

## EVALUASI NON-LINEARITAS JEMBATAN TAHANAN PADA SISTEM PENGUKURAN TERMOMETER TAHANAN PLATINA STANDAR

### *Non-Linearity Evaluation of Resistance Bridge on The Thermometer Measurement System of Standard Platinum Resistance*

Beni Adi Trisna, Agah Faisal dan Suherlan

Pusat Penelitian Metrologi – Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia  
Kompleks Puspiptek, Serpong, Tangerang, 15314, Banten, Indonesia  
E-mail: beni@kim.lipi.go.id

Diterima: 7 Januari 2016, Direvisi: 16 November 2016, Disetujui: 21 November 2016

#### Abstrak

Evaluasi non-linearitas jembatan tahanan MI 6010C dilakukan menggunakan *resistance bridge calibrator* yang bertujuan menentukan nilai kontribusi ketidakpastian tipe B dalam proses kalibrasi *standard platinum resistance thermometer*. RBC dihubungkan dengan lengan penghubung Rx dari jembatan tahanan. Nilai tahanan dari RBC ada 34 kombinasi tahanan. Kemudian dibandingkan dengan nilai tahanan dari resistor standar 100  $\Omega$  yang dihubungkan dengan lengan penghubung Rs. Nilai rasio dari seluruh kombinasi tahanan dapat diperoleh bersama residu. Selisih antara nilai rasio terukur dan terhitung yang didapat akan digunakan untuk menyatakan kesalahan penunjukan rasio dari jembatan tahanan. Metode *fitting linear* digunakan untuk mengoreksi residu sehingga varian dari residu tersebut bernilai minimum. Akar kuadrat dari varian dinyatakan sebagai non-linearitas jembatan tahanan. Hasil pengukuran menunjukkan jembatan tahanan tersebut masih laik untuk digunakan dengan nilai non-linearitas sebesar 0,7 ppm. Rentang pengukuran rasio tahananannya dari 0,16 hingga 1,16.

**Kata kunci:** jembatan tahanan, non-linearitas, pengukuran suhu.

#### Abstract

*Non-linearity Evaluation of MI 6010C resistance bridge has been used a Resistance Bridge Calibrator with aim to determine the contribution value of B type uncertainty in the calibration process of Standard Platinum Resistance Thermometer. The RBC connected with the Rx coupling sleeve of Resistance Bridge. The resistance values of RBC is 34 resistance combinations. Then, compared with the resistance values from a 100  $\Omega$  standard resistor was connected with the Rs coupling sleeve. Ratio values of all resistance combinations were achieved with the residual. Difference between measured and calculated ratio values were obtained as for used to declare the error of ratio indication of resistance bridge. The linear fitting method used to correct the residual until the residual's variances were minimum valuable. The square root of variance was be avowed as resistance bridge non-linearity. The measurement results showed the resistance bridge was still feasible to be used with the non-linearity value as big as 0.7 ppm. The measurement ratio range from 0.16 to 1.16.*

**Keywords:** resistance bridge, non-linearity, temperature measurement.

## 1. PENDAHULUAN

Termometer tahanan platina standar yang disebut *standard platinum resistance thermometer* (SPRT) merupakan termometer bermaterial logam mulia platinum. Digunakan sebagai sensor untuk mengukur suhu yang memiliki kesebandingan dengan nilai tahanan, menurut Price (1959). SPRT memiliki hubungan suhu-tahanan yang sangat stabil dan linear. Sifat unik dari SPRT yaitu memiliki rentang ukur temperatur yang cukup lebar mulai dari -272,5  $^{\circ}\text{C}$  sampai 961,78  $^{\circ}\text{C}$ . SPRT juga digunakan sebagai alat interpolasi untuk mendefinisikan

standar suhu internasional 1990 (ITS-90) (Preston-Thomas, 1990).

Penelitian ini menggunakan peralatan *non-Inductive type* standard resistor, jembatan tahanan, bak cairan, sel titik tetap, sensor SPRT, dan komputer pengolah data. Secara sistem, SPRT tidak dapat bekerja sendiri tanpa bantuan jembatan tahanan.

