

## DISEMINASI RESISTOR STANDAR 1 k $\Omega$ KE STANDAR KERJA *Dissemination of A 1 k $\Omega$ Standard Resistor To Working Standards*

Muhammad Azzumar dan Agah Faisal

Puslit Metrologi – LIPI  
Kompleks Puspiptek Setu Tangerang Selatan 15314, Banten, Indonesia  
Email: muhammad.azzumar@lipi.go.id

Diterima: 25 Juni 2015, Direvisi: 30 September 2015, Disetujui: 15 Oktober 2015

### Abstrak

Diseminasi nilai kalibrasi resistor standar kepada standar kerja di Puslit Metrologi - LIPI telah dilakukan. Hal ini bertujuan untuk mendapatkan hasil kalibrasi dan estimasi ketidakpastiannya yang valid dan tertelusur ke SI pada standar kerja. Diseminasi dilakukan dengan cara mengimplementasikan nilai kalibrasi resistor standar 1 k $\Omega$  ke resistor acuan dan kemudian ke standar kerja. Nilai yang telah diturunkan kepada standar kerja, *reference multimeter*, telah dibandingkan dengan nilai pengukuran yang dilakukan oleh KRISS (Korea Research Institute of Standards and Science) melalui kriteria derajat ekuivalensi. Error number berdasarkan kriteria derajat ekuivalensi antara Metrologi - LIPI dan KRISS pada resistor-resistor 100 $\Omega$ , 10 $\Omega$ , dan 1 $\Omega$  masing-masing adalah sebesar 0,51, 0,73, dan 0,87. Berdasarkan error number tersebut, hasil pengukuran Metrologi - LIPI memiliki kesesuaian nilai ukur dengan hasil ukur KRISS. Lebih daripada itu, hal tersebut telah memvalidasi hasil kalibrasi dan estimasi ketidakpastian dari resistor acuan dan standar kerja di Puslit Metrologi - LIPI.

**Kata kunci:** nilai kalibrasi, resistor standar, standar kerja, kriteria derajat kebebasan, validasi.

### Abstract

*Dissemination of calibration value of standard resistor to working standard in Research Center for Metrology LIPI has been done. It aims to get the calibration result and the uncertainty estimation that are valid and traceable to SI on the working standard. The dissemination was performed by implementing calibration value of 1 k $\Omega$  standard resistor to reference resistor and then to working standard. The value that had been disseminated to working standard, reference multimeter, had been compared to the measurement value made by KRISS (Korea Research Institute of Standards and Science) through a degree of equivalence criteria. The error numbers based on the degree of equivalence criteria between Metrology-LIPI and KRISS for the resistors measurement of 100 $\Omega$ , 10 $\Omega$ , and 1 $\Omega$  were 0.51, 0.73, and 0.87 respectively. Based on those error numbers, Metrology-LIPI measurement results had the measuring value agreement with KRISS measurement results. Moreover, its had validated calibration result and the uncertainty estimation of reference resistor and working standard in Metrology LIPI*

**Keywords:** calibration value, standard resistor, working standard, degree of equivalence criteria, validation.

## 1. PENDAHULUAN

Seiring dengan kebutuhan pengukuran yang terus bertambah dalam meningkatkan mutu produksi, konservasi energi dan keselamatan kerja, kehadiran pengukuran akurat dan presisi sangat dibutuhkan. Banyak norma dikembangkan untuk penilaian kesesuaian terhadap objek yang diukur (Azzumar dkk, 2014), dan dalam norma tersebut alat ukur terkalibrasi yang mampu mendemonstrasikan ketertelusuran hasil pengukuran kepada Sistem Internasional untuk Satuan (SI) sangat diperlukan.

Salah satu besaran yang memiliki peranan penting dalam peralatan ukur adalah besaran resistansi dengan satuannya yaitu ohm. Resistor sebagai komponen pasif dengan nilai resistansi tertentu banyak digunakan sebagai sensor dan transduser. Seperti penggunaan *resistance temperature detector* (RTD) sebagai sensor suhu (National Instruments, 2014), *resistance voltage divider* (RVD) sebagai pembagi level tegangan tinggi (Allen F. Podell dkk, 2007), *current shunt* sebagai konverter arus besar kepada level tegangan (Kåre Lind et al., 2008), (Boštjan Voljč et al., 2009), (Azzumar dan Faisal, 2014), dan sirkuit jembatan wheatstone sebagai transduser adalah sebagian dari banyak aplikasi resistor

dalam pengukuran (Hoffmann, 1986). Di laboratorium (lab) kalibrasi multimeter yang digunakan untuk mengases seberapa besar nilai resistansi dari suatu resistor dikalibrasi menggunakan standar acuan lab berupa *multifunction calibrator*. Sedang *multifunction calibrator* tersebut dikalibrasi di Puslit Metrologi - LIPI dengan standar kerja bertipe meter yang direpresentasikan kedalam alat yang dinamakan *reference multimeter*.

Dalam proses kalibrasi suatu besaran ukur resistansi dalam *reference multimeter* dibutuhkan suatu resistor acuan yang tertelusur ke SI melalui representasi standar primer yaitu sistem *Quantum Hall Resistance* (QHR) (Preben dkk., 2008). Di Puslit Metrologi-LIPI, penurunan nilai resistor standar kepada resistor acuan seperti penurunan nilai 1 k $\Omega$  kepada 100  $\Omega$  dan kepada nilai lainnya menggunakan *Direct Current Comparator Bridge* (DCCB). Sedangkan nilai resistor standar 1 k $\Omega$  sendiri didapati melalui program rekalisasi standar kepada Lembaga Metrologi Nasional (NMI) negara Jepang, NMIJ, dan tertelusur kepada SI melalui QHR-NMIJ sebagai representasi satuan ohm di Jepang (*Certificate of Calibration of Standard Resistor 1 k $\Omega$* , NMIJ, 2014).

