukan secara sampling bergantung pada banyaknya jumlah balok ukur dalam 1 set (3 – 5 balok ukur).



Gambar 4. Frinji beraturan (arah panah menunjukkan sisi *optical flat* yang ditekan)



Gambar 5. Frinji tidak beraturan

8 Proses kalibrasi

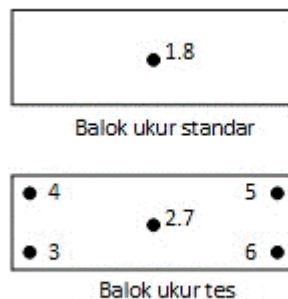
8.1 Pengukuran titik tengah balok ukur

- Sebelum melakukan pengukuran titik tengah balok ukur, lakukan pencatatan suhu dan kelembapan ruangan.
- Letakkan balok ukur standar dan balok ukur tes pada *template* secara berdampingan dan pastikan posisi balok ukur standar tidak tertukar dengan balok ukur tes. Pastikan bahwa balok ukur tes berada pada sisi yang lebih dekat dengan operator.
- Setting* komparator balok ukur agar *display* menunjukkan angka nol.
- Pastikan *inductive measuring probe* berfungsi dengan baik. Lakukan tiga kali pengukuran pada bagian tengah balok ukur standar untuk memverifikasi kestabilan pengukuran. Setelah kestabilan pengukuran diperoleh, maka pengukuran dengan metode perbandingan dapat dilakukan.

- e. Lakukan pengukuran pada titik tengah balok ukur standar kemudian bandingkan dengan titik tengah pada balok ukur tes, merujuk pada Gambar 6 dengan urutan pengukuran (1 – 2 – 7 – 8). Catat setiap data pengukuran di dalam lembar kerja.
- f. Setelah melakukan pengukuran balok ukur, catat suhu dan kelembapan ruangan.

8.2 Pengukuran variasi panjang balok ukur

Pengukuran variasi panjang dilakukan dengan cara mengukur 5 posisi yang berbeda pada muka ukur balok ukur tes. Pengukuran kelima titik ini dilakukan selama proses perbandingan panjang. Hal ini dapat dilakukan dengan cara melakukan pengukuran secara berurutan pada balok ukur tes mulai dari no 2 – 3 – 4 – 5 – 6 dan 7 sesuai dengan urutan nomor pada Gambar 6.



Gambar 6. Pengukuran balok ukur

Keterangan :

- Jika hanya melakukan pengukuran titik tengah, maka urutan pengukurannya adalah 1 – 2 – 7 – 8
- Namun, jika melakukan pengukuran titik tengah **dan** variasi panjang, maka urutan pengukurannya adalah 1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 – 8

9 Evaluasi ketidakpastian pengukuran

9.1 Model matematis titik tengah

Nilai penyimpangan balok ukur dihitung dengan model seperti pada persamaan di bawah ini:

$$l_x = l_s + \delta l_D + \delta l + \delta l_C - L(\bar{\alpha} \cdot \delta t + \delta \alpha \cdot \bar{\theta}) + \delta l_V + \delta l_F \quad (1)$$

dengan :

l_x Penyimpangan panjang balok ukur tes

l_s	Panjang balok ukur standar pada suhu referensi $t_0 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ sesuai dengan sertifikat kalibrasi
δl_D	Perubahan panjang dari balok ukur standar sejak kalibrasi terakhir yang diakibatkan karena drift
δl	Pengamatan perbedaan panjang diantara balok ukur yang penyimpangannya belum diketahui terhadap balok ukur standar
δl_C	Koreksi untuk ketidaklinieran dan offset dari komparator
L	Panjang nominal balok ukur yang diukur
$\bar{\alpha}$	Rata-rata koefisien muai termal dari balok ukur standar dan tes
δt	Perbedaan suhu balok ukur standar dan tes
$\delta \alpha$	Perbedaan koefisien muai termal diantara balok ukur standar dan tes
$\bar{\theta}$	Penyimpangan dari suhu rata-rata balok ukur standar dan tes terhadap suhu standar
δl_V	Koreksi untuk ketidaktengahan kontak dari posisi titik tengah balok ukur
δl_F	Koreksi untuk deformasi kontak

Berdasarkan model matematis, ketidakpastian baku gabungan dapat dihitung dengan persamaan :

$$u^2(l_x) = u^2(l_s) + u^2(\delta l_D) + u^2(\delta l) + u^2(\delta l_C) + L^2[\bar{\alpha}^2 \cdot u^2(\delta t) + \theta^2 \cdot u^2(\delta \alpha) + u^2(\delta \alpha) \cdot u^2(\bar{\theta})] + u^2(\delta l_V) + u^2(\delta l_F) \quad (2)$$

Ketidakpastian yang diakibatkan karena balok ukur standar dan drift dapat dinyatakan dalam bentuk kuadratik sebagai fungsi panjang nominal seperti berikut :

$$u^2(l_s) = u_a^2(l_s) + L^2 \cdot u_b^2(l_s) \text{ dan } u^2(\delta l_D) = u_a^2(\delta l_D) + L^2 \cdot u_b^2(\delta l_D) \quad (3)$$

Beberapa komponen dalam persamaan di atas memiliki koefisien sensitivitas yang berhubungan dengan fungsi panjang L. Karena terdapat beberapa komponen yang bergantung pada fungsi panjang L (*length-dependent*), maka persamaan ketidakpastian pengukuran balok ukur dapat dievaluasi dalam bentuk kuadratik $u^2 = a^2 + b^2 \cdot L^2$, sebagai berikut (Catatan: Lihat Lampiran D untuk mengetahui penjelasan lanjutan mengenai bentuk kuadratik):

$$u^2(l_x) = u_a^2(l_s) + u_a^2(\delta l_D) + u^2(\delta l) + u^2(\delta l_C) + u^2(\delta l_V) + u^2(\delta l_F) + L^2 \cdot [u_b^2(l_s) + u_b^2(\delta l_D) + \bar{\alpha}^2 \cdot u^2(\delta t) + \theta^2 \cdot u^2(\delta \alpha) + u^2(\delta \alpha) \cdot u^2(\bar{\theta})] \quad (4)$$

Sebagai catatan, proses penurunan model matematis lengkap untuk ketidakpastian pengukuran titik tengah dapat dilihat pada Lampiran E pada panduan ini.

