

PEMELIHARAAN SEBUAH GRUP RESISTOR STANDAR UNTUK MENENTUKAN LAJU PERGESERAN NILAI RESISTOR STANDAR ACUAN MENGGUNAKAN DCCB

MAINTENANCE OF A STANDARD RESISTOR GROUP TO DETERMINE THE DRIFT OF THE REFERENCE STANDARD RESISTOR VALUE USING DCCB

Agah Faisal, Muhammad Azzumar, Lukluk Khairiyati

Pusat Penelitian Metrologi Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI),
Kompleks Puspiptek, Serpong, Tangerang Selatan 15314
faisal@kim.lipi.go.id

ABSTRAK

Pemeliharaan sebuah grup resistor standar telah dikembangkan menjadi pengukuran yang diotomasi secara keseluruhan dengan maksud digunakan untuk memverifikasi resistor standar acuan di Puslit Metrologi LIPI. Dua metode, yaitu interkomparasi dan *scaling-up*, diterapkan untuk mendapatkan pembacaan rasio oleh *direct current comparator bridge* (DCCB). Sistem pengukuran yang digunakan beroperasi secara otomatis untuk melakukan sebanyak 47 sesi pengukuran. Dengan mengetahui nilai aktual awal dari rata-rata resistor 1 Ω dalam grup dan mengasumsikan nilainya tidak berubah selama periode observasi dalam satu tahun maka laju pergeseran nilai dari resistor standar acuan 1 k Ω dapat ditentukan. Hasil laju tersebut adalah (220 ± 15) n Ω/Ω per tahun dan dapat memverifikasi klaim yang ditetapkan oleh pabrikan.

Kata kunci: pemeliharaan, grup resistor, laju pergeseran, resistor standar acuan, DCCB

ABSTRACT

The maintenance of a standard resistor group has been developed to be a measurement that fully automated in order to be used for verifying the reference standard resistor of Research Center for Metrology LIPI. Both of intercomparison and scaling-up methods are applied to obtain the ratio reading by direct current comparator bridge (DCCB). The measurement system used was run automatically to do as many as 47 sessions of measurement. By knowing the initial actual value of the average of 1 Ω in the group and assuming that the value does not change for one year period of the observation, the shift rate value of the reference standard resistor of 1 k Ω can be determined. The rate was found as (220 ± 15) n Ω/Ω per year and it verifies the claim of its manufacturer.

Keywords: maintenance, resistor group, drift, reference standard resistor, DCCB

PENDAHULUAN

Stabilitas jangka panjang dari nilai suatu resistor standar yang dijadikan sebagai acuan memiliki peranan penting dalam menjamin akurasi pengukuran resistansi yang dikalibrasi. Nilai acuan dapat berubah setelah periode waktu berjalan sehingga penyimpangan nilai resistor standar setelah kalibrasi terakhir perlu dikoreksi yang bertujuan untuk mengurangi kesalahan sistematis dalam pengukuran. Perkiraan besarnya koreksi yang diimplementasikan memerlukan riwayat pengukuran dari resistor acuan tersebut.

Resistor standar yang dijadikan acuan di laboratorium metrologi kelistrikan adalah resistor 1 k Ω Tinsley 5430. Berdasarkan spesi-

fikasi pabrikannya, nilai yang diberikan untuk stabilitas jangka panjang adalah lebih kecil dari 1 $\mu\Omega/\Omega$ /tahun.^[1] Riwayat kalibrasi terakhir resistor standar acuan ini adalah bulan Oktober 2015 sehingga implementasi langsung nilai hasil kalibrasi tersebut pada waktu berikutnya dapat berisiko pada kesalahan hasil pengukuran resistansi yang dikalibrasi. Suatu prosedur *assessment* terhadap penyimpangan nilai resistansi berdasarkan periode waktu diperlukan untuk memverifikasi tingkat stabilitas jangka panjang resistor tersebut. Lebih daripada itu, prosedur asesmen tersebut dipastikan dapat menentukan karakteristik perkiraan besarnya nilai yang perlu dikoreksi kepada hasil pengukuran menggunakan resistor standar acuan ini.

Adopsi *Quantized Hall Resistance* (QHR) di Puslit Metrologi LIPI sebagai suatu sistem yang merepresentasikan resistor standar berdasarkan konstanta fundamental telah dijadikan acuan primer untuk penetapan nilai resistor standar. Capaian nilai ketidakpastian pengukuran tersebut yang telah diperoleh Khairiyati adalah sekitar $0,3 \mu\Omega/\Omega$ dengan simpangan baku sebesar $0,13 \mu\Omega/\Omega$ dalam satu minggu pengukuran resistor standar $1 \text{ k}\Omega$ Tinsley 5430.^[2] Meskipun capaian tersebut cukup menjanjikan, namun diperlukan periode waktu satu tahun untuk memverifikasi tingkat stabilitas jangka panjang resistor standar acuan. Salah satu kendala bahwa adopsi QHR tidak menjadi prosedur baku untuk *assessment* ini adalah karena harus selalu mendatangkan helium cair dari luar negeri dengan kapasitas enam puluh liter yang habis digunakan hanya dalam waktu satu pekan.