Nilai kalibrasi resistor standar 1 k $\Omega$  yang diperoleh melalui pengukuran selayaknya dapat segera didiseminasikan kepada standar kerja di Puslit Metrologi - LIPI. Namun dikarenakan proses pengiriman alat antar negara membutuhkan waktu transportasi yang relatif lama (3-4 bulan), memungkinkan nilai kalibrasi dari resistor standar tersebut mengalami penyimpangan yang dikenal sebagai *long-term drift*, yaitu perubahan nilai resistansi terhadap perubahan waktu yang lama (Wilkins dkk., 1970). Penerapan koreksi terhadap penyimpangan *long-term drift* perlu ditentukan berdasarkan karakteristik unik standar resistor yang digunakan.

Berdasarkan latar belakang tersebut, tujuan dari penelitian ini adalah mendapatkan hasil kalibrasi dan estimasi ketidakpastian yang valid dan tertelusur ke SI pada standar kerja di Puslit Metrologi - LIPI. Hal ini dilakukan dengan cara mendiseminasikan nilai kalibrasi resistor standar 1 k $\Omega$  ke resistor acuan untuk kemudian digunakan dalam proses kalibrasi standar kerja berupa *reference multimeter*, yang selanjutnya divalidasi dengan kriteria derajat ekuivalensi. Validasi yang dilakukan adalah dengan cara membandingkan hasil pengukuran yang dilakukan oleh Puslit Metrologi - LIPI dan yang dilakukan oleh KRIS (Lembaga Metrologi Nasional negara Korea Selatan) terhadap *reference multimeter* yang sama.

## 2. TINJAUAN PUSTAKA

Berdasarkan kesepakatan internasional sejak 1 Januari 1990, representasi praktis untuk satuan ohm adalah dengan melalui efek quantum Hall, dimana nilai resistansi dihubungkan dengan rasio konstanta fundamental,  $h/e^2$  (Randolph dkk., 2003), (Belecki dkk., 1990). Nilai resistansi dari efek quantum Hall,  $R_H$ , didefinisikan sebagai hasil bagi tegangan Hall pada plateau ke- $i$  dengan arus di dalam divais Hall.

Untuk kasus terbaik dalam menurunkan nilai dari QHR kepada resistor acuan adalah dengan menggunakan *cryogenic current comparator bridge* (CCCB). Implementasi ini masih dirasakan cukup menyulitkan dikarenakan salah satunya adalah coil yang digunakan harus didinginkan dengan helium cair hingga mencapai suhu kerja dibawah 3 kelvin. Selain menggunakan CCCB, penurunan nilai dari QHR kepada resistor acuan dapat menggunakan jembatan yang bekerja pada suhu ruang seperti DCCB. Sebagaimana Inglis melaporkan, beda hasil pengukuran pada resistor 100  $\Omega$  dengan menggunakan CCCB dan dengan menggunakan DCCB adalah sebesar  $(-0,3 \pm 1,4) \mu\Omega$ .

### 2.1. *Direct Current Comparator Bridge* (DCCB)

DCCB dengan model yang sama seperti yang dipaparkan oleh Inglis digunakan di Puslit Metrologi - LIPI untuk proses *scaling* dari resistor 1 k $\Omega$  ke resistor 1 k $\Omega$ , 100  $\Omega$ , 10  $\Omega$ , dan 1  $\Omega$ . DCCB merupakan peralatan yang digunakan untuk mengukur suatu resistansi yang diketahui nilainya dalam bentuk rasio atas resistansi yang belum diketahui nilainya. DCCB seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1 terbangun atas trafo dengan modulator inti magnetik toroidal ganda, perisai magnetik yang mengelilingi inti modulator dan dengan beberapa belitan (*multiple winding*).

Beberapa belitan tersebut terdiri dari belitan primer, belitan sekunder dan belitan detektor. Lengan pertama yaitu belitan sekunder yang sejumlah  $N_S$  lilitan (*turns*), dan lengan kedua yaitu belitan primer yang sejumlah  $N_X$  lilitan (*turns*), membawa aliran arus untuk diperbandingkan. Pengukuran dilakukan pada keadaan ketika kedua lengan untuk *ampere-turns* bernilai sama dan saling berbeda polaritas, sehingga akan didapati resultan *flux* yang berharga nol pada inti trafo. Resultan ini dapat dimonitor oleh *flux detector* melalui belitan detektor  $N_D$ . Pada keadaan resultan *flux* sama dengan nol, maka arus  $I_X$  dan arus  $I_S$  mencapai kondisi:

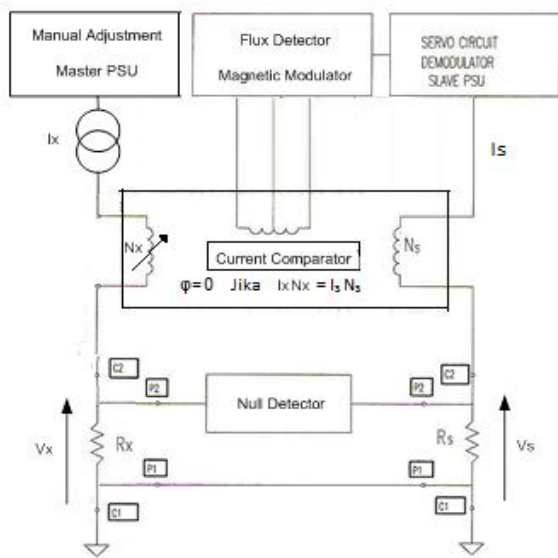
$$\frac{I_X}{I_S} = \frac{N_S}{N_X} \quad (1)$$

Dalam pengukuran, arus  $I_X$  ditentukan melalui pengaturan sedemikian sehingga untuk mencapai resultan flux sama dengan nol (Randolph et al., 2003), jumlah belitan primer yang sejumlah  $N_X$  lilitan akan menyesuaikan agar persamaan (1) tercapai. Pada keadaan ini syarat keseimbangan keduanya harus dipenuhi, dimana, arus  $I_X$  yang mengalir melalui belitan  $N_X$  dan  $R_X$  memiliki potensial yang sama dengan arus  $I_S$  yang mengalir melalui belitan  $N_S$  dan  $R_S$ , ( $V_X = V_S$ ), sehingga  $R_X$ ,  $R_S$ ,  $I_X$ , dan  $I_S$  akan saling terkait. Secara matematis keseimbangan kedua dapat dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$I_X \cdot R_X = I_S \cdot R_S \quad (2)$$

