

DISEMINASI STANDAR TEGANGAN DC POLARITAS POSITIF KE POLARITAS NEGATIF MENGGUNAKAN METODE SUBSTITUSI TERMAL PADA KETELITIAN PENGUKURAN MENCAPAI $0,04 \mu\text{V/V}$

THE DISSEMINATION OF POSITIVE POLARITY DC VOLTAGE STANDARD TO NEGATIVE POLARITY USING THERMAL SUBSTITUTION METHOD AT MEASUREMENT ACCURACY UP TO $0.04 \mu\text{V/V}$

R. Hadi Sardjono dan M. Syahadi

Pusat Penelitian Metrologi LIPI, Kompleks Puspiptek Gedung 420, Tangerang, Banten
sar_djono@yahoo.com, hadisarjono@kim.lipi.go.id

Abstrak

Pemeliharaan ketelitian besaran standar tegangan polaritas negatif (V_{DC}^-) tertinggi di Laboratorium Metrologi Kelistrikan Puslit Metrologi LIPI tidak dapat dilakukan dengan menerapkan sistem pengukuran metode substitusi langsung seperti yang telah diterapkan pada pemeliharaan ketelitian besaran tegangan polaritas positif (V_{DC}^+). Pengukuran metode substitusi langsung hanya dapat dilakukan terhadap dua besaran tegangan dengan polaritas sama. Sebuah pengukuran metode substitusi termal telah digunakan untuk menyebarkan besaran tegangan dengan polaritas yang berbeda, yaitu dari polaritas positif ke polaritas negatif. Penelitian ini dilakukan untuk mengkalibrasi besaran standar V_{DC}^- agar dapat membangun sebuah sistem ketertelusuran mandiri pada besaran standar tegangan DC (V_{DC}) yang telah mengacu pada besaran tegangan standar nasional yang dibangkitkan oleh sebuah sistem standar, yaitu PJVS_{LIPi}. Metode pencuplikan data pengukuran dilakukan berdasarkan interval waktu kestabilan dan diperoleh nilai kesalahan pengukuran mencapai 0,00001%. Hasil pengukuran ini kemudian diverifikasi dengan pengukuran berdasarkan interval waktu 1 menit yang memiliki kesalahan pengukuran mencapai 0,00071%.

Kata kunci: diseminasi, standar, tegangan DC, metode substitusi termal

Abstract

Accuracy maintenance of the highest negative polarity voltage standard (V_{DC}^-) unit in electrical metrology laboratories of Metrology Research Center-LIPI cannot be done by applying the method of direct substitution measurement system as it has been applied to the maintenance of positive polarity voltage standard (V_{DC}^+) unit. A direct measurement of substitution method can only be carried out on two same polarity units of voltage. A measurement of thermal substitution method has been used to disseminate the quantity of voltage with different polarity that is of positive polarity to the negative polarity. This study was conducted to calibrate the quantity of V_{DC}^- standards in order to establish a traceability system independently on the quantity of DC voltage standard (V_{DC}) which had been referred to the national standard voltage quantity generated by a standard system that is PJVS_{LIPi}. Measurement data sampling method was done based on the stable time interval and then it obtained the measurement error values of 0.00001%. The measurement results are then verified by measurements based on a time interval of 1 minute which had reached its measurement error of 0.00071%.

Keywords: dissemination, standard, DC voltage, thermal substitution method

1. PENDAHULUAN

Sampai saat ini, tingkat standar tertinggi (standar primer) di metrologi kelistrikan Puslit Metrologi LIPI berada pada besaran tegangan DC. Kemampuan ukur tertinggi yang telah dimiliki oleh besaran tegangan DC ini bisa mencapai $0,01 \mu\text{V/V}$ yang mana telah direalisasikan oleh sebuah sistem pembangkit tegangan berbasis

kuantum disebut sebagai Josephson Voltage System (JVS).^[1] Tingkatan standar berikutnya berada pada tingkat ketelitian yang dimiliki oleh standar sel (instrumen sumber) dan selanjutnya diikuti tingkat ketelitian yang dimiliki oleh instrumen kalibrator multifungsi.

Jika ditinjau berdasarkan fungsi kerja yang dilakukan dalam kegiatan pengukuran, instrumen kalibrator multifungsi dapat dikategorikan menjadi dua tipe, yaitu tipe sumber dan meter. Dengan keberadaan dari kedua tipe instrumen tersebut, proses pengukuran dapat dibangun berdasarkan sistem pengukuran langsung (*direct measurement*) dengan beberapa metode, yaitu metode langsung, metode perbandingan, dan metode substitusi. Metode langsung dipergunakan apabila instrumen standar dan instrumen yang akan diukur dapat melakukan pengukuran ketika keduanya dikoneksi tanpa alat bantu (secara langsung). Adapun pada pengukuran yang menggunakan metode perbandingan dan metode substitusi justru akan terjadi jika instrumen standar ataupun instrumen yang diukur sama-sama bertipe sumber atau meter. Artinya bahwa proses pengukuran berdasarkan metode perbandingan dan metode substitusi baru dapat dilakukan setelah melibatkan instrumen bantu.

Pada dasarnya terdapat dua jenis skala pengukuran tegangan DC (V_{DC}) yang terkandung dalam metrologi kelistrikan, yaitu tegangan polaritas positif (V_{DC+}) dan tegangan polaritas negatif (V_{DC-}). Kedua nilai satuan tegangan tersebut merupakan dua tipe sinyal yang dibangkitkan oleh instrumen tipe sumber. Namun, kedua instrumen sumber tersebut memiliki perbedaan polaritas. Jadi, jika diukur dengan metode substitusi langsung, model matematika yang dihasilkan bukan berupa nilai koreksi yang berasal dari proses pengukuran yang membandingkan dua nilai titik ukur yang sama, melainkan berupa nilai dari hasil proses penambahan atau pengurangan.

1.1 Latar belakang

Secara definitif, sebuah bagan ketertelusuran untuk kuantitas tegangan DC yang lengkap memiliki dua jenis besaran, yaitu besaran dengan polaritas positif (V_{DC+}) dan besaran dengan polaritas negatif (V_{DC-}). Proses diseminasi besaran ukur dari V_{DC+} ke V_{DC-} harus dilakukan di Laboratorium Metrologi Kelistrikan, Puslit Metrologi-LIPI untuk mendapatkan sebuah bagan ketertelusuran mandiri dalam besaran

V_{DC} . Proses diseminasi besaran ukur ini dilakukan dengan ketentuan bahwa instrumen standar memiliki kemampuan ukur dengan ketelitian yang lebih tinggi terhadap unit yang diukur (*unit under calibration/UUC*). Nilai ketelitian merupakan sebuah nilai kedekatan terhadap nilai sebenarnya. Semakin teliti sebuah nilai, semakin kecil nilai koreksinya.