Alternatif lain yang dikembangkan adalah pemeliharaan prosedur *assessment* terhadap tingkat kestabilan resistor standar acuan. Pengalaman National Bureau of Standards (NBS) dalam memelihara sebuah grup resistor manganin standar 1Ω menginformasikan bahwa nilai rata-rata dari grup tersebut memiliki tingkat kestabilan yang sangat tinggi. *Assessment* telah dilakukan selama 85 tahun, namun pemeliharaan nilai grup tersebut hanya berubah lebih kecil dari $10 \mu\Omega/\Omega$.^[3] Sehubungan dengan hal itu, banyak dari laboratorium standar nasional di dunia yang belum memiliki standar berbasis QHR yang menggunakan grup resistor standar berbahan manganin sebagai standar resistor acuan primer.^[4]

Berdasarkan latar belakang tersebut, tujuan dari penelitian ini adalah memelihara sebuah grup resistor standar yang dikembangkan yang terdiri atas 7 buah resistor standar 1Ω , 1 buah resistor standar 10Ω , 1 buah resistor standar 100Ω , dan 1 buah resistor standar acuan $1 \text{ k}\Omega$. Metode rasio berdasarkan *Direct Current Comparator Bridge* (DCCB) dilakukan untuk interkomparasi 1:1 dan untuk *scaling-up* 10:1. Pemeliharaan tujuh buah resistor standar 1Ω memiliki tingkat kestabilan nilai rata-rata mencapai empat kali lebih tinggi dibandingkan tingkat kestabilan jangka panjang resistor standar acuan Puslit Metrologi LIPI sehingga dapat dilakukan verifikasi.

TINJAUAN PUSTAKA

Terdapat beberapa parameter ukur dari suatu resistor standar yang perlu dikarakterisasi, yaitu *drift* atau tingkat stabilitas jangka panjang, koefisien tekanan, koefisien suhu, dan koefisien daya.^[3,5] Keempat parameter tersebut merupakan kontributor ketidakpastian pengukuran sehingga besaran ketidakpastian pengukuran resistansi bergantung pada kemampuan memberikan estimasi pengaruh waktu dan mengondisikan lingkungan terhadap nilai resistansi. Dari keempat parameter tersebut, karakterisasi tingkat stabilitas jangka panjang menjadi satu-satunya parameter yang membutuhkan waktu evaluasi lama. Tidak seperti parameter koefisien tekanan, koefisien suhu, dan koefisien daya yang dapat ditentukan dengan menggunakan sistem pengondisian, parameter tingkat stabilitas jangka panjang hanya dapat dievaluasi berdasarkan perjalanan waktu.

Quantized Hall Resistance (QHR) telah ditetapkan menjadi standar primer untuk unit Ohm dalam Sistem internasional untuk satuan pengukuran (*SI unit*), satuan berdasarkan kesepakatan internasional sejak 1 Januari 1990 yang menyimpulkan bahwa representasi praktis untuk satuan Ohm adalah melalui nilai resistansi yang berhubungan dengan rasio konstanta fundamental, h/e^2 .^[6] Nilai-nilai acuan diskrit yang dihasilkan oleh QHR pada kondisi pengukuran yang tepat memiliki tingkat stabilitas dan reproduksibilitas tinggi yang tidak dipengaruhi oleh material divaisnya maupun tempat pengoperasiannya.^[7] QHR telah menjadi sistem acuan untuk memonitor *time-dependence* dari suatu standar resistor. Laju pergeseran nilai rata-rata grup adalah sebesar $-(0.0529 \pm 0.0040) \mu\Omega/\Omega/\text{tahun}$ melalui monitoring terhadap sebuah grup resistor manganin standar dengan nilai nominal 1Ω .^[8] Laju pergeseran tersebut ditentukan melalui suatu persamaan yang diturunkan oleh data-data yang disesuaikan dengan *least-square fit* untuk mendapatkan suatu persamaan garis lurus. Tingkat stabilitas dari nilai rata-rata grup resistor standar dalam laporan tersebut bisa menjadi lebih superior dibandingkan tingkat stabilitas resistor standar yang dijadikan acuan oleh Puslit Metrologi LIPI.

Prosedur yang dikembangkan untuk memverifikasi tingkat stabilitas jangka panjang resistor standar acuan di Puslit Metrologi LIPI adalah melalui pemeliharaan sebuah grup resistor standar.^[8] Semua resistor standar yang dilibatkan dalam grup memiliki tipe *wire-wound manganin resistor* dengan empat terminal dan perlu dioperasikan dalam suhu lingkungan yang stabil. Perbandingan satu resistor dengan resistor lainnya dilakukan setiap bulan dalam jangka waktu satu tahun dan metode perbandingan yang digunakan adalah metode rasio berdasarkan *Direct Current Comparator Bridge (DCCB)*.^[9]