Berdasarkan persamaan (1) dan (2), maka hubungan  $R_X$  dan  $R_S$  dapat dinyatakan sebagai mana ditunjukkan pada persamaan (3). Dan  $\Gamma$  adalah rasio yang ditampilkan DCCB saat pengukuran.

$$\Gamma = \frac{N_X}{N_S} = \frac{R_X}{R_S} \quad (3)$$

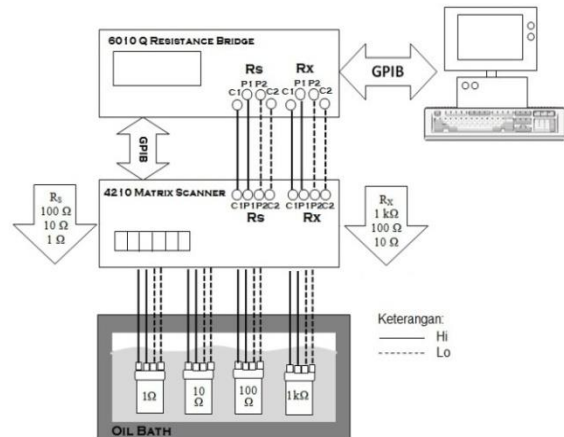


Gambar 1 Diagram skematis dari DCCB.  
(Guildline, 2001)

## 2.2. Metode Rasio dengan DCCB

Nilai resistansi dari resistor acuan yang belum diketahui ditentukan oleh nilai yang telah diketahui menggunakan metode rasio dengan DCCB. Sistematis pengukuran yang dilakukan menggunakan prosedur kalibrasi resistor menengah dengan metode perbandingan berbasis DCCB.

Sistem pengukuran yang diilustrasikan dalam Gambar 2 terdiri dari DCCB, Scanner, resistor-resistor acuan yang dicelupkan kedalam bak oli, dan seperangkat komputer. Bak oli mengkondisikan lingkungan kerja dari resistor-resistor yang ada didalamnya guna meminimalkan koreksi terhadap suhu kerja dan penyimpangan pembacaan dikarenakan perubahan suhu kerja saat pengukuran. Resistor-resistor ini disambungkan ke jalur berbeda secara 4-kawat pada scanner, dengan tujuan agar pengukuran dapat dilaksanakan secara berkesinambungan tanpa mengubah koneksi resistor ke DCCB dan meminimalkan adanya kesalahan koneksi. Scanner berfungsi sebagai pengatur resistor standar yang berperan sebagai resistor  $R_S$  atau sebagai resistor  $R_X$ . Keluaran dari scanner dihubungkan kepada DCCB. DCCB dan scanner terautomasi dengan program yang dijalankan dalam komputer. Ketika resistor yang diposisikan secara terprogram sebagai  $R_X$  dan  $R_S$  diperbandingkan maka DCCB akan menghasilkan hasil pengukuran berupa rasio ( $\Gamma$ ). Ketentuan yang selalu dipersyaratkan dalam menggunakan metode rasio dengan DCCB adalah  $R_X > R_S$ .



Gambar 2 Diagram skematis untuk sistem pengukuran resistor acuan.

Kemudian untuk menentukan nilai standar resistor acuan yang belum diketahui, perhitungan dengan cara scale-down dilakukan mengikuti persamaan (3). Pengukuran dengan menyertakan kontribusi ketidakpastian pengukuran sebagaimana panduan dalam *Guide to the expression of Uncertainty in Measurement* (JCGM 100 : 2008), dimodelkan sebagai berikut:

$$R_S = \frac{R_X \cdot (1 + \delta R_{XD}) \cdot (1 + \delta R_{XT})}{\Gamma \cdot (1 + \delta B_A) \cdot (1 + \delta B_T) \cdot (1 + \delta B_R) \cdot (1 + \delta R_{ST}) \cdot (1 + \delta R_{SR})} \quad (4)$$

$R_S$  adalah resistor standar yang belum diketahui nilainya,  $\Gamma$  adalah rasio yang ditunjukkan oleh DCCB,  $\delta B_A$  adalah koreksi dari

akurasi DCCB,  $\delta B_T$  adalah koreksi dari ketidakstabilan suhu terhadap DCCB selama pengukuran,  $\delta B_R$  adalah koreksi dari resolusi DCCB,  $R_X$  adalah resistor standar yang telah diketahui nilainya (resistor standar),  $\delta R_{XD}$  adalah koreksi drift resistor standar,  $\delta R_{XT}$  adalah koreksi dari ketidakstabilan suhu terhadap resistor standar,  $\delta R_{ST}$  adalah koreksi dari ketidakstabilan suhu terhadap resistor standar yang belum diketahui nilainya, dan  $\delta R_{SR}$  adalah koreksi pembulatan nilai resistor standar yang belum diketahui nilainya. Persamaan (4) digunakan untuk menurunkan nilai kalibrasi resistor standar 1 k $\Omega$  kepada masing-masing resistor acuan 100  $\Omega$ , 10  $\Omega$ , dan 1  $\Omega$ .

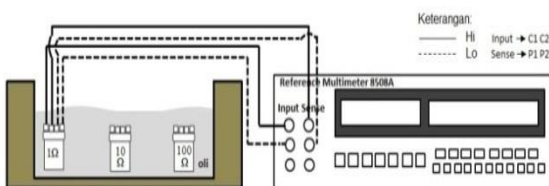
Perhitungan dengan cara scale-up juga dilakukan khususnya untuk mengestimasi stabilitas jangka panjang (drift) dari resistor standar 1 k $\Omega$ . Berbeda dengan proses scale-down, proses scale-up dilakukan secara kontinyu untuk melihat penyimpangan nilai 1 k $\Omega$  dimana sekelompok resistor 1  $\Omega$  sejumlah 7 buah dengan stabilitas yang dinyatakan mendekati konstan (dengan penyimpangan  $< 2 \times 10^{-12}$ ) dijadikan sebagai acuannya. Nilai 1 k $\Omega$  terhadap nilai sekelompok resistor 1  $\Omega$  dihitung dengan persamaan (5).

$$R_{1k} = \Gamma_{1k:100} \cdot \Gamma_{100:10} \cdot \Gamma_{10:1} \cdot R_1 \tag{5}$$

Pengamatan harian dilakukan untuk mengestimasi kecenderungan penyimpangan nilai resistor standar 1 k $\Omega$ .