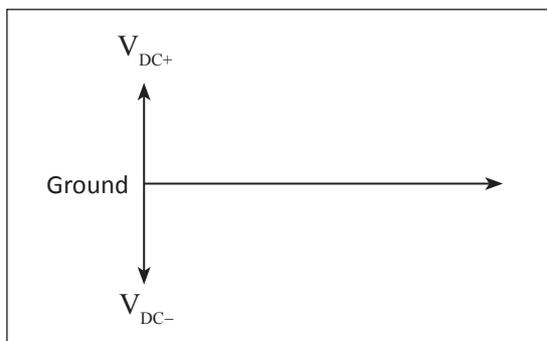
Pelayanan kalibrasi besaran V_{DC-} dapat dilakukan dengan capaian ketertelusuran yang mengacu pada standar yang tertinggi, yaitu standar V_{DC-} atau V_{DC+} . Menurut sistem pengukuran yang sudah sering dipergunakan dalam proses kalibrasi V_{DC-} , yaitu metode langsung, metode nol, ataupun substitusi langsung, ternyata berdasarkan kondisi ketersediaan standar acuan dapat dilakukan dengan dua cara. Cara pertama dapat dilakukan dengan kondisi ketersediaan standar acuan besaran V_{DC-} dapat tertelusur sampai dengan standar primer yang merealisasikan definisi satuan SI. Adapun cara kedua dilakukan dengan kondisi ketersediaan standar acuan V_{DC-} tidak dapat tertelusur sampai dengan standar primer yang merealisasikan definisi satuan SI. Standar primer yang dimaksud adalah berupa sistem pembangkit tegangan standar berbasis kuantum, yaitu *Programmable Josephson Voltage System (PJVS)*.

Implementasi cara kedua dapat direalisasikan dengan dua cara, yaitu menggunakan sensor tipe *thermoelement* (TE) dan tipe *solid state* (SS). Tipe TE, yakni elemen pemanas dan komponen bimetal merupakan dua bagian yang berbeda dan tidak terhubung secara elektrik, tetapi terhubung secara termal. Sementara itu, tipe SS memiliki komponen pembanding energi panas berupa elemen pemanas *solid state* yang dibangkitkan oleh peristiwa eksitasi (suplai) sinyal listrik V_{DC+} ataupun V_{DC-} . Energi panas dari elemen tersebut kemudian dikonversi oleh sensor RMS menjadi sinyal tegangan DC yang dapat diukur dengan menggunakan Nanovoltmeter. Tipe SS ini memiliki ketelitian pengukuran mencapai 5 ppm. Jadi, secara operasional jika dipergunakan ke dalam proses pengukuran akan terhindar dari rugi-rugi elektronik ketika menggunakan instrumen bantu elektronik, baik berupa sumber maupun meter.

1.2 Tujuan

Biasanya, pemeliharaan nilai standar untuk besaran V_{DC-} yang diperoleh dari sebuah instrumen standar pembangkit *Multifunction Calibrator* selalu dilakukan dengan menggunakan fasilitas kalibrasi otomatis secara internal. Prosedur kalibrasi internal ini dilaksanakan dengan dukungan dua instrumen standar berupa sel standar yang memiliki kemampuan membangkitkan standar tegangan sebesar 1 V, 1.018 V, dan 10 V serta resistor standar. Kedua nilai yang diperoleh dari kedua instrumen standar tersebut dikoneksikan secara bergantian ke terminal *input* dari *Multifunction Calibrator* untuk dipergunakan sebagai nilai acuan. Selanjutnya, dengan kemampuan *software*-nya, *Multifunction Calibrator* melakukan proses kalibrasi diri (*self-calibration*) terhadap besaran-besaran yang dimilikinya, termasuk besaran V_{DC-} . Hasil analisis data dari proses kalibrasi internal tersebut berupa nilai nominal yang telah terkoreksi oleh nilai sel standar pada titik ukur 10 V dan nilai resistor standar 10 k Ω , sedangkan untuk mendapatkan nilai ketidakpastian pengukuran harus dilakukan sejumlah proses kalibrasi pada interval waktu yang ditetapkan (minimum tiga bulan).

Tanpa mengubah asas kemetrollogian dari sistem pengukuran dengan metode substitusi dan dengan adanya keterbatasan dari standar acuan yang tidak tertelusur hingga standar definisi maka perlu dibangun sebuah metode pengukuran yang baru. Pengembangan sistem pengukuran dengan metode substitusi untuk besaran V_{DC-} ini harus dapat dilakukan pada kondisi keberadaan dari instrumen standar acuan yang tertelusur yakni berupa besaran standar V_{DC+} . Selain bisa membandingkan dua besaran



Gambar 1. Karakteristik Sinyal V_{DC+} dan V_{DC-}

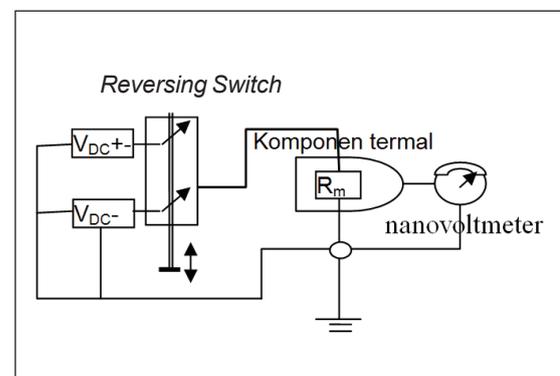
DC yang berbeda polaritas, proses pengukuran ini juga dapat dipergunakan untuk membangun sebuah bagan ketertelusuran mandiri hingga ke tingkat standar tertinggi tegangan DC+ dari *Josephson Voltage System (JVS)*.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Besaran tegangan DC merupakan sinyal tegangan listrik yang memiliki amplitudo yang bersifat tetap (konstan) sepanjang waktu. Pada dasarnya karakteristik besar tegangan listrik DC ini dapat divisualisasikan menggunakan instrumen ukur yang disebut osiloskop. Namun, untuk tujuan pengukuran dengan ketelitian yang cukup signifikan di atas 0,1%, osiloskop kurang memadai. Jadi, proses pengukuran tegangan DC pada rentang ukur yang diinginkan hanya dapat dicapai dengan menggunakan instrumen *Digital Multimeter* (meter) atau *Multifunction Calibrator* (sumber).

Berdasarkan pada struktur polaritas, sinyal tegangan DC memiliki amplitudo positif dan negatif terhadap *ground* (lihat Gambar 1), yakni bersifat tetap (konstan) sepanjang waktu dan dapat dilambangkan sebagai V_{DC+} dan V_{DC-} .^[2] Kedua polaritas tegangan tersebut dapat diukur melalui dua teknik pengukuran yang disebut sebagai sistem pengukuran langsung (*direct*) atau tidak langsung (*indirect*) dengan menggunakan metode substitusi.