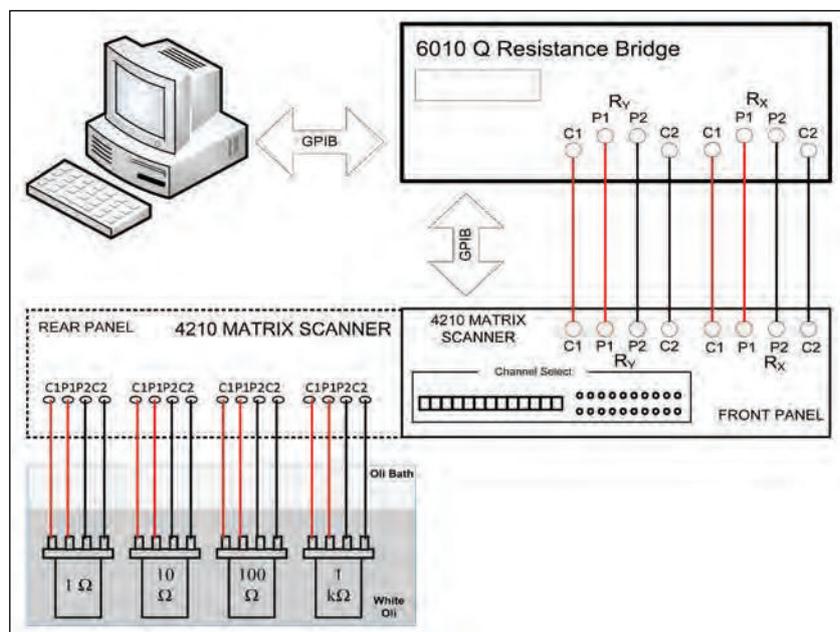
Amplifikasi dilakukan sehingga dua metode rasio diimplementasikan dalam pemeliharaan grup ini. Pertama adalah metode rasio interkomparasi 1:1 yang diperbandingkan pada dua resistor dari tujuh buah resistor standar dengan nominal 1 Ω untuk menetapkan nilai estimasi dari salah satu resistor standar transfer. Kedua adalah metode rasio *scaling-up* 10:1 yang diperbandingkan pada dua resistor, yakni dari resistor standar transfer 1 Ω ke resistor standar 10 Ω, lalu ke resistor standar 100 Ω, dan kemudian ke resistor standar acuan 1 kΩ untuk menentukan nilai estimasi dari resistor standar acuan 1 kΩ. Kedua metode tersebut, baik interkomparasi maupun *scaling-up*, dilakukan secara serial dalam satu set pengukuran. Dengan laju pergeseran nilai rata-rata grup resistor manganin

standar 1 Ω yang jauh lebih kecil dibandingkan laju pergeseran nilai resistor standar acuan 1 kΩ maka laju pergeseran nilai resistor acuan 1 kΩ menjadi dominan dalam menentukan stabilitas jangka panjang dari resistor standar acuan 1 kΩ.

METODOLOGI

a. *Direct Current Comparator Bridge (DCCB)*

Pengukuran terhadap seluruh resistor dalam sebuah grup dilakukan dengan *Direct Current Comparator Bridge (DCCB)*. Instrumen ini digunakan untuk mengukur suatu resistansi yang belum diketahui, R_x , terhadap resistansi yang sudah diketahui, R_y , berdasarkan rasio pembacaan $r_{xy} = R_x/R_y$. Pada suatu pengukuran, hanya dua buah resistor yang diperbandingkan di mana sebuah resistor menempati posisi R_x , sedangkan yang lainnya menempati posisi R_y . Agar pengukuran dapat dilakukan secara berkesinambungan tanpa harus menyambung dan melepas berkali-kali untuk resistor yang lainnya, *scanner* digunakan sebagai pengatur posisi resistor yang dipasang diantara DCCB dan resistor dalam grup. Untuk mengurangi kesalahan pengukuran yang diakibatkan oleh perubahan suhu kerja, bak oli digunakan sebagai media pencelupan resistor untuk mengondisikan suhu pengukuran.



Gambar 1. Diagram Skematis untuk Pengukuran Resistor

Tabel 1. Skema Rasio Interkomparasi

R_x/R_y	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	R_7
R_1		r_{12}	r_{13}	r_{14}	r_{15}	r_{16}	r_{17}
R_2	r_{21}		r_{23}	r_{24}	r_{25}	r_{26}	r_{27}
R_3	r_{31}	r_{32}		r_{34}	r_{35}	r_{36}	r_{37}
R_4	r_{41}	r_{42}	r_{43}		r_{45}	r_{46}	r_{47}
R_5	r_{51}	r_{52}	r_{53}	r_{54}		r_{56}	r_{57}
R_6	r_{61}	r_{62}	r_{63}	r_{64}	r_{65}		r_{67}
R_7	r_{71}	r_{72}	r_{73}	r_{74}	r_{75}	r_{76}	

Baik DCCB maupun *scanner*, keduanya dioperasikan secara otomatis dengan program yang dijalankan oleh komputer. Diagram skematis sistem pengukuran resistor standar, sebagaimana terlihat pada Gambar 1, berisi peralatan-peralatan yang terdiri atas DCCB, *scanner*, bak oli, grup resistor standar, dan seperangkat komputer.

b. Interkomparasi 1:1

Metode rasio interkomparasi 1:1 dilakukan pada tujuh buah resistor standar 1 Ω , di mana setiap resistor menempati posisi R_x dan posisi R_y dari DCCB secara bergantian. Jumlah rasio interkomparasi, $r_{xy} = R_x/R_y$, yang dibaca oleh DCCB dengan skema tersebut adalah sebanyak 42 buah. Skema rasio interkomparasi yang dihasilkan dapat didaftarkan sebagaimana pada Tabel 1.