### 2.3. Metode Pengukuran Langsung

Penurunan nilai resistor acuan ke standar kerja *reference multimeter* dilakukan menggunakan metode pengukuran langsung, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3 Diagram skematis untuk metode pengukuran langsung.

Sistem pengukuran tersebut terdiri dari *reference multimeter* dan resistor-resistor acuan yang dicelupkan di dalam oli. Penggunaan bak oli tersebut bertujuan untuk mendapatkan kestabilan suhu kerja pada resistor acuan sehingga dapat meminimalkan penyimpangan pembacaan karena perubahan suhu kerja saat pengukuran.

Resistor acuan dikoneksikan ke *reference multimeter* untuk diukur besar nilai dari resistor tersebut. Nilai yang terbaca oleh *reference multimeter* merupakan nilai pembacaan *reference multimeter* atas resistor acuan. Untuk mengetahui kesalahan pengukuran nilai yang ditampilkan oleh *reference multimeter*, dilakukan perhitungan sebagai berikut pada persamaan (6):

$$E_R = (R_{RMM} (1 + \delta M_R) (1 + \delta M_T)) - (R_{STD} (1 + \delta R_{STDD}) (1 + \delta R_{STDT})) \tag{6}$$

$R_{RMM}$  adalah nilai resistor yang terbaca di *reference multimeter*,  $R_{STD}$  adalah nilai sebenarnya dari resistor acuan,  $\delta M_R$  adalah koreksi dari resolusi *reference multimeter*,  $\delta M_T$  adalah koreksi dari ketidakstabilan suhu terhadap *reference multimeter* selama pengukuran,  $\delta R_{STDD}$  adalah koreksi drift resistor standar yang diukur, dan  $\delta R_{STDT}$  adalah Koreksi dari ketidakstabilan suhu terhadap resistor standar yang diukur. Persamaan (6) merupakan persamaan kesalahan antara pembacaan *reference multimeter* dengan nilai sebenarnya resistor acuan yang digunakan.

### 2.4. Kriteria Derajat Ekuivalensi

Menurut CIPM, derajat ekuivalensi merupakan salah satu kriteria penting dalam MRA (*Mutual Recognition Arrangement*) antar lembaga metrologi nasional. Derajat ekuivalensi dilakukan dengan tujuan untuk memvalidasi nilai yang diturunkan ke standar kerja yang dilakukan Puslit Metrologi - LIPI. Perhitungan ini dilakukan dengan membandingkan hasil pengukuran Puslit Metrologi - LIPI dengan KRIS (Korea Research Institute of Standards and Science). Perbandingan yang dilakukan untuk mendapatkan derajat ekuivalensi pengukuran menggunakan persamaan *error number*,  $E_N$ , sebagaimana ditunjukkan pada persamaan (7) (Cox, 2012).

$$E_N = \frac{D}{u(D)} \tag{7}$$

$D$  merupakan selisih nilai ukur oleh lab terhadap nilai ukur yang diperoleh oleh laboratorium acuan, dinyatakan dengan:

$$D = E_{R\_Metrologi-LIPI} - E_{R\_KRIS}$$

$u(D)$  merupakan ketidakpastian gabungan dari kedua lab yang dinyatakan dengan:

$$u(D) = \sqrt{u^2(E_{R\_Metrologi-LIPI}) + u^2(E_{R\_KRIS})}$$

Hasil pengukuran dapat dinyatakan memiliki kesesuaian pengukuran jika memenuhi kriteria derajat ekuivalensi, yaitu  $|E_M| \leq 1$ .

### 3. METODE PENELITIAN

Proses diseminasi nilai kalibrasi resistor standar 1 kΩ yang dikalibrasi di NMIJ pada tanggal 27 Oktober 2014 ke standar kerja Puslit Metrologi - LIPI dilakukan dengan 2 tahap. Tahap pertama adalah menurunkan nilai kalibrasi resistor standar 1 kΩ yang sudah terkoreksi ke resistor acuan 100 Ω, 10 Ω, dan 1 Ω. Tahap ini dilakukan dengan cara mengukur rasio antara resistor standar 1 kΩ dengan resistor acuan 100 Ω, resistor acuan 100 Ω dengan resistor acuan 10 Ω, dan resistor acuan 10 Ω ke resistor acuan 1 Ω dengan menggunakan DCCB, sebagaimana yang ditunjukkan pada Gambar 2. Dengan demikian nilai aktual resistansi setiap resistor acuan 100 Ω, 10 Ω, dan 1 Ω yang tertelusur didapatkan.

Skenario pengukuran yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Pengukuran 100 Ω dari 1 kΩ.  
Konfigurasi pengukuran ini adalah 100 Ω sebagai  $R_S$  dan 1 kΩ sebagai  $R_X$ , serta arus yang diberikan ke 100 Ω sebesar 1 mA dan arus yang diberikan ke 1 kΩ sebesar 0,1 mA.
2. Pengukuran 10 Ω dari 100 Ω.  
Konfigurasi pengukuran ini adalah 10 Ω sebagai  $R_S$  dan 100 Ω sebagai  $R_X$ , serta arus yang diberikan ke 10 Ω sebesar 10 mA dan arus yang diberikan ke 100 Ω sebesar 1 mA.
3. Pengukuran 1 Ω dari 10 Ω.  
Konfigurasi pengukuran ini adalah 1 Ω sebagai  $R_S$  dan 10 Ω sebagai  $R_X$ , serta arus yang diberikan ke 1 Ω sebesar 100 mA dan arus yang diberikan ke 10 Ω sebesar 10 mA.

Ketiga skenario pengukuran tersebut dilakukan sebanyak 25 kali dengan tujuan untuk memperkecil kesalahan acak yang diakibatkan adanya penyebaran data hasil pengukuran. Penurunan nilai resistor standar 1 kΩ ke resistor acuan ini dilakukan pada tanggal 10 Februari 2015 di Puslit Metrologi - LIPI.