Terdapat dua tipe *thermal transfer standard* (TTS) yang dapat digunakan untuk mengukur besaran listrik tegangan berdasarkan perbedaan polaritas melalui efek termal, yaitu yang berbasis elemen termal (TE atau *thermal element*) dan yang berbasis *solid state*. Kedua tipe ini



Gambar 2. Komponen Termal (TE atau *Solid State*) dalam Sistem Pengukuran V_{DC-} dengan V_{DC+}

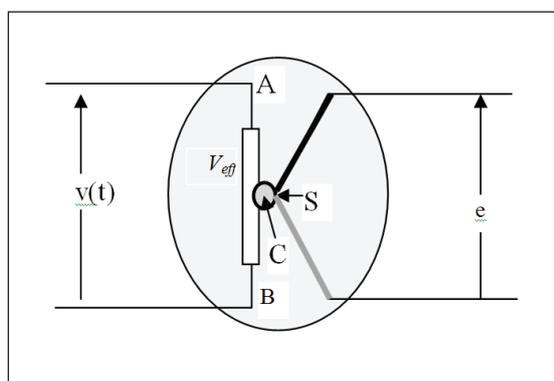
pada prinsipnya bekerja dengan menggunakan komponen TE atau *solid state* yang mampu mengubah energi listrik menjadi energi panas (*thermocouple*) dan sebaliknya (*thermoelectric*).

Deviasi respons antara eksitasi besaran listrik V_{DC+} dan V_{DC-} pada komponen elemen atau *solid state* berupa termal dapat dianalisis menurut fungsi transfer True Root Mean Square. Realisasi efek panas yang dibangkitkan oleh suplai besaran tegangan dapat dianalisis berdasarkan Gambar 2.

Rm adalah tahanan ideal (komponen elemen TE atau *chip solid state*) yang dipergunakan sebagai *media converter*.^[3] Efek termal merupakan hasil dari peristiwa perubahan energi dari energi listrik ke energi panas. Peristiwa perubahan energi dapat dijelaskan melalui Hukum Joule yang menyatakan bahwa “Komponen Rm yang memancarkan daya panas akibat nilai suplai besaran tegangan adalah sebagai suatu kondisi ketika daya panas lebih besar daripada daya listrik (P) yang dihasilkan sehingga komponen Rm mencoba memancarkannya ke ruang sekitar”. Jika panas yang dihasilkan ekuivalen dengan panas yang dipancarkan, panas Rm telah mencapai kondisi tunak (stabil). Kondisi stabil dari komponen Rm dapat tercapai menurut dua aspek, yaitu aspek penyuplaian besaran V_{DC-} dan aspek penyuplaian besaran V_{DC+} .

2.1 Prinsip Dasar TTS Berbasis *Thermo Element* (TE)

Thermal transfer standard (TTS) ini merupakan sebuah instrumen standar yang bekerja untuk mengukur besarnya sinyal listrik berdasarkan efek Seebeck. Instrumen ini bekerja menggunakan perangkat komponen TE (sebagai Rm)



Gambar 3. Rangkaian Sederhana Komponen TE

sehingga jika energi listrik dari sinyal tegangan listrik disuplaikan pada terminal *input*-nya, energi listrik tersebut akan diubah menjadi energi panas (lihat Gambar 3).^[4] Proses pemanasan elemen termal akan terjadi pada seutas kawat halus (sepanjang AB) dengan tingkat panas yang sebanding dengan besarnya aliran arus akibat suplai tegangan *input* ($v(t)$). Tegangan *output* elemen termal dapat diukur secara *remote* dengan bantuan material C, yang memanasi material jungsi S beserta dengan konstanta besi (*iron-constant*) sebesar e. Lebih lanjut, material termoelektrik memiliki konduktivitas listrik tinggi dan konduktivitas panas rendah.^[5]

Jungsi S merupakan titik pertemuan dua jenis logam dengan material yang berbeda dan disebut sebagai kontak panas (lihat Gambar 3). Nilai energi panas yang terjadi pada seutas kawat halus tersebut akan sebanding dengan nilai energi listrik *input* V yang disuplai sebagai kuadrat arus yang dialirkan sebesar,

$$E = \frac{V^2}{R} \cdot t \dots\dots\dots(1)$$

dengan,

- E = energi listrik berupa panas (joule),
- I = sinyal arus suplai (A),
- V = sinyal tegangan suplai (V),
- R = nilai tahanan komponen TE (Ω), dan
- t = waktu respons komponen TE untuk mencapai kondisi jenuh (detik).

Melalui proses efek termal (Seebeck), komponen S dapat mengonversi sinyal energi panas E menjadi sinyal listrik DC e sebesar,^[6]

$$\nabla e = -S \nabla T \dots\dots\dots(2)$$

dengan,

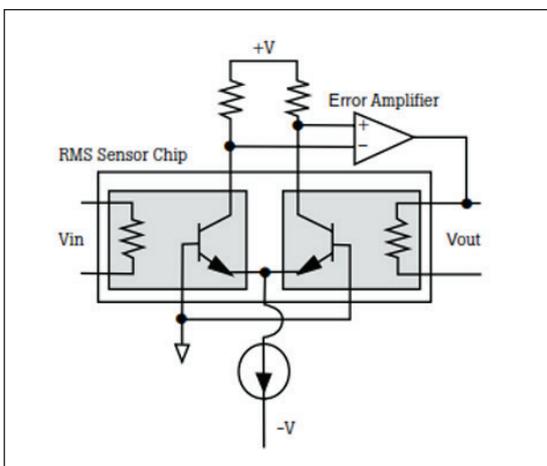
- S = koefisien Seebeck pada titik tinjauan dengan *n-type semiconductor* (difusi elektron terjadi dari *hot* ke *cold region*),
- ∇T = kecuraman suhu pada titik tinjauan, dan
- e = tegangan DC yang dibangkitkan.

2.2 Prinsip TTS Berbasis *Solid State*

TTS ini merupakan sebuah instrumen standar yang bekerja untuk mengukur besarnya sinyal listrik berdasarkan sensor *root mean square* (RMS).^[7] Sensor RMS adalah sensor RMS *solid-state* (sebagai R_m) yang memiliki rangkaian ekuivalen sederhana seperti yang telah ditunjukkan sebagai *chip* sensor pada Gambar 1. *Chip* sensor terdiri atas dua konverter tegangan termal yang terletak berdekatan dan menggunakan sensitivitas suhu, seperti termokopel tradisional (tipe TE) berupa jungsi transistor basis-emitor (BE).

Keluaran (*output*) dari *chip* sensor adalah penguat kesalahan (*error amplifier*) yang digunakan untuk memandu *chip* sensor RMS kedua (umpan balik) dari V_{in} seperti pada Gambar 4. Penyederhanaan rangkaian sensor RMS berupa resistor atau sepasang transistor. Keluaran dari rangkaian sensor RMS adalah nilai tegangan DC yang berbanding lurus dengan nilai RMS sinyal *input*. Sensor RMS ini dirancang untuk mendapatkan rugi-rugi rendah (*low noise*) dan waktu persiapan pengukuran (waktu pemanasan) yang lebih singkat dibandingkan dengan tipe TE.

Proses kerja dengan rugi-rugi rendah yang telah dimiliki transistor sensor RMS ini dapat dilihat seperti yang tercantum dalam Gambar 4. Pengukuran pada skala penuh biasanya berulang dalam kisaran nilai 0,5 ppm. Ukuran fisik sensor RMS yang kecil dan pemosisian dari kedua individu konverter yang berdekatan tersebut dapat menghasilkan kestabilan tegangan *output* yang lebih cepat.



