

SNSU PK.E-04:2024

Panduan Kalibrasi Kalibrator Arus DC



SNSU PK.E-04:2024

PANDUAN KALIBRASI KALIBRATOR ARUS DC

Penyusun:

1. Agah Faisal
2. Lukluk Khairiyati
3. Hayati Amalia
4. Nibras F. Yayienda
5. Azka Q. Yusrina
6. Arif M. Fadli

Penelaah:

1. Hastori

Kontributor Eksternal:

1. Widya Gunawan
2. Achmad Fachrudin

**Direktorat Standar Nasional Satuan Ukuran Termoelektrik dan Kimia
Badan Standardisasi Nasional**

Hak cipta © Badan Standardisasi Nasional, 2024

Lembar Pengesahan

Panduan Kalibrasi Kalibrator Arus DC (SNSU PK.E-04:2024) disusun dan diterbitkan oleh Badan Standardisasi Nasional sebagai bagian dari inisiatif untuk menyelaraskan praktik kalibrasi Kalibrator Arus DC di berbagai laboratorium kalibrasi dan institusi terkait yang memiliki kepentingan dalam menjamin validitas pengukuran. Dokumen panduan ini mencakup beberapa aspek termasuk metode kalibrasi dan estimasi ketidakpastian pengukuran. Penyusunan panduan ini dilakukan dengan mengacu pada referensi internasional dan nasional yang relevan, serta merujuk kepada sumber-sumber ilmiah terkemuka melalui serangkaian diskusi internal di Direktorat Standar Nasional Satuan Ukuran Termoelektrik dan Kimia, dengan mempertimbangkan rekomendasi yang diberikan oleh para ahli dalam bidang metrologi kelistrikan.

Dokumen ini tersedia secara gratis dan terbuka untuk umum. Beberapa bagian dari panduan ini dapat dikutip untuk keperluan pendidikan dan kegiatan penelitian, dengan mencantumkan sumbernya, namun tidak untuk tujuan komersial.

Kami mengucapkan terima kasih kepada Bpk. Widya Gunawan, Bpk. Achmad Fachrudin, dan semua pihak yang telah terlibat dalam penulisan, penyuntingan, dan penyebaran panduan ini. Semoga panduan ini memberikan manfaat yang signifikan bagi para pembaca dan berkontribusi positif terhadap perkembangan metrologi kelistrikan di Indonesia.

Disahkan tanggal 29 November 2024
Deputi Bidang Standar Nasional Satuan Ukuran
Badan Standardisasi Nasional

Yustinus Kristianto Widiwardono



**BADAN
STANDARDISASI
NASIONAL**

SNSU PK.E-04:2024

PANDUAN KALIBRASI KALIBRATOR ARUS DC

**Direktorat SNSU Termoelektrik dan Kimia
Badan Standardisasi Nasional
2024**

DAFTAR ISI

1. Pendahuluan	1
2. Ruang Lingkup	1
3. Istilah dan Definisi	1
4. Metode Kalibrasi	3
5. Model Matematis	7
6. Pelaporan Hasil	7
Suplemen 1	8
Suplemen 2	13
Referensi	22

1. Pendahuluan
 - 1.1 Panduan ini disusun untuk mengharmoniskan pelaksanaan kalibrasi alat Kalibrator Arus DC yang dilakukan oleh laboratorium, baik yang menerapkan SNI ISO/IEC 17025: 2017 maupun yang tidak.
 - 1.2 Panduan ini bukan sebagai panduan lengkap untuk memperoleh semua rincian aspek kemetrologian dari suatu Kalibrator Arus DC, namun dapat menjadi rekomendasi atau pelengkap prosedur kalibrasi yang dikeluarkan oleh pabrik pembuat alat Kalibrator Arus DC.

2. Ruang Lingkup
 - 2.1 Kategori alat Kalibrator Arus DC yaitu instrumen elektronik bertipe sumber yang memiliki kemampuan membangkitkan level arus DC yang dapat dibagi menjadi beberapa rentang ukur.
 - 2.2 Rentang ukur generik dari alat Kalibrator Arus DC adalah mulai dari rentang arus ratusan mikroampere sampai dengan puluhan ampere.
 - 2.3 Panduan ini memandu penerapan metode perbandingan langsung dan metode perbandingan tidak langsung dalam mengkalibrasi alat Kalibrator Arus DC.
 - 2.4 Alat standar yang digunakan dalam panduan kalibrasi Kalibrator Arus DC ini adalah sebuah DMM (*digital multimeter*) acuan yang diaktifkan pada modus pengukuran arus DC dalam penggunaan metode perbandingan langsung, serta standar *current shunt* acuan dan sebuah DMM acuan yang diaktifkan pada modus pengukuran tegangan DC dalam penggunaan metode perbandingan tidak langsung.

3. Istilah dan Definisi
 - 3.1 UUC atau *unit under calibration* merupakan penamaan yang ditetapkan untuk perangkat ukur yang dikalibrasi, dalam hal ini adalah Kalibrator Arus DC.
 - 3.2 Standar merupakan penamaan yang ditetapkan untuk perangkat yang digunakan sebagai representasi nilai acuan.
 - 3.3 Metode perbandingan langsung adalah cara melakukan perbandingan besaran ukur yang tidak diketahui dari suatu alat sebagai UUC terhadap

besaran ukur yang telah diketahui dari suatu standar acuan, yang mana kedua besaran tersebut merupakan parameter ukur yang sama.