Berdasarkan model matematis (4), untuk menentukan nilai resistansi resistor acuan, ada beberapa komponen yang menyebabkan timbulnya ketidakpastian pada pengukuran resistor acuan dengan metode rasio berbasis DCCB. Evaluasi ketidakpastian ini mengacu

pada panduan GUM (JCGM 100 : 2008), yang dapat direpresentasikan sebagai berikut:

$$u_c^2(R_S) = c_1^2 u^2(\bar{\Gamma}) + c_2^2 u^2(R_X) + c_3^2 u^2(\delta R_{XD}) + c_4^2 u^2(\delta R_{XT}) + c_5^2 u^2(\delta B_A) + c_6^2 u^2(\delta B_T) + c_7^2 u^2(\delta B_R) + c_8^2 u^2(\delta R_{ST}) + c_9^2 u^2(\delta R_{SR}) \quad (8)$$

Dimana:

- $u_c(R_S)$  : Ketidakpastian gabungan dari seluruh kontribusi ketidakpastian
- $c_1, c_2, c_3$  : Koefisien sensitivitas untuk masing-masing kontribusi ketidakpastian, dst
- $c_1 = \frac{\partial R_S}{\partial \bar{\Gamma}}, c_2 = \frac{\partial R_S}{\partial R_X}$ , dst
- $u(\bar{\Gamma})$  : Ketidakpastian dari pengukuran pengukuran rasio
- $u(R_X)$  : Ketidakpastian dari resistor acuan
- $u(\delta R_{XD})$  : Ketidakpastian dari ketidakstabilan perubahan nilai resistor acuan ( $R_X$ ) terhadap waktu (*drift*)
- $u(\delta R_{XT})$  : Ketidakpastian dari ketidakstabilan suhu saat pengukuran yang berakibat pada resistor acuan
- $u(\delta B_A)$  : Ketidakpastian dari akurasi DCCB
- $u(\delta B_T)$  : Ketidakpastian dari ketidakstabilan suhu saat pengukuran yang berakibat pada DCCB
- $u(\delta B_R)$  : Ketidakpastian dari resolusi DCCB
- $u(\delta R_{ST})$  : Ketidakpastian dari ketidakstabilan suhu saat pengukuran yang berakibat pada resistor acuan yang dicari
- $u(\delta R_{SR})$  : Ketidakpastian dari pembulatan nilai resistor acuan yang dicari

Dari komponen nilai ketidakpastian tersebut, maka dapat dihitung besarnya nilai ketidakpastian pengukuran resistor acuan dengan metode rasio berbasis DCCB pada masing-masing resistor.

Tahap kedua adalah menurunkan nilai masing-masing resistor acuan ke standar kerja *reference multimeter* yaitu dengan melakukan pengukuran pembacaan ohm oleh *reference multimeter* tersebut.

Seperti yang terlihat pada Gambar 3, konfigurasi pengukuran dilakukan dengan cara menghubungkan terminal  $C_1$  dan  $C_2$  resistor ke terminal Input  $H_i$  dan Input  $L_o$  *reference multimeter* dan terminal  $P_1$  dan  $P_2$  resistor ke terminal Sense  $H_i$  dan Sense  $L_o$  *reference multimeter*. Pengukuran dilakukan dengan arus yang diberikan sebesar 1 mA saat pengukuran 100  $\Omega$ , 10 mA saat pengukuran 10  $\Omega$ , dan 100 mA saat pengukuran 1  $\Omega$ .

Sebagaimana pada tahap pertama, evaluasi ketidakpastian diturunkan dari model matematis pengukuran, dengan demikian berdasarkan model matematis pengukuran seperti persamaan (6), evaluasi ketidakpastian pengukuran kesalahan pembacaan multimeter dirumuskan sebagai berikut:

$$u_c^2(E_R) = c_1^2 u^2(R_{RMM}) + c_2^2 u^2(\delta M_R) + c_3^2 u^2(\delta M_T) + c_4^2 u^2(\delta R_{STD}) + c_5^2 u^2(\delta R_{STDD}) + c_6^2 u^2(\delta R_{STDT}) \quad (9)$$

Dimana:

- $u_c(E_R)$  : Ketidakpastian gabungan dari seluruh kontribusi ketidakpastian
- $c_1, c_2, c_3$  : Koefisien sensitivitas untuk masing-masing kontribusi ketidakpastian, contoh:  

$$c_1 = \frac{\partial E_R}{\partial R_{RMM}}, c_2 = \frac{\partial E_R}{\partial \delta M_R}, \text{ dst}$$
- $u(R_{RMM})$  : Ketidakpastian dari pengulangan pengukuran resistor
- $u(\delta M_R)$  : Ketidakpastian dari resolusi *reference multimeter*
- $u(\delta M_T)$  : Ketidakpastian dari ketidakstabilan suhu saat pengukuran yang berakibat pada *reference multimeter*
- $u(\delta R_{STD})$  : Ketidakpastian dari nilai resistor standar
- $u(\delta R_{STDD})$  : Ketidakpastian dari ketidakstabilan perubahan nilai resistor standar terhadap waktu (*drift*)
- $u(\delta R_{STDT})$  : Ketidakpastian dari ketidakstabilan suhu saat pengukuran yang berakibat pada resistor standar

Dari komponen nilai ketidakpastian di atas, maka dapat dihitung besarnya nilai ketidakpastian pengukuran kesalahan pembacaan ohmmeter *reference multimeter* dengan metode langsung 4-kawat.

Pengukuran resistor standar dan pengukuran pembacaan *reference multimeter* tersebut dilakukan dalam kondisi suhu yang dijaga pada  $23 \pm 1^\circ\text{C}$ , dan resistor-resistor acuan terendam di dalam oli putih. Selain itu, sebelum pengukuran dimulai, dilakukan pemanasan (*warming up*) pada sistem pengukuran selama 60 menit dengan tujuan untuk mendapatkan kestabilan pengukuran.