Rasio-rasio berkebalikan, seperti r_{12} dan r_{21} , atau pasangan yang lainnya, secara ideal jika dikalikan adalah sama dengan 1, karena merupakan perbandingan dari resistor yang sama. Hasil perkalian berbeda menunjukkan adanya kesalahan sistematik pada DCCB. Dua nilai rasio yang berkebalikan untuk dua pasang resistor standar dirata-ratakan untuk mengurangi kesalahan sistematik tersebut sehingga secara matematis dapat diekspresikan sebagaimana pada Persamaan (1). Setelah itu jumlah rasio interkomparasi yang sudah dirata-ratakan menjadi 21 buah.

$$a_{xy} = \frac{r_{xy} + (1/r_{yx})}{2} \quad (1)$$

Nilai dari setiap resistor standar 1 Ω dapat ditentukan berdasarkan nilai rata-rata grup standar resistor, \bar{R} , dan rasio interkomparasi

yang sudah dirata-ratakan tersebut (a_{xy}). Secara matematis, nilai dari setiap resistor standar dapat diekspresikan sebagaimana pada Persamaan (2)–(8).

$$R_1 = \bar{R} \cdot \left[1 + \frac{a_{12} - a_{31} + a_{14} - a_{51} + a_{16} - a_{71}}{7} \right] \quad (2)$$

$$R_2 = \bar{R} \cdot \left[1 + \frac{-a_{12} + a_{23} - a_{42} + a_{25} - a_{62} + a_{27}}{7} \right] \quad (3)$$

$$R_3 = \bar{R} \cdot \left[1 + \frac{a_{31} - a_{23} + a_{34} - a_{53} + a_{36} - a_{73}}{7} \right] \quad (4)$$

$$R_4 = \bar{R} \cdot \left[1 + \frac{-a_{14} + a_{42} - a_{34} + a_{45} - a_{64} + a_{47}}{7} \right] \quad (5)$$

$$R_5 = \bar{R} \cdot \left[1 + \frac{a_{51} - a_{25} + a_{53} - a_{45} + a_{56} - a_{75}}{7} \right] \quad (6)$$

$$R_6 = \bar{R} \cdot \left[1 + \frac{-a_{16} + a_{62} - a_{36} + a_{64} - a_{56} + a_{67}}{7} \right] \quad (7)$$

$$R_7 = \bar{R} \cdot \left[1 + \frac{a_{71} - a_{27} + a_{73} - a_{47} + a_{75} - a_{67}}{7} \right] \quad (8)$$

c. *Scaling-up* 10:1

Metode rasio *scaling-up* 10:1 dilakukan pada salah satu dari tujuh resistor standar 1 Ω ($R_{1\Omega}$), resistor standar 10 Ω ($R_{10\Omega}$), resistor standar 100 Ω ($R_{100\Omega}$), dan resistor standar acuan 1 k Ω ($R_{1k\Omega}$). Sebuah resistor standar dengan nilai sepuluh kali lebih besar menempati posisi R_x , sedangkan yang satunya menempati posisi R_y dari DCCB. Jumlah rasio *scaling-up* 10:1 yang dibentuk kemudian dibaca oleh DCCB dengan skema tersebut sebanyak tiga buah, masing-masing adalah $r_{10\Omega:1\Omega}$, $r_{100\Omega:10\Omega}$, dan $r_{1k\Omega:100\Omega}$. Nilai perkiraan dari resistor standar acuan 1 k Ω ($R_{1k\Omega}$) dapat ditentukan berdasarkan ketiga nilai rasio tersebut dan nilai perkiraan salah satu dari tujuh resistor standar 1 Ω ($R_{1\Omega}$).

$$R_{1k\Omega} = r_{10\Omega:1\Omega} \cdot r_{100\Omega:10\Omega} \cdot r_{1k\Omega:100\Omega} \cdot R_{1\Omega} \quad (9)$$

Pemeliharaan sebuah grup resistor standar dengan total sejumlah sepuluh resistor, yang terdiri atas 7 buah resistor 1 Ω , 1 buah resistor 10 Ω , 1 buah resistor 100 Ω , dan 1 buah resistor 1 k Ω , dicelupkan ke dalam bak berisi oli putih. Oli tersebut memiliki resistansi yang sangat tinggi dan kekentalan yang sangat rendah. Suhu bak oli dikendalikan pada level $(23,0 \pm 0,1)^\circ\text{C}$, sedangkan suhu lingkungan dijaga pada level

Tabel 2. Urutan Pengoperasian secara Lengkap Pengukuran dan Penetapan Posisi Resistor R_x dan R_y

