

SNSU PK.E-03:2023

Panduan Kalibrasi Kalibrator Resistansi DC



SNSU PK.E-03:2023

PANDUAN KALIBRASI KALIBRATOR RESISTANSI DC

Penyusun:

1. Lukluk Khairiyati
2. Agah Faisal
3. Nibras F. Yaienda
4. Ashri Khusnul C.
5. Azka Q. Yusrina
6. Arif M. Fadli

Penelaah:

1. Hastori

Kontributor Eksternal:

1. M. Afip Nurul Hudah (Pusertif-PLN)
2. Masrofin Zaki (Ditmet-Kemendag RI)

Direktorat Standar Nasional Satuan Ukuran Termoelektrik dan Kimia
Badan Standardisasi Nasional

Hak cipta © Badan Standardisasi Nasional, 2023

Lembar Pengesahan

Panduan kalibrasi kalibrator resistansi DC (SNSU PK.E-03:2023) disusun dan diterbitkan oleh Badan Standardisasi Nasional sebagai bagian dari inisiatif untuk menyelaraskan praktik kalibrasi kalibrator resistansi 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. Noprizal A., Bpk. Widya G., Bpk. Fachrudin A., Bpk. Gusnaedi S., Bpk. Setyo Hadi H. 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, 25 Oktober 2023
Deputi Bidang Standar Nasional Satuan Ukuran
Badan Standardisasi Nasional

Yustinus Kristianto Widiwardono



**BADAN
STANDARDISASI
NASIONAL**

SNSU PK.E-03:2023

PANDUAN KALIBRASI KALIBRATOR RESISTANSI DC

**Direktorat SNSU Termoelektrik dan Kimia
Badan Standardisasi Nasional
2023**

DAFTAR ISI

1. Pendahuluan	1
2. Ruang Lingkup	1
3. Istilah dan Definisi	1
4. Metode Kalibrasi	3
5. Model Matematis	9
6. Pelaporan Hasil	9
Suplemen 1	10
Suplemen 2	16
Referensi	26

1. Pendahuluan
 - 1.1 Panduan ini disusun untuk menyelaraskan pelaksanaan kalibrasi alat kalibrator resistansi 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 resistansi DC, namun dapat menjadi rekomendasi atau pelengkap prosedur kalibrasi yang dikeluarkan oleh pabrik pembuat alat kalibrator resistansi DC.
2. Ruang Lingkup
 - 2.1 Kategori alat kalibrator resistansi DC yaitu instrumen elektronik bertipe sumber yang memiliki kemampuan membangkitkan nilai nominal resistansi DC, baik yang berupa nilai variabel-kontinu dalam suatu rentang maupun yang berupa nilai tetap.
 - 2.2 Rentang ukur generik dari alat kalibrator resistansi DC adalah mulai dari rentang resistansi ratusan miliohm sampai dengan satu Gigaohm.
 - 2.3 Panduan ini memandu penerapan metode perbandingan langsung dan metode substitusi dalam mengkalibrasi alat kalibrator resistansi DC.
 - 2.4 Alat standar yang digunakan dalam panduan kalibrasi kalibrator resistansi DC ini adalah sebuah DMM (digital multimeter) acuan yang diaktifkan pada modus pengukuran resistansi DC dalam penggunaan metode perbandingan langsung, serta standar resistor acuan dan DMM sebagai standar transfer nilai resistansi dalam penggunaan metode substitusi.
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 resistansi DC.
 - 3.2 Standar merupakan penamaan yang ditetapkan untuk perangkat yang digunakan sebagai representasi nilai acuan dari resistansi DC.

- 3.3 Metode perbandingan langsung adalah cara melakukan perbandingan suatu besaran ukur yang sama dari suatu alat sebagai UUC terhadap suatu standar yang digunakan sebagai acuan.
- 3.4 Metode substitusi adalah cara melakukan transfer nilai yang diketahui kepada nilai yang tidak diketahui menggunakan sebuah standar transfer yang stabil sehingga kedua pembacaannya dinyatakan dalam bentuk rasio.
- 3.5 Standar transfer adalah alat standar yang telah diketahui linearitasnya untuk membaca kedua nilai keluaran baik yang berasal dari standar resistor dan juga yang berasal dari kalibrator resistansi DC yang dikalibrasi.
- 3.6 Pengukuran resistansi secara 2-kawat adalah pengukuran resistansi menggunakan 2 (dua) kabel yang menghubungkan objek ukur dengan alat ukur melalui terminal *input* Hi dan terminal *input* Lo.
- 3.7 Pengukuran resistansi secara 4-kawat adalah pengukuran resistansi menggunakan 4 (empat) kabel yang menghubungkan objek ukur dengan alat ukur melalui sepasang terminal pengumpan arus yaitu terminal *input* Hi dan terminal *input* Lo, serta sepasang terminal pembaca tegangan yaitu terminal *sense* Hi dan terminal *sense* Lo.
- 3.8 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.
- 3.9 Nilai nominal merupakan nilai yang ditetapkan sebagai sebutan atau pelabelan, dan nilai tersebut tidak diperoleh dari pengukuran.
- 3.10 Nilai numerik merupakan nilai kuantitatif yang ditetapkan dan diperoleh dari pengukuran.
- 3.11 Nilai acuan merupakan nilai yang sudah diketahui melalui pengukuran sebelumnya dan dijadikan sebagai nilai pembanding yang sudah terkoreksi dalam suatu pengukuran berikutnya.
- 3.12 Linearitas merupakan suatu ukuran penyimpangan nilai-nilai numerik terhadap karakteristik ideal dari *input-output* yang simetris dalam suatu rentang pengukuran.

