

Pengkondisi Sinyal RTD Presisi pada Terowongan Angin *Indonesian Low-Speed Tunnel*

Muhamad Muflih^{1,2*}, Munawar Agus Riyadi¹, Ivranza Zuhdi Pane², dan Franky Surya Parulian²

¹Departemen Teknik Elektro, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Soedarto, SH, Semarang, 50275, Indonesia

²Laboratorium Aerodinamika, Aeroelastika, dan Aeroakustika, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN)
Kawasan Puspiptek Gedung 240, Tangerang Selatan, 15346, Indonesia

*Corresponding author. Email: muhamadmuflih@students.undip.ac.id

Abstract— The temperature of the Indonesian Low-Speed Tunnel (ILST) wind tunnel test section was measured using a Pt100-type Resistance Temperature Detector (RTD) sensor. With the upgrade of the Indonesian Low-Speed Tunnel - Data Acquisition and Reduction System (ILST-DARS) using Ethernet communication, an integrated RTD linearization circuit was designed with the Conditioning Unit (CU) Mk3 to replace the Newport 267B 16-bit parallel and DAS-Hub as the current RTD interface. In this research, the design of the signal conditioner uses the RTD_Linearization_v7.xls program from Texas Instruments, the LTspice simulator software, and the AMP01E precision instrumentation amplifier. Based on the calibration results in the range of 20 – 50 °C, this signal conditioner has an average deviation value of 0.38 °C (1.31%). In the wind tunnel speed variation testing with a range of 30 – 65 m/s, the RTD signal conditioner had an average deviation of 0.41 K (0.14%). The Repeatability Test procedure was carried out at a wind speed of 65 m/s with an angle of attack for the test model from -9° to 20° and data were collected 10 times at each angle. The average deviation of temperature against variations in the angle of attack of the test model in this procedure is 0.25 K (0.08%) and the average deviation of wind speed against variations in the angle of attack of the test model is 0.03 m/s (0.04%).

Keywords— linearization circuit; precision instrumentation amplifier; repeatability test; RTD; wind tunnel

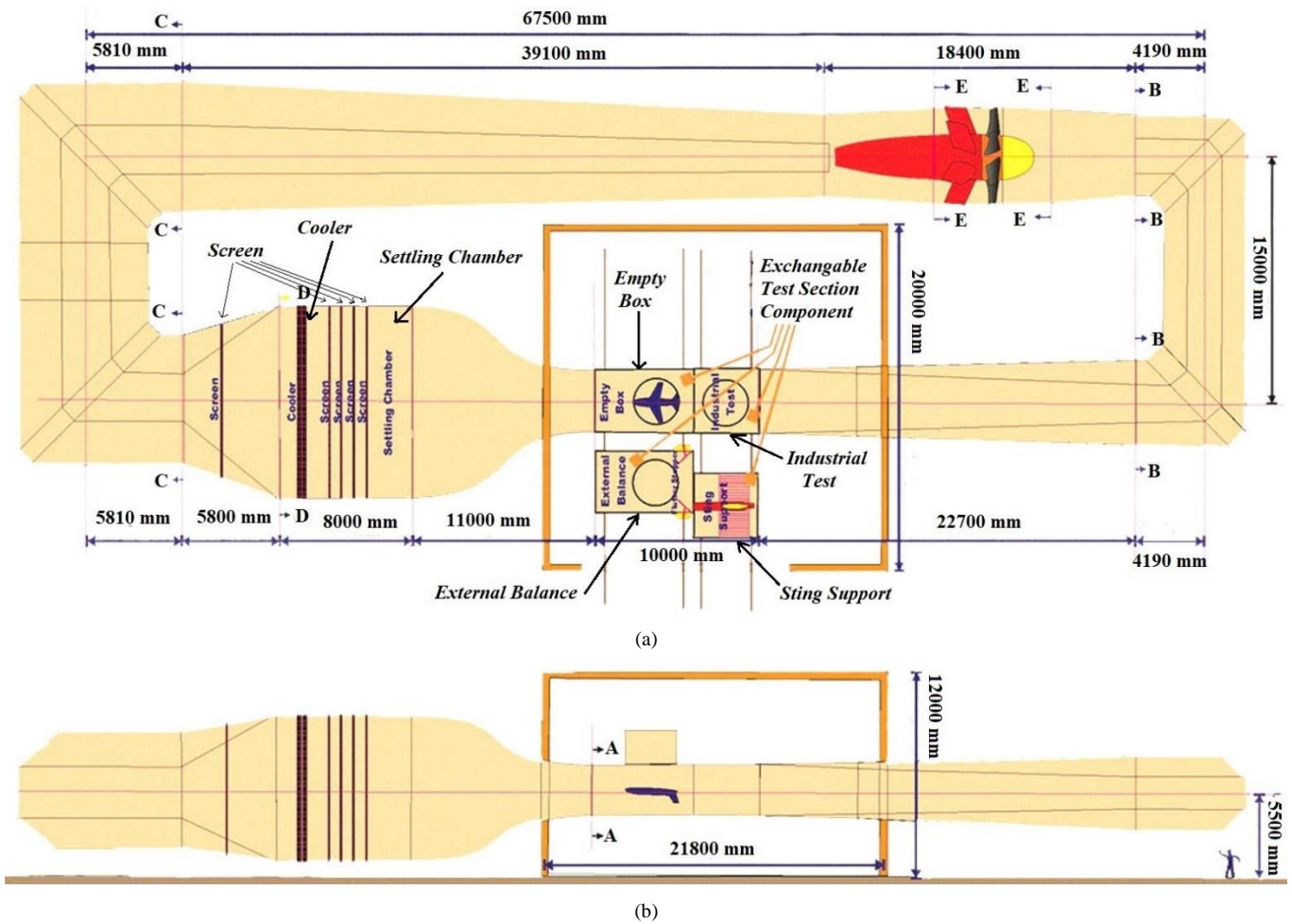
Abstrak— Temperatur seksi uji terowongan angin *Indonesian Low Speed Tunnel* (ILST) diukur menggunakan sensor *Resistance Temperature Detector* (RTD) jenis Pt100. Dengan di-upgrade-nya sistem akuisisi data *Indonesian Low-Speed Tunnel - Data Acquisition and Reduction System* (ILST-DARS) menggunakan komunikasi *Ethernet*, maka dilakukan rancang bangun rangkaian linearisasi RTD yang terintegrasi dengan *Conditioning Unit* (CU) Mk3 untuk menggantikan Newport 267B 16 bit paralel dan DAS-Hub sebagai antarmuka RTD saat ini. Pada penelitian ini, rancang bangun pengkondisi sinyal menggunakan program bantu *RTD_Linearization_v7.xls* dari Texas Instruments, perangkat lunak simulator LTspice, dan penguat instrumentasi presisi AMP01E. Berdasarkan hasil kalibrasi pada rentang 20 – 50 °C, pengkondisi sinyal RTD ini mempunyai nilai simpangan rata-rata 0,38 °C (1,31%). Pada pengujian variasi kecepatan di terowongan angin dengan rentang 30 – 65 m/s, pengkondisi sinyal RTD mempunyai simpangan rata-rata 0,41 K (0,14%). Prosedur *Repeatability Test* dilakukan pada kecepatan angin 65 m/s dengan sudut serang model uji dari -9° hingga 20° dan dilakukan pengambilan data 10 kali tiap sudut. Simpangan rata-rata temperatur terhadap variasi sudut serang model uji pada prosedur ini sebesar 0,25 K (0,08%) dan simpangan rata-rata kecepatan angin terhadap variasi sudut serang model uji sebesar 0,03 m/s (0,04%).

