

Panduan Kalibrasi

Komparator Balok Ukur



SNSU PK.P-07:2021

PANDUAN KALIBRASI KOMPARATOR BALOK UKUR

Penyusun: 1. Ocka Hedrony
 2. Okasatria Novyanto
 3. Istiqomah

Kontributor: 1. A. Praba Drijarkara
 2. Nurlathifah
 3. Nurul Alfiyati
 4. Eka Pratiwi
 5. Ardi Rahman
 6. Rina Yuniarty
 7. Azwar Sabana
 8. Achmad Fachrudin
 9. Albertus Darmawan
 10. Ediyanto
 11. Endang Sumirat

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

Direktorat Standar Nasional Satuan Ukuran Mekanika, Radiasi, dan Biologi
Badan Standardisasi Nasional

Hakcipta © Badan Standardisasi Nasional, 2021

Lembar Pengesahan

Panduan Kalibrasi Komparator Balok Ukur (SNSU PK.P-07:2021) diterbitkan oleh Badan Standardisasi Nasional sebagai upaya untuk mengharmoniskan pelaksanaan kalibrasi komparator 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	Ruang lingkup.....	1
3	Definisi	1
4	Peralatan standar.....	1
5	Proses kalibrasi.....	2
6	Evaluasi ketidakpastian pengukuran titik tengah (<i>central length</i>).....	5
6.1	Model matematis.....	5
6.2	Evaluasi sumber ketidakpastian	6
6.3	<i>Budget</i> ketidakpastian.....	7
7.	Evaluasi ketidakpastian pengukuran variasi panjang (<i>variation in length</i>)	7
7.1	Model matematis.....	7
7.2	Evaluasi sumber ketidakpastian	8
7.3	<i>Budget</i> ketidakpastian.....	8
	Lampiran A Contoh hasil pengukuran	10
	Lampiran B. Contoh sertifikat kalibrasi	12
	Bibliografi.....	12

Panduan Kalibrasi Komparator Balok Ukur

1 Pendahuluan

- 1.1. Petunjuk teknis kalibrasi ini disusun untuk mengharmoniskan pelaksanaan kalibrasi komparator balok ukur (*gauge block comparator*) yang dilakukan oleh laboratorium yang menerapkan SNI ISO/IEC 17025, *Persyaratan umum kompetensi laboratorium pengujian dan laboratorium kalibrasi*.
- 1.2. Panduan kalibrasi yang diuraikan dalam petunjuk ini mengacu pada standar ISO 3650:1998 dan Calibration Guide EURAMET cg-2 Version 2.0 (03/2011). Evaluasi ketidakpastian pengukuran mengacu kepada dokumen EA-4/02 dan JCGM 100:2008, *Guide to the expression of uncertainty in measurement*.

2 Ruang lingkup

- 2.1. Panduan ini mengacu pada instrumen yang digunakan untuk mengkalibrasi balok ukur sampai panjang nominal 100 mm dengan metode perbandingan (lih. ISO 3650, klausul 8.4), di mana panjang balok ukur yang dikalibrasi dibandingkan dengan balok ukur standar menggunakan *probe* mekanik.
- 2.2. Kalibrasi harus dilakukan dengan menggunakan balok ukur.
- 2.3. Pedoman ini digunakan hanya untuk instrumen yang mengukur balok ukur dengan dua indikator panjang dari sisi yang berlawanan (2 *probe*). Dengan panjang pergerakan *probe* ≤ 5 mm.

3 Definisi

- 3.1. Definisi yang digunakan dalam panduan ini sesuai dengan standar internasional ISO 3650:1998.

l_n panjang nominal balok ukur

l_c panjang titik tengah balok ukur

$f_o = l_{\max} - l_c$ selisih panjang maximum dengan panjang titik tengah

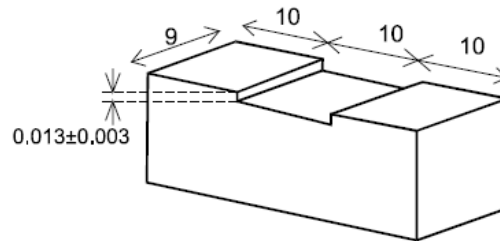
$f_u = l_c - l_{\min}$ selisih panjang titik tengah dengan panjang minimum

4 Peralatan standar

- 4.1. Kalibrasi komparator balok ukur harus menggunakan balok ukur. Sebaiknya menggunakan 6 pasang balok ukur dengan ukuran :

No	Panjang nominal (mm)	
	A	B
1	0,5	0,5
2	1,0	1,005
3	1,0	1,01
4	4,0	4,0
5	100,0	100,0
6	6,0	6,0*

* *bridge* balok ukur



Gambar 1. *Bridge* balok ukur

- 4.2. Semua balok ukur harus terbuat dari bahan yang sama, ditandai dengan nomor identifikasi dan memenuhi kualitas permukaan pengukuran (kerataan dan variasi panjang) toleransi kelas kalibrasi K (ISO 3650).