9.2 Model matematis variasi panjang

$$v = \Delta l + l(\bar{\alpha} \cdot \delta t + \delta \alpha \cdot \theta) + \delta l_{pe} \quad (5)$$

dengan :

v	Variasi panjang dari balok ukur
Δl	Perbedaan panjang diantara titik maksimum dan minimum pada balok ukur
$\bar{\alpha}$	Rata-rata koefisien muai termal diantara titik maksimum dan minimum pada balok ukur
δt	Perbedaan suhu dari titik maksimum dan minimum pada balok ukur
$\delta \alpha$	Perbedaan koefisien muai termal diantara titik maksimum dan minimum pada balok ukur
θ	Penyimpangan suhu rata-rata dari titik maksimum dan minimum pada balok ukur terhadap suhu referensi
δl_{pe}	Koreksi untuk kesalahan posisi 5 titik ukur pada balok ukur

Berdasarkan model matematis pada persamaan (5), ketidakpastian baku gabungan dapat dihitung dengan persamaan (6).

$$u^2(v) = u^2(\Delta l) + u^2(\bar{\alpha} \cdot \delta t \cdot l) + u^2(\delta \alpha \cdot \bar{\theta} \cdot l) + u^2(\delta l_{pe}) \quad (6)$$

$$u^2(v) = c_1^2 u^2(\Delta l) + c_2^2 u^2(\bar{\alpha}) + c_3^2 \cdot u^2(\delta t) + c_4^2 \cdot u^2(\delta \alpha) + c_5^2 u^2(\bar{\theta}) + c_6^2 u^2(\delta l_{pe}) \quad (7)$$

$$u^2(v) = u^2(\Delta l) + (-\delta t \cdot l)^2 \cdot u^2(\bar{\alpha}) + (-\bar{\alpha} \cdot l)^2 \cdot u^2(\delta t) + (-\bar{\theta} \cdot l)^2 \cdot u^2(\delta \alpha) + (-\delta \alpha \cdot l)^2 \cdot u^2(\theta) + u^2(l_{pe}) \quad (8)$$

$$u^2(v) = u^2(\Delta l) + u^2(\delta l_{pe}) \quad (9)$$

Catatan : $u^2(\Delta l)$ terdiri atas $u^2(\delta l_1), u^2(\delta l_2), u^2(\delta l_3)$

Keterangan :

$u^2(\delta l_1)$ = Ketidakpastian pengukuran dari sertifikat kalibrasi komparator balok ukur

$u^2(\delta l_2)$ = Daya baca komparator balok ukur

$u^2(\delta l_3)$ = Keberulangan pengukuran

Sehingga persamaan ketidakpastian menjadi :

$$u^2(v) = u^2(\delta l_1) + u^2(\delta l_2) + u^2(\delta l_3) + u^2(\delta l_{pe}) \quad (10)$$

Karena 5 titik pengukuran diambil dalam waktu yang singkat, perbedaan suhu diasumsikan sangat kecil sehingga ketidakpastian dari variable suhu dapat diabaikan.

Sebagai catatan, proses penurunan model matematis lengkap untuk ketidakpastian pengukuran variasi panjang dapat dilihat pada Lampiran F pada panduan ini.

9.3 Evaluasi sumber-sumber ketidakpastian

9.3.1 Evaluasi sumber-sumber ketidakpastian titik tengah

Sumber-sumber ketidakpastian titik tengah balok ukur dapat dievaluasi menurut panduan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Evaluasi sumber-sumber ketidakpastian titik tengah

Besaran	Estimasi nilai besaran	Evaluasi ketidakpastian
l_s	Nilai koreksi dari sertifikat kalibrasi	Ketidakpastian dari sertifikat kalibrasi dalam bentuk kuadrat
δl_D	Jika ada riwayat kalibrasi, δl_D dapat dihitung dari selisih penyimpangan maksimum dan minimum setiap nominal dari riwayat sertifikat kalibrasi Jika tidak ada riwayat kalibrasi, diasumsikan $\delta l_D = 0$.	Jika δl_D dihitung dari riwayat kalibrasi, $u(\delta l_D)$ dapat dihitung dari $Drift = \frac{E_{max}(x) - E_{min}(x)}{rentang\ tahun}$ $u(\delta l_D) = \frac{Max\ Drift}{\sqrt{3}}$ E_{max} dan E_{min} diperoleh dari sertifikat kalibrasi standar pada setiap titik
δl	Dari pengukuran (dua sumber)	Daya baca komparator balok ukur $\delta_{l1} = \frac{daya\ baca}{\sqrt{3}}$
		$\delta_{l2} = \frac{s}{\sqrt{n}}$ <p>s : simpangan baku n : banyaknya pengukuran pada titik ukur yang dievaluasi</p> <p>Pengukuran berulang untuk mengevaluasi sebaran nilai dapat dilakukan pada salah satu titik ukur dan sebaiknya dilakukan 10 kali pada titik tersebut.</p>
δl_c	0	$\delta l_c = \frac{U_{95}}{k}$ <p>ketidakpastian dari sertifikat komparator balok ukur</p>
L	Panjang nominal	-

Besaran	Estimasi nilai besaran	Evaluasi ketidakpastian
δt	$\delta t = 0$ diasumsikan bahwa balok ukur standar dan tes telah dikondisikan cukup lama sehingga mempunyai suhu yang sama	Dapat diestimasi dari perkiraan, misalnya : $\delta t = \frac{0,05}{\sqrt{3}} = 0,0289^{\circ}\text{C}$
$\delta \alpha$	$\delta \alpha = 0$ diasumsikan bahwa balok ukur standar dan tes terbuat dari bahan yang sama	Dapat diestimasi dari perkiraan, misalnya : $u(\delta \alpha) = \frac{2 \times 10^{-6}}{\sqrt{3}} \text{ } ^{\circ}\text{C}$
$\delta \alpha \cdot \bar{\theta}$	0	1e-6
δl_V	0	Dapat diestimasi 15 nm (ISO 3650)
δl_F	0	Dapat diestimasi 10 nm jika balok ukur standar dan balok ukur tes terbuat dari bahan yang sama. Jika bahan tidak sama, dapat melihat Lampiran G pada panduan ini.

9.3.2 Evaluasi sumber-sumber ketidakpastian variasi panjang

Sumber-sumber ketidakpastian variasi panjang balok ukur dapat dievaluasi menurut panduan dalam Tabel 2.

Tabel 2. Evaluasi sumber-sumber ketidakpastian variasi panjang

Besaran	Estimasi nilai besaran	Evaluasi ketidakpastian
Δl	δl_1 Nilai koreksi dari sertifikat kalibrasi	Ketidakpastian pengukuran dari sertifikat kalibrasi komparator balok ukur
	δl_2 0	Daya baca komparator balok ukur : 0,005 μm $\delta_{l2} = \frac{\text{daya baca}}{\sqrt{3}}$
	δl_3 dari pengukuran	$\delta_{l2} = \frac{s}{\sqrt{n}}$ s : simpangan baku n : banyaknya pengukuran pada titik ukur yang dievaluasi Keberulangan pengukuran : dari standard deviasi 10 pengukuran berulang perbedaan panjang
δl_{pe}	0	Dapat diestimasi 15 nm (ISO 3650)

9.4 Budget ketidakpastian

9.4.1 Budget ketidakpastian titik tengah

Contoh *budget* ketidakpastian untuk pengukuran titik tengah ditunjukkan dalam Tabel 3.