Jembatan tahanan berfungsi sebagai indikator rasio. Fungsinya membandingkan tahanan terukur SPRT (Rx) dengan tahanan resistor standar (Rs) yang terkondisi dalam bak cairan. Jembatan tahanan mempunyai peranan penting dalam sistem kalibrasi suhu dan dapat mencapai ketelitian hingga  $\leq 6$  mK.

Salah satu permasalahan yang masih diteliti hingga saat ini adalah mengenai non-linearitas jembatan tahanan. Non-linearitas menjadi salah satu komponen ketidakpastian pada pengukuran rasio tahanan ITS-90 (Strouse, 2008; Joung, dkk., 2012; & White, dkk., 2008).

Evaluasi jembatan tahanan penting dilaksanakan karena dapat meningkatkan kepercayaan atas hasil pengukuran dibandingkan klaim pabrikan jembatan tahanan (White, 1997). Secara sederhana, sumber ketidakpastian non-linearitas pada Jembatan Tahanan dapat diestimasi dari spesifikasi teknisnya. Namun, nilai tersebut tidak praktis untuk penggunaan di laboratorium bahkan menyebabkan estimasi nilai ketidakpastian cenderung lebih *under-estimated*.

Evaluasi jembatan tahanan dapat ditentukan dengan mengetahui nilai rasio tahanan aktual pada suatu rentang rasio tertentu. Penyimpangan indikator terhadap nilai aktualnya dalam suatu rentang dinyatakan sebagai nilai non-linearitas rasio tahanan pada jembatan tahanan. Terdapat dua metode untuk mendapatkan nilai aktual dari rasio tahanan. Metode pertama menggunakan beberapa nilai tahanan standar yang telah diketahui nilai aktualnya. Metode kedua dengan perhitungan yang tidak perlu mengetahui nilai aktual masing-masing tahanan. Evaluasi non-linearitas jembatan tahanan dalam penelitian ini dilakukan dengan menerapkan metode kedua. Metode ini dipilih karena lebih sederhana tanpa harus mengetahui nilai aktual tahanan.

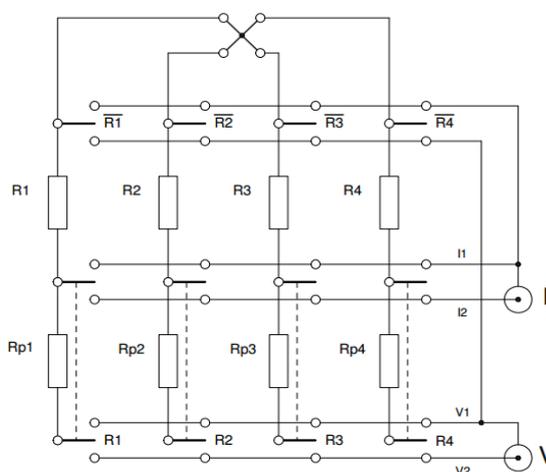
Tujuan penelitian untuk menentukan nilai kontribusi ketidakpastian tipe B dalam penggunaan indikator jembatan tahanan pada proses kalibrasi SPRT. Manfaat penelitian ini adalah dapat memberikan nilai ketidakpastian non-linearitas jembatan tahanan yang sesuai dengan penggunaan di laboratorium. Disamping itu, penelitian berkontribusi dalam penjaminan kepercayaan dan kualitas pengukuran di Pusat Penelitian Metrologi – LIPI (Akil, dkk., 2006).

## 2. TINJAUAN PUSTAKA

Non-linearitas rasio tahanan dari Jembatan Tahanan dapat dievaluasi dengan dua cara. Cara pertama menggunakan nilai tahanan standar yang diketahui nilai aktualnya dan terpasang pada lengan penghubung Rx dan Rs. Penyimpangan rasio tahanan terhadap rasio aktualnya pada rentang tertentu dapat dinyatakan sebagai non-linearitas dari jembatan tahanan. Cara ini membutuhkan banyak resistor

standar untuk melingkupi rentang rasio dengan derajat kebebasan yang memadai.