- 3.4 Metode perbandingan tidak langsung adalah cara melakukan perbandingan besaran ukur yang tidak diketahui dari suatu alat sebagai UUC terhadap besaran-besaran ukur yang telah diketahui dari standar acuan, yang mana besaran-besaran tersebut merupakan parameter ukur yang berbeda.
- 3.5 Standar *current shunt* adalah standar resistor dengan nilai rendah yang dirancang untuk mengukur arus listrik pada sebuah rangkaian listrik. Pengukuran dengan *current shunt* dilakukan dengan cara menghubungkan *current shunt* secara seri dengan dengan aliran sumber arus sehingga menghasilkan jatuh tegangan yang nilainya proporsional dengan nilai arus yang mengalir. Jatuh tegangan yang terjadi itu diukur dengan DMM acuan yang diaktifkan pada modus pengukuran tegangan.
- 3.6 Pengenalan atau *zeroing* adalah cara untuk menyesuaikan sirkuit secara internal dari suatu alat untuk meniadakan *offset* di seluruh rentang operasi agar memenuhi nilai-nilai spesifikasi alat tersebut.
- 3.7 Nilai nominal merupakan nilai yang ditetapkan melalui pengaturan, dan nilai tersebut tidak diperoleh dari pengukuran.
- 3.8 Nilai numerik merupakan nilai kuantitatif yang ditetapkan dan diperoleh dari pengukuran.
- 3.9 Nilai acuan merupakan nilai yang sudah diketahui melalui pengukuran sebelumnya dan dijadikan sebagai nilai pembanding yang sudah terkoreksi dalam suatu pengukuran berikutnya.
- 3.10 *Compliance voltage* merupakan batasan tegangan maksimum yang dapat dicapai oleh Kalibrator Arus DC pada perangkat sistem pengukuran arus sehingga sumber arusnya masih dapat mempertahankan level keluaran yang diinginkan.
- 3.11 *Drift* merupakan suatu ukuran stabilitas jangka panjang dari suatu nilai numerik dalam interval waktu tertentu.

4. Metode Kalibrasi

4.1 Prinsip Kalibrasi

- 4.1.1 Nilai acuan yang digunakan, baik pada metode perbandingan langsung maupun metode perbandingan tidak langsung, harus dapat ditunjukkan bahwa nilai tersebut tertelusur kepada Sistem Internasional untuk Satuan (SI).
- 4.1.2 Definisi pengukuran terhadap UUC ditentukan pada terminal keluaran alat tersebut. Alat yang dilengkapi dengan aksesoris kabel atau konektor lain yang menyertai UUC tetap ditentukan dengan definisi yang sama.
- 4.1.3 Aliran arus bekerja dalam *loop* tertutup, sehingga arus yang dialirkan dari satu terminal keluaran Kalibrator Arus DC akan kembali ke terminal keluaran lainnya.
- 4.1.4 Impedansi total dalam *loop* aliran arus tidak boleh melebihi nilai rasio *compliance voltage* terhadap besar arus yang dialirkan.
- 4.1.5 Terminal arus input dan rentang arus standar acuan yang sesuai dipilih sebelum aliran arus dioperasikan. Pastikan aliran arus yang dioperasikan tidak melampaui batasan yang diijinkan pada terminal arus input dan rentang arus tersebut.
- 4.1.6 Hasil kalibrasi yang diperoleh menggunakan panduan ini adalah koreksi penunjukan alat, yaitu selisih nilai acuan sebagai standar dengan nilai nominal yang ditunjukkan oleh UUC.

4.2 Persiapan Kalibrasi

- 4.2.1 Kegiatan awal yang dilakukan dalam persiapan adalah melakukan verifikasi kondisi fisik dan fungsi dari UUC.
- 4.2.2 Jika kondisi fisik dan fungsi sudah terverifikasi dengan baik, sehingga tidak terdapat adanya kesalahan yang mungkin terjadi saat pengukuran, maka UUC perlu dikondisikan pada ruang yang digunakan untuk memfasilitasi kegiatan kalibrasi.
- 4.2.3 Kegiatan kalibrasi dikondisikan dalam ruangan terkendali dengan suhu $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ dan kelembaban relatif $(60 \pm 10) \% \text{RH}$.

Catatan:

Suhu lingkungan yang berbeda antara kondisi laboratorium kalibrasi acuan dengan kondisi saat pengukuran berlangsung akan berimplikasi pada perlunya mengoreksi hasil pengukuran karena pengaruh suhu.

- 4.2.4 Jika pengondisian cukup, sehingga sudah terjadi kesetimbangan termal antara ruang dalam selungkup UUC dengan ruang laboratorium, selanjutnya UUC dapat dioperasikan.
- 4.2.5 Tegangan catu daya yang diterapkan harus sesuai dengan peruntukannya. Untuk itu perlu dilakukan pemeriksaan level tegangan catu daya yang diperlukan.
- 4.2.6 Pengoperasian awal alat dalam kondisi menyala dan *standby*, atau biasa dikenal *warming-up* (pemanasan), diperlukan untuk menstabilkan jaringan sirkuit internal pada alat. Pemanasan alat diterapkan pada standar dan UUC sesuai dengan rekomendasi pabrikan masing-masing.
- 4.2.7 Laboratorium sebaiknya mengatur penempatan masing-masing alat untuk memastikan pembuangan udara hangat dari suatu peralatan tidak mengalir secara langsung mengenai peralatan lainnya.
- 4.2.8 Kegiatan persiapan berikutnya sebelum menggunakan DMM acuan adalah melakukan pengaturan *zeroing* sesuai dengan rekomendasi pabrikan.
- 4.2.9 Laboratorium perlu menggunakan kabel yang sesuai untuk pengukuran arus sampai dengan level puluhan ampere. Serta kondisi kabel harus baik dan terbebas dari korosi.

4.3 Penentuan Titik Ukur

4.3.1 Titik ukur untuk alat UUC

Titik ukur arus DC diatur sedemikian rupa sehingga, titik ukur dinyatakan dalam persentasi terhadap skala penuh. Titik-titik ukur tersebut dapat dilihat sebagaimana pada Tabel 1. Titik ukur dapat berbeda jika ada permintaan dari pelanggan.

Tabel 1. Titik ukur kalibrasi UUC untuk arus DC

Rentang	Titik ukur
Terkecil	0%, 20%, 50% dan $\pm 100\%$.
Menengah	20%, 50%, 80%, dan $\pm 100\%$.
Lainnya	20%, 50% dan $\pm 100\%$.