Tabel 3. *Budget* ketidakpastian titik tengah

Komponen ketidakpastian konstan											
Sumber ketidakpastian	Satuan	Tipe distribusi	Simbol	Var. Interval a	Pembagi	Derajat kebebasan ν_i	Ketidakpastian std u_i	Koef. sensitivitas c_i	$c_i \cdot u_i$	$(c_i \cdot u_i)^2$	$(c_i \cdot u_i)^4/\nu_i$
1a. Balok ukur standar	μm	Normal	$u(l_s)$	0.065	2.000	1E+99	0.0325	1	0.0325	0.00106	1.1E-105
2a. Drift	μm	Segitiga	$u(\delta l_D)$	0.024	2.449	12.5	0.0098	1	0.0098	0.00010	7.4E-10
3a. Daya baca comparator	μm	Persegi	$u(\delta l_1)$	0.005	1.732	1E+99	0.0029	1	0.0029	0.00001	6.9E-110
3b. Keberulangan pengukuran	μm	Normal	$u(\delta l_2)$	0.0040	1.414	99	0.0028	1	0.0028	0.00001	6.5E-13
4. Ketidakpastian comparator	μm	Normal	$u(\delta l_c)$	0.050	2.000	1E+99	0.0250	1	0.0250	0.00063	3.9E-106
8. Ketidaktengahan kontak muka ukur	μm	Persegi	$u(\delta l_v)$	0.015	1.732	12.5	0.0089	1	0.0089	0.00008	5.1E-10
9. Deformasi kontak	μm	Persegi	$u(\delta l_F)$	0.010	1.732	5.5555556	0.0058	1	0.0058	0.00003	2.0E-10
Jumlah										0.00191	1.4E-9
Ketidakpastian gabungan, u_{c1} dan derajat kebebasan efektif untuk ketidakpastian konstan										0.0437	2518
Komponen ketidakpastian yang bergantung pada panjang											
Sumber ketidakpastian	Satuan	Tipe distribusi	Simbol	Var. Interval a	Pembagi	Derajat kebebasan ν_i	Ketidakpastian std u_i	Koef. sensitivitas c_i	$c_i \cdot u_i$	$(c_i \cdot u_i)^2$	$(c_i \cdot u_i)^4/\nu_i$
1b. Balok ukur standar	μm	Normal	$u(l_s)$	1.3E-06L	2	1E+99	6.5E-07L	1	6.5E-07L	4.2E-13L ²	1.8E-124
2b. Drift	μm	Segitiga	$u(\delta l_D)$	4.4E-07L	2.449	12.5	2E-7	1	1.8E-07L	3.2E-14L ²	8.3E-29
5. Perbedaan suhu antara balok ukur	$^{\circ}\text{C}$	Persegi	$u(\delta t)$	0.05	1.732	12.5	0.029	1.2E-05L	3.4E-07L	1.2E-13L ²	1.1E-27
6. Perbedaan koefisien muai	$^{\circ}\text{C}$	Persegi	$u(\delta \alpha)$	2.0E-06	2.449	50	8E-7	0.00L	0.00L	0.0E+00L ²	0.0E+0
7. Efek termal	$^{\circ}\text{C}$	Persegi	$u(\delta \alpha \theta)$	1.0E-06L	4.243	50	2.4E-07L	1	2.4E-07L	5.6E-14L ²	6.2E-29
Jumlah (L dalam μm)										6.3E-13L ²	1.3E-27
Ketidakpastian gabungan, u_{c1} dan derajat kebebasan efektif untuk ketidakpastian tergantung panjang										7.93E-07L	314
Total ketidakpastian gabungan, u_c (L dalam mm)										Q[0.044, 0.000 79 L]	
Derajat kebebasan										> 100	
Ketidakpastian terentang pada $k = 2$ (L dalam mm)										U = Q[0.087, 0.001 59 L]	

Catatan :

- Nilai komponen ketidakpastian di atas hanya sebagai ilustrasi.
- Untuk mendapatkan ketidakpastian tertentu, lihat Lampiran E

Contoh perhitungan ketidakpastian pengukuran Q [0,087, 0,0016L] μm , L dalam mm untuk balok ukur 100 mm

$$U_{100} = \sqrt{0,087^2 + (0,0016 \times 100)^2} = 0,19 \mu\text{m}$$

Tabel perhitungan Ketidakpastian Pengukuran Q[0,087, 0,0016L] μm , L in mm untuk beberapa nominal panjang adalah sebagai berikut :

Tabel 4. Contoh perhitungan ketidakpastian pengukuran

a	b	L	U
μm	μm	mm	μm
0,087	0,0016		
		10	0,088
		20	0,093
		50	0,12
		100	0,19

9.4.2 Budget ketidakpastian variasi panjang

Contoh *budget* ketidakpastian untuk pengukuran variasi panjang ditunjukkan dalam Tabel 5.

Tabel 5. Budget ketidakpastian variasi panjang

Komponen ketidakpastian											
Sumber ketidakpastian	Satuan	Tipe distribusi	Simbol	Var. Interval a	Pembagi	Derajat kebebasan ν_i	Ketidakpastian std u_i	Koef. sensitivitas c_i	$c_i \cdot u_i$	$(c_i \cdot u_i)^2$	$(c_i \cdot u_i)^4 / \nu_i$
Sertifikat komparator balok ukur	μm	normal	$u(\Delta L1)$	0.04	2.000	1.E+99	0.0200	1	0.0200	0.00040	1.6E-106
Daya baca komparator	μm	rect	$u(\Delta L2)$	0.005	1.732	1.E+99	0.0029	1	0.0029	0.00001	6.9E-110
Keberulangan pengukuran	μm	A	$u(\Delta L3)$	0.006	3.162	9	0.0019	1	0.0019	0.00000	1.4E-12
Position Error	μm	rect	$u(\delta l_{pe})$	0.015	1.732	12.5	0.0087	1	0.0087	0.00008	4.5E-10
Jumlah										0.00049	4.5E-10
Ketidakpastian gabungan, u_c dan derajat kebebasan efektif untuk ketidakpastian konstan										0.0221	525.2
Ketidakpastian terentang (dalam μm) at $k=2$, U95										U95	0.044

Catatan : Nilai komponen ketidakpastian di atas hanya sebagai ilustrasi

Lampiran A

(informatif)

Contoh Lembar Kerja

Tanggal kalibrasi :	No.order :
Identifikasi standar acuan	Nama Pembuat :
Model/ type :	No.Seri :
Identifikasi alat yang dikalibrasi	Nama Pembuat :
Model/ type :	No.Seri :
Rentang ukur :	Grade :
Suhu ruang (awal) :	Kelembapan (awal) :

Pengecekan Kerataan Balok Ukur (Lampiran C)

Pengukuran	Muka Ukur 1			Muka Ukur 2		
	a	b	b/a	a	b	b/a
1						
2						
3						
Hasil	Rata-rata b/a			Rata-rata b/a		
	Sesuai			Sesuai		
	Tidak sesuai			Tidak sesuai		

Pengukuran	Suhu dan RH	Panjang Nominal & No. Seri		Pembacaan			Rata-Rata	Tes-Std	Variasi Panjang	Rata-Rata	Dev. Std	Rata-Rata	Rata-Rata	
		Std : mm		Kiri	Tengah	Kanan	(Titik Tengah)	(Titik Tengah)	(Max-Min)	Tes-Std	(Sertifikat)	(Test-Std)+Dev. Std	Variasi Panjang	
1					1									
					8									
		S.N.		4	2	5								
				3	7	6								
2		Tes :	mm		1									
					8									
		S.N.		4	2	5								
				3	7	6								
1		Std :	mm		1									
					8									
		S.N.		4	2	5								
				3	7	6								
2		Tes :	mm		1									
					8									
		S.N.		4	2	5								
				3	7	6								
1		Std :	mm		1									
					8									
		S.N.		4	2	5								
				3	7	6								
2		Tes :	mm		1									
					8									
		S.N.		4	2	5								
				3	7	6								
1		Std :	mm		1									
					8									
		S.N.		4	2	5								
				3	7	6								
2		Tes :	mm		1									
					8									
		S.N.		4	2	5								
				3	7	6								
Suhu (Akhir)	:				Kelembapan (akhir)			Pelaksana		:	Paraf	:	Penyelia	:
Note :														