Gambar 4. Penyederhanaan Rangkaian Sensor RMS

2.3 Prinsip Dasar Sistem Pengukuran Langsung Berdasarkan Metode Sensor RMS

Pada prinsipnya, sensor RMS dapat dikatakan sebagai media yang mampu menghasilkan sinyal tegangan listrik dari suatu proses pentransferan energi, yaitu dari energi panas ke energi listrik. Energi panas ideal dapat diperoleh dari reaksi sebuah beban ideal (resistor ideal) yang dialiri arus listrik, dan nilai arus listrik ini dapat diatur oleh nilai tegangan yang menyuplai beban ideal tersebut. Perubahan nilai panas yang terjadi pada media ini tidak bergantung pada polaritas sinyal arus atau tegangan, baik itu berupa sinyal AC, DC+ maupun DC-, tetapi jika terjadi perubahan nilai amplitude. Dengan demikian, prinsip sensor RMS ini dapat dipergunakan untuk mengkalibrasi sinyal listrik (UUC) yang memiliki polaritas yang berlainan terhadap polaritas sinyal acuan (STD).

Kedua sinyal yang terlibat dalam proses kalibrasi ini akan dibandingkan melalui sebuah medium transfer yang sama sehingga dapat dianalogikan sebagai metode substitusi. Dengan demikian, dapat ditetapkan bahwa sistem pengukuran langsung memiliki dua metode substitusi, yaitu metode substitusi langsung dan metode substitusi termal.

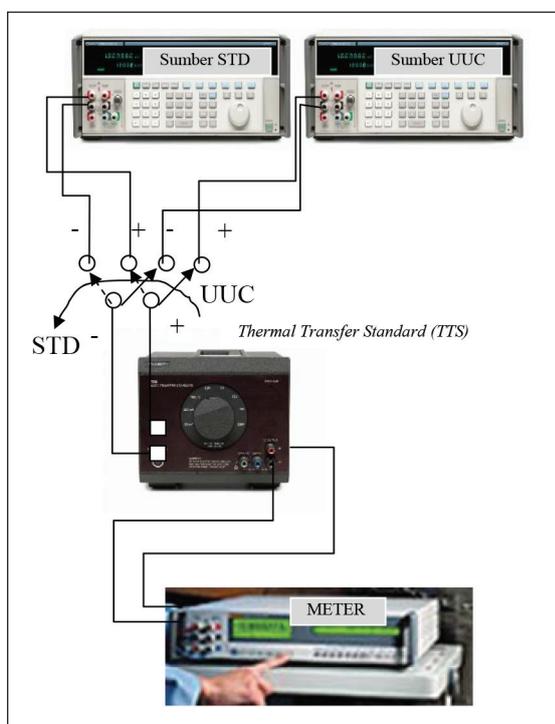
Pada metode substitusi langsung, untuk membandingkan dua sinyal harus dilengkapi dengan alat bantu berupa Meter. Adapun alat bantu Meter ini hanya dapat digunakan untuk memproses perbandingan jika kedua sinyal tersebut memiliki polaritas sama. Selain itu, secara metrologi, keterlibatan alat bantu tersebut dapat dianalisis sebagai salah satu sumber kesalahan pada sistem pengukuran karena diartikan telah melibatkan rangkaian elektronik yang ikut serta dalam proses pengukuran dalam hal membaca setiap sinyal, baik sinyal acuan maupun sinyal yang dikalibrasi. Oleh karena itu, metode substitusi langsung ini tidak dapat digunakan untuk mengkalibrasi sinyal listrik yang memiliki polaritas saling berbeda.

Sementara itu, dengan mengimplementasikan metode substitusi termal, pemakaian alat bantu Meter hanya digunakan untuk mengukur hasil proses efek termal yang diperoleh berupa tegangan *output* dengan polaritas positif, yaitu

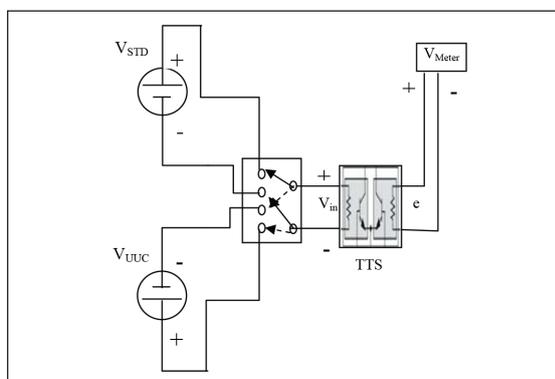
V_{DC+} . Dengan demikian, metode substitusi termal ini dapat dipergunakan untuk melakukan kalibrasi sinyal listrik yang memiliki polaritas saling berlainan, artinya tegangan dengan polaritas negatif (V_{DC-}) dapat dikalibrasi dengan tegangan polaritas positif (V_{DC+}).

Proses kalibrasi dapat dilakukan berdasarkan dukungan sebuah rangkaian ekuivalen berupa sistem pengukuran langsung dengan metode substitusi termal dan yang dapat dinyatakan berupa diagram rangkaian seperti tertera pada Gambar 5b.

Metode substitusi termal dapat dilakukan dengan menggunakan sebuah instrumen standar



Gambar 5a. Rangkaian Sistem Pengukuran Langsung Metode Substitusi Termal



Gambar 5b. Rangkaian Ekuivalen Sistem Pengukuran Langsung Metode Substitusi Termal

yang disebut *thermal transfer standard* (TTS) yang dapat dilihat pada Gambar 5a dan 5b. Sesuai dengan prinsip kerjanya, sebagai komponen transfer termal, TTS akan melakukan dua proses transfer energi, yaitu dari energi listrik sebagai sinyal *input* (sinyal standar tegangan DC+ dan sinyal yang dikalibrasi tegangan DC-) ke energi panas dan dari energi panas ke energi listrik sebagai sinyal *output* berupa sinyal tegangan DC+. Relasi antara sinyal *input* dan *output* dari TTS dapat dinyatakan berupa persamaan berikut ini,^[8]

$$e = k \cdot V_{eff}^n \dots\dots\dots(3)$$

dengan

e = tegangan *output* TTS,

V_{eff} = tegangan efektif dari suplai tegangan *input*,

k = koefisien yang bergantung pada karakteristik *chip* RMS sensor, dan

n = sensitivitas *chip* RMS sensor, yaitu berkisar 1.6 sampai dengan 2.0.