No	R_x	R_y	Arus (A)	No	R_x	R_y	Arus (A)	No	R_x	R_y	Arus (A)
1	R_1	R_2	0,05	17	R_5	R_4	0,05	33	R_6	R_4	0,05
2	R_3	R_4	0,05	18	R_7	R_6	0,05	34	R_1	R_5	0,05
3	R_5	R_6	0,05	19	R_3	R_1	0,05	35	R_2	R_7	0,05
4	R_7	R_1	0,05	20	R_4	R_2	0,05	36	R_3	R_6	0,05
5	R_2	R_3	0,05	21	R_7	R_5	0,05	37	R_4	R_1	0,05
6	R_4	R_5	0,05	22	R_1	R_6	0,05	38	R_5	R_2	0,05
7	R_6	R_7	0,05	23	R_4	R_3	0,05	39	R_7	R_3	0,05
8	R_1	R_3	0,05	24	R_8	R_7	0,01	40	R_8	R_4	0,01
9	R_2	R_4	0,05	25	R_2	R_6	0,05	41	R_6	R_2	0,05
10	R_5	R_7	0,05	26	R_1	R_4	0,05	42	R_5	R_1	0,05
11	R_9	R_8	0,001	27	R_5	R_3	0,05	43	R_7	R_4	0,05
12	R_2	R_1	0,05	28	R_{10}	R_9	0,0001	44	R_6	R_3	0,05
13	R_3	R_5	0,05	29	R_4	R_7	0,05	45	R_7	R_2	0,05
14	R_4	R_6	0,05	30	R_6	R_1	0,05	46	R_8	R_1	0,01
15	R_1	R_7	0,05	31	R_2	R_5	0,05	47	R_6	R_5	0,05
16	R_3	R_2	0,05	32	R_3	R_7	0,05	-	-	-	-

Tabel 3. Riwayat Pengukuran yang Dilakukan pada Awal Observasi

R_x/R_y	r_{xy}	a_{xy}	R_x/R_y	r_{xy}	a_{xy}	R_x/R_y	r_{xy}	a_{xy}
R_1/R_2	1,00000264	$a_{12} =$	R_2/R_5	1,00000113	$a_{25} =$	R_4/R_6	1,00000801	$a_{64} =$
R_2/R_1	0,99999724	1,00000270	R_5/R_2	0,99999876	1,00000119	R_6/R_4	0,99999187	0,99999193
R_1/R_3	0,99999452	$a_{31} =$	R_2/R_6	1,00000607	$a_{62} =$	R_4/R_7	1,00000862	$a_{47} =$
R_3/R_1	1,00000539	1,00000544	R_6/R_2	0,99999381	0,99999387	R_7/R_4	0,99999127	1,00000868
R_1/R_4	1,00000071	$a_{14} =$	R_2/R_7	1,00000668	$a_{27} =$	R_5/R_6	1,00000495	$a_{65} =$
R_4/R_1	0,99999917	1,00000077	R_7/R_2	0,99999321	1,00000673	R_6/R_5	0,99999494	1,00000500
R_1/R_5	1,00000377	$a_{51} =$	R_3/R_4	1,00000610	$a_{34} =$	R_5/R_7	1,00000555	$a_{75} =$
R_5/R_1	0,99999610	0,99999617	R_4/R_3	0,99999378	1,00000616	R_7/R_5	0,99999433	0,99999439
R_1/R_6	1,00000873	$a_{16} =$	R_3/R_5	1,00000916	$a_{53} =$	R_6/R_7	1,00000061	$a_{67} =$
R_6/R_1	0,99999116	1,00000878	R_5/R_3	0,99999071	0,99999077	R_7/R_6	0,99999929	1,00000066
R_1/R_7	1,00000934	$a_{71} =$	R_3/R_6	1,00001411	$a_{36} =$	R_6/R_1	9,99996409	-
R_7/R_1	0,99999054	0,99999060	R_6/R_3	0,99998574	1,00001418	R_1/R_4	9,99997122	-
R_2/R_3	0,99999185	$a_{23} =$	R_3/R_7	1,00001473	$a_{73} =$	R_7/R_7	10,00005758	-
R_3/R_2	1,00000804	0,99999191	R_7/R_3	0,99998516	0,99998521	R_8/R_8	9,99997905	-
R_2/R_4	0,99999796	$a_{42} =$	R_4/R_5	1,00000305	$a_{45} =$	R_{10}/R_9	10,00006204	-
R_4/R_2	1,00000192	1,00000198	R_5/R_4	0,99999683	1,00000311	-	-	-

(23 ± 2)°C dengan kelembaban relatif (55 ± 10) %RH.

Suatu program pengukuran dibangun untuk mengoperasikan pemeliharaan sebuah grup resistor standar yang dijalankan secara otomatis menggunakan seperangkat komputer. Secara

total, skema perbandingan dari seluruh resistor yang berada dalam grup tersebut berjumlah 47 buah pembacaan rasio, yang terdiri atas 42 buah skema pengukuran metode rasio interkomparasi 1:1, 3 buah skema pengukuran metode rasio *scaling-up* 10:1, dan 2 buah skema

pengukuran rasio *scaling-up* 10:1 tambahan. Dua buah skema tambahan ini adalah skema R_1 dan skema R_7 yang dilakukan pada dua buah dari tujuh resistor standar 1Ω ($R_{1\Omega}$), yaitu R_1 dan R_7 sehingga masing-masing diperoleh rasio $r_{10\Omega:1\Omega}$ berdasarkan perbandingannya terhadap resistor standar dengan nominal 10Ω ($R_{10\Omega}$). Skema tambahan ini digunakan untuk verifikasi penentuan nilai resistor standar 10Ω ($R_{10\Omega}$) dari mata rantai perbandingan lain.