Contoh lembar kerja yang telah diisi:

Pengukuran	Suhu	Panjang Nominal			Pembacaan			Rata-rata (titik tengah)	Tes-Sid (titik tengah)	Variasi panjang (max-min)	Rata-rata Tes-Sid	Dev. Sid (sertifikasi)	Mean(Test-Ref) (Tes-std)+Dev. Sid	Rata-rata Variasi Panjang
		dan No. Seri			Kiri	Tengah	Kanan							
		Ref:	2	mm										
1	20.02							0.00	0.19	0.03	0.19	-0.13	0.06	0.03
								0.00						
		S.N.	86892		0.18	0.19	0.16	0.19						
					0.16	0.19	0.17							
2	20.03							0.00	0.19	0.03	0.19		0.06	0.03
								0.00						
		S.N.	21390		0.18	0.19	0.16	0.19						
					0.16	0.19	0.17							
maks														
Pengukuran	Suhu	Panjang Nominal			Pembacaan			Rata-rata (titik tengah)	Tes-Sid (titik tengah)	Variasi panjang (max-min)	Rata-rata Tes-Sid	Dev. Sid (sertifikasi)	Mean(Test-Ref) (Tes-std)+Dev. Sid	Rata-rata Variasi Panjang
		dan No. Seri			Kiri	Tengah	Kanan							
		Ref:	3	mm										
1	20.01							0.00	-0.02	0.02	-0.02	0.03	0.01	0.02
								0.00						
		S.N.	86892		-0.04	-0.02	-0.03	-0.02						
					-0.03	-0.02	-0.04							
2	20.03							0.00	-0.02	0.02	-0.02		0.01	0.02
								0.00						
		S.N.	020925		-0.04	-0.02	-0.03	-0.02						
					-0.03	-0.02	-0.04							
maks														
Pengukuran	Suhu	Panjang Nominal			Pembacaan			Rata-rata (titik tengah)	Tes-Sid (titik tengah)	Variasi panjang (max-min)	Rata-rata Tes-Sid	Dev. Sid (sertifikasi)	Mean(Test-Ref) (Tes-std)+Dev. Sid	Rata-rata Variasi Panjang
		dan No. Seri			Kiri	Tengah	Kanan							
		Ref:	5	mm										
1	20.01							0.00	-0.16	0.02	-0.16	0.14	-0.02	0.02
								0.00						
		S.N.	86892		-0.15	-0.16	-0.16	-0.16						
					-0.17	-0.16	-0.16							
2	20.03							0.00	-0.16	0.02	-0.16		-0.02	0.02
								0.00						
		S.N.	021528		-0.15	-0.16	-0.16	-0.16						
					-0.17	-0.16	-0.16							

Pengukuran balok ukur standar dan balok ukur tes dilakukan sebanyak dua set (sebanyak dua kali pengukuran berulang). Hasil pengukuran balok ukur standar dan balok ukur tes dituliskan pada lembar kerja.

Angka notasi 1 sampai dengan 8 merupakan hasil pengukuran mengacu pada gambar 6 dan pada Klausul 8 dalam panduan ini. Rata-rata nilai titik tengah diperoleh dari masing-masing dua kali pembacaan titik tengah balok ukur standar (pembacaan 1 dan 8) dan nilai pembacaan balok ukur tes (pembacaan 2 dan 7).

Kolom tes - standar merupakan pengurangan antara nilai rata-rata titik tengah balok ukur tes dikurangi dengan nilai rata-rata titik tengah balok ukur standar.

Kolom variasi panjang diisi dengan hasil pengurangan antara nilai maksimum dan minimum (notasi 2 – 3 – 4 – 5 - 6 – 7) pada setiap set pengukuran, yang pada akhirnya rata-rata variasi panjang dari kedua set pengukuran dituliskan di kolom paling kanan.

Kolom rata-rata tes – standar adalah hasil rata-rata dari kolom tes – standar untuk dua set pengukuran.

Deviasi standar dari sertifikat kalibrasi harus diidentifikasi dan dituliskan di lembar kerja kemudian dijumlahkan dengan nilai rata-rata tes – standar.

Perlu diingat bahwa kolom pengukuran 1 dan 2 menandakan dua kali set pengukuran pada dua nominal balok ukur standar dan tes yang sama.

Lampiran B
(informatif)
Contoh laporan kalibrasi

No Order/ *Order Number* :
 Nama Alat/ *Instrument Name* :
 Nama Pembuat/ *Manufacturer* :
 Type & No. Seri/ *Type & Serial Number* :
 Tanggal Kalibrasi/ *Calibration Date* :
 Tempat Kalibrasi/ *Calibration Place* :
 Kelembapan/ *Relative Humidity* : (\pm) %
 Suhu/ *Temperature* : (\pm) °C

HASIL KALIBRASI/ CALIBRATION RESULT

No.	Panjang Nominal/ <i>Nominal Length</i> (mm)	Penyimpangan Titik Tengah/ <i>Central Length Deviation</i> (μ m)	Variasi Panjang/ <i>Variation in length</i> (μ m)	No. Identitas/ <i>Identity No.</i>

Catatan/*Notes*:

Standar kalibrasi/ *Reference standard* :

Prosedur kalibrasi/ *Calibration procedure* :

Ketidakpastian pengukuran/*Measurement uncertainty* :

Ketidakpastian titik tengah/ <i>Uncertainty of central length</i>	Ketidakpastian variasi panjang/ <i>Uncertainty of variation in length</i>

Hasil pengukuran yang dilaporkan tertelusur ke SI melalui/ *The reported measurement result is traceable to the SI through*

Ketidakpastian pengukuran dinyatakan pada tingkat kepercayaan tidak kurang dari 95% dengan faktor cakupan $k = 2$ / *Uncertainty of measurement is expressed at a confidence level of no less than 95% with coverage factor $k = 2$*

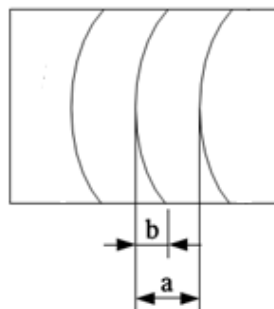
Pelaksana/ <i>Calibration Officer</i>	Penyelia/ <i>Supervisor</i>
(Nama)	(Nama)

Lampiran C

(informatif)

Pengukuran Kerataan Balok Ukur

- Sebelum melakukan pengukuran kerataan balok ukur, lakukan pencatatan suhu dan kelembapan ruangan.
- Bersihkan balok ukur dan *optical flat* standar. Tunggu 30 menit untuk menyeragamkan suhu balok ukur dan *optical flat* standar.
- Nyalakan *power* lampu monokromatik dan tunggu sekitar 30 menit untuk pemanasan instrumennya agar stabil dan siap digunakan.
- Letakkan *optical flat* standar di atas muka ukur balok ukur dengan cahaya dari lampu monokromatik mengenai *optical flat*.
- Atur posisinya sedemikian rupa sehingga tampak frinji yang cukup jelas dan mudah diukur (2 atau 3 frinji) seperti pada Gambar 7.
- Kerataan permukaan balok ukur diukur dengan mengevaluasi pola frinji yang dibentuk oleh cahaya monokromatik dari permukaan balok ukur dan sebuah *optical flat*. Pola frinji pada kondisi ini dapat diinterpretasikan sebagai peta kontur, dan deviasi dari kerataan dapat diukur dengan cara mengevaluasi kelengkungan dari frinji sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Gambar Frinji

$$\text{Error Kerataan} = (b/a) \times \lambda/2$$

di mana λ adalah panjang gelombang dari lampu monokromatik.