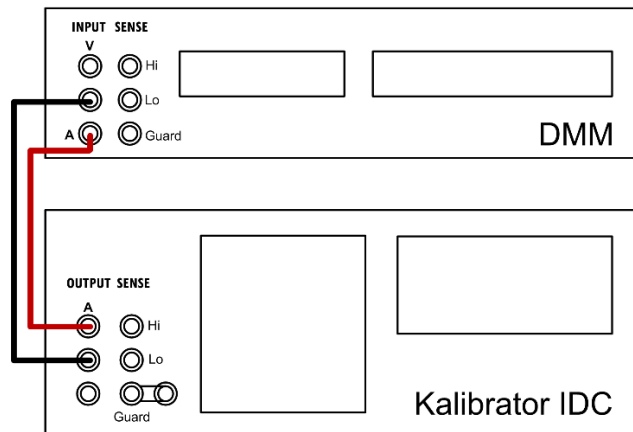
4.3.2 Titik ukur 0% merupakan indikasi dari nilai *offset* dari rentang terkecil yang diukur. Titik ukur 20% merupakan indikasi dari suatu nilai awal dari sebuah rentang ukur, titik ukur lain dapat digunakan sebagai pengganti suatu nilai awal dari sebuah rentang ukur. Titik ukur 50 % merupakan indikasi dari suatu nilai tengah dari sebuah rentang ukur. Sedangkan titik ukur 100% merupakan indikasi dari suatu nilai akhir dari sebuah rentang ukur, titik ukur lain dapat digunakan sebagai pengganti suatu nilai akhir dari sebuah rentang. Titik ukur 80%, atau titik ukur lainnya dapat digunakan sebagai pengganti, merupakan indikasi dari nilai-nilai yang dapat diberikan untuk menentukan evaluasi non-linearitas dari UUC.

4.4 Pengkabelan UUC terhadap Standar

Perhatian perlu diberikan pada beberapa tipikal UUC maupun standar. Terminal untuk arus yang lebih kecil dapat berbeda dengan terminal arus yang lebih besar. Laboratorium selalu waspada terhadap titik arus yang dioperasikan agar selalu sesuai dengan terminal peruntukannya. Gunakan kabel yang sesuai untuk pengukuran arus untuk menghindari terjadinya *overheat* saat pengukuran berlangsung.

4.4.1 Pengkabelan untuk metode perbandingan langsung

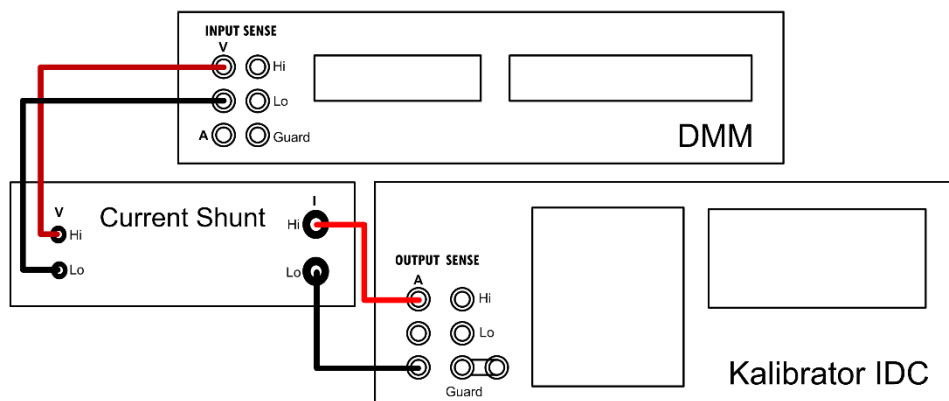
Pengukuran dengan menggunakan metode perbandingan langsung dilakukan dengan menghubungkan kabel sebagaimana diagram skematik yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Pengkabelan untuk metode perbandingan langsung

4.4.2 Pengkabelan untuk metode perbandingan tidak langsung

Pengukuran dengan menggunakan metode perbandingan tidak langsung dilakukan dengan menghubungkan kabel sebagaimana diagram skematik yang ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Pengkabelan untuk metode perbandingan tidak langsung

4.5 Pengoperasian Arus

Dua macam pengkabelan untuk kedua metode, baik antara Kalibrator Arus DC (UUC) dengan terminal arus input DMM atau UUC dengan terminal arus input *current shunt*, membentuk *loop* aliran arus yang tidak boleh terbuka. Pastikan beban yang menghambat aliran arus tidak menyebabkan *compliance voltage* menjadi terlampaui.

Saat arus dibangkitkan oleh UUC dan dioperasikan pada DMM atau *current shunt*, arus tersebut akan memanaskan resistansi input dari DMM atau

resistansi *current shunt* sehingga diperlukan waktu tunggu untuk mencapai kestabilan. Lamanya waktu untuk kestabilan bergantung pada besarnya resistansi yang dihadapi. Resistansi yang lebih kecil memerlukan waktu tunggu yang lebih lama.

4.6 Perekaman Data Pengukuran

Perekaman data pengukuran dilakukan beberapa saat setelah kondisi stabil tercapai. Pengulangan pengukuran data dilakukan untuk mendapatkan estimasi terbaik dari nilai numerik yang dihasilkan melalui pengukuran.

Perekaman data untuk metode langsung dalam satuan ampere, sedangkan perekaman data untuk metode tidak langsung dalam satuan volt.

5. Model Matematis

Model matematis pengukuran dirumuskan berdasarkan selisih nilai standar terkoreksi dan nilai penunjukan alat. Model matematis pengukuran dapat juga menggambarkan kontributor-kontributor yang berpengaruh dalam pelaksanaan kalibrasi. Model matematis tersebut digunakan untuk menurunkan persamaan ketidakpastian pengukuran.

6. Pelaporan Hasil

Pelaporan hasil yang tergabung dalam sertifikat kalibrasi harus memenuhi persyaratan yang ditentukan dalam butir-butir 7.8 SNI ISO/IEC 17025:2017.

Panduan pelaporan hasil dapat mengacu pada SNSU PK.E-01:2021, Panduan Kalibrasi Digital Multimeter.

S1 Suplemen 1: Kalibrasi nominal 10 A Kalibrator Arus DC dengan metode perbandingan langsung

S1.1. Koreksi arus dari penunjukan Kalibrator Arus DC sebagai UUC ditentukan berdasarkan pengukuran langsung menggunakan DMM acuan sebagai standar pada rentang ukur 20 A. Pengondisian laboratorium dijaga pada suhu $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ dan pada kelembaban relatif $(60 \pm 10)\% \text{ RH}$. Terhadap UUC dan standar dilakukan pemanasan pada kondisi laboratorium tidak kurang dari 4 (empat) jam, sehingga kesetimbangan termal antara bagian dalam dan luar selengkap masing-masing alat sudah tercapai. Selanjutnya terhadap standar diterapkan *zeroing*, dan diatur pada resolusi yang tertinggi. Pastikan terminal arus keluaran UUC dan terminal arus input standar yang terpilih sesuai dengan level arus yang dioperasikan. Kemudian, pastikan *compliance voltage* dari UUC tidak terlampaui saat UUC beroperasi mengalirkan arus ke terminal input standar. Dan juga pastikan kabel pengukuran tidak *overheat* saat pengukuran berlangsung UUC kemudian dioperasikan, dan pengambilan data pengukuran sebanyak 5 (lima) kali pengulangan dilakukan setelah tercapainya periode stabilisasi aliran arus dari UUC ke standar. Pengambilan data pengukuran tersebut dilakukan setelah arus beroperasi selama 10 menit.