3.13 *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 substitusi, 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 Pengukuran resistansi pada nilai nominal resistor di bawah atau sama dengan 100 k Ω , baik untuk UUC yang memiliki empat terminal ataupun dua terminal keluaran, dilakukan pengukuran secara 4-kawat, sedangkan pada nilai nominal resistor di atas 100 k Ω dilakukan pengukuran secara 2-kawat.

4.1.4 Arus kerja yang diumpankan oleh DMM tidak melebihi arus yang diizinkan oleh UUC.

4.1.5 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 $(60 \pm 10) \%RH$.

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 pengkondisian cukup sehingga sudah terjadi keseimbangan termal antara ruang dalam selungkup UUC dengan ruang laboratorium, maka UUC dapat selanjutnya 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*, diperlukan untuk menstabilkan jaringan sirkuit internal pada alat. *Warming-up* 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 lainnya yang dilakukan dalam persiapan menggunakan DMM acuan sebagai standar adalah:

- melakukan pengaturan *zeroing* sesuai dengan rekomendasi pabrikan,

- melakukan pemilihan resolusi yang sesuai dengan nilai nominal resistansi yang diukur dan dengan jumlah digit terbanyak atau dengan pemilihan waktu integrasi sinyal terlama.

4.2.9 Sebaiknya menggunakan kabel yang terpilin (*twisted*), terselungkup (*shielded*), dan memiliki efek gaya gerak listrik (*electromotive force*) yang rendah akibat pengaruh suhu (*low thermal EMF*) serta kondisi kabel yang bagus dan terbebas dari korosi.

4.3 Penentuan Titik Ukur

4.3.1 Titik ukur untuk alat UUC dengan nilai variabel-kontinu

Tipikal kalibrator resistansi DC dapat memiliki rentang ukur resistansi mulai dari ratusan miliohm sampai dengan satu Gigaohm. Setiap rentangnya dapat diatur nilai nominal yang bisa divariasikan secara kontinu. Titik ukur resistansi DC diatur dalam persentase terhadap skala penuh, sebagaimana pada Tabel 1. Titik ukur dapat berbeda jika ada permintaan dari pelanggan.

Tabel 1. Titik ukur kalibrasi UUC

Rentang	Titik ukur
terkecil	0%, 10%, dan 100%.
menengah	10%, 20%, 50%, 80%, dan 100%.
lainnya	10% dan 100%.

Titik ukur 0% merupakan indikasi dari nilai *offset* dari rentang terkecil yang diukur. Titik ukur 10% 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 20% dan 80%, atau titik ukur lainnya

dapat digunakan sebagai pengganti, merupakan indikasi dari nilai-nilai yang dapat diberikan untuk menentukan evaluasi non-linearitas dari UUC.

4.3.2 Titik ukur untuk alat UUC dengan nilai tetap.

Tipikal kalibrator resistansi DC dapat memiliki nilai nominal resistansi dengan nilai tetap yang dapat dipilih sesuai dengan daftar yang dimilikinya. Titik ukur resistansi DC diatur pada setiap nilai nominal dalam daftar tersebut. Titik ukur dapat berbeda jika ada permintaan dari pelanggan.

4.4 Pengkabelan UUC terhadap Standar

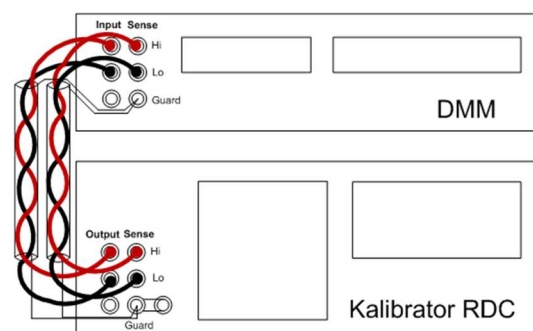
Pengkabelan dibedakan berdasarkan nilai nominal resistor yang dikalibrasi. Untuk nilai nominal resistor di bawah atau sama dengan 100 k Ω dilakukan pengukuran secara 4-kawat, sedangkan untuk nilai nominal resistor di atas 100 k Ω dilakukan pengukuran secara 2-kawat.

Catatan:

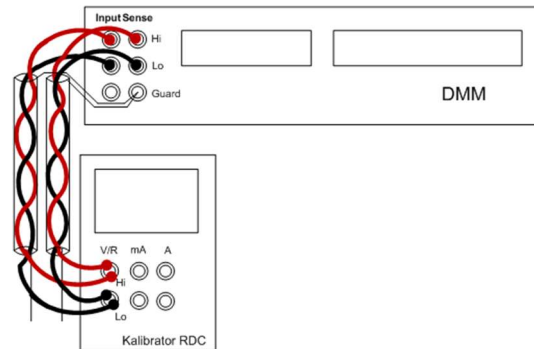
Pada tipikal UUC terdapat terminal *guard*, hubungkan terminal tersebut pada terminal *guard* DMM acuan sedemikian hingga *guard* tersebut aktif pada sisi UUC (kalibrator resistansi DC) saja.