Kata kunci— rangkaian linearisasi; penguat instrumentasi presisi; *repeatability test*; RTD; terowongan angin

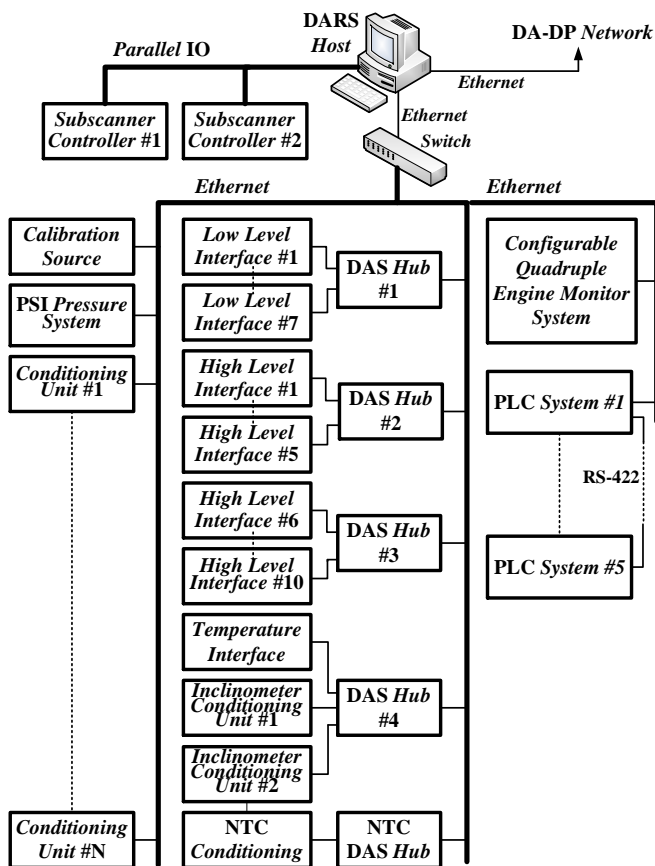
I. PENDAHULUAN

Dalam suatu seksi uji terowongan angin, kecepatan angin diturunkan dari tekanan dinamik dan kerapatan udara dalam terowongan angin. Salah satu faktor yang mempengaruhi kerapatan udara adalah temperatur udara. Semakin tinggi temperatur maka kerapatan udaranya semakin rendah [1]. *Indonesian Low-Speed Tunnel* (ILST) adalah sebuah terowongan angin sirkuit tertutup dengan kecepatan angin maksimal 80 m/s dengan area seksi uji 4 m x 3 m dan panjang 10 m. ILST dioperasikan oleh Laboratorium Aerodinamika, Aeroelastika, dan Aeroakustika (LA3) yang berada di bawah Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN). Denah ILST dapat dilihat pada Gambar 1 [2].

Temperatur seksi uji ILST diukur menggunakan *Resistance Temperature Detector* (RTD) [3]. Komponen utama RTD adalah *Digital Pyrometer* Newport 267B yang membaca hasil pengukuran sensor temperatur Pt100. Hasil pembacaan berupa besaran temperatur dalam derajat Celcius dapat ditampilkan pada 4 digit panel *7-segment* dan ditransmisikan menuju komputer akuisisi data dalam format *Binary Code Decimal* (BCD) 16-bit paralel. Komunikasi antara komputer akuisisi data dengan instrumen pada *ILST Data Acquisition and Reduction System* (ILST DARS) menggunakan antar muka *Ethernet* dan dapat dilihat pada Gambar 2. Perlu bantuan sebuah piranti *Data Acquisition System Hub* (DAS-Hub) yang menjembatani komunikasi *Ethernet* dengan format BCD paralel pada unit RTD [4].



Gambar 1. Terowongan angin jenis tertutup ILST-LA3 (a) tampak atas dan (b) tampak samping [2]



Gambar 2. Arsitektur Data Acquisition (DA) ILST-DARS [4]

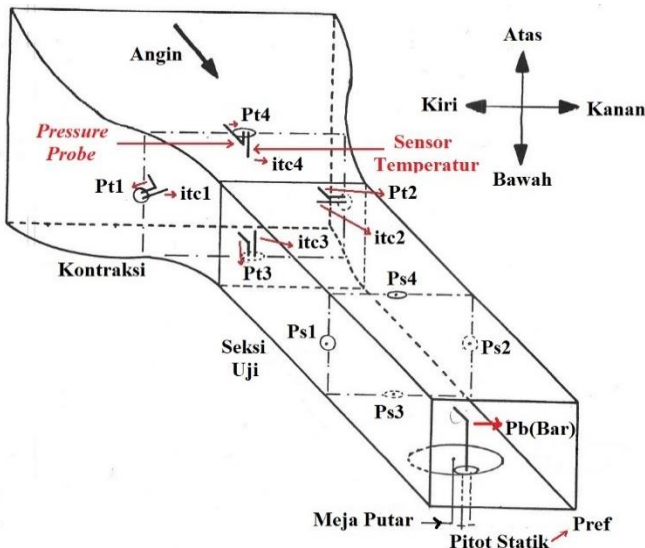
Dengan telah di-upgrade-nya sistem akuisisi data ILST-DARS menggunakan komunikasi *Ethernet* serta sistem distribusi data *Distributed Real-time Automation and Control Host Multi-platform Executive* (DRACHME) [4], maka diperlukan rancang bangun pengkondisi sinyal RTD yang baru untuk menggantikan Newport 267B 16 bit paralel dan DAS-Hub sebagai antarmuka RTD saat ini. Rancang bangun pengkondisi sinyal RTD telah banyak dikembangkan terintegrasi dengan sistem akuisisi data yang dilengkapi modul dan perangkat lunak. Contoh pengkondisi sinyal RTD tersebut adalah menggunakan modul NI 9219 *Analog Input* [5]–[8] atau NI 9217 *Pt100 RTD Input* [9]–[11] dan Arduino Uno dengan perangkat lunak LabView dari National Instruments [12]. Beberapa pendekatan rancang bangun pengkondisi sinyal RTD yang lainnya adalah dengan berbasis pada sistem *Complex Programmable Logic Device* (CPLD) dan *Field-Programmable Gate Array* (FPGA) [13].