S1.2. Koreksi UUC untuk penunjukan arus dengan nilai nominal 10 A mengikuti model matematis berikut:

$$C_X = \bar{I}_S + \delta I_S + \delta I_A + \delta I_R - I_X \quad \text{E.S1.1}$$

Dimana:

- C_X : Koreksi penunjukan nilai nominal Kalibrator Arus DC,
- I_X : Nilai nominal yang ditunjukkan oleh Kalibrator Arus DC sebagai UUC,
- \bar{I}_S : Rata-rata pembacaan DMM acuan sebagai standar dengan pengulangan dari $i = 1$ sd $i = 5$,
- δI_S : Koreksi pembacaan yang diperoleh dari sertifikat kalibrasi DMM acuan,
- δI_A : Koreksi pembacaan berdasarkan akurasi DMM acuan,
- δI_R : Koreksi pembacaan yang disebabkan oleh keterbatasan resolusi DMM acuan.

S1.3. Data hasil pengukuran berulang diperoleh sebagai berikut:

Tabel S1.1. Hasil pengukuran berulang

No.	Pembacaan DMM untuk nilai nominal 10 A (I_{Si})
1	9,988 981 A
2	9,989 073 A
3	9,989 056 A
4	9,989 024 A
5	9,988 955 A

Pengukuran berulang kemudian dievaluasi secara tipe A. Rata-rata pengukuran berulang oleh DMM acuan pada nilai nominal 10 A adalah:

$$\bar{I}_S = 9,989 018 A$$

dan standar deviasinya sebesar:

$$s(I_S) = 0,000 050 A$$

Sehingga standar deviasi rata-rata yang diperoleh secara eksperimental, ESDM, sebagai ketidakpastian baku dari pengukuran berulang pada nilai nominal 10 A adalah:

$$u(I_S) = s(\bar{I}_S) = 2,2 \times 10^{-5} A$$

dan derajat kebebasannya sebesar:

$$v = 4$$

S1.4. Data kalibrasi DMM acuan, sebagaimana ditunjukkan dalam sertifikat kalibrasi pada rentang pengukuran 20 A, dapat dilihat pada Tabel S1.2 berikut ini:

Tabel S1.2. Salinan laporan kalibrasi pada rentang pengukuran 20 A

Rentang (A)	Titik Ukur (A)	Pembacaan (A)	Koreksi (A)	Ketidakpastian (A)
20	2	1,999 29	-0,000 61	0,000 02
	10	10,000 03	-0,001 22	0,000 10
	18	17,994 91	-0,004 19	0,000 34

Nilai ketidakpastian ini dilaporkan dengan tingkat kepercayaan 95 % dan dengan faktor cakupan, k , sama dengan 2. Derajat kebebasannya diestimasi sebesar tak berhingga.

Sehingga nilai ketidakpastian baku yang diperoleh dari sertifikat kalibrasi DMM acuan adalah:

$$u(\delta I_S) = \frac{U(\delta I_S)}{k} = \frac{1,0 \times 10^{-4} A}{2} = 5,0 \times 10^{-5} A$$

- S1.5. Nilai numerik yang dilaporkan dalam sertifikat kalibrasi hanya sesuai saat DMM acuan itu dikalibrasi. Nilai numerik tersebut dimungkinkan mengalami perubahan seiring waktu dan menyebabkan terjadinya *drift*, yang menjadi kontributor keraguan terhadap perbedaan nilai saat DMM acuan dikalibrasi dengan saat ia digunakan. Nilai keraguan ini dapat diestimasi dengan mengambil nilai akurasi berdasarkan spesifikasi sebagaimana disebutkan dalam manual DMM acuan. Selain menyatakan stabilitas untuk kondisi 1 tahun sejak kalibrasi terakhir, spesifikasi tersebut juga menyatakan deviasi yang mungkin untuk kondisi perubahan suhu $\pm 5^\circ C$ dari suhu kalibrasi, serta non-linearitas untuk masing-masing rentang pengukuran. Untuk tipikal DMM acuan, spesifikasi mengklaim bahwa akurasi untuk rentang ukur 20 A adalah sebesar 380 ppm dari pembacaan ditambah 20 ppm dari rentang.

Nilai rentang paruh yang bersumber dari akurasi, $U(\delta I_A)$, bernilai:

$$U(\delta I_A) = 380 \times 0,000001 \times 10 A + 20 \times 0,000001 \times 20 A = 4,2 \times 10^{-3} A$$

Sehingga nilai ketidakpastian baku yang bersumber dari akurasi DMM acuan, $u(\delta I_A)$, adalah:

$$u(\delta I_A) = \frac{U(\delta I_A)}{\sqrt{3}} = \frac{4,2 \times 10^{-3} A}{\sqrt{3}} = 2,4 \times 10^{-3} A$$

Nilai ketidakpastian ini diestimasi memiliki distribusi segiempat dan dengan derajat kebebasan sebesar 200.

- S1.6. Nilai yang ditampilkan oleh layar DMM acuan merupakan suatu hasil pembulatan, sehingga ada perbedaan antara nilai sesungguhnya dengan nilai yang ditampilkan. Pembulatan angka pembacaan mempunyai nilai yang besarnya tidak akan lebih besar dari setengah resolusi. Nilai ketidakpastian yang bersumber dari resolusi, $U(\delta I_R)$, bernilai sebesar $5,0 \times 10^{-7} A$. Sehingga nilai ketidakpastian baku yang bersumber dari resolusi DMM acuan adalah:

$$u(\delta I_R) = \frac{U(\delta I_R)}{\sqrt{3}} = \frac{5,0 \times 10^{-7} A}{\sqrt{3}} = 2,9 \times 10^{-7} A$$

Nilai ketidakpastian ini diestimasi memiliki distribusi segiempat dengan derajat kebebasan sebesar 200.