4.4.1 Pengkabelan untuk metode perbandingan langsung

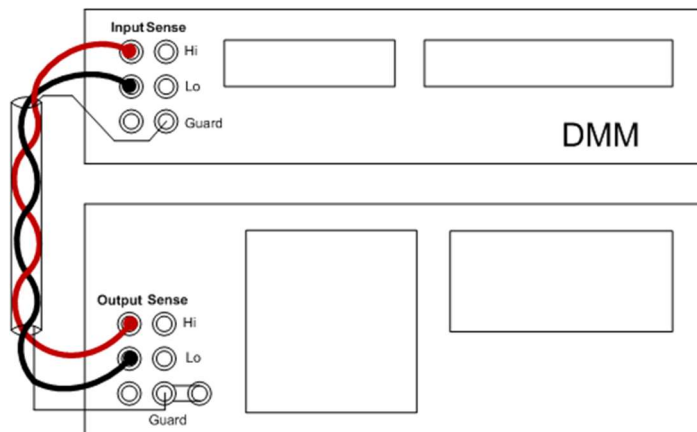
Pengukuran dengan menggunakan metode perbandingan langsung dilakukan dengan menghubungkan kabel sebagaimana diagram skematik yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1a. metode perbandingan langsung, pengkabelan 4-kawat untuk UUC yang memiliki empat terminal



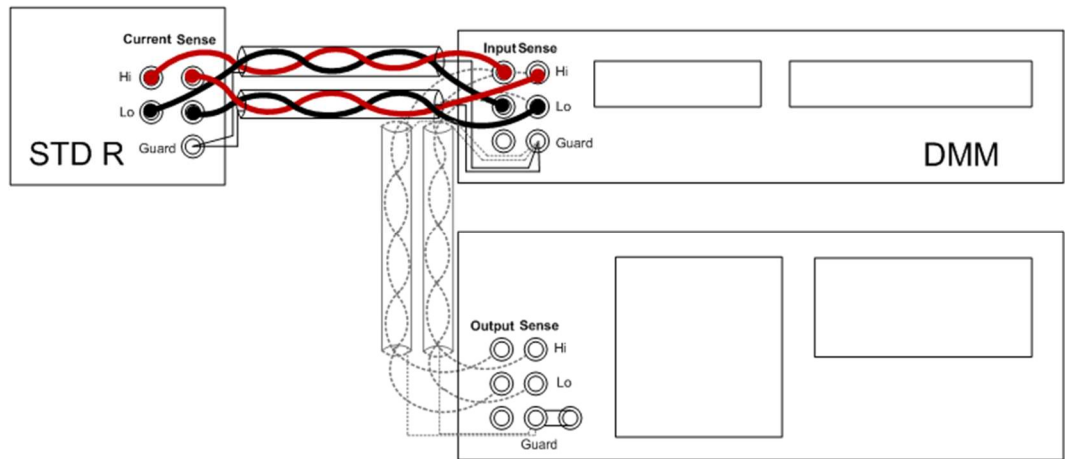
Gambar 1b. metode perbandingan langsung, pengkabelan 4-kawat untuk UUC yang memiliki dua terminal



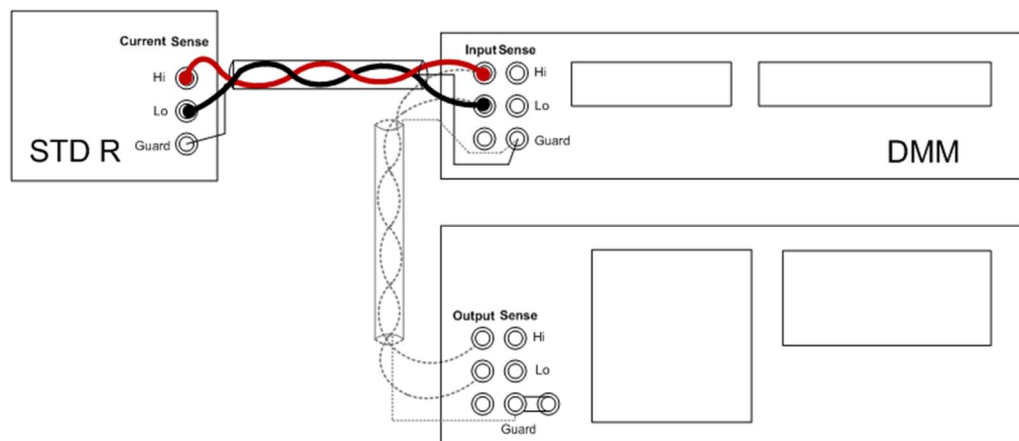
Gambar 1c. metode perbandingan langsung, pengkabelan 2-kawat

4.4.2 Pengkabelan untuk metode substitusi

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



Gambar 2a. metode substitusi, pengkabelan 4-kawat



Gambar 2b. metode substitusi, pengkabelan 2-kawat

4.5 Perekaman Data Pengukuran

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

5. Model Matematis

Model matematis pengukuran berdasarkan selisih nilai standar terkoreksi dan nilai penunjukan alat. Ia 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 1 kΩ kalibrator resistansi DC dengan metode perbandingan langsung

S1.1. Koreksi resistansi dari penunjukan kalibrator resistansi DC sebagai UUC ditentukan berdasarkan perbandingan langsung dengan menggunakan DMM acuan sebagai standar pada rentang ukur yang berkesesuaian dengan nilai nominal 1 kΩ, yaitu pada rentang ukur 2 kΩ. Pastikan arus kerja yang diumpankan DMM tidak melebihi arus yang diizinkan untuk kalibrator resistansi DC. Pengkondisian laboratorium dijaga pada suhu $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ dan pada kelembaban relatif $(60 \pm 10) \%RH$. Kedua alat UUC dan Standar di-*warming up* pada pengkondisian laboratorium tidak kurang dari 4 (empat) jam, sehingga keseimbangan suhu antara bagian dalam dan luar *casing* masing-masing alat sudah tercapai. Kemudian standar diterapkan *zeroing*, dan diatur pada resolusi yang tinggi. Pengukuran resistansi dengan nilai nominal 1 kΩ dilakukan secara 4-kawat. Pengukuran menggunakan kabel yang terpilin, terselungkup, dan memiliki efek gaya gerak listrik yang rendah. UUC kemudian dioperasikan untuk pengambilan data sebanyak 5 (lima) kali pengulangan. Pengambilan data pengukuran dilakukan setelah periode stabilisasi UUC tercapai.