Jika fasilitas suplai tegangan *input* dari elemen termal digunakan untuk mengkalibrasi tegangan DC- (V_{UUC}) dengan menggunakan standar tegangan DC+ (V_{STD}), berdasarkan perbedaan panas yang terjadi pada sensor RMS tersebut dapat diperoleh nilai kesalahan (*error*) V_{UUC} dari V_{STD} yaitu sebesar δ . Nilai perbedaan panas pada TTS tersebut kemudian diubah menjadi perbedaan nilai tegangan *output* yang dapat dimonitor dengan menggunakan nanovoltmeter. Nilai kesalahan ini dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut,^[8]

$$\delta = \frac{V_{UUC} - V_{STD}}{V_{STD}} \dots\dots\dots(4)$$

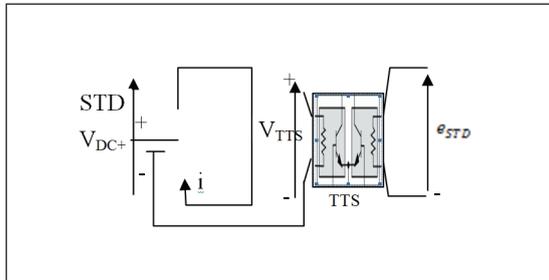
3. PROSES PENGUKURAN DAN ANALISIS DATA

Menurut spesifikasi teknis dari komponen Rm yang dimiliki tipe elemen dan *solid state* dapat dilihat pada Tabel 1.^[3]

Mengingat proses pengukuran yang harus dilakukan pada penelitian ini membutuhkan waktu konsentrasi yang cukup lama dan masih bersifat manual, berdasarkan pertimbangan teknis tersebut dipergunakan tipe *solid state*.

Tabel 1. Spesifikasi Teknis Komponen Rm Tipe TE dan *Solid State*

Type	Komponen	Ketelitian	e	Responsi
<i>Solid state</i>	2 transistor dan R difuse	Tidak kurang dari 10 ppm	2 V	30 detik
TE	<i>thermocouple</i>	Tidak kurang dari 10 ppm	700 mV	Beberapa menit



Gambar 6a. Kondisi Rangkaian Listrik pada Kondisi $V_{DC+} > V_{TTS}$

Proses pengukuran berdasarkan metode substitusi termal ini dilakukan untuk menetapkan nilai sebenarnya dari V_{DC-} berdasarkan nilai acuan yang dimiliki V_{DC+} . Hasil pengukuran dapat diperoleh dengan cara membandingkan tingkat konversi yang dilakukan oleh TTS, yaitu dari energi panas ke energi listrik yang diakibatkan oleh suplai nilai tegangan yang diukur (V_{UUC} sebesar V_{DC-}) dan nilai tegangan acuan (V_{STD} sebesar V_{DC+}). Proses pembangkitan energi panas yang terjadi pada TTS tersebut mengakibatkan munculnya karakteristik aliran sinyal arus DC- dan DC+ sebagai berikut,

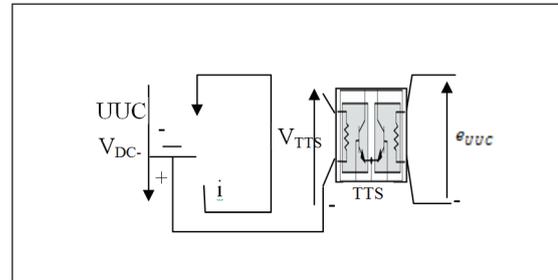
Perbedaan tingkat konversi energi panas dari nilai arus DC+ dan DC- tersebut dapat diwakili oleh nilai energi panas yang menurut persamaan 1 adalah sebesar,

$$E_{STD} = V_{STD} \cdot I_{STD} \cdot t = \frac{(+V_{STD})^2}{R} \cdot t \dots\dots\dots(5)$$

$$E_{UUC} = V_{UUC} \cdot I_{UUC} \cdot t = \frac{(-V_{UUC})^2}{R} \cdot t \dots\dots\dots(6)$$

Ketika arus listrik dialirkan pada elemen TTS (lihat Gambar 6a), terjadi penyerapan panas pada sensor RMS. Pelepasan dan penyerapan panas ini saling berbalik begitu arah arus dibalik (lihat Gambar 6b).^[9]

Kemudian berdasarkan proses konversi energi, kedua nilai energi panas (E_{VDC-} dan E_{VDC+})



Gambar 6b. Kondisi Rangkaian Listrik pada Kondisi $V_{DC-} < V_{TTS}$

tersebut dapat dijelaskan dengan mengacu pada persamaan (5 dan 6) dan kemudian dilanjutkan ke proses konversi energi listrik yang sebanding dengan nilai tegangan *output* e sebesar,

$$E_{STD} = k \cdot V_{eff-STD}^n \dots\dots\dots(7)$$

dan

$$e_{UUC} = k \cdot V_{eff-UUC}^n \dots\dots\dots(8)$$

Kedua nilai *output* yang telah dibaca oleh instrumen nanovoltmeter tersebut kemudian dipergunakan untuk proses analisis pada pembandingan dua nilai *input* dari TTS yang merupakan nilai perbedaan tingkat konversi sebesar δ .

3.1 Proses pengukuran tegangan DC- dengan metode substitusi termal

Proses pengukuran V_{DC-} dilakukan berdasarkan dua cara pengambilan data, yaitu pengamatan data menurut interval waktu yang ditetapkan dan sampai pada kondisi pembacaan stabil. Karena kedua pengamatan data tersebut dilakukan berdasarkan sebuah sistem pengukuran yang terdiri atas dua komponen alat ukur yang sama, yaitu TTS dan nanovoltmeter, kedua hasil pengukuran tersebut memiliki sumber-sumber ketidakpastian tipe B yang sama.

Pengamatan diseminasi ketelitian dari tegangan instrumen standar (STD) ke instrumen

yang dikalibrasi (UUC) dilakukan dengan pemantauan tegangan *output* dari TTS, yaitu sebesar e . Prosedur pengamatan yang dilakukan pada penelitian ini adalah mencatat nilai e yang digunakan sebagai nilai acuan yang dihasilkan oleh hasil eksitasi nilai tegangan STD. Kemudian nilai acuan e ini dipergunakan untuk menjustifikasi nilai tegangan yang dikalibrasi.

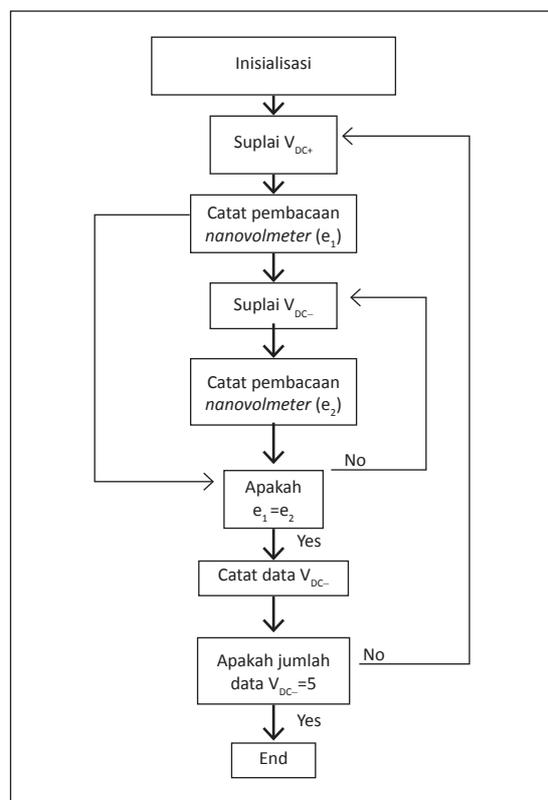
Agar hasil pengukuran terhindar dari perbedaan waktu respons yang mengakibatkan munculnya rugi-rugi emf E setelah melalui proses konversi termal, dua metode pengamatan dilakukan, yaitu berdasarkan interval waktu 1 menit dan berdasarkan interval waktu capaian kestabilan pembacaan nanovoltmeter. Jumlah pengamatan dari kedua pengamatan tersebut dilakukan sebanyak lima kali.