Balok ukur B pasangan No. 6 merupakan balok ukur khusus yang didesain sebagai jembatan (*bridge*) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Hal ini memungkinkan untuk membandingkan sensitivitas *probe* bawah dengan sensitivitas *probe* atas. Salah satu permukaan yang diukur adalah rata, sedangkan sisi permukaan yang berlawanan dibagi menjadi tiga bagian dengan ukuran yang hampir sama (9 mm x 10 mm). Bagian tengah memiliki panjang nominal 6 mm, dua bagian samping lebih panjang sekitar $(13 \pm 3) \mu\text{m}$. Bidang muka ukur harus memiliki kualitas yang bisa di-*wringing*.

Balok ukur pasangan no. 6, dapat diwakilkan oleh balok ukur pasangan no. 2 dan 3. Namun perbandingan sensitivitas *probe* untuk balok ukur pasangan no. 6 dilakukan dengan kondisi balok ukur 6A tidak berubah (diasumsikan kondisinya stabil). Sedangkan pada balok ukur pasangan no. 2 dan 3, kondisinya berubah (A-B menjadi B-A)

- 4.3. Perbedaan antara panjang titik tengah (*central length*, l_c) balok ukur A dan B dari pasangan 1 sampai 5, serta deviasi f_o , f_u (*variation in length*) dari titik tengah balok ukur B dari pasangan 2 dan 3 harus dikalibrasi dengan ketidakpastian pengukuran yang diperluas ($k = 2$) sebaiknya lebih kecil atau sama dengan $0,02 \mu\text{m}$. Balok ukur pasangan No. 6 (*bridge*) disarankan untuk dikalibrasi juga seperti balok ukur biasa.

5 Proses kalibrasi

5.1. Persiapan kalibrasi

Sebelum kalibrasi, pastikan komparator balok ukur berfungsi dengan baik. Selain itu, periksa juga

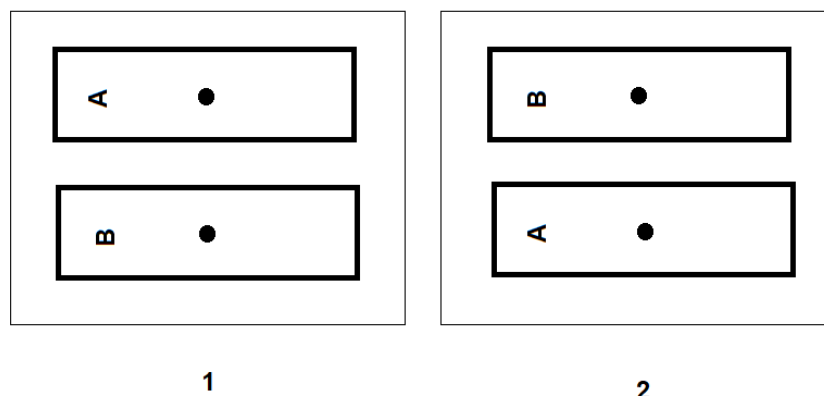
- a. Permukaan meja ukur harus sempurna (tidak ada goresan ataupun aus).
- b. *Probe* atas dan bawah harus segaris (sejajar lurus), bisa diperiksa menggunakan *centering* khusus.

Gambar 2. *Centering*

- c. Ketika dalam kondisi bekerja, posisi permukaan *probe* bawah harus berada di bawah meja kerja.
- d. Dalam kondisi tidak bekerja, permukaan *probe* bawah harus menonjol di atas meja ukur sebesar 20 μm sampai 100 μm .
- e. Balok ukur dikondisikan, minimal 2 jam untuk keseragaman suhunya.

5.2. Perbandingan pengukuran panjang titik tengah

Masing-masing pasangan balok ukur 1 sampai 5, dilakukan pengukuran sebanyak 10 kali, dengan posisi balok ukur A sebagai standar dan balok ukur B sebagai alat yang dikalibrasi (Gambar 3. No.1). Kemudian posisinya di tukar, dengan posisi balok ukur B sebagai standar dan balok ukur A sebagai alat yang dikalibrasi (Gambar 3. No. 2). Lakukan pengukuran sebanyak 10 kali juga. Nilai rata-rata dan deviasi standar harus dihitung untuk setiap seri pengukuran dari sepasang balok ukur (10 kali pengukuran).