S1.2. Koreksi UUC untuk penunjukan resistansi dengan nilai nominal 1 kΩ mengikuti model matematis berikut:

$$C_X = \overline{R_S} + \delta R_S + \delta R_A + \delta R_R - R_X \quad \text{E.S1.1}$$

Dimana:

- C_X : Koreksi penunjukan nilai nominal kalibrator resistansi DC,
- R_X : Nilai nominal yang ditunjukkan oleh kalibrator resistansi DC sebagai UUC,
- $\overline{R_S}$: Rata-rata pembacaan DMM acuan sebagai standar dengan pengulangan dari $i = 1$ sd $i = 5$,
- δR_S : Koreksi pembacaan yang diperoleh dari sertifikat kalibrasi DMM acuan,

- δR_A : Koreksi pembacaan berdasarkan akurasi DMM acuan,
 δR_R : Koreksi pembacaan yang disebabkan oleh keterbatasan resolusi DMM acuan,

S1.3. Nilai yang ditunjukkan kalibrator resistansi DC

Nilai nominal 1 k Ω yang dikeluarkan oleh kalibrator resistansi DC adalah,
 $R_X = 0,999\ 9934\ k\Omega$.

S1.4. Data hasil pengukuran berulang diperoleh sebagai berikut:

Tabel S1.1. Hasil pengukuran berulang

No.	Pembacaan DMM untuk nilai nominal 1 k Ω (R_{Si})
1	0,999 9774 k Ω
2	0,999 9774 k Ω
3	0,999 9775 k Ω
4	0,999 9776 k Ω
5	0,999 9777 k Ω

Pengukuran berulang kemudian dievaluasi secara tipe A. Rata-rata pengukuran berulang oleh DMM acuan pada nilai nominal 1 k Ω adalah:

$$\overline{R_S} = 0,999\ 9775\ k\Omega$$

dan standar deviasinya sebesar:

$$s(R_S) = 0,000\ 0001\ k\Omega$$

Sehingga standar deviasi rata-rata yang diperoleh secara eksperimental, ESDM, sebagai ketidakpastian baku dari pengukuran berulang pada nilai nominal 1 k Ω adalah:

$$u(R_S) = s(\overline{R_S}) = 5,8 \times 10^{-8}\ k\Omega$$

Dan derajat kebebasannya sebesar:

$$\nu = 4$$

S1.5. Data kalibrasi DMM acuan, sebagaimana ditunjukkan dalam sertifikat kalibrasi pada rentang pengukuran 2 kΩ, dapat dilihat pada Tabel S1.2 berikut ini:

Tabel S1.2. Salinan laporan kalibrasi pada rentang pengukuran 2 kΩ

Titik Ukur (kΩ)	Pembacaan Alat (kΩ)	Koreksi (kΩ)	Ketidakpastian (kΩ)
1	0,999 9772	0,000 0201	0,000 0073

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:

$$u(\delta R_S) = \frac{U(\delta R_S)}{k} = 3,7 \times 10^{-6} \text{ k}\Omega$$

S1.6. 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 ± 5 °C dari suhu kalibrasi, serta non-linearitas untuk masing-masing rentang pengukuran. Untuk tipikal DMM acuan, spesifikasi mengklaim bahwa akurasi untuk rentang ukur 2 kΩ adalah sebesar 7 ppm dari pembacaan ditambah 0,25 ppm dari rentang.

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

$$U(\delta R_A) = 7 \times 0,000001 \times 1 \text{ k}\Omega + 0,25 \times 0,000001 \times 2 \text{ k}\Omega = 0,000 0075 \text{ k}\Omega$$

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

$$u(\delta R_A) = \frac{U(\delta R_A)}{\sqrt{3}} = 4,3 \times 10^{-6} \text{ k}\Omega$$

Nilai ketidakpastian ini diestimasi memiliki distribusi segi-4 dan dengan derajat kebebasan sebesar 200.

S1.7. 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, $U(\delta R_R)$, bernilai sebesar $5,0 \times 10^{-8} \text{ k}\Omega$. Sehingga nilai ketidakpastian baku yang bersumber dari resolusi DMM acuan adalah:

$$u(\delta R_R) = \frac{U(\delta R_R)}{\sqrt{3}} = 2,9 \times 10^{-8} \text{ k}\Omega$$

Nilai ketidakpastian ini diestimasi memiliki distribusi segi-4 dengan derajat kebebasan sebesar 200.