- Lakukan pengecekan kerataan pada sejumlah balok ukur dan catat hasil pengamatan pada lembar kerja.
- Untuk balok ukur dengan panjang nominal sampai 2,5 mm, toleransi kerataan tidak boleh melebihi batas toleransi pada tabel 5 ketika balok ukur berada dalam kondisi *terwringing*

dengan platen. Jika balok ukur tidak dalam kondisi *terwringing*, permukaan ukur harus memiliki kerataan maksimum sampai 4 μm .

- i. Untuk balok ukur dengan panjang nominal lebih besar dari 2,5 mm, toleransi kerataan tidak boleh melebihi batas toleransi pada Tabel 6, baik balok ukur tersebut dalam keadaan *terwringing* dengan plat ataupun tidak *terwringing* (ISO 3650).
- j. Setelah melakukan pengukuran kerataan balok ukur, lakukan pencatatan suhu dan kelembapan ruangan.

Tabel 6. Toleransi Kerataan Balok Ukur (ISO 3650)

Panjang Nominal, l_n mm	Toleransi Kerataan, t_r μm			
	Grade			
	K	0	1	2
	$0,05$	$0,1$	$0,15$	$0,25$
$0,5 \leq l_n \leq 150$				

Lampiran D

(informatif)

Penjelasan Persamaan Ketidakpastian Bentuk Kuadratik ($Q[a,bL]$) dalam Sertifikat Kalibrasi

D.1. Sertifikat kalibrasi balok ukur yang dikeluarkan oleh Laboratorium Metrologi Panjang BSN melaporkan hasil kalibrasi dalam bentuk penyimpangan terhadap nilai nominal dan ketidakpastian pengukurannya. Kedua informasi tersebut akan memberikan jaminan terhadap rantai ketertelusuran terhadap sistem satuan internasional (SI). Dalam besaran panjang secara umum, sebagian besar kemampuan pengukuran dan kalibrasi dinyatakan dalam bentuk persamaan numerik $Q[a,bL]$, selain dalam beberapa lingkup dinyatakan bentuk nilai tunggal. Hal ini dikarenakan komponen ketidakpastian pengukuran dapat bergantung pada parameter panjang (*length dependent*; misalnya panjang balok ukur, diameter) dan komponen yang tidak bergantung pada panjang (*length independent*). Di dunia metrologi ilmiah besaran panjang internasional, khususnya untuk lingkup standar ujung seperti balok ukur, pernyataan kemampuan kalibrasi terbaik dinyatakan dalam notasi $Q[a,bL]$. Berkaitan dengan itu, SNSU BSN menggunakan notasi $Q[a,bL]$ dalam merepresentasikan kemampuan kalibrasinya agar mudah diterima di dunia global. Notasi $Q[a,bL]$ merepresentasikan akar kuadrat jumlah bentuk-bentuk yang ada di dalam kurung brakat: $Q[a,bL] = [a^2 + b^2 \cdot L^2]^{1/2}$. Bentuk tersebut dalam sertifikat kalibrasi dinyatakan dalam ketidakpastian bentangan dengan faktor cakupan, $k = 2$ dan tingkat kepercayaan 95%.

D.2. Sebagai contoh, pada sertifikat kalibrasi sebuah balok ukur pendek, *grade 0* yang diterbitkan oleh SNSU-BSN tertulis ketidakpastian pengukuran berikut:

$$U = \sqrt{(0,07)^2 + (0,0013)^2 L^2} \text{ } \mu\text{m, } L \text{ dalam mm,}$$

Ketidakpastian pengukuran yang dilaporkan adalah bersatuan μm yang nilainya dapat diperoleh dengan memasukkan nilai nominal balok ukur (L) dalam satuan mm. Misalnya dalam kasus ini, ketidakpastian bentangan tersebut jika dinyatakan dalam rentang untuk L diantara (0-100) mm terentang diantara 0,07 μm sampai dengan 0,15 μm . Sebagai tambahan, dalam bentuk $Q[a,bL]$, akan menjadi $Q[0,07; 0,0013L] \text{ } \mu\text{m}$ dimana L dalam mm.

D.3. Keuntungan menyatakan ketidakpastian dalam bentuk $Q[a,bL]$ adalah laboratorium dapat menyatakan ketidakpastian sesuai dengan nilai nominalnya (dalam satuan mm), sehingga untuk nominal yang kecil tentu akan diperoleh ketidakpastian yang lebih kecil. Berbeda halnya jika tidak dalam bentuk $Q[a,bL]$, ketidakpastian tentu saja harus dinyatakan dalam nilai terbesar, tentu saja hal ini tidak optimal.

- D.4.** Sebagai tambahan, jika balok ukur *grade* 0 tersebut digunakan untuk mengkalibrasi balok ukur lainnya, maka nilai a dan b dalam $Q[a,bL]$ harus dibagi terlebih dahulu dengan faktor cakupan ($k=2$) untuk kemudian diperoleh ketidakpastian bakunya. Misalnya analisa ketidakpastian pengukuran proses kalibrasi ini dipecah menjadi dua bagian yaitu, komponen yang tidak bergantung panjang L dan komponen bergantung panjang L . Nilai $a/2$ dimasukkan pada komponen tak bergantung panjang L , dan nilai $b/2$ dimasukkan pada komponen bergantung panjang L .