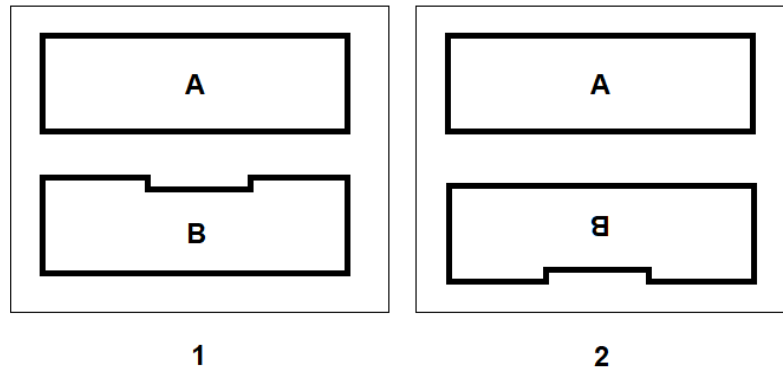


Gambar 3. Pengukuran panjang titik tengah

5.3. Perbandingan pengukuran dengan *bridge* balok ukur

Ada 2 seri pengukuran, masing-masing terdiri dari 10 kali pengukuran pada pasangan balok ukur no. 6. Seri pertama, balok ukur berbentuk jembatan (*bridge*) sebagai alat yang dikalibrasi,

diletakkan menghadap ke atas (Gambar 4. No. 1). Seri kedua, balok ukur berbentuk bridge diletakkan menghadap ke bawah (Gambar 4. No.2). Nilai rata-rata dan standar deviasi harus dihitung untuk kedua seri pengukuran (masing-masing 10 nilai pengukuran), serta perbedaan antara dua nilai rata-rata.

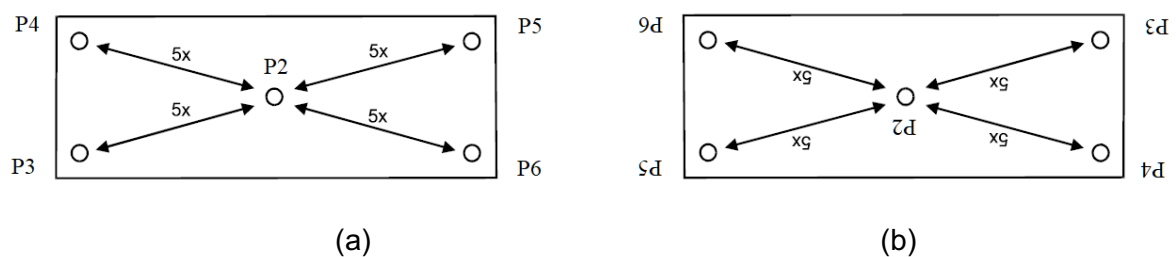


Gambar 4. Pengukuran dengan *bridge* balok ukur

Ketidakpastian untuk pengukuran titik tengah dan *bridge* balok ukur bisa dilihat pada klausul 6.

5.4. Deviasi f_o dan f_u dari panjang titik tengah

Untuk menentukan deviasi f_o dan f_u ini, digunakan balok ukur dengan ukuran 1,005 mm atau 1,01 mm. Pengukuran dimulai dari titik tengah balok ukur menuju ke 4 sudut balok ukur (Gambar 5a). Contoh, pengukuran di titik P2 dilanjutkan pengukuran titik P3 sebanyak 5 kali, kemudian pengukuran titik P2 dilanjutkan pengukuran titik P4 sebanyak 5 kali, dan seterusnya.



Gambar 5. Posisi balok ukur untuk f_o dan f_u

Keempat seri pengukuran harus diulang setelah balok ukur diputar 180° (Gambar 5b) pada bidang horizontal. Nilai rata-rata dan standar deviasi harus dihitung untuk masing-masing dari delapan seri pengukuran. Penyimpangan f_o dan f_u dari panjang titik tengah dihasilkan dari nilai terbesar dan terkecil dari nilai rata-rata delapan seri pengukuran.

Deviasi dari komparator balok ukur yang dikalibrasi tidak perlu dikoreksi atau dianggap nol, karena difungsikan sebagai komparator antara balok ukur dengan nominal yang sama. Kesalahan yang terjadi pada kalibrasi balok ukur yang ukurannya sama akan hilang dengan metode substitusi.