S1.7. Bujet ketidakpastian

Karena tidak terdapat korelasi antara satu kontributor ketidakpastian dengan kontributor lainnya serta koefisien sensitifitas yang bernilai mutlak sama dengan 1 (satu), maka ketidakpastian baku gabungan yang diturunkan dari model matematis dapat dituliskan dengan:

$$u_c(C_X) = \sqrt{u^2(\bar{I}_S) + u^2(\delta I_S) + u^2(\delta I_A) + u^2(\delta I_R)} \quad \text{E.S1.2}$$

dan derajat kebebasan efektif dihitung dengan persamaan:

$$v_{eff} = \frac{u_c^4}{\sum_{i=1}^N \frac{(u(x_i))^4}{v_i}} \quad \text{E.S1.3}$$

Sehingga kemudian ketidakpastian bentangan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$U(C_X) = k \times u_c(C_X) \quad \text{E.S1.4}$$

Tabel S1.3 berikut menyajikan bujet perhitungan nilai numerik dan ketidakpastian untuk data-data yang telah disajikan di atas.

Tabel S1.3. Bujet perhitungan untuk kalibrasi Kalibrator Arus DC 10 A dengan metode perbandingan langsung

Kontributor	Nilai estimasi		Ketidakpastian baku		Distribusi	Koefisien sensitivitas	Kontribusi	DoF	
X_i	x_i		$u(x_i)$		PDF	c_i	$u(l_i)$	u_i	
Pengukuran berulang standar	9,98902	A	2,2E-05	A	tipe A	1	2,2E-05	4	
Sertifikat standar	-0,00122	A	5,0E-05	A	norm/ tipe B	1	5,0E-05	∞	
Akurasi standar	0	A	2,4E-03	A	segi-4/ tipe B	1	2,4E-03	200	
Resolusi standar	0	A	2,9E-07	A	segi-4/ tipe B	1	2,9E-07	200	
Nilai penunjukan alat	10	A	-	-	-	-	-	-	
C_x	-0,0122	A	Ketidakpastian baku gabungan:				2,43E-03		
			Derajat kebebasan efektif:				200		
			Faktor cakupan 95 % tingkat kepercayaan:				2,0		
			Ketidakpastian bentangan (95%):				0,0049	A	

S1.8. Hasil akhir dapat disajikan sebagai berikut:

Tabel S1.4. Laporan kalibrasi Kalibrator Arus DC dengan metode perbandingan langsung

Rentang (A)	Penunjukan Alat (A)	Koreksi Penunjukan (A)	Ketidakpastian (A)
20	10	-0,0122	0,0049

Ketidakpastian pengukuran dihitung dengan faktor cakupan $k = 2,0$ pada tingkat kepercayaan 95%.

S2. Suplemen 2: Kalibrasi nominal 10 A Kalibrator Arus DC dengan metode perbandingan tidak langsung

S2.1. Untuk menentukan nilai koreksi dari penunjukan Kalibrator Arus DC sebagai UUC, dengan metode perbandingan tidak langsung, diperlukan sebuah *current shunt* standar acuan dan sebuah DMM acuan yang diaktifkan pada modus pengukuran tegangan DC. *Current shunt* standar yang diacu memiliki nilai nominal 0,01 Ω dan dikalibrasi pada arus kerja 10 A. Sedangkan DMM yang diacu, untuk parameter tegangan DC nya, dikalibrasi di titik ukur 100 mV pada rentang 200 mV. Pengondisian laboratorium dijaga pada suhu (23 ± 2) $^{\circ}\text{C}$ dan pada kelembaban relatif (60 ± 10)% RH. UUC dan DMM acuan dilakukan pemanasan serta *current shunt* ditempatkan, pada pengondisian laboratorium tidak kurang dari 4 (empat) jam, sehingga kesetimbangan termal antara bagian dalam dan luar selungkup masing-masing alat sudah tercapai. Selanjutnya, pada DMM acuan diterapkan *zeroing*, dan diatur pada resolusi pembacaan tegangan yang tertinggi. Pastikan terminal arus keluaran UUC dan terminal arus input *current shunt* sesuai dengan level arus yang dioperasikan. Kemudian, pastikan *compliance voltage* dari UUC tidak terlampaui saat UUC beroperasi mengalirkan arus ke terminal input standar. Dan juga pastikan kabel pengukuran tidak *overheat* saat pengukuran berlangsung. UUC kemudian dioperasikan pada level arus DC 10 A dan ditunggu 10 menit hingga tercapai stabilitas aliran arus dari UUC ke *current shunt*. Pengambilan data sebanyak 5 (lima) kali pengulangan dilakukan setelah arus beroperasi selama periode stabilisasi. Pengukuran juga dilakukan untuk mendapatkan nilai tegangan parasitik EMF. Pelaksanaannya dilakukan tanpa harus memutus *loop* dan pengoperasian aliran arus, yaitu dengan cara membalik koneksi pada terminal keluaran *current shunt*. Pengambilan data sebanyak 5 (lima) kali pengulangan dilakukan lagi setelah membalik koneksi pada terminal keluaran *current shunt*. Penentuan tegangan parasitik dapat mengacu pada dokumen SNSU PK.E-02:2022, Panduan Kalibrasi Kalibrator Tegangan DC.

S2.2. Koreksi UUC untuk penunjukan Arus DC pada nilai nominal 10 A dengan metode perbandingan tidak langsung mengikuti model matematis berikut:

$$C_X = \frac{(\overline{V_{SI}} + \delta V_S + \delta V_E + \delta V_A + \delta V_R)}{(R_S + \delta R_D + \delta R_T)} - I_X \quad \text{E.S2.1}$$

Dimana:

- C_X : Koreksi penunjukan nilai nominal Kalibrator Arus DC,
- I_X : Nilai nominal yang ditunjukkan oleh Kalibrator Arus DC sebagai UUC,
- $\overline{V_{Si}}$: Nilai rata-rata dari pengukuran berulang pembacaan tegangan oleh DMM acuan dengan pengulangan dari $i = 1$ sd $i = 5$,
- δV_S : Koreksi pembacaan yang diperoleh dari sertifikat kalibrasi DMM acuan,
- δV_E : Koreksi pembacaan yang diperoleh dari tegangan parasitik EMF,
- δV_A : Koreksi pembacaan berdasarkan akurasi DMM acuan,
- δV_R : Koreksi pembacaan yang disebabkan oleh resolusi DMM acuan.
- R_S : Nilai resistansi yang diperoleh dari sertifikat kalibrasi *current shunt*,
- δR_D : Koreksi resistansi *current shunt* berdasarkan pengaruh *drift*,
- δR_T : Koreksi resistansi *current shunt* berdasarkan pengaruh suhu.