Proses pengukuran dilakukan secara bertahap sesuai dengan diagram alir pada Gambar 7.

Hasil pengukuran dari metode substitusi termal berbasis interval waktu 1 menit dan interval waktu capaian kestabilan dapat diperoleh seperti terlihat pada Tabel 1 dan 2.

Kedua data pengukuran tersebut diverifikasi keabsahannya dengan menggunakan perhitungan nilai kesalahan terhadap nilai acuan. Nilai kesalahan ini dipergunakan untuk mengukur tingkat kompetensi sistem pengukuran. Hasil verifikasi dapat dinyatakan valid apabila nilai kesalahan pengukuran lebih kecil daripada nilai kesalahan pengukuran lainnya.

Nilai sebenarnya yang dimaksud adalah nilai V_{DC+} yang diperoleh dari instrumen standar kalibrator tipe *multifunction calibrator* yang telah divalidasi oleh proses asesmen dan proses



Gambar 7. Diagram Alir Proses Pengukuran V_{DC-} Menggunakan TTS

Tabel 1. Data Hasil Pengukuran Metode Substitusi Termal pada Interval Waktu 1 Menit (Per Menit)

Titik Ukur	Polaritas	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5
100mV	VDC+	100,00000	100,00000	100,00000	100,00000	100,00000
	VDC-	-100,00344	-100,00329	-100,00374	-100,00438	-100,0048
1V	VDC+	1,0000000	1,0000000	1,0000000	1,0000000	1,0000000
	VDC-	-0,9999930	-0,9999932	-0,9999939	-0,9999936	-0,9999934
2,2V	VDC+	2,2000000	2,2000000	2,2000000	2,2000000	2,2000000
	VDC-	-2,1999848	-2,1999856	-2,199985	-2,1999858	-2,1999852
10V	VDC+	10,000000	10,000000	10,000000	10,000000	10,000000
	VDC-	-9,999921	-9,999922	-9,999919	-9,999916	-9,999918
100V	VDC+	100,00000	100,00000	100,00000	100,00000	100,00000
	VDC-	-99,99897	-99,99909	-99,99919	-99,99913	-99,99918
1000V	VDC+	1000,0000	1000,0000	1000,0000	1000,0000	1000,0000
	VDC-	-999,9921	-999,9922	-999,9924	-999,9926	-999,9923

Tabel 2. Data Hasil Pengukuran Metode Substitusi Termal pada Interval Waktu Capaian Kestabilan

Titik Ukur	Polaritas	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₅
100mV	VDC+	99,99957	99,99952	99,99949	99,99963	99,99955
	VDC-	-99,99992	-99,99979	-99,99985	-99,99982	-99,99980
1V	VDC+	1,0000130	1,0000129	1,0000132	1,0000131	1,0000130
	VDC-	-1,0000128	-1,0000127	-1,0000129	-1,0000130	-1,0000129
2,2V	VDC+	2,200026	2,200026	2,200025	2,200026	2,200025
	VDC-	-2,200026	-2,200025	-2,200026	-2,200024	-2,200026
10V	VDC+	10,000109	10,000111	10,000110	10,000112	10,000111
	VDC-	-10,000114	-10,000115	-10,000115	-10,000113	-10,000114
100V	VDC+	100,00144	100,00142	100,00144	100,00145	100,00143
	VDC-	-100,00174	-100,00175	-100,00176	-100,00175	-100,00176
1000V	VDC+	1000,0154	1000,0155	1000,0157	1000,0157	1000,0154
	VDC-	-1000,0150	-1000,0151	-1000,0150	-1000,0150	-1000,0151

inter-laboratory comparison (ILC) dengan nomor registrasi APMP.EM-S8 (sedang dalam proses Draf B).

3.2 Analisis data

Proses diseminasi besaran V_{DC+} ke V_{DC-} diperoleh dengan menganalisis data hasil pengukuran di atas (lihat Tabel 1 dan 2) secara nominal yang dilengkapi oleh kesalahan pengukuran karena proses statistik ataupun nonstatistik (estimasi). Kesalahan pengukuran karena proses statistik (ketidakpastian Tipe A) merupakan tingkat ketelitian dari besaran tegangan V_{DC-} terhadap ketelitian besaran tegangan V_{DC+} yang diperoleh melalui penyederhanaan model matematis Persamaan (6) menjadi persamaan baru seperti berikut,

$$\delta = \frac{(V_{DC-}) - (V_{DC+})}{V_{DC+}} \dots\dots\dots(9)$$

dengan setiap variabel dari V_{DC-} dan V_{DC+} merupakan penyederhanaan dari variabel V_{UUC} dan

V_{STD} . Sesuai dengan persamaan (9), nilai δ dari kedua metode substitusi di atas dapat dihitung sesuai dengan titik ukurnya sebagaimana tertera dalam Tabel 3 dan 4.

Persamaan (5) dan (6) telah menjelaskan bahwa energi panas yang dihasilkan oleh eksitasi kedua besaran tegangan yang berbeda polaritas pada komponen sensor RMS adalah sama karena proses *kuadratisasi*. Kondisi ini kemudian dapat diturunkan pada Persamaan (8) sehingga dapat menghasilkan sebuah persamaan baru dalam Persamaan (10).

$$\delta = \frac{|V_{DC-}| - |V_{DC+}|}{|V_{DC+}|} \dots\dots\dots(10)$$

Kemudian proses perhitungan nilai nominal hasil pengukuran V_{DC-} (lihat Tabel 3b dan 4b) dapat dilanjutkan dengan mengombinasikan nilai δ (lihat Tabel 3a dan 4a) terhadap nilai nominal standar dari V_{DC+} sesuai dengan data pengukuran (lihat Tabel 1 dan 2) dengan cara

Tabel 3a. Hasil Perhitungan Variabel δ dari Metode Substitusi Termal dengan Interval Waktu 1 Menit

Titik Ukur	δ_1	δ_2	δ_3	δ_4	δ_5
-100mV	0,0000344	0,0000329	0,0000374	0,0000438	0,0000480
-1V	-0,0000070	-0,0000068	-0,0000061	-0,0000064	-0,0000066
-2.2V	-0,0000069	-0,0000065	-0,0000068	-0,0000065	-0,0000067
-10V	-0,0000079	-0,0000078	-0,0000081	-0,0000084	-0,0000082
-100V	-0,0000103	-0,0000091	-0,0000081	-0,0000087	-0,0000082
-1000V	-0,0000079	-0,0000078	-0,0000076	-0,0000074	-0,0000077

Tabel 3b. Hasil Perhitungan V_{DC} Berdasarkan Variabel δ dari Metode Substitusi Termal dengan Interval Waktu 1 Menit