6 Evaluasi ketidakpastian pengukuran titik tengah (*central length*)

6.1 Model matematis

Hasil kalibrasi komparator balok ukur dihitung dengan model matematis seperti pada persamaan di bawah ini.

$$e = L_B \cdot (1 - \alpha \cdot \theta_B) - L_A \cdot (1 - \alpha \cdot \theta_A) + \Delta d_F - \Delta L_{AB} \quad (1)$$

e : hasil kalibrasi pada suhu referensi = 20°C

L_A : panjang *balok ukur* A

L_B : panjang *balok ukur* B;

α : koefisien muai termal linier dari *balok ukur* A dan B;

θ_A : deviasi suhu *balok ukur* A dari 20 °C;

θ_B : deviasi suhu *balok ukur* B dari 20 °C;

Δd_F : perbedaan koreksi penekanan probe $dF_B - dF_A$

ΔL_{AB} : perbedaan kalibrasi panjang antara balok ukur A dan B $L_{Bk} - L_{Ak}$

Perbedaan panjang yang diukur balok ukur dapat dinyatakan dengan:

$$L_B \cdot (1 - \alpha \cdot \theta_B) - L_A \cdot (1 - \alpha \cdot \theta_A) = L_B - L_A - (L_B \cdot \alpha \cdot \theta_B - L_A \cdot \alpha \cdot \theta_A) = \Delta L - \alpha \cdot (L_B \cdot \theta_B - L_A \cdot \theta_A) \quad (2)$$

Jika $\delta\theta = \theta_B - \theta_A$, maka

$$\Delta L - \alpha \cdot (L_B \cdot \theta_B - L_A \cdot \theta_A) = \Delta L - \alpha \cdot (L_B \cdot \theta_B - L_A (\theta_B - \delta\theta)) = \Delta L - \alpha \cdot (\theta_B \cdot (L_B - L_A) + L_A \delta\theta) \quad (3)$$

$$\text{Karena } \alpha \cdot (\theta_B \cdot (L_B - L_A)) \text{ dapat diabaikan, maka } = \Delta L - \alpha \cdot L_A \delta\theta \quad (4)$$

L_A dapat diganti dengan panjang nominal pasangan gauge block L_N , kemudian $\Delta L - \alpha \cdot L_N \delta\theta$

$$\text{Model matematisnya menjadi } e = \Delta L - \alpha \cdot L_N \delta\theta + \Delta d_F - \Delta L_{AB} \quad (5)$$

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

$$u_c^2(e) = c_{\Delta L}^2 \cdot u^2(\Delta L) + c_{\alpha}^2 \cdot u^2(\alpha) + c_{\delta\theta}^2 \cdot u^2(\delta\theta) + c_{\Delta d_F}^2 \cdot u^2(\Delta d_F) + c_{\Delta L_{AB}}^2 \cdot u^2(\Delta L_{AB}) + c_{\Delta L} \cdot u^2 \Delta L_2 + c_{\Delta L} \cdot u^2(\Delta L_3) \quad (6)$$

$$c_{\Delta L} = \partial f / \partial \Delta L = 1$$

$$c_{\alpha} = \partial f / \partial \alpha = L_N \cdot \delta\theta$$

$$c_{\delta\theta} = \partial f / \partial \delta\theta = \alpha \cdot L_N$$

$$c_{\Delta d_F} = \partial f / \partial \Delta d_F = 1$$

$$c_{\Delta L_{AB}} = \partial f / \partial \Delta L_{AB} = 1$$

Persamaan ketidakpastiannya menjadi,

$$u_c^2(e) = u^2(\Delta L_1) + (L_N \cdot \delta\theta) \cdot u^2(\alpha) + (\alpha \cdot L_N) \cdot u^2(\delta\theta) + u^2(\Delta d_F) + u^2(\Delta L_{AB}) + u^2(\Delta L_2) + u^2(\Delta L_3) \quad (7)$$

6.2 Evaluasi sumber ketidakpastian

Sumber ketidakpastian dalam persamaan (6) dapat dievaluasi menurut panduan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Evaluasi beberapa sumber ketidakpastian

Kuantitas X_i	Nilai perkiraan x_i	Rentang keberagaman (a)	Distribusi Probabilitas	Pembagi	Koefisien sensitifitas c_i
ΔL	Dari pengukuran (tiga sumber)	Daya baca : 0,005 μm	Persegi	$\sqrt{3}$	1
		Keberulangan pengukuran : dari σ 10 pembacaan berulang pada balok ukur	Normal	1	1
		Linieritas comparator	Persegi	$\sqrt{3}$	1
L_{AB}	Nilai koreksi dari sertifikat	Ketidakpastian dari sertifikat kalibrasi dalam bentuk kuadrat	Normal	Seperti di sertifikat	1
α	$4,23 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	$0,5\text{e-}6 \text{ } ^\circ\text{C}$	Persegi	$\sqrt{3}$	$L_N \cdot \delta\theta$
$\delta\theta$	0	$0,05 \text{ } ^\circ\text{C}$	Persegi	$\sqrt{3}$	$L_N \cdot \alpha$
Δd_F	0	$0,02 \text{ } \mu\text{m}$	Persegi	$\sqrt{3}$	1