Dengan mempertimbangkan faktor kompatibilitas pada sistem akuisisi data ILST-DARS dan sistem distribusi data DRACHME yang unik, maka perlu solusi praktis dalam proses rancang bangun pengkondisi sinyal RTD memanfaatkan antarmuka dan perangkat *Conditioning Unit* (CU) Mk3 yang sudah ada. CU Mk3 merupakan perangkat ukur standar pada sistem akuisisi data ILST-DARS yang menggunakan komunikasi *Ethernet*. Alternatif solusi rancang bangun lainnya adalah menggunakan *Embedded System*, namun banyak parameter yang harus disesuaikan dengan sistem akuisisi ILST-DARS dan sistem distribusi data DRACHME seperti sinkronisasi pewaktuan, format data hingga *Address and Memory Management* sehingga membutuhkan banyak waktu dalam proses perancangan.

Rancang bangun suatu pengkondisi sinyal RTD berupa rangkaian linearisasi RTD tersambung ke jalur masukan CU Mk3 yang belum pernah dilakukan sebelumnya dapat menyederhanakan sistem akuisisi data temperatur dengan meniadakan kebutuhan DAS-Hub sehingga diharapkan dapat meningkatkan kinerja pengukuran temperatur serta menjamin konsistensi hasil data pengujian di terowongan angin berdasarkan kriteria tingkat pengukuran dan keterulangan menggunakan *Analysis of Variance* (ANOVA).

II. METODE

Kecepatan angin dalam seksi uji terowongan angin ILST diturunkan dari tekanan dinamik dan kerapatan udara yang diukur oleh fasilitas *Tunnel Reference* pada bagian kontraksi seksi uji [3] seperti ditunjukkan Gambar 3. Tekanan dinamik di seksi uji diukur oleh delapan *pressure probe* dimana empat *probe* (Pt1-Pt4) mengukur tekanan total (tekanan hasil penjumlahan tekanan diferensial dan tekanan statik) dan empat *probe* (Ps1-Ps4) mengindera tekanan statik (tekanan atmosfer di dinding seksi uji) [3]. Empat sensor temperatur Pt100 yang diletakkan bersama *pressure probe* untuk tekanan total, digunakan untuk mengukur temperatur seksi uji yang mempengaruhi besaran kerapatan udara [3]. Hasil pengukuran temperatur dibaca oleh Newport 267B RTD Interface [4].



Gambar 3. Tata letak *pressure probe* dan sensor temperatur pada *Tunnel Reference* ILST [3]

Temperatur absolut rata-rata pada seksi uji seperti ditunjukkan di Gambar 3 diperoleh melalui persamaan berikut:

$$T_{av} = \frac{itc1 + itc2 + itc3 + itc4}{4} \quad (1)$$

di mana *itc1*–*itc4* adalah temperatur pada bagian kontraksi dalam °C (Celcius) dan *T_{av}* adalah temperatur rata-rata absolut dalam K (Kelvin). Temperatur total *T₁₀* pada seksi uji dapat dituliskan sebagai berikut:

$$T_{10} = T_{av} \left(\frac{1 + 0,2 (gvM_0)^2}{1 + 0,17 (gvM_0)^2} \right) \quad (2)$$

di mana *M₀* adalah *Mach Number* dan *gvM₀* adalah *Mach Number* lokal. Temperatur statik *T₀* pada seksi uji dapat dituliskan sebagai berikut:

$$T_0 = T_{10} \left(\frac{1}{1 + 0,2 M_0^2} \right) \quad (3)$$

sedangkan kerapatan udara pada seksi uji diperoleh dari persamaan berikut:

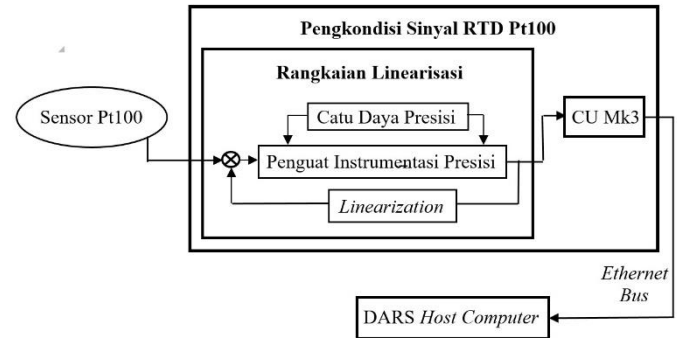
$$\rho_0 = \frac{P_0}{(R T_0)} \quad (4)$$

di mana *P₀* adalah tekanan statik *free stream* di dalam seksi uji kosong dan *R* adalah konstanta gas ideal udara 287,04 m²/s²K [3]. Kecepatan angin *V₀* di seksi uji adalah:

$$V_0 = \sqrt{\frac{2q_0}{\rho_0}} \quad (5)$$

di mana kecepatan angin *V₀* dalam m/s [3].

Berdasarkan spesifikasi CU Mk3 sebagai peralatan standar pada ILST-DARS yang sudah terhubung jalur *Ethernet Bus*, pada penelitian ini dilakukan pengintegrasian rangkaian linearisasi RTD dengan CU Mk3 untuk kompatibilitas, fleksibilitas, dan penyederhanaan langkah rancang bangun. Diagram rancang bangun pengkondisi sinyal RTD ini dapat dilihat pada Gambar 4.

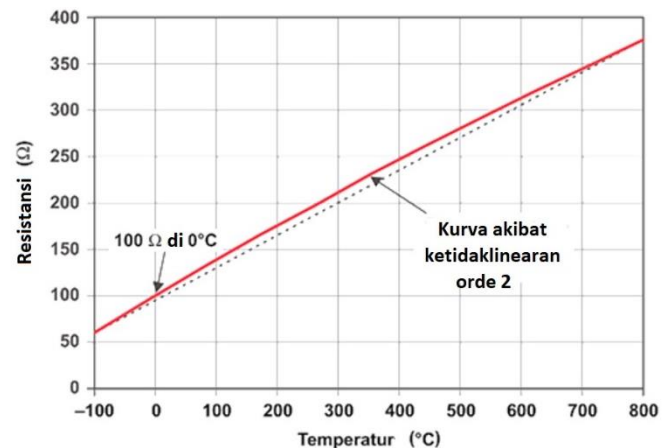


Gambar 4. Diagram rancang bangun pengkondisi sinyal RTD

Dari Gambar 4 dapat dilihat bahwa Sensor Pt100 pada bagian kontraksi terowongan angin terhubung dengan rangkaian linearisasi RTD yang menggunakan catu daya presisi. Tegangan keluaran dari rangkaian linearisasi kemudian dihubungkan dengan jalur masukan CU Mk3.