Cara kedua lebih sederhana, menggunakan serangkaian resistor yang diinterkoneksi seri-paralel pada Rx dan satu resistor standar pada Rs. Berbeda dengan cara pertama, nilai tahanan yang dihasilkan dengan cara ini tidak perlu diketahui nilai aktualnya. Nilai rasio tahanan aktual dapat diperoleh secara perhitungan. Penyimpangan indikator rasio terhadap rasio hasil perhitungan dapat dinyatakan sebagai non-linearitas dari jembatan tahanan. Salah satu alat ukur non-linearitas jembatan tahanan yang menggunakan metode ini adalah *resistance bridge calibrator* (RBC) (White, dkk., 1997).



Gambar 1 Skema rangkaian *resistance bridge calibrator*.

(Sumber: Podgornik, dkk., 2009).

Gambar 1 menunjukkan skema rangkaian RBC. Berupa 4 resistor dasar (R1 - R4), 4 resistor pembagi potensial (Rp1 - Rp4), 8 saklar, dan 2 konektor Bayonet Neill - Concelman (BNC). Rangkaian ini menghasilkan 34 kombinasi resistor seri-paralel berbeda yang dapat digunakan. Kombinasi tersebut diuraikan menurut White, dkk. (1997) sebagai berikut:

- 4 kombinasi pada resistor yang berdiri sendiri
- 5 kombinasi dari 2 resistor di rangkai seri
- 6 kombinasi dari 2 resistor di rangkai paralel
- 12 kombinasi dari 2 resistor dirangkai seri atau paralel terhadap resistor ketiga
- 4 kombinasi dari 3 resistor dirangkai seri atau paralel terhadap resistor keempat
- 3 kombinasi dari 2 pasang resistor parallel dirangkai seri.

Nilai rasio tahanan terukur diperoleh melalui pengukuran 34 kombinasi resistor Rx dibandingkan nilai tahanan dari resistor standar Rs. Rasio tahanan adalah besaran yang tidak memiliki dimensi. Karena itu, nilai aktual tahanan

Rx dan Rs tidak perlu diketahui dan tertelusur ke Satuan Internasional. Empat rasio tahanan terukur dijadikan dasar perhitungan 30 rasio lainnya menggunakan prinsip rangkaian pengganti dari masing-masing penghubungan seri-paralel. Ketigapuluh nilai tahanan berdasarkan rangkaian pengganti tersebut dinyatakan sebagai rasio tahanan terhitung. Nilai selisih rasio terukur dengan rasio terhitung dinyatakan sebagai residu. Akar kuadrat dari varian residu tersebut dinyatakan sebagai nilai non-linearitas dari jembatan tahanan. Hasil pengukuran dengan metode ini hanya menghasilkan nilai non-linearitas tetapi tidak menunjukkan nilai akurasi alat sebenarnya (White, dkk., 1997).

Hasil pengukuran rasio tahanan dari 4 resistor dasar dikoreksi dengan metode *fitting linear* agar evaluasi semakin akurat. Metode ini lebih akurat karena mengasumsikan jembatan tahanan memiliki penyimpangan rasio yang proporsional terhadap nilai rasio tahanan (White, 1997).

Pengolahan data dengan metode *fitting linear* untuk mendapatkan nilai  $\delta_{non-linearitas}$  tersebut dilakukan dengan beberapa langkah. Pertama, menggunakan 30 data pengukuran tahanan ( $m$ ) dan pengukuran 4 resistor dasar. Data tersebut dibuat model matematis *fitting linear* untuk residu ( $y_i$ ) terhadap nilai rasio terukur ( $x_i$ ). Hasilnya mendapatkan persamaan kurva yaitu:  $y = \alpha + \beta x$  (1)

Simbol  $\alpha$  adalah *intercept* dan  $\beta$  adalah *slope* dari persamaan *linear* tersebut. Kedua, nilai  $\alpha$  dan  $\beta$  dihitung menggunakan Persamaan (2) dan (3).