Lampiran E

(informatif)

Penurunan Model Matematis Ketidakpastian Pengukuran untuk Titik Tengah

$$L_t = L_o + \Delta L$$

$$L_t = L_o + L_o \cdot \alpha \cdot \Delta t$$

Panjang balok ukur standar (S) :

$$L_{ts} = L_s + L_s \cdot \alpha_s \cdot \Delta t$$

Panjang balok ukur tes (T) :

$$L_{tx} = L_x + L_x \cdot \alpha_x \cdot \Delta t$$

Panjang penyimpangan balok ukur :

$$d = T - S$$

$$d = (L_x + L_x \cdot \alpha_x \cdot \Delta t) - (L_s + L_s \cdot \alpha_s \cdot \Delta t)$$

$$d = L_x + L_x \cdot \alpha_x \cdot \Delta t - L_s - L_s \cdot \alpha_s \cdot \Delta t$$

$$L_x = L_s + d + L_s \cdot \alpha_s \cdot \Delta t - L_x \cdot \alpha_x \cdot \Delta t$$

Note : sama-sama panjang mula-mula beda (panjang nominal)

$$L_x = L_s + d + L (\alpha_s \cdot \Delta t - \alpha_x \cdot \Delta t)$$

$$L_x = L_s + d + L [\alpha_s (t_s - 20) - \alpha_x (t_x - 20)]$$

Untuk menyederhanakan dan tidak terjadi korelasi maka persamaan tersebut dimodifikasikan menjadi :

$$\bar{\alpha} = (\alpha_s + \alpha_x)/2$$

$$\delta\alpha = (\alpha_s - \alpha_x)$$

$$\delta t = t_x - t_s$$

$$\bar{\theta} = \frac{t_x + t_s}{2} - 20$$

$$L_x = (l_s + \delta l_D) + (\delta l + \delta l_C) - L (\bar{\alpha} \cdot \delta t + \delta\alpha \cdot \bar{\theta}) + \delta l_v + \delta l_F$$

$$L_x = (l_s + \delta l_D) + (\delta l + \delta l_C) - L (\bar{\alpha} \cdot \delta t) - L (\delta\alpha \cdot \bar{\theta}) + \delta l_v + \delta l_F$$

Persamaan ketidakpastian menjadi :

$$u^2(Lx)$$

$$= u^2(l_s) + u^2(\delta l_D) + u^2(\delta l) + u^2(\delta l_C) + u^2(\bar{\alpha} \cdot \delta t \cdot L) + u^2(\delta \alpha \cdot \bar{\theta} \cdot L) + u^2(\delta l_v) + u^2(\delta l_F)$$

$$u^2(Lx)$$

$$= C_1^2 \cdot u^2(l_s) + C_2^2 \cdot u^2(\delta l_D) + C_3^2 \cdot u^2(\delta l) + C_4^2 \cdot u^2(\delta l_C) + C_5^2 \cdot u^2(\bar{\alpha}) + C_6^2 \cdot u^2(\delta t) + C_7^2 \cdot u^2(\delta \alpha) + C_8^2 \cdot u^2(\bar{\theta}) + C_9^2 \cdot u^2(\delta l_v) + C_{10}^2 \cdot u^2(\delta l_F)$$

$C_1 = 1$	$C_5 = -\delta t \cdot L$	$C_9 = 1$
$C_2 = 1$	$C_6 = -\bar{\alpha} \cdot L$	$C_{10} = 1$
$C_3 = 1$	$C_7 = -\bar{\theta} \cdot L$	
$C_4 = 1$	$C_8 = -\delta \alpha \cdot L$	

$$u^2(Lx)$$

$$= u^2(l_s) + u^2(\delta l_D) + u^2(\delta l) + u^2(\delta l_C) + (-\delta t \cdot L)^2 \cdot u^2(\bar{\alpha}) + (-\bar{\alpha} \cdot L)^2 \cdot u^2(\delta t) + (-\bar{\theta} \cdot L)^2 \cdot u^2(\delta \alpha) + (-\delta \alpha \cdot L)^2 \cdot u^2(\bar{\theta}) + u^2 \delta l_v + u^2 \delta l_F$$

Pengaplikasian bentuk orde 2 :

$$u^2(Lx)$$

$$= u^2(l_s) + u^2(\delta l_D) + u^2(\delta l) + u^2(\delta l_C) + (-\delta t \cdot L)^2 \cdot u^2(\bar{\alpha}) + (-\bar{\alpha} \cdot L)^2 \cdot u^2(\delta t) + (L)^2 \cdot u^2(\bar{\alpha} \cdot \delta t) + (-\bar{\theta} \cdot L)^2 \cdot u^2(\delta \alpha) + (L)^2 \cdot u^2(\delta \alpha \cdot \bar{\theta}) + (-\delta \alpha \cdot L)^2 \cdot u^2(\bar{\theta}) + u^2 \delta l_v + u^2 \delta l_F$$

$$\bar{\alpha} = (\alpha_s + \alpha_x)/2$$

$$\delta \alpha = (\alpha_s - \alpha_x)$$

$$\delta t = tx - ts$$

$$\bar{\theta} = \frac{tx + ts}{2} - 20$$

Asumsi :

$ts = (20 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$ $tx = (20 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$	$\alpha_s = 1,19 \times 10^{-6} \pm 1 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ $\alpha_x = 1,19 \times 10^{-6} \pm 1 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
$\delta t = tx - ts$ $\delta t = (20 - 20) = 0 ^\circ\text{C}$ $u(\delta t) = \frac{0,05}{\sqrt{3}} = 0,0289 ^\circ\text{C}$ Note : 0,05 $^\circ\text{C}$ diperoleh dari pengalaman	$\delta \alpha = (\alpha_s - \alpha_x)$ $\delta \alpha = (1,19 \times 10^{-6} - 1,19 \times 10^{-6}) = 0$ $u(\delta \alpha) = u(\delta \alpha_s) + u(\delta \alpha_x)$ $u(\delta \alpha) = (1 \times 10^{-6} + 1 \times 10^{-6})/\sqrt{3}$ $u(\delta \alpha) = (0,82 \times 10^{-6}) / ^\circ\text{C}$

$\bar{\theta} = \frac{tx + ts}{2} - 20$ $\bar{\theta} = \frac{20 + 20}{2} - 20 = 0$ $u(\bar{\theta}) = \frac{0.5}{\sqrt{3}} = 0,289 \text{ } ^\circ\text{C}$	$\bar{\alpha} = (\alpha_s + \alpha_x)/2$ $\bar{\alpha} = (1 \times 10^{-6} + 1 \times 10^{-6})/2$ $\bar{\alpha} = (11,9 \times 10^{-6})/^\circ\text{C}$ $u(\bar{\alpha}) = \frac{1}{2} [u(\alpha_s) + u(\alpha_x)]$ $u(\bar{\alpha}) = \frac{1}{2} \left[\frac{(1 \times 10^{-6})}{\sqrt{3}} + \frac{(1 \times 10^{-6})}{\sqrt{3}} \right] u(\bar{\alpha}) =$ $(0,41 \times 10^{-6})/^\circ\text{C}$
--	---

Dengan memasukkan nilai yang tertera pada tabel asumsi maka :

$$(-\delta t \cdot L)^2 \cdot u^2(\bar{\alpha}) = 0$$

$$(-\bar{\alpha} \cdot L)^2 u^2(\delta t) = \text{ada}$$

$$(L)^2 \cdot u^2(\bar{\alpha} \cdot \delta t) = \text{nilainya terlalu kecil sehingga diabaikan}$$

$$(-\bar{\theta} \cdot L)^2 \cdot u^2(\delta \alpha) = 0$$

$$(-\delta \alpha \cdot L)^2 \cdot u^2(\bar{\theta}) = 0$$

$$(L)^2 \cdot u^2(\delta \alpha \cdot \bar{\theta}) = \text{ada}$$

Sehingga persamaan ketidakpastian final menjadi :

$$u^2(Lx) = u^2(l_s) + u^2(\delta l_D) + u^2(\delta l) + u^2(\delta l_C) + (-\bar{\alpha} \cdot L)^2 u^2(\delta t) + (L)^2 \cdot u^2(\delta \alpha \cdot \bar{\theta}) + u^2 \delta l_v + u^2 \delta l_f$$