S1.8. **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:

$$u_c(C_X) = \sqrt{u^2(\bar{R}_S) + u^2(\delta R_S) + u^2(\delta R_A) + u^2(\delta R_R)} \quad \text{E.S1.2}$$

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 resistansi DC 1 k Ω dengan metode perbandingan langsung

Kontributor	Nilai estimasi		Ketidakpastian baku		Distribusi	Koefisien sensitivitas	Kontribusi	DoF
X_i	x_i		$u(x_i)$		PDF	c_i	$u(R_i)$	u_i
Pengukuran berulang standar	0,9999775	k Ω	5,8E-08	k Ω	tipe A	1	5,8E-08	4
Sertifikat standar	0,0000201	k Ω	3,7E-06	k Ω	norm/ tipe B	1	3,7E-06	∞
Akurasi standar	0	k Ω	4,3E-06	k Ω	segi-4/ tipe B	1	4,3E-06	200
Resolusi standar	0	k Ω	2,9E-08	k Ω	segi-4/ tipe B	1	2,9E-08	200
Nilai penunjukan alat	0,9999934	k Ω	-	-	-	-	-	-
C_x	0,000 004	k Ω	Ketidakpastian baku gabungan:				5,7E-06	
			Derajat kebebasan efektif:				585	
			Faktor cakupan 95 % tingkat kepercayaan:				2,0	
			Ketidakpastian bentangan (95%):				0,000 011	k Ω

S1.9. Hasil akhir dapat disajikan sebagai berikut:

Tabel S1.4. Laporan kalibrasi kalibrator resistansi DC dengan metode perbandingan langsung

Rentang (k Ω)	Penunjukan Alat (k Ω)	Koreksi Penunjukan (k Ω)	Ketidakpastian (k Ω)
2	0,999 9934	0,000 004	0,000 011

Resistansi DC diukur pada arus 1 mA. Ketidakpastian pengukuran dihitung dengan faktor cakupan $k = 2,0$ pada tingkat kepercayaan 95 %.

S2. Suplemen 2: Kalibrasi nominal 1 kΩ kalibrator resistansi DC dengan metode substitusi

S2.1. Untuk menentukan nilai koreksi dari penunjukan kalibrator resistansi DC dengan metode substitusi, diperlukan sebuah DMM dengan resolusi tinggi sebagai suatu standar transfer, dan sebuah standar resistor terkalibrasi sebagai standar acuan. Nilai nominal yang diperlukan sebagai standar acuan adalah sama besarnya dengan nilai nominal penunjukan kalibrator resistansi DC yang dikalibrasi. Pengukuran resistansi diatur pada rentang ukur 2 kΩ dan dilakukan secara 4-kawat. Pengukuran menggunakan kabel yang terpilin, terselungkup, dan memiliki efek gaya gerak listrik yang rendah. Arus kerja yang diumpankan DMM sebesar 1 mA. Arus kerja yang diumpankan DMM tersebut dipastikan tidak melebihi arus yang diizinkan baik untuk standar acuan maupun untuk kalibrator resistansi DC. Pengkondisian laboratorium dijaga pada suhu (23 ± 2) °C dan pada kelembaban relatif (60 ± 10) %RH. Pengukuran resistansi oleh DMM dioperasikan untuk pengambilan data sebanyak 5 (lima) kali pengulangan. Pengukuran ini diterapkan berturut-turut pada standar acuan kemudian pada kalibrator resistansi DC.

S2.2. Koreksi UUC untuk penunjukan resistansi dengan nilai nominal 1 kΩ dengan metode substitusi mengikuti model matematis berikut:

$$C_X = (\bar{r} + \delta r_R + \delta r_S + \delta r_L) \cdot (R_S + \delta R_D + \delta R_T + \delta R_P) - R_X \quad \text{E.S2.1}$$

Dimana:

- C_X : Koreksi penunjukan nilai nominal kalibrator resistansi DC,
- R_X : Nilai nominal yang ditunjukkan oleh kalibrator resistansi DC sebagai UUC,
- \bar{r} : Rata-rata rasio kedua pembacaan DMM sebagai standar transfer saat dihubungkan dengan resistor standar acuan dan saat dihubungkan dengan kalibrator resistansi DC,
- δr_R : Koreksi rasio yang disebabkan oleh keterbatasan resolusi DMM sebagai standar transfer,
- δr_S : Koreksi yang disebabkan oleh stabilitas jangka pendek DMM sebagai standar transfer,

- δr_L : Koreksi yang disebabkan oleh non-linearitas DMM sebagai standar transfer,
- R_S : Nilai resistor standar acuan yang telah diketahui dari kalibrasi,
- δR_D : Koreksi nilai resistor standar acuan berdasarkan *drift* yang diketahui dari riwayat kalibrasi,
- δR_T : Koreksi nilai resistor standar yang disebabkan oleh koefisien suhu,
- δR_P : Koreksi nilai resistor standar yang disebabkan oleh koefisien daya,

S2.3. Nilai penunjukan kalibrator resistansi DC

Nilai nominal 1 k Ω yang dikeluarkan oleh kalibrator resistansi DC adalah, $R_X = 0,999\ 9934\ k\Omega$.

S2.4. Pengulangan rasio kedua pembacaan DMM

Berdasarkan pengulangan, $n = 5$, terhadap nilai rasio dari kedua pembacaan DMM sebagai standar transfer saat dihubungkan dengan resistor standar acuan dan saat dihubungkan dengan kalibrator resistansi DC, rekaman data rasio disajikan sebagai berikut:

Tabel S2.1. Hasil pengukuran berulang

No.	Pembacaan thd. standar resistor acuan (R_{Si})	Pembacaan thd. kalibrator resistansi DC (R_{Xi})	Nilai rasio kedua pembacaan DMM ($r = \frac{R_{Xi}}{R_{Si}}$)
1	1,000 0438 k Ω	0,999 9774 k Ω	0,999 9336
2	1,000 0440 k Ω	0,999 9774 k Ω	0,999 9334
3	1,000 0442 k Ω	0,999 9775 k Ω	0,999 9333
4	1,000 0443 k Ω	0,999 9776 k Ω	0,999 9333
5	1,000 0443 k Ω	0,999 9777 k Ω	0,999 9334