Titik Ukur	V_{UUC-1}	V_{UUC-2}	V_{UUC-2}	V_{UUC-2}	V_{UUC-2}	$V_{UUC-rata-rata}$	Std. Dev (ppm)	U_{TipeA} (ppm)
-100mV	-100,00344	-100,00329	-100,00374	-100,00438	-100,0048	-100,00393	0,64	0.29
-1V	-0,9999921	-0,9999922	-0,9999919	-0,9999916	-0,9999918	-0,99999192	0,2	0.1
-2.2V	-2,1999885	-2,1999887	-2,1999886	-2,1999888	-2,1999891	-2,1999858	0,4	0.2
-10V	-9,9998785	-9,9998945	-9,999871	-9,9998715	-9,9998755	-9,9998782	10	4
-100V	-99,99897	-99,99909	-99,99919	-99,99913	-99,99918	-99,999112	90	40
-1000V	-999,9921	-999,9922	-999,9924	-999,9926	-999,9923	-999,99232	200	90

Tabel 4a. Hasil Perhitungan Variabel δ dari Metode Substitusi Termal dengan Interval Waktu Capaian Kestabilan

Titik Ukur	δ_1	δ_2	δ_3	δ_4	δ_5
-100mV	0,0000035	0,0000027	0,0000036	0,0000019	0,0000025
-1V	-0,0000002	-0,0000002	-0,0000003	-0,0000001	-0,0000001
-2.2V	0,0000000	-0,0000005	0,0000005	-0,0000009	0,0000005
-10V	0,0000005	0,0000004	0,0000005	0,0000001	0,0000003
-100V	0,0000030	0,0000033	0,0000032	0,0000030	0,0000033
-1000V	-0,0000004	-0,0000004	-0,0000007	-0,0000007	-0,0000003

Tabel 4b. Hasil Perhitungan V_{DC} Berdasarkan Variabel δ dari Metode Substitusi Termal dengan Interval Waktu 1 Menit

Titik Ukur	V_{UUC-1}	V_{UUC-2}	V_{UUC-3}	V_{UUC-4}	V_{UUC-5}	$V_{UUC-rata-rata}$	Std. Dev (ppm)	U_{TipeA} (ppm)
-100mV	-100,00035	-100,0003	-100,0004	-100,0002	-100,0003	-100,00028	0,0713	0,03
-1V	-0,9999998	-0,9999998	-0,9999997	-0,9999999	-0,9999999	-0,9999998	0,1	0,04
-2,2V	-2,2000000	-2,1999990	-2,2000010	-2,1999980	-2,2000010	-2,1999998	1,3	0,58
-10V	-10,000005	-10,000004	-10,000005	-10,000001	-10,000003	-10,000004	1,7	0,75
-100V	-100,00030	-100,00033	-100,00032	-100,00030	-100,00033	-100,00032	15,2	6,78
-1000V	999,9996	999,9996	999,9993	999,9993	999,9997	999,99950	187,1	83,6

menyederhanakan Persamaan (8) menjadi Persamaan (11)

$$V_{DC-} = \delta(1 + V_{DC+}) \dots\dots\dots(11)$$

Dengan demikian, nilai nominal V_{DC-} dari kedua metode pengukuran tersebut dapat diperoleh seperti yang terlihat pada Tabel 5 dan 6.

Sumber-sumber ketidakpastian pengukuran dapat diturunkan dari sebuah model matematis di atas, yakni tipe A diperoleh dari variabel kesalahan acak (*random*) δ , sedangkan tipe B diperoleh dari dua variabel, yaitu sertifikat standar V_{DC+} dan resolusi nanovoltmeter. Setiap dari tiga nilai ketidakpastian tersebut di atas memiliki koefisien ketidakpastian

sebesar $1(\partial V_{DC-}/\partial V_{DC+})$, $1(\partial V_{DC-}/\partial \delta)$, dan $\delta((\partial V_{DC-})/\partial V_{DC+})$.^[10]

Berdasarkan hasil pengamatan yang telah dilakukan dalam penelitian ini dapat diperoleh dua karakteristik data pengukuran, yaitu menurut metode substitusi termal berbasis interval waktu 1 menit ($V_{DC-permenit}$) dan capaian kestabilan ($V_{DC-kestabilan}$). Data pengukuran (lihat Tabel 1 dan 2) yang dihasilkan dari kedua metode pengukuran tersebut kemudian dianalisis kelayakannya dengan menggunakan nilai acuan yang diperoleh dari sertifikat kalibrasi. Secara diagram dapat digambarkan setiap karakteristik, yaitu nilai acuan, nilai pengukuran dengan interval 1 menit, dan nilai pengukuran dengan interval kestabilan (lihat Gambar 8).

Tabel 5. Hasil Analisis Pengukuran Metode Substitusi Termal dengan Interval Waktu 1 Menit

Titik Ukur	V_{DC} -Interval Waktu 1 Menit (V)	U_{DC} -Interval Waktu 1 Menit (ppm)
-100 mV	-100,00393	0,29
-1 V	-0,9999919	0,1
-2.2 V	-2,1999886	0,2
-10 V	-9,9998782	4
-100 V	-99,99911	40
-1000 V	-999,99232	90

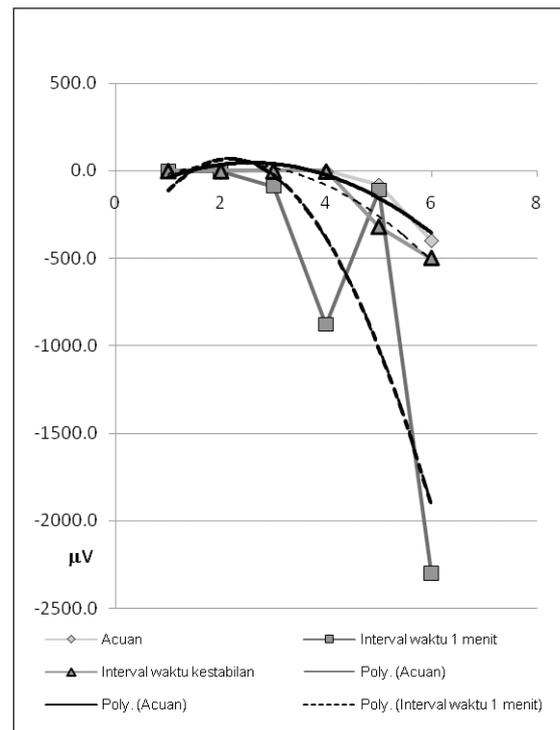
Kedua metode pengukuran ini dilakukan pada sebuah sistem pengukuran yang sama sehingga dapat ditetapkan bahwa metode pengukuran dengan interval waktu 1 menit dan interval waktu kestabilan telah memiliki nilai sumber-sumber ketidakpastian pengukuran tipe B yang sama. Oleh karena itu, pada proses analisis ketidakpastian pengukuran dapat dilakukan berdasarkan perbandingan nilai ketidakpastian Tipe A.