A. Sensor Pt100 *Class-B* DIN *European Standard*

Sensor Pt100 yang digunakan di ILST adalah tipe *Class-B* DIN *European Standard* yang memiliki resolusi 0,385 Ω per 1°C dengan akurasi ± 0,12 Ω [3]. Keakuratan ini dapat menurun seiring dengan naiknya temperatur [14]. Grafik hubungan antara nilai resistansi RTD Pt100 terhadap temperatur dapat dilihat pada Gambar 5.



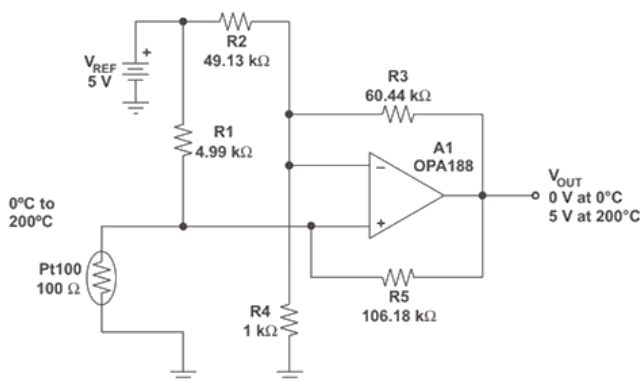
Gambar 5. Nilai resistansi RTD Pt100 terhadap temperatur [14]

Garis putus-putus pada Gambar 5 merupakan kurva linear ideal sedangkan garis warna merah merupakan kurva sebenarnya dari nilai resistansi RTD Pt100 terhadap temperatur pada rentang -100 – 800 °C yang mempunyai ketidaklinearan orde 2 [14], [15]. Dalam pengukuran temperatur menggunakan sensor Pt100, diperlukan tegangan eksitasi dengan arus yang tidak boleh melebihi nilai 1mA. Hal ini karena jika dialiri arus melebihi 1 mA, maka akan timbul efek *self-heating* [16].

Seperti layaknya komponen resistor, maka kelebihan arus akan diubah menjadi panas sehingga hasil pengukuran menjadi tidak sesuai lagi. Sumber tegangan eksitasi pada rancangan penelitian ini dihasilkan dari suatu catu daya presisi Delta 75SX5.

B. Rangkaian Linearisasi RTD Pt100

Berdasarkan kurva pada Gambar 5, nilai resistansi RTD Pt100 terhadap temperatur mempunyai ketidaklinearan orde 2 (*Second-Order Nonlinearity*) sebesar 0,38% tiap 100 °C [14], [15]. Untuk pengukuran temperatur dengan tingkat kepresisian yang tinggi, ketidaklinearan tersebut perlu diperkecil atau dikurangi [17], [18]. Sensor RTD membutuhkan sumber arus eksitasi yang stabil untuk memperkecil ketidaklinearan [17]. Rangkaian linearisasi RTD umpan balik positif menggunakan suatu penguat operasional (Op-Amp) dengan sensor Pt100 2 kawat (*2 Wire*) [14] yang merupakan bagian dari pengkondisi sinyal RTD dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Rangkaian Linearisasi RTD Pt100 dengan Op-Amp OPA188 [14]

Pada Gambar 6 dapat dilihat bahwa resistor R1 menyediakan arus eksitasi dari sumber tegangan referensi stabil V_{REF} . Resistor R5 merupakan resistor umpan balik positif yang mempengaruhi keluaran dari penguat A1 diakibatkan nilai arus eksitasi terpengaruh variasi temperatur [14]. Tegangan RTD V_{RTD} di masukan penguat dilinearkan ketika keluaran penguat dilinearkan dan sebaliknya dengan menentukan nilai resistor umpan balik positif yang tepat dan optimal. Resistor R2, R3, dan R4 mengatur penguatan dan *offset* penguat A1 untuk menghasilkan rentang tegangan keluaran yang diinginkan. Dengan menggunakan persamaan nodal [14], hubungan antara tegangan RTD V_{RTD} , resistansi RTD R_{RTD} , tegangan referensi V_{REF} , resistansi R1, resistansi R5 dan tegangan keluaran penguat A1 V_{OUT} adalah sebagai berikut:

$$V_{RTD} = V_{REF} \frac{\frac{R_{RTD} \times R_5}{R_{RTD} + R_5}}{\frac{R_{RTD} \times R_5}{R_{RTD} + R_5} + R_1} + V_{OUT} \times \frac{\frac{R_{RTD} \times R_1}{R_{RTD} + R_1}}{\frac{R_{RTD} \times R_1}{R_{RTD} + R_1} + R_5} \quad (6)$$

Penentuan nilai resistor R5 untuk mendapatkan nilai koreksi terbaik dapat dihitung dengan pendekatan teknik iteratif [14]. Tiga kondisi temperatur pada titik awal, titik tengah dan titik akhir kalibrasi diperhitungkan dengan persamaan masing-masing secara bersamaan untuk memperkecil kesalahan pengukuran. Perhitungan untuk mendapatkan nilai resistor umpan balik positif R5 sangat panjang dan menggunakan program bantu *RTD_Linearization_v7.xls* seperti ditunjukkan pada Gambar 7 serta simulator rangkaian TINA-TI SPICE dari Texas Instruments Inc. (<http://www.ti.com/lit/zip/SLYT442>) [14]. Beberapa program bantu alternatif dapat digunakan untuk pengaturan linearisasi seperti LTspice [19] dan Cube suite+ [20]. Kekurangan rangkaian linearisasi RTD dengan sensor Pt100 2 *Wire* seperti ditunjukkan di Gambar 6 adalah timbulnya

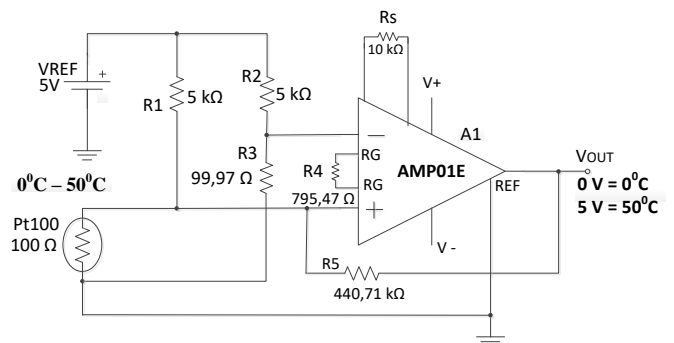
tegangan masukan mode bersama (*common mode*) akibat adanya resistansi pada saluran.