Keterangan :

L_s	Panjang balok standar pada suhu referensi $t_0 = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$ sesuai dengan sertifikat kalibrasi
δl_D	Perubahan panjang dari balok ukur standar sejak kalibrasi terakhir yang diakibatkan karena drift
δl	Pengamatan perbedaan panjang diantara balok ukur yang penyimpangannya belum diketahui terhadap balok standar
δl_C	Koreksi untuk ketidaklinieran dan offset dari komparator
L	Panjang nominal balok ukur yang diukur
$\bar{\alpha}$	Rata-rata koefisien muai termal dari balok standar dan balok tes

δt	Perbedaan suhu balok standar dan balok ukur tes yang belum diketahui
$\delta \alpha$	Perbedaan koefisien muai termal diantara balok ukur standar dan balok ukur tes
$\bar{\theta}$	Penyimpangan dari suhu rata-rata balok ukur standar dan balok ukur tes dari suhu acuan
δl_v	Koreksi untuk kontak ketidaktengahan dari muka ukur balok ukur tes
δl_F	Koreksi untuk deformasi kontak

Lampiran F

(informatif)

Penurunan Model Matematis Ketidakpastian Pengukuran untuk Variasi Panjang

$$v = L_{max} - L_{min}$$

Untuk 5 titik ukur, diasumsikan bahwa $L_1 \ll L_2, L_3, L_4 \ll L_5$, sehingga :

$$v = L_5 - L_1$$

Persamaan untuk muai panjang:

$$L = L + L \cdot \alpha \cdot \Delta t$$

Dengan mengaplikasikan persamaan tersebut maka persamaan menjadi :

$$v = L_5 + L_5 \cdot \alpha_5 \Delta t - L_1 + L_1 \cdot \alpha_1 \Delta t$$

$$v = (L_5 - L_1) + L_5 \cdot \alpha_5 \Delta t - L_1 \cdot \alpha_1 \Delta t$$

$$v = (L_5 - L_1) + L [\alpha_5(t_5 - 20) - \alpha_1(t_1 - 20)]$$

$$v = (L_5 - L_1) + L [\alpha_5(t_5 - 20) - \alpha_1(t_1 - 20)]$$

Untuk menyederhanakan dan tidak terjadi korelasi maka persamaan tersebut dimodifikasi menjadi :

$$\bar{\alpha} = (\alpha_5 + \alpha_1)/2$$

$$\delta\alpha = (\alpha_5 - \alpha_1)$$

$$\delta t = t_x - t_s$$

$$\bar{\theta} = \frac{t_x + t_s}{2} - 2$$

$$v = \Delta L + L (\bar{\alpha} \cdot \delta t + \delta\alpha \cdot \bar{\theta})$$

$$v = \Delta L + L (\bar{\alpha} \cdot \delta t + \delta\alpha \cdot \bar{\theta}) + \delta l_{pe}$$

$$u^2(v) = u^2(\Delta L) + (\bar{\alpha} \cdot \delta t \cdot L) + u^2(\delta\alpha \cdot \bar{\theta} \cdot L) + u^2(\delta l_{pe})$$

$$u^2(v) = C_1^2 u^2(\Delta L) + C_2^2 \cdot u^2(\bar{\alpha}) + C_3^2 \cdot u^2(\delta t) + C_4^2 \cdot u^2(\delta\alpha) + C_5^2 \cdot u^2(\bar{\theta}) + C_6^2 u^2(\delta l_{pe})$$

$$\begin{aligned}
 C_1 &= 1 & C_4 &= -\bar{\theta} \cdot L \\
 C_2 &= -\delta t \cdot L & C_5 &= -\delta \alpha \cdot L \\
 C_3 &= -\bar{\alpha} \cdot L & C_6 &= 1
 \end{aligned}$$

$$u^2(v) = u^2(\Delta L) + (-\delta t \cdot L)^2 \cdot u^2(\bar{\alpha}) + (-\bar{\alpha} \cdot L)^2 u^2(\delta t) + (-\bar{\theta} \cdot L)^2 \cdot u^2(\delta \alpha) + (-\delta \alpha \cdot L)^2 \cdot u^2(\bar{\theta}) + u^2(\delta l_{pe})$$

Karena 5 titik diukur dalam waktu yang singkat, perbedaan temperatur diasumsikan sangat kecil, sehingga ketidakpastian untuk variable temperatur diabaikan.

$$\begin{aligned}
 u^2(v) &= u^2(\Delta L) + u^2(\delta l_{pe}) \\
 u^2(\Delta L) &\text{ terdiri atas } u^2(\delta L_1), u^2(\delta L_2), u^2(\delta L_3)
 \end{aligned}$$

Sehingga persamaan di atas menjadi :

$$u^2(v) = u^2(\delta L_1) + u^2(\delta L_2) + u^2(\delta L_3) + u^2(\delta l_{pe})$$

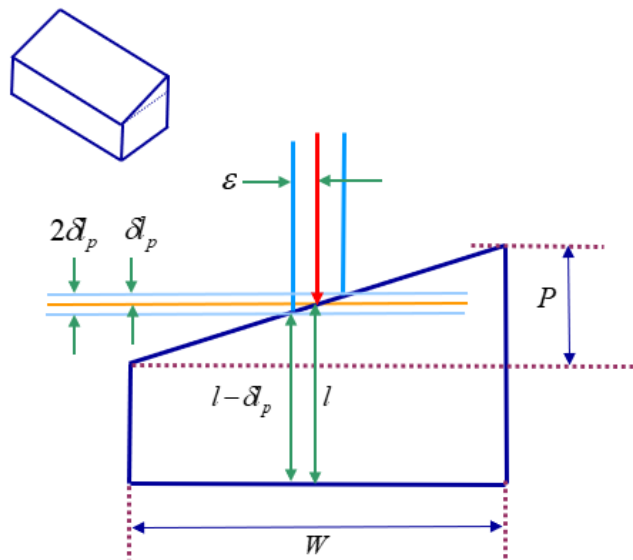
Lampiran G

(informatif)

Ketidakpastian akibat ketidaktengahan kontak (*non-central contacting*):

$$u(d_{center})$$

Jika muka ukur balok ukur tidak paralel, ketidaktengahan kontak dari muka ukur akan menyebabkan penyimpangan panjang δl_p , dari titik tengah. Ketidakpastian dari titik tengah $u(d_p)$, dapat dihitung dari distribusi probabilitas segiempat dengan *semi-range* δl_p . Asumsikan bahwa variasi panjang yang diizinkan, P , terjadi sepanjang lebar balok ukur sebesar 9 mm, dan *probe* komparator yang memiliki radius ε kontak dengan balok ukur, seperti ditunjukkan gambar berikut.