S2.3. Nilai rata-rata dari pengukuran berulang pembacaan tegangan

Hasil pengukuran tegangan diperoleh berdasarkan pengulangan, $n = 5$, terhadap keluaran *current shunt* yang diukur oleh DMM acuan saat arus sebesar 10 A dioperasikan pada *current shunt* 0,01 Ω .

Tabel S2.1. Hasil pengukuran berulang

No.	Pembacaan DMM untuk nilai nominal 100 mV (V_{Si})
1	99,875 76 mV
2	99,874 68 mV
3	99,874 91 mV
4	99,875 57 mV
5	99,875 33 mV

Rata-rata pengukuran berulang pembacaan tegangan oleh DMM acuan pada nilai nominal 100 mV adalah:

$$\bar{V}_S = 99,875\ 25\ mV$$

dan standar deviasinya sebesar:

$$s(V_S) = 0,000\ 45\ mV$$

Ketidakpastian pengukuran berulang dievaluasi secara tipe-A. Standar deviasi rata-rata yang diperoleh secara eksperimental, ESDM, sebagai ketidakpastian baku dari pengukuran berulang pembacaan tegangan pada nilai nominal 100 mV adalah:

$$u(V_S) = s(\bar{V}_S) = 2,0 \times 10^{-4}\ mV$$

Ketidakpastian baku dari pengukuran berulang pembacaan tegangan terdistribusi secara normal, dengan derajat kebebasan sebesar:

$$\nu = n - 1 = 4$$

- S2.4. Koreksi pembacaan yang diperoleh dari sertifikat kalibrasi DMM acuan Data kalibrasi DMM acuan, sebagaimana ditunjukkan dalam sertifikat kalibrasi pada rentang pengukuran 200 mV, dapat dilihat pada Tabel S2.2 berikut ini:

Tabel S2.2. Salinan laporan kalibrasi pada rentang pengukuran 200 mV

Rentang (mV)	Titik Ukur (mV)	Pembacaan (mV)	Koreksi (mV)	Ketidakpastian (mV)
200	20	20,000 03	-0,000 03	0,000 12
	100	100,001 44	-0,001 44	0,000 24
	180	180,003 16	-0,003 16	0,000 25

Nilai ketidakpastian ini dilaporkan dengan tingkat kepercayaan 95% dan dengan faktor cakupan, k , sama dengan 2. Derajat kebebasannya diestimasi sebesar tak berhingga.

Sehingga koreksi pembacaan yang diperoleh dari sertifikat kalibrasi DMM acuan pada titik 100 mV adalah:

$$\delta V_S = -0,001\ 44\ mV$$

Kemudian nilai ketidakpastian baku untuk koreksi pembacaan yang diperoleh dari sertifikat kalibrasi DMM acuan adalah:

$$u(\delta V_S) = \frac{U(\delta V_S)}{k} = \frac{2,4 \times 10^{-4}\ mV}{2} = 1,2 \times 10^{-4}\ mV$$

Ketidakpastian baku dari koreksi pembacaan yang diperoleh dari sertifikat kalibrasi DMM acuan terdistribusi secara normal, dengan derajat kebebasan sebesar tak berhingga.

S2.5. Koreksi pembacaan yang diperoleh dari tegangan parasitik EMF

Tegangan parasitik EMF diperoleh melalui pengukuran berulang setelah pengkabelan dibalik pada koneksi terminal keluaran *current shunt*, dan dihitung dengan persamaan:

$$\delta V_E = - \left(\frac{V_{DMMa} + V_{DMMb}}{2} \right) \quad \text{E.S2.2}$$

Tabel S2.3. Hasil pengukuran berulang untuk evaluasi nilai δV_E

No.	Pengkabelan normal (V_{DMMai})	Pengkabelan dibalik (V_{DMMbi})	Nilai tegangan parasitik EMF (δV_{Ei})
1	99,875 76 mV	-99,878 74 mV	0,001 49 mV
2	99,874 68 mV	-99,877 71 mV	0,001 52 mV
3	99,874 91 mV	-99,876 93 mV	0,001 01 mV
4	99,875 57 mV	-99,877 79 mV	0,001 11 mV
5	99,875 33 mV	-99,877 57 mV	0,001 12 mV

Koreksi pembacaan yang diperoleh dari tegangan parasitik EMF diestimasi dengan cara merata-ratakan nilai tegangan parasitik, δV_{Ei} :

$$\delta V_E = 0,001 25 \text{ mV}$$

dan standar deviasinya sebesar:

$$s(\delta V_E) = 0,000 24 \text{ mV}$$

Sehingga standar deviasi rata-rata yang diperoleh secara eksperimental, ESDM, sebagai ketidakpastian baku dari pengukuran berulang untuk tegangan parasitik EMF adalah:

$$u(\delta V_E) = 1,1 \times 10^{-4} \text{ mV}$$

Ketidakpastian baku dari pengukuran berulang untuk tegangan parasitik EMF terdistribusi secara normal, dengan derajat kebebasan sebesar:

$$\nu = n - 1 = 4$$

S2.6. Koreksi pembacaan berdasarkan akurasi DMM acuan

Nilai numerik yang dilaporkan dalam sertifikat kalibrasi hanya sesuai saat DMM acuan itu dikalibrasi. Nilai numerik tersebut dimungkinkan mengalami perubahan seiring waktu. *Drift* menjadi kontributor keraguan terhadap perbedaan nilai saat DMM acuan dikalibrasi dengan saat ia digunakan. Nilai keraguan ini dapat diestimasi dengan mengambil nilai akurasi berdasarkan spesifikasi sebagaimana disebutkan dalam manual DMM acuan. Selain menyatakan stabilitas untuk kondisi 1 tahun sejak kalibrasi terakhir, spesifikasi itu juga menyatakan deviasi yang mungkin untuk kondisi perubahan suhu $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ dari suhu kalibrasi, serta non-linearitas untuk masing-masing rentang pengukuran. Untuk tipikal DMM acuan, spesifikasi mengklaim bahwa akurasi untuk rentang ukur 200 mV adalah sebesar 2,7 ppm dari pembacaan ditambah 0,5 ppm dari rentang.