6.3 Budget ketidakpastian

Contoh budget ketidakpastian ditunjukkan dalam Tabel 2 dengan nilai masukan sebagai berikut:

Tabel 2. Contoh *budget* ketidakpastian

Sumber Ketidakpastian	Unit	Dist. Type	Symbol	Var. Interval	Div	Deg. of freedom vi	Std. Uncert. ui	Sens. Coeff. ci	ui ci	(ui ci)^2	(ui ci)^4/v
Repeatability	μm	Normal	$u(L_1)$	0,01	2,236	5	0,0060	1	0,006023	0,000036	2,63E-10
Readability of comparator	μm	Rect.	$u(L_2)$	0,005	1,730	60	0,0029	1	0,002890	0,000008	1,16E-12
Linearity of probe	μm	Rect.	$u(L_3)$	0,01	1,730	60	0,0058	1	0,005780	0,000033	1,86E-11
Uncertainty of calibration standard	μm	Normal	$u(L_{AB})$	0,067	2,000	60	0,0120	1	0,012000	0,000144	3,46E-10
Difference in temperature of GB	°C	Rect.	$u(\delta\theta)$	0,05	1,730	60	0,0289	4,23E-07	0,000000	0,000000	3,72E-034
Thermal exp. Coefficient	/°C	Rect.	$u(\alpha)$	5,00E-07	1,730	60	0,0000	0,05	0,000000	0,000000	7,27E-034
Difference of probing indentation	μm	Rect.	$u(\Delta dF)$	0,02	1,730	60	0,0058	1	0,005780	0,000033	1,86E-11
Total combined uncertainty								uc		0,037	
Effective degree of freedom								Veff			100,833670
Expanded Uncertainty at k=2								U95		0,073	μm

CATATAN : Nilai komponen ketidakpastian hanya sebagai ilustrasi dan bukan merupakan panduan.

7. Evaluasi ketidakpastian pengukuran variasi panjang (*variation in length*)

7.1 Model matematis

Hasil pengukuran variasi panjang pada komparator balok ukur dihitung dengan model matematis seperti pada persamaan di bawah ini.

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

v : variasi panjang dari balok ukur

Δl : perbedaan panjang diantara titik tengah dan sudut pada balok ukur

Δt : perbedaan temperature selama pengukuran

$\bar{\alpha}$: koefisien ekspansi termal dari balok ukur

δl_{pe} : koreksi untuk kesalahan posisi titik ukur pada balok ukur

Dari persamaan (8), kita menuliskan ketidakpastian baku nya menjadi,

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

$$u^2(v) = c_1^2 u^2(\Delta l) + c_2^2 u^2(\bar{\alpha}) + c_3^2 \cdot u^2(\delta t) + c_4^2 u^2(\delta l_{pe}) \quad (10)$$

Karena hanya menggunakan 1 balok ukur, dan dilakukan dalam waktu yg singkat, maka perubahan muai dianggap sama diseluruh balok ukur dan perubahan suhu diasumsikan sangat kecil, sehingga variabel temperatur dan koefisien muai termal dapat diabaikan. Persamaan ketidakpastian menjadi ;

$$u^2(v) = u^2(\Delta l) + u^2(\delta l_{pe}) \quad (11)$$

dimana $u^2(\Delta l)$ terdiri atas $u^2(\delta l_1), u^2(\delta l_2)$

$$\text{Maka, } u^2(v) = u^2(\delta l_1) + u^2(\delta l_2) + u^2(\delta l_{pe}) \quad (12)$$

7.2 Evaluasi sumber ketidakpastian

Sumber ketidakpastian dalam persamaan (6) dapat dievaluasi menurut panduan dalam Tabel 3.