Rata-rata dari hasil pengukuran berulang nilai rasio diperoleh sebesar:

$$\bar{r} = 0,999\ 9334\ k\Omega/k\Omega$$

dan dengan standar deviasinya sebesar:

$$s(r) = 0,000\ 0001\ k\Omega/k\Omega$$

Sehingga standar deviasi rata-rata yang diperoleh secara eksperimental, ESDM, sebagai ketidakpastian baku dari pengukuran berulang pada nilai rasio kedua pembacaan DMM saat dihubungkan dengan resistor standar acuan dan saat dihubungkan dengan kalibrator resistansi DC:

$$u(r) = s(\bar{r}) = \frac{s(r)}{\sqrt{n}} = 5,5 \times 10^{-8}\ k\Omega/k\Omega$$

Dan derajat kebebasannya sebesar:

$$\nu = 4$$

S2.5. Keterbatasan daya baca (resolusi) DMM

Keraguan terhadap keterbatasan daya baca (resolusi) DMM sehingga nilai yang ditampilkan merupakan suatu hasil pembulatan, terjadi dua kali baik pada saat membaca standar resistor acuan dan juga pada saat membaca kalibrator resistansi DC yang dikalibrasi. Koreksi rasio yang disebabkan oleh keterbatasan resolusi DMM sebagai standar transfer diestimasi sama dengan nol. Sedangkan nilai rentang paruh sebagai nilai ketidakpastian yang bersumber dari resolusi, $U(\delta r_R)$, bernilai sebesar $5,0 \times 10^{-8}\ k\Omega$ atau secara relatif bernilai sebesar $5,0 \times 10^{-8}\ k\Omega/k\Omega$.

Sehingga ketidakpastian baku yang bersumber dari resolusi DMM acuan adalah:

$$u(\delta r_R) = \frac{U(\delta r_R)}{\sqrt{6}} = 2,0 \times 10^{-8}\ k\Omega/k\Omega$$

Nilai ketidakpastian ini diestimasi memiliki distribusi segi-3 dengan derajat kebebasan sebesar 200.

S2.6. Stabilitas jangka pendek DMM

Dua proses pengukuran dengan DMM sebagai standar transfer memberikan kontribusi keraguan terhadap stabilitas pembacaan DMM saat pertama kali melakukan pengukuran pada standar resistor acuan kemudian diikuti dengan pengukuran pada kalibrator resistansi DC. Koreksi yang disebabkan oleh

stabilitas jangka pendek DMM sebagai standar transfer diestimasi sama dengan nol.

Nilai stabilitas pembacaan DMM ini diestimasi berdasarkan informasi pabrikan sebagaimana dituangkan dalam spesifikasi teknis yang menggambarkan stabilitas jangka pendek DMM. Untuk tipikal DMM acuan, spesifikasi mengklaim bahwa ketidakpastian 24 jam stabilitas jangka pendek untuk rentang ukur 2 k Ω adalah sebesar 1 ppm dari pembacaan ditambah 0,25 ppm dari rentang. Nilai rentang paruh sebagai nilai ketidakpastian yang bersumber dari stabilitas jangka pendek DMM, bernilai sebesar:

$$U(\delta r_S) = 1 \times 10^{-6} \times 1 \text{ k}\Omega + 0,25 \times 10^{-6} \times 2 \text{ k}\Omega = 1,5 \times 10^{-6} \text{ k}\Omega$$

atau secara relatif bernilai sebesar $1,5 \times 10^{-6} \text{ k}\Omega/\text{k}\Omega$.

Sehingga ketidakpastian baku yang bersumber dari stabilitas jangka pendek DMM acuan adalah:

$$u(\delta r_S) = \frac{U(\delta r_S)}{\sqrt{6}} = 6,1 \times 10^{-7} \text{ k}\Omega/\text{k}\Omega$$

Nilai ketidakpastian ini diestimasi memiliki distribusi segi-3 dengan derajat kebebasan sebesar 200.

S2.7. Non-linearitas DMM

Pembacaan nilai dalam suatu rentang pengukuran pada DMM dipengaruhi oleh deviasi nilai aktual yang dibaca DMM tersebut terhadap pendekatan kurva secara linear yang dihasilkan dari kalibrasi beberapa titik ukur dalam rentang tersebut. Untuk mendapatkan nilai non-linearitas DMM pada rentang 2 k Ω , beberapa nilai standar resistor yang diketahui diukur secara langsung oleh DMM tersebut. Salinan data pengukuran dapat dilihat pada Tabel S2.2 berikut ini:

Tabel S2.2. Data pengukuran Untuk mendapatkan nilai non-linearitas DMM

Rentang (kΩ)	Titik Ukur (kΩ)	Pembacaan Alat (kΩ)	Koreksi (kΩ)
2	0,5	0,499 9773	-0,000 0142
	1,0	0,999 9559	-0,000 0279
	1,2	1,199 9459	-0,000 0319
	1,5	1,499 9324	-0,000 0403
	1,875	1,874 9188	-0,000 0489

Non-linearitas DMM diperoleh dengan menghitung akar kuadrat dari jumlah kuadrat residu, SSR (*sum square residual*), dibagi derajat kebebasan, $\nu = n - 2$. Residu tersebut adalah selisih nilai koreksi pembacaan oleh DMM dengan nilai pendekatan (*fitting*) terhadap persamaan kurva kalibrasi pada rentang 2 kΩ.