Telah dianalisis sebuah sistem pengukuran metode termal untuk keperluan proses diseminasi ketelitian dari besaran V_{DC+} ke besaran V_{DC-} . Analisis dilakukan dengan menggunakan pendekatan bilangan nominal dari hasil pengukuran metode termal terhadap nilai nominal acuan. Dengan bantuan *trendline polynomial*, secara diagram (lihat Gambar 8) dapat ditunjukkan dua hal, yaitu pertama pada kedua metode pengukuran berbasis termal ini menghasilkan nilai kesalahan semakin besar pada nilai nominal pengukuran yang besar. Kedua, tingkat kesalahan pengukuran yang terjadi pada metode pengukuran dengan interval waktu kestabilan lebih kecil.

Pada proses pengukuran berbasis termal dengan menggunakan interval waktu 1 menit pada pelaksanaannya dilakukan pembacaan data setelah waktu pengukuran berjalan 1 menit untuk semua titik ukur pengamatan. Adapun pada proses pengukuran dengan menggunakan interval waktu kestabilan pada pelaksanaan dilakukan pembacaan data setelah waktu pengukuran berjalan lebih dari 2 menit. Proses pengukuran dengan menggunakan interval waktu kestabilan ini paling cepat dapat dilakukan selama 2 menit.

Tabel 6. Hasil Analisis Pengukuran Metode Substitusi Termal dengan Interval Waktu Kestabilan

Titik Ukur	V_{DC} -Interval Waktu 1 Menit (V)	U_{DC} -Interval Waktu 1 Menit (ppm)
-100 mV	-100,00030	0,03
-1 V	-0,9999998	0,04
-2,2 V	-2,1999998	0,58
-10 V	-10,000003	0,75
-100 V	-100,00032	6,78
-1000 V	-999,99950	83,6



Gambar 8. Diagram Hasil Karakterisasi Metode Pengukuran V_{DC-} Berdasarkan Nilai Nominal 100 mV, 1 V, 2.2 V, 10 V, 100 V, dan 1.000 V.

Hasil analisis penelitian ini telah membuktikan bahwa tingkat kestabilan pengukuran dari metode substitusi termal berdasarkan interval waktu capaian kestabilan dapat menunjukkan tingkat kompetensi lebih tinggi dibandingkan dengan yang lain. Tingkat kompetensi tersebut dinyatakan dalam bentuk tingkat ketelitian pengukuran yang diperlihatkan oleh nilai nominal pengukuran dan nilai ketidakpastian pengukuran (lihat Tabel 7). Dengan demikian, berdasarkan penelitian ini telah dapat diperoleh hasil validasi sebuah sistem pengukuran besaran V_{DC-} dengan metode termal menggunakan proses pendataan dengan interval waktu kestabilan

Tabel 7. Nilai Koreksi Pengukuran Metode Termal untuk Pendataan Interval Waktu 1 Menit dan Interval Kestabilan terhadap Nilai Acuan

Titik Ukur	V_{Acuan}	Koreksi $V_{UUC-Interval}$ 1 Menit (%)	Koreksi $V_{UUC-Interval}$ kestabilan (%)
-100 mV	-99,99929	0,00464	0,00101
-1 V	-0,9999974	0,00055	0,00024
-2.2 V	-2,2000000	0,00052	0,00001
-10 V	-9,999992	0,00114	0,00011
-100 V	-99,99998	0,00087	0,00034
-1000 V	-999,9994	0,00071	0,00001

karena tingkat kompetensinya lebih tinggi (atau nilai koreksinya lebih rendah) dibandingkan dengan interval waktu 1 menit (lihat Tabel 7). Nilai koreksi diperoleh berdasarkan formulasi berikut.

$$Koreksi = \frac{\text{Nilai Acuan} - \text{Nilai pengukuran}}{\text{Nilai pengukuran}} \cdot 100\%$$

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Sebuah prosedur baru telah diperoleh dari hasil penelitian ini, yaitu pengukuran berbasis termal untuk besaran V_{DC} , sehingga dapat mendiseminasikan besaran standar V_{DC} . Dari dua prosedur pengukuran yang dianalisis, ternyata dalam pelaksanaannya, proses pendataan dengan interval waktu kestabilan lebih tinggi tingkat kompetensinya sebesar 0,00001% dibandingkan dengan interval waktu 1 menit sebesar 0,00071%.

Prosedur pengukuran dengan proses pendataan dengan interval waktu kestabilan ini dapat ditingkatkan ketelitiannya dengan cara pengukuran otomatisasi sehingga dapat mengeliminasi kesalahan pengukuran dengan meniadakan kesalahan karena kelelahan manusia.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Tim peneliti mengucapkan terima kasih atas dukungan langsung ataupun tidak langsung yang telah diberikan oleh rekan-rekan dan pihak manajemen Puslit Metrologi–LIPI sehingga pelaksanaan penelitian untuk mendukung proyek pelayanan kalibrasi dapat ditingkatkan kualitasnya dan dapat meningkatkan

kemampuan pengukuran tegangan listrik DC di Laboratorium Metrologi Kelistrikan Puslit Metrologi–LIPI.

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Sardjono, R. Hadi dan Bambang Suprianto. 2015. “Establishing the Traceability of DC Voltage Quantity in the Electrical Metrology Laboratory of Research Center, KIM–LIPI”. *MAPAN, Journal of Metrology Society of India* Vol. 30 (2): 145–153, ISSN 0970-3950 (Print Version), 0974-9853 (Online Version).
- [2] “What is Negative Voltage”. *Electrical Engineering*. Modifikasi terakhir 23 September 2011. Diakses 13 April 2014. <http://electronics.stackexchange.com/questions/10322/what-is-negative-voltage>.
- [3] Sardjono, R. Hadi. 2014. *B3-1 Metrologi Kelistrikan untuk Besaran Arus dan Tegangan*. Malang: UB Press, Cetakan pertama Maret 2014, ISBN: 978-602-203-621-0.
- [4] Putra, Rio Ananda, Erna Septyaningrum, Aisyiah Nur Isnaeni, Yogi Arif C.N., Gema Panji E., dkk. 2011. “Effect Seebeck.” Diakses 10 Februari 2015. <http://riiorap.blogspot.com/2011/12/effect-seebeck.html>.
- [5] Kasap, Safa. 1997–2001. “Thermoelectric Effects in Metals: Thermocouples”. An e-booklet, Departement of electrical Engineering University of Saskatchewan, Canada.
- [6] “Thermoelectric Effect”. *Wikipedia: The Free Encyclopedia*. Diakses 10 Februari 2015. http://en.wikipedia.org/wiki/Thermoelectric_effect.
- [7] Matson, D. 1990. “Using a Linear Thermal Transfer Standard for High Precision AC/DC Transfers”, Dalam Prosiding Conference on Precision Electromagnetic Measurements. CPEM ’90 Digest, 64–65.
- [8] Hitoshi Sasaki, Kunihiko Takahashi, “Development of a High-Precision AC-DC Transfer Standard Using the Fast-Reversed DC Method”, AIST June 1999.
- [9] Pri, Yudhi. 2010. “Termoelektrik (Energi Panas menjadi Listrik)”. Diakses 30 Maret 2015. <https://yudhipri.wordpress.com/2010/07/05/termoelektrik-energi-panas-menjadi-listrik>.
- [10] JCGM 100:2008. 2008. “Evaluation of Measurement Data—Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement.” GUM 1995 with Minor Corrections, First Edition, JCGM 2008.