Validasi dilakukan pada hasil pengukuran kesalahan pembacaan *reference multimeter*. Selisih nilai ukur oleh lab terhadap nilai ukur yang diperoleh oleh lab acuan sedemikian hingga lebih kecil dari ketidakpastian gabungan keduanya dievaluasi berdasarkan persamaan (7). Hasil pengukuran oleh KRIS dapat dilihat pada sertifikat kalibrasi *reference multimeter*. (*Certificate of Calibration of Reference multimeter* 8508A KRIS, 2014).

#### 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengukuran berdasarkan rangkaian yang ditunjukkan pada Gambar 2 dilakukan pada tanggal 10 Februari 2015. Penurunan nilai resistor standar 1 k $\Omega$  ke resistor acuan 100  $\Omega$ , 10  $\Omega$ , dan 1  $\Omega$  dinyatakan dalam bentuk rasio ( $\Gamma$ ) yang ditunjukkan oleh DCCB. Rata-rata rasio yang ditunjukkan beserta standar deviasi untuk masing-masing penurunan nilai resistor didaftarkan ke dalam Tabel 1. Nilai rata-rata dan standar deviasi tersebut ditentukan berdasarkan jumlah pengukuran sebanyak 25 kali. Hasil pengukuran menunjukkan kestabilan pengukuran yang presisi. Hal itu dapat dilihat dari deviasi masing-masing pengukuran yang mencapai orde  $10^{-8}$  terhadap penunjukan.

Tabel 1 Hasil pengukuran dengan DCCB ( $\Gamma$ ).

Nilai Nominal Rasio	Penunjukan DCCB ( $\Gamma$ )	Deviasi (ppm)
1000 : 100	10,00006199	0,067
100 : 10	9,999979114	0,014
10 : 1	9,999964865	0,012

Untuk menentukan variable terikat ( $R_S$ ) yaitu nilai resistor acuan yang belum diketahui berdasarkan model matematis pengukuran yang ditunjukkan pada persamaan (4), variabel bebas seperti nilai resistor acuan yang sudah diketahui, rasio yang ditunjukkan oleh DCCB dan koreksi-koreksi yang relevan diperlukan.

Pada penurunan nilai resistor standar 1 k $\Omega$  kepada resistor acuan 100  $\Omega$ , nilai yang sudah diketahui adalah berdasarkan nilai kalibrasi 1 k $\Omega$  yang diturunkan dari QHR-NMIJ pada tanggal 27 Oktober 2014 yaitu bernilai

1000,00301 ± 0,00012 Ω. Adapun koreksi yang diterapkan adalah koreksi dari *drift* resistor 1 kΩ. Hal tersebut dikarenakan penurunan nilai ini dilakukan pada tanggal 10 Februari 2015, sehingga memiliki selisih waktu sekitar 4 bulan sejak diperoleh nilai kalibrasi 1 kΩ. Perbedaan waktu 4 bulan ini memberikan koreksi sebesar 0,25 ppm. Sedangkan komponen yang lain diestimasi tidak memiliki koreksi yang signifikan, sehingga komponen tersebut cukup dimasukkan sebagai komponen ketidakpastian.

Setelah nilai resistor acuan 100 Ω diperoleh, nilai tersebut langsung diturunkan kepada resistor acuan 10 Ω dan nilai resistor

acuan 10 Ω kepada resistor acuan 1 Ω, sehingga tidak memiliki koreksi yang diakibatkan oleh *drift* pada resistor-resistor acuan tersebut.

Koefisien *drift* diperoleh berdasarkan pengamatan yang dilakukan di Puslit Metrologi-LIPI sesuai persamaan (5) untuk *drift* resistor standar 1 kΩ, sedangkan koefisien-koefisien yang lain diperoleh dari spesifikasi pabrik. Ketidakpastian dari pengukuran resistor dengan metode rasio berbasis DCCB yang dihitung berdasarkan persamaan (8) dapat dicontohkan untuk pengukuran resistor acuan 100 Ω dinyatakan dalam Tabel 2.

Tabel 2 Budget evaluasi ketidakpastian pengukuran nilai resistor acuan 100 Ω.

Komponen	Nilai		Ketidakpastian Standar		Distri-busi	Koefisien sensitivitas		Kontribusi ketidakpastian	Derajat kebebasan
$X_i$	$x_i$		$u(x_i)$			$c_i$		$u(R_i)$	$u_i$
Pengulangan pengukuran rasio	10,000062	Ω/Ω	1,35E-07	Ω/Ω	norm	-9,99990862	Ω	-1,35E-06	24
Nilai resistor standar 1 k	1000,00301	Ω	6,0E-05	Ω	norm	0,0999994	Ω/Ω	6,00E-06	1,00E+20
Drift 1 k	0,00025036	Ω	1,74E-08	Ω/Ω	rect	99,9996811	Ω	1,74E-06	1,00E+20
Pengaruh ketidakstabilan suhu ke 1 k			1,15E-06	Ω/Ω	rect	99,9997061	Ω	1,15E-04	1,00E+20
Akurasi bridge			4,1E-08	Ω/Ω	rect	-99,9997061	Ω	-4,08E-06	1,00E+20
Pengaruh ketidakstabilan suhu ke bridge			5,77E-09	Ω/Ω	rect	-99,9997061	Ω	-5,77E-07	1,00E+20
Resolusi bridge			2,9E-08	Ω/Ω	rect	-99,9997061	Ω	-2,89E-06	1,00E+20
Pengaruh ketidakstabilan suhu ke 100			1,15E-06	Ω/Ω	rect	-99,9997061	Ω	-1,15E-04	1,00E+20
Pembulatan akhir			2,89E-08	Ω/Ω	rect	-99,9997061	Ω	-2,89E-06	1,00E+20
Nilai resistor acuan	99,9997061	Ω	Ketidakpastian gabungan:					1,64E-04	
			Derajat kebebasan efektif:					5166398532	
			Faktor cakupan pada tingkat kepercayaan 95 %:					2	
			Ketidakpastian terentang (pada tingkat kepercayaan 95%):					0,00033	Ω
								3,3	μΩ /Ω

Dengan cara evaluasi yang sama dapat diperoleh nilai resistor acuan 10 Ω adalah (9,999992 ± 0,000046) Ω dan nilai resistor acuan 1 Ω adalah (1,0000027 ± 0,0000052) Ω.