Temp °C	RTD ohms	RTD % Nonlin	RTD Voltage	Output Vout
20	107.794	0.00%	0.10550	0.0000
23	108.959	0.04%	0.10669	0.5000
26	110.123	0.07%	0.10788	1.0000
29	111.286	0.09%	0.10907	1.5000
32	112.447	0.11%	0.11026	2.0000
35	113.608	0.11%	0.11144	2.5000
38	114.768	0.11%	0.11263	3.0000
41	115.927	0.09%	0.11382	3.5000
44	117.085	0.07%	0.11501	4.0000
47	118.241	0.04%	0.11620	4.5000
50	119.397	0.00%	0.11739	5.0000

Data for Platinum RTD. Pt100=100 ohms @ 0°C
 RTD R0= 100 ohms
 A= 3.9083E-03
 B= -5.7750E-07

Gambar 7. Tampilan program bantu *RTD_Linearization_v7.xls* [14]

Rangkaian linearisasi RTD pada penelitian ini merupakan pengembangan dari rangkaian pada Gambar 6 yang menggunakan penguat instrumentasi dengan sensor Pt100 3 kawat (*3 Wire*) seperti ditunjukkan di Gambar 8 untuk kompensasi resistansi saluran. Rangkaian linearisasi ini terdiri dari sebuah penguat instrumentasi presisi AMP01E dengan penguatan variabel berdasarkan nilai R_G (Resistor *Gain*) R4 dan rangkaian penginderaan sensor Pt100. Sumber tegangan stabil V_{REF} 5 volt terhubung dengan resistor R1 untuk menyediakan arus eksitasi sensor Pt100. Arus eksitasi untuk sensor Pt100 adalah sebesar 1 mA [14]. Pada saat sensor Pt100 dieksitasi dengan sumber arus, tegangan yang dihasilkan berbanding lurus dengan resistansi. Resistor R5 berfungsi sebagai umpan balik positif dari penguat instrumentasi untuk koreksi linearitas akibat variasi temperatur [14].



Gambar 8. Diagram skema rancang bangun rangkaian linearisasi RTD Pt100

Dalam koneksi *3 Wire*, dua koneksi digunakan di sisi *ground* dari Pt100. Arus yang sama mengalir dalam dua jalur resistansi Pt100 menimbulkan tegangan masukan *common mode* yang ditolak oleh penguat instrumentasi. Arus yang mengalir dalam sisi *ground* juga menimbulkan tegangan *common mode*. Besarnya arus dalam jalur sinyal masukan tidak sama persis akibat arus koreksi linearitas yang bervariasi dari R5 [14]. Konfigurasi rangkaian dengan penguat instrumentasi ini meminimalkan sebagian besar kesalahan yang disebabkan oleh resistansi saluran.

Pengukuran temperatur di terowongan angin ILST mempunyai rentang dari temperatur kamar (25 °C) hingga maksimal 50 °C, sehingga pada inialisasi perancangan dipilih rentang temperatur dari 0 °C hingga 50 °C. Rentang tegangan keluaran rangkaian linearisasi ini dipilih 0 - 5 Vdc yang sebanding dengan temperatur inialisasi perancangan (0 - 50 °C).

Tegangan keluaran 0 - 5 Vdc pada rangkaian linearisasi jika dihubungkan ke CU Mk3 akan menghasilkan nilai di *Display 7 Segment* CU Mk3 sebesar 0000 untuk 0 Vdc dan 5000 untuk 5 Vdc. Nilai temperatur ini sesuai dengan 4 digit *Display 7*

Segment pengkondisi sinyal RTD Newport 267B pada RTD Interface yang akan digantikan.

C. Conditioning Unit (CU) Mk3

CU Mk3 [4] adalah perangkat yang melakukan fungsi pengkondisian sinyal dari suatu transduser analog (tekanan, strain gage, load cell, dll) akurasi tinggi dan mengubahnya menjadi data digital yang dikirimkan ke komputer DARS Host melalui jalur Ethernet dengan beberapa fitur sebagai berikut:

- Full scale sensitivity (Range : ±10000 mV),
- Adjustable transducer excitation voltage (0-15 Vdc),
- Adjustable frequency low-pass filter (1 – 1000 Hz),
- ADC 16 bit (15 bit + sign) Dual Slope,
- Terdapat saluran untuk mengatur agar semua parameter yang berpengaruh pada pengukuran berada dalam jangkauan data komputer DARS Host, seperti amplifier gain, tegangan eksitasi nominal, dan low pass filter cut-off frequency,
- Nilai aktual diperoleh melalui proses kalibrasi terhadap nilai nominal komputer DARS Host, serta melalui prosedur pemeriksaan terhadap pengoperasian secara menyeluruh dimulai dari saluran terendah, termasuk pada transduser,
- Memiliki resolusi 1 mikrovolt pada gain 1000 dan tingkat akurasi yang tinggi (0,01%) serta tipe impedansinya tinggi sehingga tidak akan mempengaruhi transduser,
- Setiap saluran terisolasi dari saluran lainnya sehingga catu daya transduser tidak akan terbagi, tidak ada ground bersama yang mengakibatkan sistem menjadi kurang sensitif terhadap gangguan pada waktu tertentu,
- Data rate dan bandwidth dapat disesuaikan dengan aplikasi tertentu serta pada umumnya dijaga serendah mungkin,
- Untuk pemakaian di luar sistem DARS, CU Mk3 dapat digunakan sebagai pengkondisi sinyal dalam mode stand alone bench-top.

CU Mk3 terdiri dari sejumlah modul fungsional dan dipasang pada PCB secara terpisah yang dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 9. Conditioning Unit (CU) Mk3

D. Pengambilan Data Pengukuran RTD Pt100

Untuk mengetahui kinerja dari rancang bangun pengkondisi sinyal RTD, maka perlu dilakukan langkah awal berupa kalibrasi dengan pembanding berupa unit pengkondisi sinyal RTD yang telah dikalibrasi pada ruang kalibrasi temperatur

[21]. Rentang temperatur yang diukur pada proses ini disesuaikan dengan kondisi di dalam terowongan angin ILST. Selain itu, untuk penerapan pada pengujian di terowongan angin ILST, perlu dilakukan pengukuran bersama antara pengkondisi sinyal RTD yang dirancang dengan pengkondisi sinyal RTD saat ini yaitu Newport 267B. Data digital keluaran CU Mk3 dan RTD Newport 267B dikirimkan ke komputer DARS-Host dengan format file.xml dan dikirimkan ke komputer Data Processing (DP)-Host secara online [4].