Setiap resistor menempati posisi R_x dan R_y dari DCCB secara bergantian. Arus yang dialirkan pada setiap resistor yang menempati posisi R_x adalah sebesar 0,05 A, 0,01 A, 0,001 A, dan 0,0001 A secara berturut-turut untuk masing-masing resistor dengan nominal 1Ω , 10Ω , 100Ω , dan $1 \text{ k}\Omega$. Pengukuran dilakukan hingga satu dari sepasang resistor yang telah dioperasikan dalam suatu sesi tidak langsung dioperasikan kembali pada sesi pengukuran berikutnya. Urutan pengoperasian secara lengkap didaftarkan sebagaimana tertuang dalam Tabel 2. Pengukuran sepasang resistor, R_x terhadap R_y , dalam satu sesi dilakukan sebanyak 30 kali, namun hanya 25 pengukuran terakhir dievaluasi untuk mendapatkan nilai rasio terbaik. Hal tersebut untuk menjamin tingkat kestabilan pengukuran yang memerlukan waktu dalam pemanasan resistor dengan arus kerjanya.

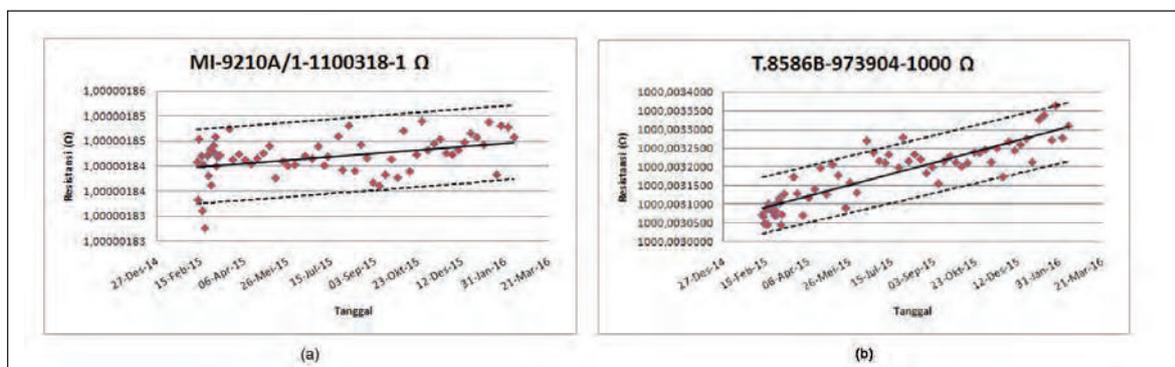
Hasil pembacaan rasio dengan DCCB diobservasi dalam satu tahun. Observasi dimulai pada tanggal 11 Februari 2015 dan berakhir pada tanggal 10 Februari 2016. Interval dari satu set pengukuran dengan satu set pengukuran berikutnya dilakukan tiap satu pekan sekali,

kecuali pada dua bulan pertama yang dilakukan lebih intensif setiap hari kerja untuk memastikan program yang dikembangkan dapat dilanjutkan selama interval waktu satu tahun.

Dalam penelitian ini, nilai rata-rata grup sudah diketahui dan diasumsikan tidak berubah dalam satu tahun sehingga nilai setiap resistor standar dalam grup dapat ditentukan. Persamaan (5) digunakan untuk menentukan nilai resistor standar R_4 sebagai nilai turunan dari grup yang digunakan sebagai acuan untuk penentuan resistor standar 10Ω , sedangkan Persamaan (9) digunakan untuk menentukan nilai resistor standar $R_{1k\Omega}$. Evaluasi dalam satu tahun riwayat pengukuran terhadap sebuah grup resistor standar ini dapat digunakan untuk mengestimasi stabilitas jangka panjang dari resistor standar acuan $1 \text{ k}\Omega$.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sebanyak 47 buah pembacaan rasio telah dihasilkan dari tiap sesi pengukuran sepasang resistor dalam satu set perbandingan dari setiap resistor yang berada dalam sebuah grup resistor standar. Untuk menuntaskan satu set pengukuran, secara otomatis, menggunakan skema yang dikembangkan dalam penelitian ini memerlukan waktu sekitar empat jam. Riwayat pengukuran yang telah dilakukan pada pertama kali observasi dimulai dapat ditunjukkan sebagaimana Tabel 3. Pada setiap sesi pengukuran untuk sepasang rasio resistor yang berkebalikan didapati adanya ketidaksamaan nilai r_{XY} dengan nilai r_{YX} tidak lebih dari $0,2 \mu\Omega/\Omega$. Untuk mengompensasi kesalahan sistematik tersebut, nilai rasio dengan rasio



Gambar 2. (a) Hasil Pengukuran dari Nilai Aktual Resistor Standar R_4 (1Ω); (b) Hasil Pengukuran dari Nilai Aktual Resistor Standar $R_{1k\Omega}$ (1000Ω) P

berkebalikannya dirata-ratakan dan dinyatakan sebagai rasio interkomparasi, yaitu a_{xy} .