Tabel 3. Evaluasi beberapa sumber ketidakpastian

Quantity X_i		Estimate value x_i	Variability interval (a)	Probability distribution	Divisor	Sensitivity coefficient c_i
Δl	δl_1	Dari pengukuran	Keberulangan pengukuran: dari standard deviasi 10 pengukuran berulang perbedaan panjang	Type A	\sqrt{n}	1
	δl_2	0	Daya baca komparator: 0,005 μm	Persegi	$\sqrt{3}$	1
δl_{pe}		0	15 nm (ISO 3650)	Persegi	$\sqrt{3}$	1

7.3 Budget ketidakpastian

Contoh *budget* ketidakpastian ditunjukkan dalam Tabel 4 dengan nilai masukan sebagai berikut:

Tabel 4. Contoh *budget* ketidakpastian

Sumber Ketidakpastian	Unit	Dist. Type	Symbol	Var. Interval	Div	Deg. of freedom ν_i	Std. Uncert. u_i	Sens. Coeff. c_i	$u_i c_i$	$(u_i c_i)^2$	$(u_i c_i)^{4/\nu}$
Repeatability	μm	Normal	$u(L_1)$	0,01	2,236	4	0,0024	1	0,0024	6E-06	9E-12
Readability of comparator	μm	Rect.	$u(L_2)$	0,01	1,730	60	0,0029	1	0,0029	6E-06	3E-13
Position error	μm	Rect.	$u(L_3)$	0,02	1,730	60	0,0087	1	0,0087	8E-05	3E-11
Total combined uncertainty								U_c		0,009452	
Effective degree of freedom								ν_{eff}			212,9696
Expanded Uncertainty at $k=2$								U_{95}		0,02 μm	

CATATAN : Nilai komponen ketidakpastian hanya sebagai ilustrasi dan bukan merupakan panduan.

Penggunaan ketidakpastian kalibrasi komparator balok ukur harus disesuaikan ketika menghitung ketidakpastian kalibrasi balok ukur. Ketidakpastian titik tengah pada komparator balok ukur menjadi salah satu sumber ketidakpastian yang harus dimasukkan ke dalam perhitungan ketidakpastian titik tengah dari kalibrasi balok ukur. Sedangkan ketidakpastian variasi panjang pada kalibrasi komparator balok ukur dimasukkan ke dalam perhitungan ketidakpastian variasi panjang balok ukur.

Lampiran A

(informatif)

Contoh hasil pengukuran titik tengah

Berikut ini contoh hasil pengukuran titik tengah yang dilakukan dengan menggunakan 6 pasang balok ukur standar, di mana besaran nominal pasangan tersebut dapat dilihat pada Tabel dari klausul 4.1. Untuk mempermudah pengukuran, maka pasangan A dan B, diberi identitas P1 dan dilakukan pengukuran sebanyak 10 kali.

Position	Meas	No. 1 [0,5 / 0,5] mm			No. 2 [1 / 1,005] mm			No. 3 [1 / 1,010] mm		
		A/P1	B/P1	B-A	A/P1	B/P1	B-A	A/P1	B/P1	B-A
A	1	-1.74	-1.65	0.09	-1.4	3.46	4.86	0.12	10.19	10.07
	2	-1.87	-2.04	-0.17	-1.34	3.52	4.86	0.23	10.33	10.10
B	3	-1.95	-2.12	-0.17	-1.41	4.12	5.53	0.74	10.70	9.96
	4	-2.17	-2.20	-0.03	-0.75	4.15	4.90	0.82	10.58	9.76
	5	-1.85	-2.28	-0.43	-0.95	3.78	4.73	0.58	10.73	10.15
Span										
Avrg B-A				-0.14			4.98			10.01

Catatan : No. 1 s/d No. 6 adalah nomor pasangan gauge block

Position	Meas	No. 1 [0,5 / 0,5] mm			No. 2 [1 / 1,005] mm			No. 3 [1 / 1,010] mm		
		B/P1	A/P1	B-A	B/P1	A/P1	B-A	B/P1	A/P1	B-A
B	1	0.07	2.18	-2.11	-1.18	-6.16	4.98	-1.06	-11.22	10.16
	2	-0.08	1.57	-1.65	-1.15	-6.01	4.86	-1.2	-10.32	9.12
A	3	-0.05	-0.09	0.04	-1.00	-6.03	5.03	-1.1	-10.66	9.56
	4	-0.52	0.44	-0.96	-1.09	-6.04	4.95	-1.05	-11.12	10.07
	5	-0.60	-0.74	0.14	-1.00	-5.88	4.88	-0.9	-10.94	10.04
Span										
Avrg B-A				-0.91			4.94			9.79

Position	Meas	No. 4 [4 / 4] mm			No. 5 [6 / 6] mm			No. 6 [100 / 100] mm		
		A/P1	B/P1	B-A	A/P1	B/P1	B-A	A/P1	B/P1	B-A
A	1	-0.71	-0.78	-0.07	0.53	0.52	-0.01	1.47	1.59	0.12
	2	-0.82	-0.85	-0.03	0.38	0.3	-0.08	1.68	1.8	0.12
B	3	-0.81	-0.82	-0.01	0.17	0.07	-0.10	1.83	1.93	0.10
	4	-0.76	-0.71	0.05	-0.07	-0.12	-0.05	1.98	2.02	0.04
	5	-0.66	-0.62	0.04	-0.22	-0.34	-0.12	2.03	2.27	0.24
Span										
Avrg B-A				0.00			-0.07			0.12