E. Perbandingan Data Pengukuran Pengkondisi Sinyal RTD terhadap Newport 267B

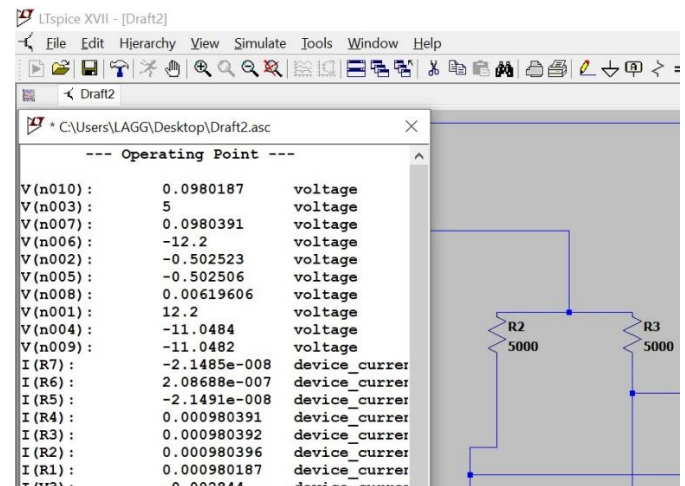
Untuk mengetahui karakteristik serta perbandingan dari rancang bangun pengkondisi sinyal RTD terhadap Newport 267B, maka diperlukan analisis data pengukuran temperatur yang berkontribusi terhadap konsistensi hasil data pengujian di terowongan angin. Dalam penyajian data perbandingan pengukuran temperatur rancang bangun pengkondisi sinyal RTD terhadap Newport 267B, diperlukan prosedur pengujian repeatability atau keterulangan [2]. Prosedur pengujian repeatability atau repeat test berfungsi untuk memvalidasi dan menjamin konsistensi data pengukuran di terowongan angin [2], [22].

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

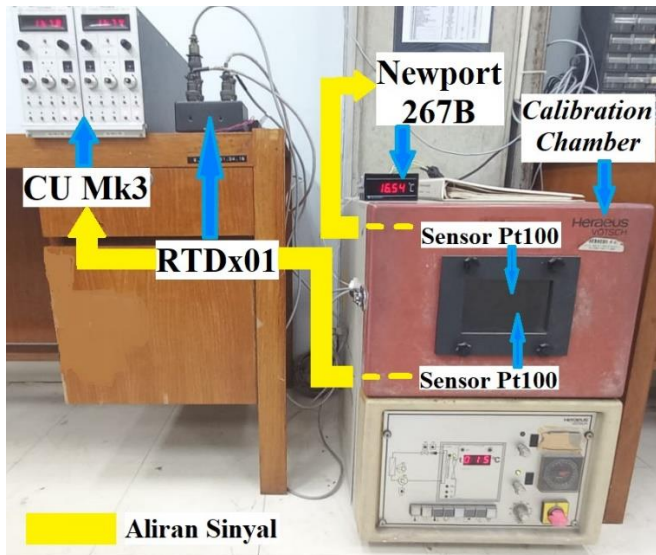
A. Kalibrasi Pengkondisi Sinyal RTD

Perancangan pengkondisi sinyal RTD diawali melalui simulasi rangkaian dengan perangkat lunak LTspice sebelum proses kalibrasi seperti ditunjukkan pada Gambar 10. Kalibrasi dilakukan untuk mengetahui kinerja rangkaian hasil rancangan yang dibandingkan dengan unit pengkondisi sinyal RTD yang telah dikalibrasi oleh laboratorium terakreditasi Komite Akreditasi Nasional (KAN) dalam ruang kalibrasi seperti ditunjukkan pada Gambar 11.

Dari Gambar 11 dapat dilihat bahwa pengkondisi sinyal RTDx01 hasil rancangan dan Newport 267B yang telah terkalibrasi dan mengacu pada Standar Nasional Satuan Ukuran (SNSU) Badan Standardisasi Nasional (BSN) serta LK-160-IDN, masing-masing terhubung dengan sensor Pt100 yang berada di dalam Calibration Chamber Heraeus VMT40 (-40 – 130 °C). Tegangan keluaran pengkondisi sinyal RTDx01 dihubungkan dengan CU Mk3 dan data pengukurannya diambil secara bersamaan dengan data pengukuran Newport 267B. Hasil kalibrasi dapat dilihat pada Tabel I.



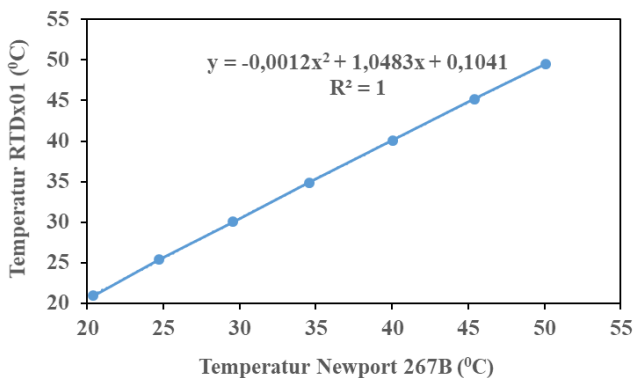
Gambar 10. Tampilan simulasi rangkaian pengkondisi sinyal RTD dengan perangkat lunak Ltspice



Gambar 11. Kalibrasi pengkondisi sinyal RTD dalam Calibration Room

TABEL I. HASIL KALIBRASI PENGKONDISI SINYAL RTD

No.	Newport 267B (°C)	RTDx01 (°C)	Simpangan (°C)
1.	20,40	20,92	0,52
2.	24,70	25,34	0,64
3.	29,58	30,06	0,48
4.	34,55	34,85	0,30
5.	40,04	40,06	0,02
6.	45,39	45,19	0,20
7.	50,08	49,55	0,53

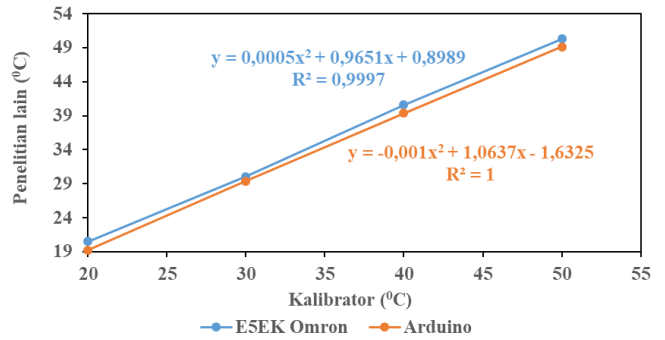


Gambar 12. Kurva kalibrasi pengkondisi sinyal RTDx01

Dari Tabel I didapatkan nilai simpangan rata-rata 0,38 °C (1,31%) dan ketidakpastian 0,12 °C untuk rentang temperatur kalibrasi 20 – 50 °C. Koefisien kalibrasi pengkondisi sinyal RTDx01 adalah $y = -0,0012x^2 + 1,0483x + 0,1041$ seperti ditunjukkan pada Gambar 12.

Dibandingkan dengan hasil kalibrasi pengkondisi sinyal RTD penelitian lain yang menggunakan digital controller E5EK Omron [21] dan Arduino Uno [12] untuk rentang temperatur 20 – 50 °C seperti pada Gambar 13, ketidaklinearan orde 2 (Second-Order Nonlinearity) hasil rancangan ini sangat kecil ditandai dengan nilai koefisien determinasi $R^2 = 1$. Tingkat linearitas hasil rancangan dan penelitian [12] dapat dikatakan lebih baik daripada penelitian [21].