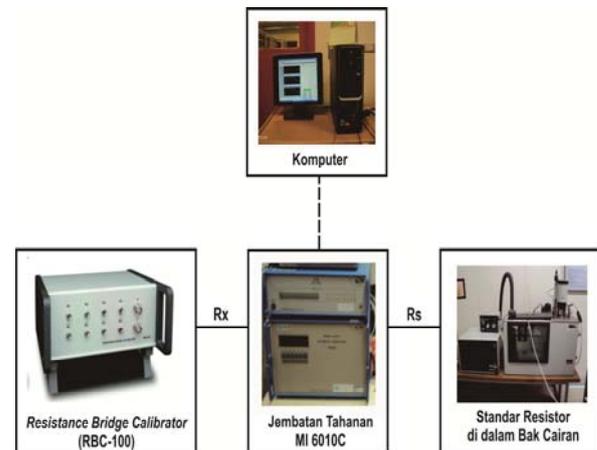
$$\alpha = \frac{1}{m} \sum y_i - \beta \frac{1}{m} \sum x_i, \quad (2)$$

$$\beta = \frac{m \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{m \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (3)$$

Ketiga, nilai residu masing-masing rasio tahanan dapat ditentukan setelah diperoleh hasil  $y$  dari persamaan kurva (1). Persamaan yang digunakan untuk menghitung nilai  $\delta_{non-linearitas}$  adalah:

$$\delta_{non-linearitas} = \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (4)$$

### 3. METODE PENELITIAN



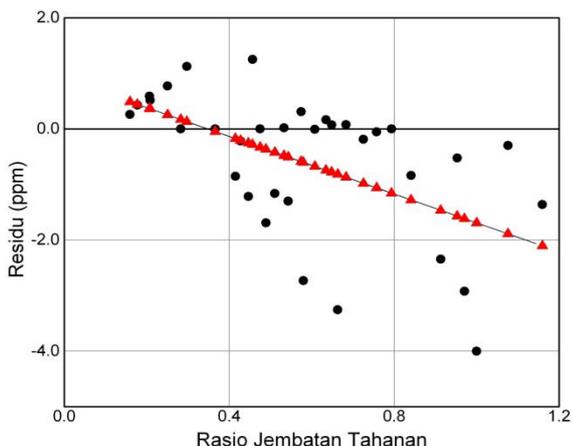
Gambar 2 Sistem pengukuran non-linearitas jembatan tahanan.

Sistem pengukuran non-linearitas jembatan tahanan MI 6010C ditunjukkan dalam Gambar 2. Lengan penghubung Rs dikoneksikan dengan resistor standar 100  $\Omega$  (Tinsley 5685). Kemudian lengan penghubung Rx dikoneksikan dengan RBC-100 menggunakan konektor BNC. Saklar pengganti kombinasi resistor pada RBC-100 diubah sesuai urutan kombinasi secara manual. Penggunaan sistem pengukuran ini dapat melingkupi rasio tahanan mulai dari 0,16 hingga 1,26.

Pengukuran tahanan dilakukan dengan mengalirkan arus sebesar 1 mA pada setiap lengan penghubung. Gunanya agar hasil pengukuran dapat dibandingkan. Kemudian, jembatan tahanan berfungsi mengukur nilai tahanan sekaligus mencari nilai rasio tahanan kedua lengan penghubung.

Pada setiap kombinasi, nilai tahanan Rx dan Rs dibaca dan direkam dengan komputer sebanyak 20 kali. Kemudian nilai rata-rata dari pengukuran tersebut dibandingkan sehingga diperoleh nilai rasio tahanan untuk satu titik ukur. Proses tersebut dilakukan pada semua titik ukur untuk memenuhi 34 kombinasi (satu pengukuran penuh). Pengukuran penuh diulang 5 set agar diketahui nilai standar deviasi penyimpangan rasio tahanan pada setiap titik ukur. Gunanya untuk menunjukkan kemampuan ulang pengukuran sistem ini.

#### 4. HASIL DAN PEMBAHASAN



Gambar 3 Hasil evaluasi non-linearitas jembatan tahanan MI 6010C.

Hasil evaluasi yang ditunjukkan pada Gambar 3 memperlihatkan residu sebelum dan sesudah dilakukan *fitting linier*. Residu sebelum diberi simbol lingkaran. Residu sesudah diberi simbol segitiga. Nilai residu merupakan nilai rerata dari 5 set pengukuran penuh.