Nilai-nilai ketidakpastian dari pengukuran resistor acuan 100 Ω, 10 Ω, dan 1 Ω yang dicontohkan pada Tabel 2 adalah ketidakpastian terentang (*expanded uncertainty*) yang diperoleh dengan asumsi memiliki distribusi normal. Ketidakpastian tersebut merupakan ketidakpastian standar gabungan yang dievaluasi dengan akar jumlah kuadrat dari

sumber-sumber ketidakpastian standar, seperti yang ditunjukkan pada persamaan (8), dikalikan dengan faktor cakupan (*k*) sama dengan dua. Besar faktor cakupan yang digunakan didasarkan dengan tingkat kepercayaan sebesar 95%.

Setelah nilai resistor acuan diperoleh, nilai tersebut digunakan untuk diturunkan ke standar kerja *reference multimeter* dengan cara mengukur kemampuan pembacaan *reference multimeter* menggunakan metode langsung 4-kawat. Hasil pengukuran tersebut ditunjukkan

pada Tabel 3. Hasil pengukuran menunjukkan kestabilan pengukuran yang presisi. Hal itu dapat dilihat dari deviasi masing-masing pengukuran yang mencapai orde  $10^{-7}$  terhadap penunjukan.

Tabel 3 Hasil pengukuran pembacaan resistor acuan dengan *reference multimeter*.

Nilai Nominal Resistor Standar ( $\Omega$ )	Pembacaan Alat ( $\Omega$ )	Deviasi (ppm)
100	99,999406	0,05
10	9,9999372	0,37
1	0,99998886	0,15

Dengan menggunakan persamaan (6), kesalahan pembacaan *reference multimeter* dapat diketahui. Hasil pengukuran yang terbaca di *reference multimeter* memiliki komponen-komponen koreksi yang diestimasi bernilai nol, karena komponen-komponen koreksi tersebut tidak signifikan terhadap nilai pembacaan *reference multimeter*. Sehingga komponen-komponen tersebut cukup dimasukkan sebagai komponen ketidakpastian. Evaluasi ketidakpastian dapat dikalkulasi dengan menggunakan persamaan (9) dapat dicontohkan untuk pengukuran *reference multimeter* pada titik 100  $\Omega$  dinyatakan dalam Tabel 4.

Tabel 4 Budget evaluasi ketidakpastian pengukuran *reference multimeter* pada titik 100  $\Omega$ .

Komponen	Nilai	Ketidakpastian Standar	Distri-busi	Koefisien sensitivitas	Kontribusi ketidakpastian	Derajat kebebasan
$X_i$	$x_i$	$u(x_i)$		$c_i$	$u(R_i)$	$u_i$
Pengulangan pengukuran resistor standar	99,999406 $\Omega$	5,48E-08 $\Omega$	norm	1 $\Omega/\Omega$	5,48E-08	4
Resolusi <i>reference multimeter</i>		2,89E-08 $\Omega/\Omega$	rect	99,999406 $\Omega$	2,89E-06	1,00E+20
Pengaruh ketidakstabilan suhu ke <i>reference multimeter</i>		4,33E-12 $\Omega/\Omega$	rect	99,999406 $\Omega$	4,33E-10	1,00E+20
Nilai resistor standar 100	99,9997061 $\Omega$	1,64E-04 $\Omega$	norm	-1 $\Omega/\Omega$	-1,64E-04	1,00E+20
Drift 100		6,69E-09 $\Omega/\Omega$	rect	-99,999706 $\Omega$	-6,69E-07	1,00E+20
Pengaruh ketidakstabilan suhu ke 100		1,15E-06 $\Omega/\Omega$	rect	-99,999706 $\Omega$	-1,15E-04	1,00E+20
Kesalahan Pembacaan	0,00030 $\Omega$	Ketidakpastian gabungan:			2,00E-04	
		Derajat kebebasan efektif:			7151355,717	
		Faktor cakupan pada tingkat kepercayaan 95 %:			2	
		Ketidakpastian terentang (pada tingkat kepercayaan 95%):			0,000401 $\Omega$	
					4,0 $\mu\Omega/\Omega$	

Dengan cara evaluasi yang sama dapat diperoleh hasil pengukuran kesalahan pembacaan *reference multimeter* pada titik ukur 10  $\Omega$  adalah sebesar  $(0,000054 \pm 0,000053) \Omega$ , dan pada titik ukur 1  $\Omega$  adalah sebesar  $(0,000014 \pm 0,000005) \Omega$ .

Setelah pengukuran penurunan nilai standar acuan ke standar kerja *reference multimeter* telah dilakukan, kemudian hasil tersebut dibandingkan dengan hasil pengukuran yang dilakukan oleh KRISS menggunakan persamaan (7). Berikut nilai kesalan pembacaan *reference multimeter* dan ketidakpastiannya dari

Metrologi - LIPI dan KRISS yang ditunjukkan pada Tabel 5.

Berdasarkan Tabel 5, dapat dilihat bahwa terdapat perbedaan pengukuran antara Metrologi-LIPI dengan KRISS. Perbedaan tersebut dikarenakan beberapa hal yang dapat terjadi. Hal pertama adalah resistor standar yang digunakan oleh Metrologi-LIPI memiliki nilai aktual resistor standar 1 k $\Omega$  dari hasil estimasi koreksi yang diakibatkan adanya *drift* yang diperoleh berdasarkan persamaan (5). Hal kedua adalah pengkondisian resistor acuan saat pengukuran. Meskipun hasil pengukuran



kesalahan pembacaan *reference multimeter* tersebut terdapat perbedaan, nilai ketidakpastian yang diberikan Metrologi - LIPI dan KRISSS saling mencakup, sehingga pengukuran yang dilakukan kedua lembaga metrologi nasional ini memiliki kecocokan/kesetaraan pengukuran.

Tabel 5 Perbandingan hasil ukur Metrologi - LIPI dan KRISSS.