Position	Meas	No. 4 [4 / 4] mm			No. 5 [6 / 6] mm			No. 6 [100 / 100] mm		
		B/P1	A/P1	B-A	B/P1	A/P1	B-A	B/P1	A/P1	B-A
B	1	-0.88	-0.78	-0.10	1.02	1.03	0.01	0.5	0.27	0.23
	2	-0.79	-0.73	-0.06	1.05	1.1	0.05	0.28	0.08	0.20
A	3	-0.72	-0.62	-0.10	1.13	1.21	0.08	0.04	-0.1	0.14
	4	-0.61	-0.49	-0.12	1.19	1.16	-0.03	0	-0.11	0.11
	5	-0.46	-0.37	-0.09	1.20	1.18	-0.02	-0.15	-0.26	0.11
Span										
Avrg B-A				-0.09			0.02			0.16

Untuk pengukuran jembatan (*bridge*), dapat dilihat pada tabel di atas, khususnya pasangan no. 5 (warna hijau).

Selanjutnya dilakukan analisa data dari hasil pengukuran di atas, diketahui nilai dari sertifikat standar balok ukur (angka 1 dari Lampiran B).

Nilai rata-rata pengukuran (angka 2 dari Lampiran B) diperoleh dari nilai rata-rata dari setiap pasangan balok ukur.

Sebagai contoh, nilai -0,53 diperoleh dari rata-rata pasangan no. 1, yaitu:

$$\frac{-0.14 + (-0.91)}{2} = -0.53$$

Sedangkan nilai selisih (dari Lampiran B), diperoleh dari angka 1 dikurangi angka 2.

Untuk mendapatkan nilai standar deviasi (angka 3 dari Lampiran B), diperoleh dari nilai rata-rata secara acak dari pengukuran setiap pasangan.

Sebagai contoh nilai 0,79, diperoleh dari rata-rata pasangan no. 1, yaitu:

$$= STDEV(0.09, -0.17, -0.17, -0.03, -0.43, -2.11, -1.65, 0.04, -0.96, 0.14) = 0.79$$

Nilai keberulangan pengukuran (*repeatability*) pada variasi interval, yaitu nilai 0,79 (tabel di bawah ini), diperoleh dari nilai standar deviasi terbesar dari seluruh nilai dari angka 3, yaitu:

$$= MAX(0.79, 0.22, 0.33, 0.06, 0.06) = 0,79$$

Nilai keberulangan pengukuran harus dimasukkan dalam perhitungan *budget* ketidakpastian,

Tahapan yang sama dilakukan untuk mengetahui nilai rata-rata terukur dari pasangan no. 6, baik untuk posisi d maupun posisi u (tabel selisih titik tengah dapat dilihat pada Lampiran B).

Source of Uncertainty	Unit	Dist. Type	Symbol	Var. Interval	Divisor	Deg. of freedom ν_i	Std. Uncertainty u_i	Sens. Coeff. c_i	$u_i c_i$	$(u_i c_i)^2$	$(u_i c_i)^{4/3}$
Repeatability	μm	Normal	$u(L1)$	0.79	2.24	5	0.35317	1	0.3531713	0.12473	3.11E-03
Readability of Comparator	μm	Rect.	$u(L2)$	0.005	1.73	60	0.00289	1	0.0028902	0.00001	1.16E-12
Linearity of Probe	μm	Rect.	$u(L3)$	0.04	1.73	60	0.02486	1	0.0248560	0.00062	6.36E-09
Uncertainty of Calibration Standard	μm	Normal	$u(L_{AB})$	0.024	2.00	60	0.01200	1	0.0120000	0.00014	3.46E-10
Difference in temperature of GB	$^{\circ}\text{C}$	Rect.	$u(\delta\theta)$	0.05	1.73	60	0.02890	4.E-07	0.0000000	0.00000	3.72E-34
Thermal exp. Coefficient	$^{\circ}\text{C}$	Rect.	$u(\alpha)$	5.0E-07	1.73	60	0.00000	0.05	0.0000000	0.00000	7.27E-34
Difference of Probing Indentation	μm	Rect.	$u(\Delta dF)$	0.01	1.73	60	0.00751	1	0.0075145	0.00006	5.31E-11
Non Central Contacting	μm	Rect.	$u(P)$	0.02	1.73	60	0.01156	1	0.0115607	0.00013	2.98E-10
Total combined uncertainty								U_c		0.355	
Effective degree of freedom								ν_{eff}			5.08E+00
Expanded Uncertainty at $k=2$								U_{95}		0.71	μm