Berdasarkan nilai rata-rata, sebuah grup standar resistor sebesar $0,999\ 999\ 71\ \Omega$ dan setiap rasio interkomparasi, resistor R_1 – R_7 , dapat ditentukan nilainya berdasarkan Persamaan (2)–(8) sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 3. Riwayat satu tahun nilai resistor R_4 , yaitu resistor standar yang dijadikan acuan untuk menurunkan nilai $R_{1k\Omega}$, dibuatkan titik ke dalam suatu bagan sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2a. Laju pergeseran nilai resistor standar R_4 dievaluasi berdasarkan pendekatan yang disesuaikan dengan *least-square fit*, yaitu sekitar $(4,9 \pm 1,4)\ \text{n}\Omega/\Omega$ per tahun. Ketidakpastian baku untuk estimasi nilai R_4 dalam tahun yang diobservasi adalah $3,7\ \text{n}\Omega/\Omega$, dengan derajat kebebasan sebesar 63.

Skema pengukuran metode rasio *scaling-up* 10:1 untuk menentukan nilai $R_{1k\Omega}$ berbasis R_4 dilakukan dalam set pengukuran yang sama dengan metode rasio interkomparasi pada interval waktu observasi sehingga nilai aktual langsung diperoleh menggunakan Persamaan (9). Hal tersebut dilakukan tanpa menggunakan persamaan *least-square fit* satu tahun dari masing-masing resistor standar R_4 , $R_{10\Omega}$, dan $R_{100\Omega}$. Riwayat satu tahun nilai resistor $R_{1k\Omega}$ dibuatkan titik ke dalam suatu bagan, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2b. Persamaan garis lurus dapat ditarik dalam bagan tersebut berdasarkan pengepasan terhadap titik-titik pada gambar menggunakan *least-square fit*. Persamaan tersebut adalah $R_{1k\Omega}(t) = (5,9 \times 10^{-7} \cdot t + 999,98)\ \Omega$. Laju pergeseran nilai resistor standar $R_{1k\Omega}$ dalam setahun didapati sekitar $(220 \pm 15)\ \text{n}\Omega/\Omega$ per tahun. Ketidakpastian baku untuk estimasi nilai $R_{1k\Omega}$ dalam tahun yang diobservasi adalah $39\ \text{n}\Omega/\Omega$ dengan derajat kebebasan sebesar 63. Laju pergeseran nilai tersebut memiliki kesesuaian dengan klaim spesifikasi pabrikan yang menyatakan tingkat stabilitasnya lebih kecil dari $1\ \mu\Omega/\Omega$ per tahun.

Pada Gambar 2a dan Gambar 2b, terdapat batas atas dan batas bawah yang ditentukan berdasarkan nilai dua kali ketidakpastian baku terhadap persamaan garis lurus yang dibentuk. Batas-batas tersebut mengakomodasi tingkat kepercayaan sekitar 95%, yang mana

semua nilai hasil pengukuran yang ditentukan berdasarkan Persamaan (5) dan Persamaan (9) berada di antara batas-batas ini. Berdasarkan kedua gambar tersebut terdapat beberapa hasil pengukuran di luar batas atas atau batas bawah, namun jumlahnya lebih kecil dari 5% dari seluruh riwayat data pengukuran.

Untuk konfirmasi nilai rata-rata grup yang sudah diketahui sebesar $0,999\ 999\ 71\ \Omega$ dan diasumsikan tidak berubah dalam satu tahun maka skema tambahan yang dilakukan pada dua buah dari tujuh resistor standar $1\ \Omega$ ($R_{1\Omega}$) yang lain, yaitu skema R_1 dan R_7 digunakan. Dari persamaan garis nilai resistor standar $R_{1k\Omega}$, $R_{1k\Omega}(t) = (5,9 \times 10^{-7} \cdot t + 999,98)\ \Omega$, nilai estimasi dari $R_{1k\Omega}$ dapat ditentukan setiap tanggal dilakukannya pengukuran. Invers dari Persamaan (9) yang diterapkan untuk mendapatkan $R_{1\Omega}$ pada R_1 dan R_7 akan menghasilkan masing-masing nilai resistor standar $1\ \Omega$ tersebut pada setiap tanggal dilakukannya pengukuran. Kemudian invers dari Persamaan (2) dan Persamaan (8) yang digunakan untuk mendapatkan nilai rata-rata grup berdasarkan skema R_1 dan R_7 akan juga diperoleh setiap tanggal dilakukannya pengukuran.

Evaluasi terhadap laju pergeseran nilai rata-rata grup berdasarkan skema R_1 dan R_7 dapat dilaporkan masing-masing adalah sekitar $(0,3 \pm 15)\ \text{n}\Omega/\Omega$ dan $(1,1 \pm 15)\ \text{n}\Omega/\Omega$ per tahun. Kedua laju berdasarkan dua skema tambahan sebagaimana disebutkan di atas adalah saling berkesesuaian dengan derajat ekuivalensi (*En number*) sebesar 0,04. Laju pergeseran nilai rata-rata grup, baik berdasarkan skema R_1 maupun R_7 , dapat diabaikan dalam suatu rentang ketidakpastian baku dari laju pergeseran nilai sebesar $15\ \text{n}\Omega/\Omega$, bahkan laju pergeseran nilai rata-rata grup lebih kecil dibandingkan laju pergeseran nilai resistor standar R_4 . Dengan kata lain, nilai rata-rata grup dapat diasumsikan tidak berubah dalam satu tahun.