Nilai ketidakpastian baku dari kontributor non-linearitas DMM, $u(\delta r_L)$, dapat diestimasi dengan persamaan:

$$u(\delta r_L) = \sqrt{\frac{SSR}{n-2}} = 6,3 \times 10^{-7} \text{ k}\Omega$$

Atau secara relatif relatif bernilai sebesar $6,3 \times 10^{-7} \text{ k}\Omega/\text{k}\Omega$.

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

S2.8. Nilai sertifikat kalibrasi standar resistor acuan

Sertifikat kalibrasi standar resistor acuan menyatakan bahwa nilai pengukuran standar resistor beserta ketidakpastiannya adalah:

$$R_S \pm U(R_S) = (1,000\ 0571 \pm 0,000\ 0023) \text{ k}\Omega$$

Standar resistor dikalibrasi pada arus kerja 3,16 mA. Ketidakpastian pengukuran dihitung dengan faktor cakupan $k = 2$ dan pada tingkat kepercayaan 95 %.

Sehingga ketidakpastian baku yang bersumber dari sertifikat kalibrasi, $u(R_S)$, dihitung dengan:

$$u(R_S) = \frac{U(R_S)}{2} = 1,2 \times 10^{-6} \text{ k}\Omega$$

Nilai ketidakpastian ini diestimasi memiliki distribusi normal dengan derajat kebebasan sebesar tak berhingga.

S2.9. *Drift* kalibrasi standar resistor acuan

Berdasarkan 3 (tiga) riwayat kalibrasi terakhir dari standar resistor acuan, nilai *drift* standar tersebut dapat diestimasi. Tabel S2.3 berikut menyajikan kedua riwayat kalibrasi itu:

Tabel S2.3. Tiga riwayat kalibrasi standar resistor acuan

Tahun	Nilai Standar Resistor (kΩ)	Ketidakpastian (kΩ)
2016	1,000 0438	0,000 0023
2019	1,000 0531	0,000 0023
2022	1,000 0571	0,000 0023

Pendekatan kurva (*curve fitting*) linear dilakukan untuk mendapatkan *drift* nilai standar resistor acuan setiap tahun. Kemiringan garis (pergeseran nilai dalam setahun) didapatkan sebesar:

$$m = 2,2 \times 10^{-6} \text{ k}\Omega/\text{tahun}$$

sehingga koreksi nilai standar resistor acuan berdasarkan *drift* yang diketahui dari riwayat kalibrasi ini dapat diestimasi sebesar:

$$\delta R_D = m \times \text{tahun} = 2,2 \times 10^{-6} \frac{\text{k}\Omega}{\text{tahun}} \times 1 \text{ tahun} = 2,2 \times 10^{-6} \text{ k}\Omega.$$

Nilai ketidakpastian baku dari kontributor *drift* standar resistor acuan, $u(\delta R_D)$, dapat diestimasi dengan persamaan:

$$u(\delta R_D) = \sqrt{\frac{SSR}{n-2}} = 2,2 \times 10^{-6} \text{ k}\Omega$$

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

S2.10. Pengaruh suhu pada standar resistor acuan

Pengkondisian laboratorium yang dijaga pada suhu $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ berkontribusi pada perubahan nilai standar resistor acuan. Koreksi yang disebabkan oleh pengaruh suhu pada standar resistor acuan diestimasi sama dengan nol.

Nilai rentang paruh sebagai nilai ketidakpastian yang bersumber dari pengaruh suhu pada standar resistor acuan, $U(\delta R_T)$, dapat diestimasi dari setengah dari selisih masing-masing nilai standar resistor pada suhu $21 ^\circ\text{C}$ dan $25 ^\circ\text{C}$.

Dengan mengetahui kedua nilai koefisien suhu *alpha* (kemiringan kurva pada suhu $23 ^\circ\text{C}$) dan koefisien suhu *beta* (laju perubahan kemiringan kurva), Estimasi nilai standar resistor pada suhu $21 ^\circ\text{C}$ dan $25 ^\circ\text{C}$ dapat diketahui.

Untuk tipikal standar resistor, kedua nilai koefisien suhu *alpha* dan *beta* diketahui, masing-masing secara berturut-turut sebesar:

$$\alpha = -6.8 \times 10^{-8} / ^\circ\text{C} \text{ dan } \beta = -1.7 \times 10^{-8} / ^\circ\text{C}^2 .$$

Estimasi nilai standar resistor pada suhu t dapat diformulasikan sebagai berikut:

$$R_t = R_{23} \cdot [1 + \alpha \cdot (t - 23) + \beta \cdot (t - 23)^2]$$

$$\text{Sehingga } R_{21} = 1,000\ 0572\ \text{k}\Omega \text{ dan } R_{25} = 1,000\ 0569\ \text{k}\Omega .$$

Nilai ketidakpastian dari kontributor pengaruh suhu pada standar resistor acuan, $U(\delta R_T)$, dapat diestimasi dengan persamaan:

$$U(\delta R_T) = \frac{1}{2} \times |R_{23} - R_{21}| = 1,4 \times 10^{-7}\ \text{k}\Omega$$

Nilai ketidakpastian ini diestimasi memiliki distribusi segi-4 dengan derajat kebebasan sebesar 200. Sehingga nilai ketidakpastian baku yang bersumber dari pengaruh suhu pada standar resistor acuan adalah:

$$u(\delta R_T) = \frac{U(\delta R_T)}{\sqrt{3}} = 7,9 \times 10^{-8}\ \text{k}\Omega$$