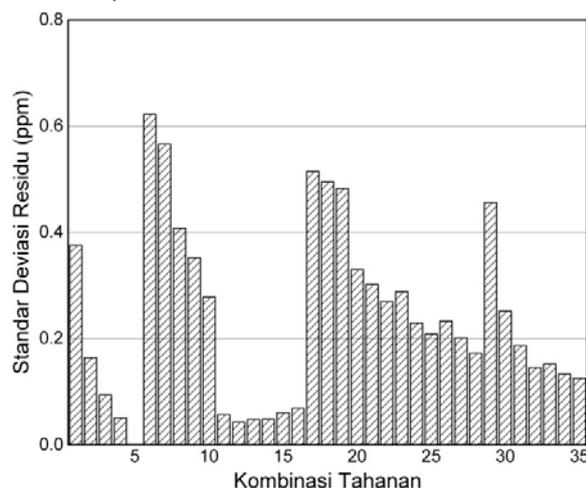
Rasio tahanan (residu) terbesar dan terkecil sebelum *fitting linier* adalah 1,00 (-4,00 ppm) dan 0,65 (0,07 ppm). Rasio tahanan terbesar dan terkecil setelah *fitting linier* adalah 1,16 (-2,10 ppm) dan 0,36 (0,05 ppm). Perhitungan yang digunakan mengacu persamaan (1), (2), dan (3). Hal ini menunjukkan bahwa metode *fitting linier* efektif menurunkan nilai residu. Metode ini juga lebih tepat untuk menggambarkan kondisi ideal dari linearitas suatu jembatan tahanan. Sebab, residu berbanding lurus terhadap rasio.

Hasil perhitungan nilai ketidakpastian non-linearitas jembatan tahanan menggunakan persamaan (4) adalah 0,70 ppm. Hal ini di luar spesifikasi teknis yang diklaim pabrikan jembatan tahanan tersebut sebesar <0,1 ppm. Keadaan ini disebabkan karena perbedaan kondisi pengukuran ketika klaim tersebut dinyatakan dan saat digunakan di laboratorium. Selain itu, ketidakstabilan resistor dasar dalam RBC juga turut memberikan andil pada hasil pengukuran non-linearitas. Podgornik (2008) melaporkan bahwa koefisien suhu pada 4 resistor dasar dalam RBC adalah  $\pm 0,6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ . Pengukuran non-linearitas dilakukan dengan meletakkan RBC pada suhu ruang dengan spesifikasi teknis  $22 \pm 1^{\circ}\text{C}$ . Hal ini karena variasi maksimum pengukuran tahanan RBC dapat mencapai 0,30 ppm pada rentang suhu tersebut. Cara tersebut menghasilkan ketidakpastian sekitar 0,1 ppm sehingga hasil pengukuran di

luar spesifikasi teknis pabrik pembuat jembatan tahanan.

Nilai ketidakpastian non-linearitas tersebut ketika diaplikasikan pada pengukuran suhu menggunakan SPRT berada dalam batas wajar. Hal ini memenuhi kriteria jembatan tahanan sebagai sebuah indikator. Penggunaan nilai ini telah dilakukan pada proses realisasi titik leleh gallium ( $29,7646^{\circ}\text{C}$ ). Nilai ketidakpastian non-linearitas jembatan tahanan 0,70 ppm dikonversi dalam satuan suhu setara dengan 0,39 mK. Konversi ini dilakukan dengan asumsi konstanta  $dW/dT$  dari titik tetap gallium sebesar 0,003952412 (White, dkk., 2009). Hasil ketidakpastian standar gabungan dari realisasi titik leleh gallium adalah sekitar 1,0 mK. Komponen ketidakpastian non-linearitas jembatan tahanan hanya berkontribusi sekitar 15,21% dari ketidakpastian standar gabungan. Hasilnya termasuk dalam batas wajar karena berkontribusi minor terhadap ketidakpastian gabungan.

Kemampuan ulang pengukuran non-linearitas juga dievaluasi selain nilai ketidakpastian non-linearitas. Gambar 4 menunjukkan kemampuan ulang 5 set pengukuran sebagai standar deviasi residu setelah *fitting linier* pada setiap titik ukur. Kemampuan ulang terbesar yang diperoleh adalah 0,62 ppm pada nilai rasio tahanan 1,16. Kemampuan ulang terkecil yang diperoleh adalah 0,04 ppm pada nilai rasio tahanan 0,25. Nilai rata-rata kemampuan ulang pengukuran non-linearitas dari 5 set pengukuran adalah 0,25 ppm. Dari data ini disimpulkan bahwa kemampuan ulang pengukuran tidak tercapai secara optimal.