Nominal Resistor	Lab.	Kesalahan Pembaca-an Alat ( $\Omega$ )	Ketidak-pastian ( $\Omega$ )
100	Metrologi-LIPI	0,00030	0,00040
	KRISSS	0,00001	0,00040
10	Metrologi-LIPI	0,000054	0,000053
	KRISSS	-0,000004	0,000060
1	Metrologi-LIPI	0,000014	0,000005
	KRISSS	0,000006	0,000007

Selain melihat nilai tersebut, untuk memvalidasi kesetaraan tersebut dikalkulasi dengan persamaan (7) yang menghasilkan *error number* ( $E_N$ ) yang ditampilkan pada Tabel 6.

Tabel 6 *Error Number* ( $E_N$ ) antara Metrologi - LIPI dengan KRISSS.

Nominal Resistor	$E_N$
100	0,5125
10	0,7311
1	0,8732

Berdasarkan hasil tersebut dapat dinyatakan bahwa pengukuran yang dilakukan oleh Puslit Metrologi - LIPI dan KRISSS memiliki nilai ukur yang berkesesuaian di mana  $|E_N| \leq 1$ , yang artinya perbedaan pengukuran Metrologi - LIPI dan KRISSS dapat dicakupi oleh masing-masing ketidakpastian di titik-titik pengukuran 100  $\Omega$ , 10  $\Omega$ , dan 1  $\Omega$ .

## 5. KESIMPULAN

Dari penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa nilai kalibrasi resistor standar telah berhasil diperoleh dan divalidasi dengan pengukuran yang dilakukan oleh KRISSS dengan nilai ukur yang berkesesuaian. Impelementasi nilai kalibrasi resistor standar 1 k $\Omega$  ke resistor acuan memberikan hasil pengukuran nilai resistor acuan 100  $\Omega$  adalah (99,99971  $\pm$  0,00033)  $\Omega$ , nilai resistor acuan 10  $\Omega$  adalah (9,999992  $\pm$  0,000046)  $\Omega$ , dan nilai resistor acuan 1  $\Omega$  adalah (1,0000027  $\pm$  0,0000052)  $\Omega$ . Nilai yang telah diturunkan kepada standar kerja,

*reference multimeter*, telah didapatkan kesalahan pembacaan pada titik ukur 100  $\Omega$  adalah sebesar (0,00030  $\pm$  0,00040)  $\Omega$ , pada titik ukur 10  $\Omega$  adalah sebesar (0,000054  $\pm$  0,000053)  $\Omega$ , dan pada titik ukur 1  $\Omega$  adalah sebesar (0,000014  $\pm$  0,000005)  $\Omega$ . *Error number* berdasarkan kriteria derajat ekuivalensi antara Metrologi - LIPI dan KRISSS pada resistor-resistor 100  $\Omega$ , 10  $\Omega$ , dan 1  $\Omega$  masing-masing adalah sebesar 0,51, 0,73, dan 0,87. Berdasarkan *error number* tersebut, hasil pengukuran Metrologi - LIPI memiliki kesesuaian nilai ukur dengan hasil ukur KRISSS. Saran peningkatan kedepan adalah memperkecil selisih nilai ukur oleh lab terhadap nilai ukur yang diperoleh oleh lab acuan, dengan mengkarakteristik dan mengevaluasi setiap nilai standar acuan terhadap pengaruh suhu. Koreksi terhadap pengaruh suhu dapat diberikan dan ketidakpastian dari komponen ini dapat diperkecil sehingga tidak lagi menggunakan nilai yang diberikan dari spesifikasi.

## DAFTAR PUSTAKA

- Allen F. Podell. (2007). Resistive Voltage Divider. Paten US No.US7202760 B2.
- Azzumar, M., Syahadi, M., dan Faisal, A. (2014). Karakterisasi Nilai Tahanan Current Shunt terhadap Arus Masukan. Jakarta: PPI-KIM ke-40.
- Azzumar, M. dan Faisal, A. (2014). Pengaruh Arus terhadap Nilai Resistansi dari Resistor Standar 1 m $\Omega$ . Jakarta: PPIS 2014.
- Boštjan Voljč, Matjaž Lindič, and Rado Lapuh. (2009). *Direct Measurement of AC Current by Measuring the Voltage Drop on the Coaxial Current Shunt*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 58, no. 4, April 2009.
- Cox, M. G. (2002). *The Evaluation of Key Comparison Data*. Metrologia, Vol. 39, No. 6, pp 589-595.
- F. J. Wilkins, M. J. Swan. (1970). *Precision ac/dc resistance standards*, Proc. IEEE, Vol 117, No. 4.
- Guildline. (2001). Technical Manual for Model 6675A Automatic Direct-Current-Comparator Resistance Bridge.
- Hoffmann, K. (1986). *Applying The Wheatstone Bridge Circuit*. HBM.
- Howarth Preben, Redgrave Fiona. (2008). Metrologi sebuah pengantar diterjemahkan oleh A. Praba Drijakara.

- Inglis.A.D. *Measuring the Quantum Hall Resistance Using a Room Temperature DC Current Comparator Bridge*. Technical Paper Institute for National Measurement Standards, NRC, Ottawa, Canada K1A 0R6.
- International Committee of Weights and Measures (CIPM): *Guidelines for CIPM key comparisons*, 1 March 1999, (<http://www1.bipm.org/utis/en/pdf/guidelines.pdf>).
- JCGM 100 : 2008. (2008). Evaluation of measurement data-Guide to The Expression of Uncertainty in Measurement.
- Kåre Lind, Tore Sørsdal, and Harald Slinde. (2008). *Design, Modeling, and Verification of High Performance AC-DC Current Shunts From Inexpensive Components*. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 57, no. 1, January 2008.
- National Instruments. (2014). *How to Guide for Most Common Measurements: Taking Temperature Measurements with RTDs*.
- Norman B. Belecki, Ronal F. Dziuba, Bruce F. Field and Barry N. Taylor. (1990). *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.
- Randolph E. Elmquist, Dean G. Jarrett, George R. Jones, Jr., Marlin E. Kraft, Scott H. Shields, and Ronald F. Dziuba. (2003). *NIST Measurement Service for DC Standard Resistors*. NIST. US.