Simpangan rata-rata hasil kalibrasi pengkondisi sinyal RTDx01 rancangan jauh lebih kecil dari penelitian [12] yang bernilai 0,72 °C (2,28%), namun sedikit lebih besar dari penelitian [21] yang bernilai 0,36 °C (1,17%). Perbandingan hasil kalibrasi penelitian lain [12], [21] ini dapat dilihat pada Tabel II.



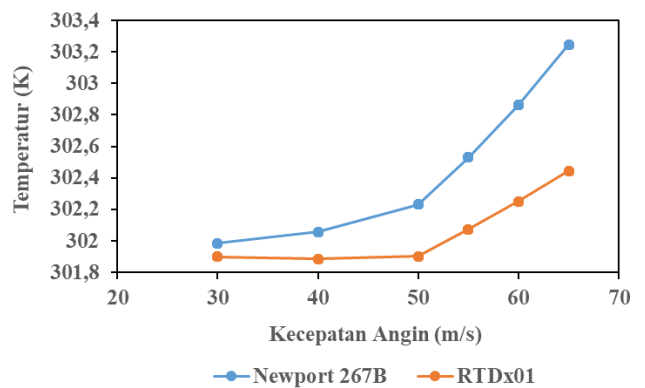
Gambar 13. Kurva kalibrasi penelitian lain

TABEL II. HASIL KALIBRASI RTD PENELITIAN LAIN

No.	Kalibrator (°C)	E5EK Omron (°C) [21]	Arduino Uno (°C) [12]	Simpangan (°C)	
				E5EK Omron	Arduino Uno
1.	20	20,49	19,25	0,49	0,75
2.	30	30,03	29,41	0,03	0,59
3.	40	40,58	39,35	0,58	0,65
4.	50	50,33	49,12	0,33	0,88

B. Pengukuran Pengkondisi Sinyal RTDx01 dan Newport 267B pada Kecepatan Angin yang Bervariasi

Hasil pengukuran rancang bangun pengkondisi sinyal RTDx01 dan Newport 267B pada kecepatan angin dengan rentang 30 – 65 m/s dapat dilihat pada Gambar 14. Rentang kecepatan tersebut selama ini banyak digunakan dalam pengujian aerodinamika aeronotik misalnya pesawat terbang dan roket serta aerodinamika non-aeronotik misalnya bangunan, jembatan dan mobil di terowongan angin ILST.

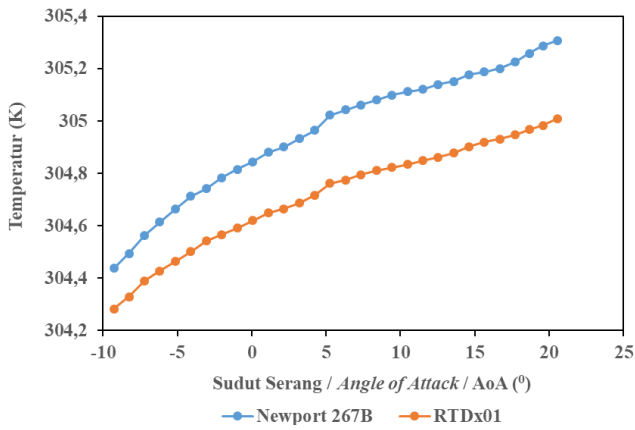


Gambar 14. Kurva hasil pengukuran pengkondisi sinyal RTDx01 dan Newport 267B terhadap variasi kecepatan angin

Terdapat perbedaan hasil pengukuran antara pengkondisi sinyal rancangan RTDx01 terhadap Newport 267B. Kurva pengukuran pada Gambar 14 merupakan perbandingan nilai temperatur rata-rata masing-masing peralatan melalui prosedur Repeat Test untuk mengetahui keterulangan (repeatability) dengan pengambilan data 10 kali tiap titik. Simpangan rata-rata temperatur antara RTDx01 dengan Newport 267B sebesar 0,41 K (0,14%).

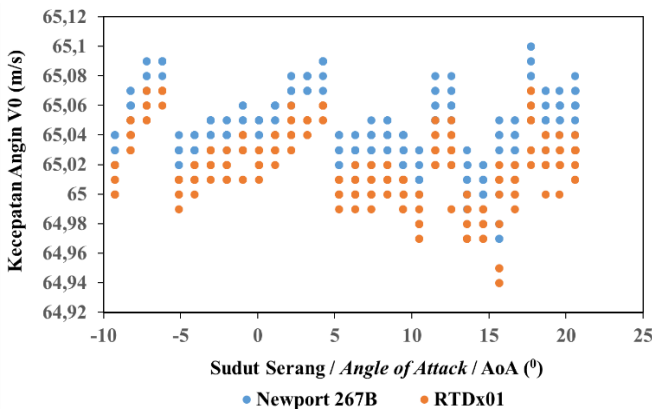
C. Pengukuran Pengkondisi Sinyal RTDx01 dan Newport 267B pada Kecepatan Angin 65 m/s terhadap Variasi Sudut Serang Model Uji

Hasil pengukuran temperatur rata-rata antara pengkondisi sinyal rancangan RTDx01 dan Newport 267B pada kecepatan angin 65 m/s terhadap variasi sudut serang model uji dapat dilihat pada Gambar 15. Kecepatan tersebut saat ini merupakan kecepatan tertinggi yang aman dan banyak digunakan dalam pengujian aerodinamika aeronotik khususnya pesawat terbang di terowongan angin ILST.

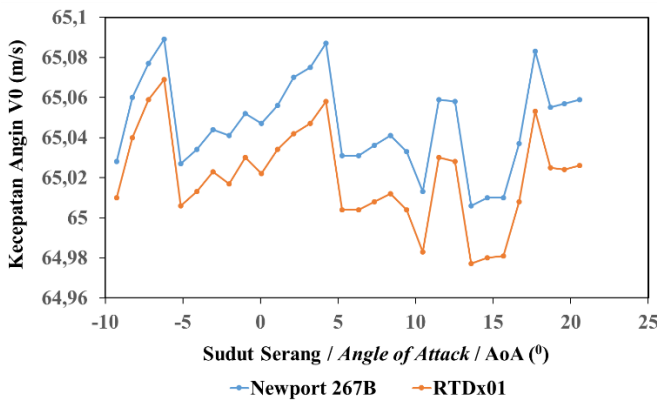


Gambar 15. Kurva hasil pengukuran temperatur pengkondisi sinyal RTDx01 dan Newport 267B pada kecepatan angin 65 m/s

Kurva pada Gambar 15 diperoleh melalui prosedur *Repeat Test* dengan pengambilan data 10 kali tiap sudut serang model uji pesawat. Simpangan rata-rata temperatur antara RTDx01 dengan Newport 267B terhadap variasi sudut serang model pesawat dari -9° – 20° adalah 0,25 K (0,08%). Variasi sudut serang tersebut saat ini paling banyak digunakan dalam pengujian aerodinamika aeronotik di terowongan angin ILST. Perbandingan perhitungan kecepatan angin berdasarkan nilai temperatur yang dihasilkan oleh pengkondisi sinyal RTDx01 dan Newport 267B terhadap variasi sudut serang model uji dapat dilihat pada Gambar 16 dan Gambar 17.