Gambar 4 Kemampuan ulang dari sistem pengukuran non-linearitas jembatan tahanan.

## 5. KESIMPULAN

Evaluasi non-linearitas Jembatan Tahanan MI 6010C menggunakan RBC untuk pertama kalinya telah dilakukan. Hasil evaluasi non-linearitas menunjukkan jembatan tahanan yang digunakan memenuhi kriteria sebagai indikator pada proses kalibrasi SPRT. Nilai ketidakpastian non-linearitas yang dihasilkan sebesar 0,70 ppm pada rentang ukur rasio antara 0,16 dan 1,16. Nilai tersebut diaplikasikan pada pengukuran suhu, setara dengan 0,39 mK pada suhu titik leleh gallium (29,7646 °C). Hasil pengukuran suhu tersebut menunjukkan berkontribusi minor (15,21%) dari ketidakpastian standar gabungan pada realisasi titik leleh gallium.

Pengukuran non-linearitas memiliki ketergantungan tahanan dari resistor dasar RBC terhadap suhu ruang. Ketergantungan ini mengakibatkan kemampuan ulang pengukuran tidak tercapai secara optimal. Penelitian selanjutnya dapat membuat enklosur untuk mengatasi ketergantungan tersebut. Enklosur berguna untuk menjaga stabilitas suhu resistor dasar dalam RBC. Gunanya agar pengukuran nilai tahanan RBC yang bergantung pada suhu dapat diminimalisir. Hal ini berdampak pada tercapainya kemampuan ulang pengukuran yang lebih baik.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Pusat Penelitian Metrologi - LIPI atas dukungan dana penelitian yang telah diberikan. Selain itu, penulis juga mengucapkan terima kasih kepada A. S. Tistomo dan D. Larasati atas diskusi teknis yang memperluas wawasan untuk penyusunan makalah ini.

## DAFTAR PUSTAKA

- Akil, H. A., Erawan, D. & Zaid, G. (2006). The role of NMI in the development and implementation of documentary standard and accreditation scheme. *Prosiding 3rd International Symposium on Metrology & Physics Application, and Energy Measurement*, 3, 31-37.
- Joung, W., dkk. (2012). Nonlinearity Assessment of ASL F900 resistance thermometry bridges. *Prosiding the Ninth International Temperature Symposium*, 8, 404-408.
- Podgornik, T., dkk. (2009). Nonlinearity testing of equipment used in temperature measurements. *Prosiding XIX IMEKO World*

- Congress, Fundamental and Applied Metrology*, 14, 815-819.
- Podgornik, T., dkk. (2008). Automation of resistance bridge calibrator. *Int. J. Thermophys*, 29, 403-413.
- Podgornik, T., dkk. (2009). Investigation of resistance-ratio bridges using the automated resistance bridge calibrator. *Measurement*, 24, 7, 1065-1072.
- Price, R. (1959). The platinum resistance thermometer: a review of its construction and applications. *Platinum Metals Rev.*, 3, 3, 78-87.
- Strouse, G. F. (2008). Standard platinum resistance thermometer calibrations from the Ar TP to the Ag FP. Gaithersburg: NIST Publication.
- Preston-Thomas, H. (1990). The international temperature scale of 1990 (ITS-90). *Metrologia*, 27, 1, 3-10.
- White, D. R. (1997). A method for calibrating resistance bridges. *Prosiding TEMPMEKO 1996*, 6, 129-134.
- White, D. R., & Williams, J. M. (1997). Resistance network for verifying the accuracy of resistance bridges. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 46, 2, 329-332.
- White, D. R., Jones, K., Williams, J. M., & Ramsey, I.E. (1997). A Simple Resistance Network for Calibrating Resistance Bridges. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 46, 5, 1068-1074.
- White, D.R., dkk. (2008). A General Technique for Calibrating Indicating Instruments. *Metrologia*, 45, 199-210.