Nilai rentang paruh yang bersumber dari akurasi, $U(\delta V_A)$, bernilai:

$$U(\delta V_A) = 2,7 \times 10^{-6} \times 100\text{ mV} + 0,5 \times 10^{-6} \times 200\text{ mV} = 3,7 \times 10^{-4}\text{ mV}$$

Ketidakpastian baku yang bersumber dari akurasi DMM acuan, $u(\delta V_A)$, diestimasi sebesar:

$$u(\delta V_A) = \frac{U(\delta V_A)}{\sqrt{3}} = \frac{3,7 \times 10^{-4}\text{ mV}}{\sqrt{3}} = 2,1 \times 10^{-4}\text{ mV}$$

Ketidakpastian bakunya terdistribusi secara segiempat dengan derajat kebebasan sebesar 200.

S2.7. Koreksi pembacaan yang disebabkan oleh resolusi DMM acuan

Nilai yang ditampilkan oleh layar DMM acuan merupakan suatu hasil pembulatan, sehingga ada perbedaan antara nilai sesungguhnya dengan nilai yang ditampilkan. Pembulatan angka pembacaan mempunyai nilai yang besarnya tidak akan lebih besar dari setengah resolusi. Nilai ketidakpastian yang bersumber dari resolusi, $U(\delta V_R)$, bernilai sebesar $5,0 \times 10^{-6}\text{ mV}$. Sehingga nilai ketidakpastian baku yang bersumber dari resolusi DMM acuan adalah:

$$u(\delta V_R) = \frac{U(\delta V_R)}{\sqrt{3}} = \frac{5,0 \times 10^{-6}\text{ mV}}{\sqrt{3}} = 2,9 \times 10^{-6}\text{ mV}$$

Nilai ketidakpastian ini diestimasi memiliki distribusi segiempat dengan derajat kebebasan sebesar 200.

S2.8. Nilai resistansi yang diperoleh dari sertifikat kalibrasi *current shunt*

Data kalibrasi *current shunt*, sebagaimana ditunjukkan dalam sertifikat kalibrasi dapat dilihat pada tabel S2.4 berikut ini:

Tabel S2.4. Salinan laporan kalibrasi pada *current shunt* 0,01 Ω

Nilai Nominal (Ω)	Arus Kerja (A)	Nilai Aktual (Ω)	Ketidakpastian (Ω)
0,01	10	0,010 000 58	0,000 000 20

Nilai ketidakpastian ini dilaporkan dengan tingkat kepercayaan 95% dan dengan faktor cakupan, k , sama dengan 2. Derajat kebebasannya diestimasi sebesar tak berhingga.

Sehingga nilai resistansi yang diperoleh dari sertifikat kalibrasi *current shunt* pada arus kerja 10 A:

$$R_S = 0,010\ 000\ 58\ \Omega$$

Kemudian nilai ketidakpastian baku untuk nilai resistansi yang diperoleh dari sertifikat kalibrasi *current shunt* adalah:

$$u(R_S) = \frac{U(R_S)}{k} = \frac{2,0 \times 10^{-7}\ \Omega}{2} = 1,0 \times 10^{-7}\ \Omega$$

Ketidakpastian baku dari nilai resistansi yang diperoleh dari sertifikat kalibrasi *current shunt* terdistribusi secara normal, dengan derajat kebebasan sebesar tak berhingga.

S2.9. Koreksi resistansi *current shunt* berdasarkan pengaruh *drift*

Nilai numerik yang dilaporkan dalam sertifikat kalibrasi hanya sesuai saat *current shunt* itu dikalibrasi. Nilai numerik tersebut dimungkinkan mengalami perubahan seiring waktu. *Drift* menjadi kontributor keraguan terhadap perbedaan nilai saat *current shunt* dikalibrasi dengan saat ia digunakan. Laboratorium memiliki riwayat kalibrasi *current shunt* sejak 2014 sampai dengan 2019 sebagai berikut:

Tabel S2.5. Rekap riwayat kalibrasi pada *current shunt* 0,01 Ω

Tahun/Lab	Arus Kerja (A)	Nilai Aktual (Ω)	Ketidakpastian (Ω)
2014/ <i>KRISS</i>	5	0,010 000 60	0,000 000 10
2017/ <i>P2M</i>	10	0,010 000 60	0,000 000 11
2019/ <i>SCL</i>	10	0,010 000 58	0,000 000 20

Nilai-nilai yang terdapat dalam riwayat kalibrasi sebagaimana ditunjukkan Tabel S2.5 di atas dimanfaatkan sebagai konfirmasi terhadap nilai *drift* yang diestimasi dengan cara mengambil nilai akurasi dalam 1 tahun berdasarkan spesifikasi sebagaimana disebutkan dalam dokumen manual *current shunt*. Pergeseran nilai resistansi *current shunt* berdasarkan riwayat kalibrasi tidak lebih besar dari klaim akurasi dalam 1 tahun oleh pabrik. Untuk tipikal *current shunt* yang digunakan, spesifikasi mengklaim bahwa nilai akurasi dalam 1 tahun adalah sebesar 0,01% dari nilai nominal 0,01 Ω .

Koreksi resistansi *current shunt* berdasarkan pengaruh *drift*, δR_D , diestimasi bernilai:

$$\delta R_D = 0$$

Dengan nilai ketidakpastian, $U(\delta R_D)$, yang diestimasi sebesar:

$$U(\delta R_D) = 0,01\% \times 0,01\Omega = 1,0 \times 10^{-6} \Omega$$

Nilai ketidakpastian ini terdistribusi secara segiempat dengan derajat kebebasan sebesar 200. Sehingga nilai ketidakpastian baku dari koreksi resistansi *current shunt* berdasarkan pengaruh *drift*, $u(\delta R_D)$, adalah:

$$u(\delta R_D) = \frac{U(\delta R_D)}{\sqrt{3}} = \frac{0,01\% \times 0,01\Omega}{\sqrt{3}} = 5,8 \times 10^{-7} \Omega$$

S2.10. Koreksi resistansi *current shunt* berdasarkan pengaruh suhu

Pengondisian laboratorium yang dijaga pada suhu $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ berkontribusi pada perubahan nilai resistansi *current shunt*. Suhu yang dilaporkan saat mengkalibrasi *current shunt* adalah pada kisaran $(23,8 \pm 0,2) ^\circ\text{C}$. Perbedaan suhu tersebut memiliki selisih terbesar, $\Delta T = 2,6 ^\circ\text{C}$. Keraguan yang ditimbulkan kemudian dievaluasi sebagai ketidakpastian, dan diestimasi sama dengan nilai perbedaan maksimum suhu dikali koefisien suhu *current shunt*.