Dalam penentuan nilai rata-rata grup berdasarkan skema invers dari $R_{1k\Omega}$ kepada \bar{R} , ketidakpastian laju pergeseran nilai resistor standar $R_{1k\Omega} = 1\ \text{k}\Omega$ telah berpropagasi pada ketidakpastian laju pergeseran nilai rata-rata grup \bar{R} . Bahkan, ketidakpastian laju pergeseran nilai resistor standar $R_4 = 1\ \Omega$

telah berkontribusi pada ketidakpastian laju pergeseran nilai resistor standar $R_{1k\Omega} = 1 \text{ k}\Omega$. Hal tersebut mengindikasikan bahwa laju pergeseran nilai resistor acuan $1 \text{ k}\Omega$ menjadi lebih dominan daripada laju pergeseran nilai rata-rata grup dalam menentukan stabilitas jangka panjang dari resistor standar acuan $1 \text{ k}\Omega$. Berdasarkan evaluasi, laju pergeseran nilai rata-rata grup adalah sekitar 0,005 kali ($1,1 \text{ n}\Omega/\Omega : 220 \text{ n}\Omega/\Omega$) lebih kecil dari laju pergeseran nilai resistor standar acuan.

KESIMPULAN

Pemeliharaan sebuah grup resistor standar melalui penelitian ini telah mampu menentukan laju pergeseran nilai resistor standar acuan $R_{1k\Omega}$ milik Puslit Metrologi LIPI sebesar (220 ± 15) $\text{n}\Omega/\Omega$ per tahun. Kemampuan tersebut dapat digunakan untuk memverifikasi stabilitas jangka panjang resistor standar acuan yang telah dinyatakan oleh spesifikasi pabrikannya, yaitu lebih kecil dari $1 \mu\Omega/\Omega/\text{tahun}$. Dalam pembahasan, telah dikonfirmasi bahwa nilai nilai rata-rata grup resistor standar dengan nominal 1Ω dapat didekatkan tidak berubah nilainya dalam satu tahun pengamatan. Sistem pengukuran untuk pemeliharaan ini telah dilakukan secara otomatis sehingga dapat menyelesaikan satu set pengukuran yang terdiri atas 47 sesi perbandingan antara dua buah resistor standar dalam waktu sekitar empat jam.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada pimpinan Puslit Metrologi LIPI dan jajaran manajemen yang telah menyediakan sarana dan prasarana untuk melaksanakan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Fluke Corporation. 2016. 5430 Standard AC/DC Resistors. Terakhir dimodifikasi pada 30 November 2016. <http://us.flukecal.com/products/obsolete-products/5430-standard-acdc-resistors>.
- [2] Khairiyati, L., R. H. Sardjono, M. Syahadi, A. M. Boynawan, dan Ratnaningsih. 2012. "Penetapan Nilai Resistor Standar Tipe Thomas 1Ω Berbasis *Quantum Hall Resistance* dengan Ketelitian Lebih Kecil dari 0,3 ppm." *Instrumentasi Scientific Publication* 36 (1) (Januari–Juni 2012): 45–53.
- [3] Dziuba, Ronald F. 1987. "The NBS Ohm: Past–Present–Future" (Paper No. VI-A, 15). Proc. Meas. Sciences Conf., 1987.
- [4] Lide, David R. 2002. *A Century of Excellence in Measurements, Standards, and Technology* (CRC Press). Prepared by R. Dziuba, N. B. Belecki, dan J. F. MayoWells based on excerpts from the paper *The Ampere and Electrical Units*, authored by members of the Electricity Division of NIST.
- [5] Elmquist, R. E., D. G. Jarrett, Jones Jr., G. R., Kraft, M. E., Shields S. H., dan R. F. Dziuba. 2003. *NIST Measurement Service for DC Standard Resistors*. US: NIST.
- [6] Belecki, N. B., R. F. Dziuba, B. F. Field, dan B. N. Taylor. 1989. *Guidelines for implementing the New Representations of the Volt and Ohm Effective January 1, 1990* (NIST Technical Note 1263). Electricity Division National Institute of Standards and Technology, June 1989.
- [7] Klitzing, K. V. 1985. *The Quantized Hall Effect* (Noble Lecture). Max-Planck-Institut für Festkörperforschung, D-7000 Stuttgart 80.
- [8] Cage, M. E., R. F. Dziuba, C. R. V. Degrift, dan D. Y. Yu. 1989. "Determination of the Time Dependence of Ω NBS Using the Quantized Hall Resistance," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 38 (2).
- [9] Azzumar, M. dan A. Faisal. 2015. "Diseminasi Resistor Standar $1 \text{ k}\Omega$ ke Standar Kerja." *Jurnal Standardisasi* 17 (3): 223–232.