Lampiran B

(informatif)

Contoh sertifikat kalibrasi (untuk pengukuran titik tengah)

Nama Alat/ *Instrument Name* :
 Nama Pembuat/ *Manufacturer* :
 Tipe & No.Seri/ *Type & Serial Number* :
 Tanggal Kalibrasi/ *Calibration Date* :
 Tempat Kalibrasi/ *Calibration Place* :
 Suhu/ *Temperature* :
 Kelembapan/ *Relative Humidity* :

Hasil Kalibrasi/ Calibration Result

Selisih Titik Tengah/ *Difference of Central Length*

Nomor Pasangan/ <i>Number of Pairs</i>	Panjang Nominal/ <i>Nominal Length</i> (mm)		Nilai dari Sertifikat Kalibrasi/ <i>Value from Calibration Certificate</i> (μm)	Nilai Rata-Rata Pengukuran/ <i>Measured Mean Value</i> (μm)	Selisih/ <i>Difference</i> (μm)	Standar Deviasi Pengukuran/ <i>Measured Standard Deviation</i> (μm)
	A	B	C (B - A)	M (B - A)	C - M	B - A
1	0,5	0,5	0,01	-0,53	0,54	0,79
2	1	1,005	4,90	4,96	-0,06	0,22
3	1	1,01	10,01	9,10	0,11	0,33
4	4	4	-0,03	-0,05	0,02	0,06
5	100	100	0,07	0,14	-0,07	0,06

Selisih Titik Tengah Pasangan Nomor 6/ *Difference of Central Length of Pair Number 6*

Nomor Pasangan/ <i>Number of Pair</i>	Panjang Nominal/ <i>Nominal Length</i> (mm)		Nilai Rata-Rata Pengukuran/ <i>Measured Mean Value</i> (μm)		Selisih Rata-Rata/ <i>Difference of mean</i> (μm)	Standar Deviasi Pengukuran/ <i>Measured Standard Deviation</i> (μm)	
	A	B	Balok Ukur B Sisi Datar di Bagian Bawah (Posisi d)/ <i>Gauge block B flat side down (Position d)</i>	Balok Ukur B Sisi Datar di Bagian Atas (Posisi u)/ <i>Gauge block B flat side up (Position u)</i>	Posisi d - Posisi u/ <i>Position d - Position u</i>	Posisi d/ <i>Position d</i>	Posisi u/ <i>Position u</i>
			(B - A)	(B - A)		(B - A)	(B - A)
6	6	6	-0,07	0,02	-0,09	0,04	0,05

Penyimpangan f_o dan f_u dari Titik Tengah/ *Deviations f_o and f_u from the Central Length*

Panjang Nominal/ <i>Nominal Length</i> (mm)	Nilai dari Sertifikat/ <i>Value from Certificate</i> C (μm)		Nilai Rata-rata Pengukuran/ <i>Measured Mean Value</i> M (μm)		Selisih/ <i>Difference</i> C – M (μm)		Standar Deviasi Pengukuran/ <i>Measured Standard Deviation</i> (μm)
	f_o	f_u	f_o	F_u	f_o	f_u	
1,01	0,05	0,00	0,02	0,08	0,03	0,08	0,04

Standar Kalibrasi/ *Reference Standard* : Gauge Block Grade K, MAHR, S.N. 07012

Prosedur Kalibrasi/ *Calibration Procedure* : I.ML.2.09

Hasil pengukuran yang dilaporkan tertelusur ke SI melalui Tubitak UME, Turki/ *The reported measurement result is traceable to the SI through Tubitak UME, Turkey.*

Ketidakpastian pengukuran dinyatakan pada tingkat kepercayaan tidak kurang dari 95% dengan faktor cakupan $k = 2$ adalah $0,71 \mu\text{m}$ / *Uncertainty of measurement is expressed at a confidence level of not less than 95% with coverage factor = 2 is $0,71 \mu\text{m}$.*

Bibliografi

ISO 3650:1998, *Geometrical Product Specifications (GPS) – Length standards – Gauge Blocks*.

Calibration Guide EURAMET cg-2 Version 2.0 (03/2011), Calibration of Gauge Block Comparators.

A.Godina, B. Acko, M. Druzovec, *New approach to uncertainty evaluation in the calibration of balok ukur comparators*, ScienceDirect 40(2007), 607-614.

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*.