Koreksi resistansi *current shunt* berdasarkan pengaruh suhu, δR_T , diestimasi bernilai:

$$\delta R_T = 0$$

Dengan nilai ketidakpastian, $U(\delta R_T)$, yang diestimasi sebesar:

$$U(\delta R_T) = \text{koef. suhu} \times \Delta T = 10 \times 10^{-6} ^\circ\text{C}^{-1} \times 2,6 ^\circ\text{C} \times 0,01 \Omega = 2,6 \times 10^{-7} \Omega$$

Nilai ketidakpastian ini terdistribusi secara segiempat dengan derajat kebebasan sebesar 200. Sehingga nilai ketidakpastian baku dari koreksi resistansi *current shunt* berdasarkan pengaruh *drift*, $u(\delta R_T)$, adalah:

$$u(\delta R_T) = \frac{U(\delta R_T)}{\sqrt{3}} = \frac{2,6 \times 10^{-7} \Omega}{\sqrt{3}} = 1,5 \times 10^{-7} \Omega$$

S2.11. Koefisien sensitifitas

Masing-masing nilai koefisien sensitifitas untuk setiap kontributor ketidakpastian dapat diturunkan secara parsial dari model matematis pada persamaan E.S21. Masing-masing nilai koefisien sensitifitas tersebut adalah sebagai berikut:

$$c(\bar{V}_S) = c(\delta V_S) = c(\delta V_E) = c(\delta V_A) = c(\delta V_R)$$

$$= \frac{1}{R_S} = 99,9942 \Omega^{-1}$$

$$c(R_S) = c(\delta R_D) = c(\delta R_T)$$

$$= -\frac{(\bar{V}_S + \delta V_S + \delta V_E)}{R_S^2} = -998638 \text{ mV} \cdot \Omega^{-2}$$

S2.12. Bujet perhitungan nilai numerik dan ketidakpastian pengukuran

Tabel S2.6 berikut menyajikan bujet perhitungan nilai numerik dan ketidakpastian untuk kalibrasi Kalibrator Arus DC dengan menggunakan metode perbandingan tidak langsung.

Tabel S2.6. Bujet perhitungan untuk kalibrasi Kalibrator Arus DC 10 A dengan metode perbandingan tidak langsung

Kontributor	Nilai estimasi		Ketidakpastian baku		Distribusi	Koefisien sensitivitas		Kontribusi	DoF	
X_i	x_i		$u(x_i)$		PDF	c_i		$u(R_i)$	u_i	
Pengukuran berulang pembacaan tegangan	99,875 25	mV	2,0E-04	mV	norm/ tipe A	99,9942	Ω^{-1}	2,0E-02	4	
Sertifikat kalibrasi DMM	-0,001 44	mV	1,2E-04	mV	norm/ tipe B	99,9942	Ω^{-1}	1,2E-02	∞	
Tegangan parasitik EMF	0,001 25	mV	1,1E-04	mV	norm/ tipe A	99,9942	Ω^{-1}	1,1E-02	4	
Akurasi DMM	0	mV	2,1E-04	mV	segi-4/ tipe B	99,9942	Ω^{-1}	2,1E-02	200	
Resolusi DMM	0	mV	2,9E-06	mV	segi-4/ tipe B	99,9942	Ω^{-1}	2,9E-04	200	
Sertifikat kalibrasi <i>current shunt</i>	0,010 000 58	Ω	1,0E-07	Ω	norm/ tipe B	-998638	$\text{mV}\Omega^{-2}$	-1,0E-01	∞	
<i>Drift current shunt</i>	0	Ω	5,8E-07	Ω	segi-4/ tipe B	-998638	$\text{mV}\Omega^{-2}$	-5,8E-01	200	
Koefisien suhu <i>current shunt</i>	0	Ω	1,5E-07	Ω	segi-4/ tipe B	-998638	$\text{mV}\Omega^{-2}$	-1,5E-01	200	
Penunjukan Kalibrator Arus DC	10	A								
C_x	-0,0130	A	Ketidakpastian baku gabungan:						6,05E-01	
			Derajat kebebasan efektif:						241	
			Faktor cakupan 95 % tingkat kepercayaan:						2,0	
			Ketidakpastian bentangan (95%):						0,0012	A

S2.13. Hasil akhir dapat disajikan sebagai berikut:

Tabel S2.7. Laporan kalibrasi Kalibrator Arus DC dengan metode perbandingan tidak langsung

Rentang (A)	Penunjukan Alat (A)	Koreksi Penunjukan (A)	Ketidakpastian (A)
20	10	-0,0130	0,0012

Ketidakpastian pengukuran dihitung dengan faktor cakupan $k = 2,0$ pada tingkat kepercayaan 95%.

Referensi

- [1] Panduan SNSU PK.E-01-2021, *Panduan Kalibrasi Digital Multimeter*.
- [2] EURAMET CG-15 version 3.0 *Guidelines on the Calibration of Digital Multimeters*, February 2015.
- [3] JCGM 100:2008 *Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement*, September 2008.
- [4] SNI ISO/IEC 17025:2017 *Persyaratan Umum Kompetensi Laboratorium Pengujian dan Kalibrasi*, Ditetapkan oleh BSN tahun 2018.
- [5] Panduan SNSU PK.E-02:2022, *Panduan Kalibrasi Kalibrator Tegangan DC*.
- [6] Instruksi Kerja SNSU-BSN, I.ME.3.05 *Kalibrasi Sumber Arus DC Menggunakan Metode Langsung*, 2024.
- [7] Instruksi Kerja SNSU-BSN, I.ME.3.03 *Kalibrasi Sumber Arus DC Menggunakan Metode Tidak Langsung*, 2024.