S2.11. Pengaruh daya disipasi pada standar resistor acuan

Arus kerja yang diumpankan DMM akan menimbulkan daya disipasi kepada standar resistor acuan. Arus kerja yang diumpankan DMM pada rentang ukur 2 k Ω adalah sebesar 1 mA, sedangkan arus kerja yang diumpankan kepada standar resistor acuan saat ia dikalibrasi adalah sebesar 3,16 mA. Untuk tipikal standar resistor acuan 1 k Ω , spesifikasi menyatakan, bahwa arus kerja maksimal yang dapat diumpankan adalah sebesar 10 mA dan hanya jika arus tersebut lebih besar dari 2 mA, pengaruh arus kerja ini berkontribusi sebesar 1 ppm. Nilai rentang paruh sebagai nilai ketidakpastian yang bersumber dari pengaruh daya disipasi pada standar resistor acuan, bernilai sebesar:

$$U(\delta R_P) = 1 \times 10^{-6} \times 1 \text{ k}\Omega = 1,0 \times 10^{-6} \text{ k}\Omega$$

Nilai ketidakpastian ini diestimasi memiliki distribusi segi-4 dengan derajat kebebasan sebesar 200. Sehingga nilai ketidakpastian baku yang bersumber dari pengaruh daya disipasi pada standar resistor acuan adalah:

$$u(\delta R_P) = \frac{U(\delta R_P)}{\sqrt{3}} = 5,8 \times 10^{-7} \text{ k}\Omega$$

S2.12. Koefisien sensitifitas

Masing-masing koefisien sensitifitas untuk setiap kontributor ketidakpastian dapat diturunkan secara parsial berdasarkan model matematis sebagaimana persamaan E.S2.1. Nilai-nilai tersebut adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} c(\bar{r}) &= c(\delta r_R) = c(\delta r_S) = c(\delta r_L) \\ &= (R_S + \delta R_D + \delta R_T + \delta R_P) \text{ k}\Omega \\ &= (1,000\ 0571 + 0,000\ 0022) \text{ k}\Omega \\ &= 1,000\ 0593 \text{ k}\Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c(R_S) &= c(\delta R_D) = c(\delta R_T) = c(\delta R_P) \\ &= (\bar{r} + \delta r_R + \delta r_S + \delta r_L) \text{ k}\Omega/\text{k}\Omega \\ &= 0,999\ 9334 \text{ k}\Omega/\text{k}\Omega \end{aligned}$$

S2.13. Tabel S2.4 berikut menyajikan bujet perhitungan nilai numerik dan ketidakpastian untuk peningkatan kemampuan melalui ketidakpastian pengukuran yang telah disajikan di atas.

Tabel S2.4. Bujet perhitungan untuk kalibrasi kalibrator resistansi DC 1 k Ω dengan metode substitusi

Kontributor	Nilai estimasi		Ketidakpastian baku		Distribusi	Koefisien sensitivitas		Kontribusi	DoF	
	X_i	x_i	$u(x_i)$			C_i	$u(R_i)$			u_i
Pengulangan rasio kedua pembacaan DMM	0,999 9334	k Ω /k Ω	5,5E-08	k Ω /k Ω	tipe A	1,000 0593	k Ω	5,5E-08	4	
Resolusi DMM	0,000 0000	k Ω /k Ω	2,0E-08	k Ω /k Ω	segi-3/ tipe B	1,000 0593	k Ω	2,0E-08	200	
Stabilitas jangka pendek DMM	0,000 0000	k Ω /k Ω	4,3E-07	k Ω /k Ω	segi-3/ tipe B	1,000 0593	k Ω	4,3E-07	200	
Non-linearitas DMM	0,000 0000	k Ω /k Ω	6,3E-07	k Ω /k Ω	norm/ tipe B	1,000 0593	k Ω	6,3E-07	200	
Sertifikat kalibrasi Standar Resistor Acuan	1,000 0571	k Ω	1,2E-06	k Ω	norm/ tipe B	0,999 9334	k Ω /k Ω	1,1E-06	∞	
<i>Drift</i> kalibrasi Standar Resistor Acuan	0,000 0022	k Ω	2,2E-06	k Ω	norm/ tipe B	0,999 9334	k Ω /k Ω	2,2E-06	200	
Pengaruh suhu pada Standar Resistor Acuan	0,000 0000	k Ω	7,9E-08	k Ω	segi-4/ tipe B	0,999 9334	k Ω /k Ω	7,9E-08	200	
Pengaruh daya disipasi pada Standar Resistor Acuan	0,000 0000	k Ω	5,8E-07	k Ω	segi-4/ tipe B	0,999 9334	k Ω /k Ω	5,8E-07	200	
Penunjukan Kalibrator Resistansi DC	0,999 9934	k Ω								
C_x	-0,000 0007	k Ω	Ketidakpastian baku gabungan:				2,6E-06			
			Derajat kebebasan efektif:				431			
			Faktor cakupan 95 % tingkat kepercayaan:				2,0			
			Ketidakpastian bentangan (95%):				0,000 0053			k Ω

S2.14. Hasil akhir dapat disajikan sebagai berikut:

Tabel S2.5. Laporan kalibrasi kalibrator resistansi DC dengan metode substitusi

Rentang (k Ω)	Penunjukan Alat (k Ω)	Koreksi Penunjukan (k Ω)	Ketidakpastian (k Ω)
2	0,999 9934	-0,000 0007	0,000 0053

Resistansi DC diukur pada arus 1 mA. 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] Instruksi Kerja SNSU-BSN, I.ME.2.05 Kalibrasi Resistor DC Dengan Menggunakan Metode Langsung, 2023.
- [6] Instruksi Kerja SNSU-BSN, I.ME.2.07 Kalibrasi Resistor DC Dengan Menggunakan Metode Substitusi, 2023.