Panjang akhir akibat dari penyimpangan panjang (l') dikalkulasi dengan :

$$l' = l \pm \delta l_p$$

$$= l \pm \left(\frac{\varepsilon}{W} \right) \times P$$

Kemudian, Ketidakpastian dari titik tengah $u(d_p)$, dapat dihitung dengan persamaan :

$$u(d_p) = \frac{\delta l_p}{\sqrt{3}} = \left(\frac{\varepsilon}{W} \right) \times \frac{P}{\sqrt{3}}$$

Untuk $\varepsilon = 1 \text{ mm}$, dan $W = 9 \text{ mm}$, dapat dihitung $u(d_p)$ sebesar:

$$u(d_p) = P \times \left(\frac{1 \text{ mm}}{9 \text{ mm}} \right) \times \frac{1}{\sqrt{3}} = 0.064 P$$

Jika diestimasi pada ketidakpastian relatif 20%, maka derajat kebebasan efektifnya:

$$\nu(d_p) = \frac{1}{2} \left(\frac{100}{20} \right)^2 = 12.5$$

Menimbang bahwa balok ukur referensi dan balok ukur tes dikenai kontak satu kali untuk pengukuran perbedaan panjang :

$$u(d_{center}) = \sqrt{(0.064 \times P_{ref})^2 + (0.064 \times P_{test})^2}$$

Sebagai contoh, balok ukur kelas K digunakan untuk mengkalibrasi balok ukur kelas 0. Dari ISO 3650 terdapat informasi sebagai berikut:

- Variasi Panjang maksimal untuk balok ukur kelas K: 70 nm
- Variasi Panjang maksimal untuk balok ukur kelas 0: 120 nm

Sehingga:

$$\begin{aligned} u(d_{center}) &= \sqrt{(0.064 \times 70 \text{ nm})^2 + (0.064 \times 120 \text{ nm})^2} \\ &= \sqrt{(4 \text{ nm})^2 + (8 \text{ nm})^2} = 9 \text{ nm} \end{aligned}$$

Dengan derajat kebebasan :

$$\nu(d_{center}) = \frac{(9 \text{ nm})^4}{\frac{(4 \text{ nm})^4}{12.5} + \frac{(8 \text{ nm})^4}{12.5}} \cong 18.8$$

Lampiran H

(informatif)

Ketidakpastian dari Koreksi Deformasi Kontak

Terdapat beberapa bahan yang digunakan untuk membuat balok ukur yaitu : steel, ceramic, tungsten carbide dan zerodur. Bahan-bahan tersebut mempunyai koefisien muai dan modulus young yang berbeda, sehingga dalam perhitungan ketidakpastiannya harus memperhatikan bahan pembuat balok ukur tersebut.

$$l_{cd} = (A_{ux} - A_{ur}) + (A_{lx} - A_{lr})$$

$$A_{\alpha\beta} = \frac{P^{\frac{2}{3}} \alpha}{2} \left[\frac{(3\pi)^2}{D_{\alpha}} \left(\frac{1 - S_d^2}{\pi E_{\alpha}} + \frac{1 - S_{\beta}^2}{\pi E_{\beta}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$\alpha = u, l \quad \beta = r, x$$

dimana :

P_{α} = gaya tekan (dalam N)

D_{α} = diameter tip probe (dalam m)

S_d = Poisson rasio probe

S_{β} = Poisson rasio balok ukur

E_{α} = modulus young tip probe N/m²

E_{β} = modulus young balok ukur N/m²

Dengan menerapkan hukum propagasi maka ketidakpastiannya adalah :

$$\begin{aligned} u^2(l_{cd}) = & (c^x p_u - c^r p_u)^2 u^2(P_u) + (c^x p_l - c^r p_l)^2 u^2(P_l) + (c^x D_u - c^r D_u)^2 u^2(D_u) \\ & + (c^x D_l - c^r D_l)^2 u^2(D_l) + (c^{ux} S_d - c^{ur} S_d + c^{lx} S_d - c^{lr} S_d)^2 u^2(S_d) \\ & + (c^{ux} E_d - c^{ur} E_d + c^{lx} E_d - c^{lr} E_d)^2 u^2(E_d) + (c^u S_x - c^l S_x)^2 u^2(S_x) \\ & + (c^u S_r - c^l S_r)^2 u^2(S_r) + (c^u E_x - c^l E_x)^2 u^2(E_x) + (c^u E_r - c^l E_r)^2 u^2(E_r) \end{aligned}$$

Diperoleh bahwa $r \neq x$, menggunakan orde tinggi

Koefisien sensitivitas :

$$C_{P\alpha} = \frac{2A_{\alpha\beta}}{3P\alpha}$$

$$C^{\alpha}S_{\beta} = -\sqrt{\frac{2}{D_{\alpha}A_{\alpha\beta}}} \frac{S_{\alpha}P\alpha}{E_{\beta}}$$

$$C_{D\alpha} = \frac{-A_{\alpha\beta}}{3D\alpha}$$

$$C^{\alpha\beta}E_d = -\frac{(1-S^2d)P_{\alpha}}{E^2d\sqrt{2D_{\alpha}A_{\alpha\beta}}}$$

$$C^{\alpha\beta}S_d = -\sqrt{\frac{2}{D_{\alpha}A_{\alpha\beta}}} \frac{S_{\alpha}P\alpha}{E_{\alpha}}$$

$$C^{\alpha\beta}E_{\beta} = -\frac{(1-S^2\beta)P_{\alpha}}{E^2\beta\sqrt{2D_{\alpha}A_{\alpha\beta}}}$$

Contoh : komparator balok ukur federal 130B-24

Asumsi jika balok ukur standar terbuat dari bahan *tungsten carbide* dan balok ukur tes terbuat dari bahan *steel*.

Adapun data-data yang dimiliki tentang balok ukur tersebut adalah sebagai berikut :

$$P_u = 1,83 \text{ N}$$

$$S_x = 0,30$$

$$P_l = 0,27 \text{ N}$$

$$E_d = 12,6 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$$

$$D_u = D_e = 3,2 \times 10^{-4} \text{ m}$$

$$E_r = 2,8 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$$

$$S_d = 0,09$$

$$E_x = 2,1 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$$

$$S_r = 0,28$$

Nilai estimasi ketidakpastiannya adalah :

$u(P_u) = u(P_l) = \frac{0,05}{\sqrt{3}} = 0,029 \text{ N}$	$u(S_r) = \frac{0,02}{\sqrt{3}} = 0,012$
$u(D_u) = u(D_e) = \frac{5 \times 10^{-5}}{\sqrt{3}} = 2 \times 10^{-5} \text{ m}$	$u(S_x) = \frac{0,05}{\sqrt{3}} = 0,029$
$u(S_d) = \frac{0,01}{\sqrt{3}} = 0,006$	$u(E_d) = u(E_r) = u(E_x) = \frac{0,1 \times 10^{11}}{\sqrt{3}} = \text{N/m}^2$

Sehingga diperoleh : $u(l_{cd}) = 5 \text{ nm}$ (nilai ini sudah dibagi dengan distribusi *rectangular*)

Bibliografi

ISO 3650-2:1998, *Geometrical product specifications (GPS) – Length standards – Gauge blocks*.

JCGM 100:2008, *Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement*.

EA-4/02 M:2013, *Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration*.

Material training Metrology in Length and Dimensional Measurement, Global Metrology Academy, KRISS.

Material training, Handling of short gauge block for interferometry and calibration, UME.