Gambar 16. Kurva hasil perhitungan kecepatan angin dari nilai temperatur dengan pengambilan data 10 kali tiap sudut serang model uji



Gambar 17. Kurva hasil perhitungan kecepatan angin dari nilai temperatur rata-rata pengkondisi sinyal RTDx01 dan Newport 267B

Kurva pada Gambar 16 merupakan hasil perhitungan kecepatan angin di terowongan angin ILST berdasarkan persamaan (1) – (5). Nilai temperatur hasil pengukuran dari pengkondisi sinyal RTDx01 dan Newport 267B menentukan besarnya kecepatan angin (m/s). Pengambilan data dilakukan

10 kali tiap sudut serang model uji pesawat sebagai bagian dari prosedur *Repeat Test*.

Perbandingan hasil perhitungan kecepatan dari nilai temperatur rata-rata pengkondisi sinyal RTDx01 dan Newport 267B dapat dilihat pada Gambar 17. Simpangan rata-rata kecepatan angin terhadap variasi sudut serang model pesawat dari -9° – 20° adalah 0,03 m/s (0,04%).

Berdasarkan kriteria tingkat pengukuran dan keterulangan menurut penelitian terdahulu menggunakan ANOVA [23]–[26] dari berbagai konfigurasi baik variasi kecepatan angin maupun variasi sudut serang model uji, pengukuran temperatur melalui pengkondisi sinyal hasil rancangan RTDx01 dibandingkan dengan Newport 267B mempunyai simpangan rata-rata kurang dari 0,5% nilai terukur. Kinerja pengkondisi sinyal RTDx01 dengan simpangan rata-rata tersebut termasuk dalam kategori alat presisi [27] serta dapat diterima dan layak digunakan [23].

Simpangan rata-rata suatu pengkondisi sinyal RTD pada penelitian lain yang menerapkan rangkaian *Brokaw Bandgap Voltage Reference Cell* pada tegangan referensi V_{REF} rangkaian linearisasi dapat mencapai 0,14 °C untuk rentang 0 - 85 °C [19]. Nilai ini lebih kecil dari hasil pengukuran pengkondisi sinyal rancangan, namun merupakan hasil simulasi menggunakan perangkat lunak LTspice yang belum direalisasikan dalam suatu purwarupa serta belum melalui proses kalibrasi dan pengujian di terowongan angin khususnya ILST.

IV. PENUTUP

Pengkondisi sinyal RTD telah berhasil dirancang dan digunakan pada ILST menggantikan Newport 267B serta DAS-Hub dengan format data BCD 16-bit paralel sekaligus menyederhanakan arsitektur sistem akuisisi data ILST-DARS berbasis *Ethernet Bus* khususnya untuk pengukuran temperatur seksi uji terowongan angin. Kinerja pengkondisi sinyal RTD hasil rancangan termasuk dalam kategori layak digunakan berdasarkan kriteria tingkat pengukuran dan keterulangan menggunakan ANOVA serta mempunyai tingkat linearitas dan kepresisian yang tinggi dengan simpangan rata-rata kurang dari 0,5% nilai terukur sehingga menjamin konsistensi data pengukuran temperatur seksi uji terowongan angin. Penelitian selanjutnya adalah merancang pengkondisi sinyal RTD dengan menggunakan komponen *low-offset* dan *high-precision amplifier* pada terowongan angin transonik (170 – 410 m/s).

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih disampaikan kepada Laboratorium Aerodinamika, Aeroelastika dan Aeroakustika, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) serta Departemen Teknik Elektro, Universitas Diponegoro yang telah bekerjasama memberikan dukungan fasilitas, bimbingan, dan bahan dalam penelitian ini.

REFERENSI

- [1] F. E. Jones, *Techniques and Topics in Flow Measurement*, 1st ed., Boca Raton, USA: CRC Press, 2020.
- [2] N. Risnawan, F. A. Yohanes, H. Novianti, and Y. Feriadi, "Pengukuran Kualitas Kecepatan Angin pada Terowongan Angin di ILST BBTA3," *J. Aero Technol.*, vol. 2, no. 1, pp. 26–36, 2018.
- [3] O. De Vries, "Equations for the Data Processing of the ILST." NLR, Amsterdam, The Netherlands, 2017.
- [4] T. ter M. and H. Slot, "Interface Control Document for the ILST FMS Version 1." NLR, Amsterdam, The Netherlands, 2017.
- [5] M. Oblak, M. Pirmat, and M. Boltežar, "An impedance tube submerged in a liquid for the low-frequency transmission-loss measurement of a porous material," *Appl. Acoust.*, vol. 139, no. 1, pp. 203–212, 2018, doi: 10.1016/j.apacoust.2018.04.014.
- [6] S. M. Iacob *et al.*, "Plantar pressure variations induced by experimental malocclusion—a pilot case series study," *Healthc.*, vol. 9, no. 5, pp. 1–9, 2021, doi: 10.3390/healthcare9050599.

- [7] A. J. R. Silva, P. M. G. Moreira, M. A. P. Vaz, and J. Gabriel, "Temperature profiles obtained in thermoelastic stress test for different frequencies," *Int. J. Struct. Integr.*, vol. 8, no. 1, pp. 51–62, 2017, doi: 10.1108/IJSI-04-2016-0016.
- [8] J. Stetina, T. Mauder, L. Klimes, and P. Charvat, "Melting front propagation in a paraffin-based phase change material lab-scale experiment and simulations," *Therm. Sci.*, vol. 22, no. 6, pp. 2723–2732, 2018, doi: 10.2298/TSCI161109322S.
- [9] E. Quiles, E. Garcia, J. Cervera, and J. Vives, "Development of a Test Bench for Wind Turbine Condition Monitoring and Fault Diagnosis," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 17, no. 6, pp. 907–913, 2019, doi: 10.1109/TLA.2019.8896812.
- [10] S. Tiari, M. Mahdavi, and S. Qiu, "Experimental study of a latent heat thermal energy storage system assisted by a heat pipe network," *Energy Convers. Manag.*, vol. 153, no. 1, pp. 362–373, 2017, doi: 10.1016/j.enconman.2017.10.019.
- [11] K. Baraya, J. A. Weibel, and S. V. Garimella, "Heat pipe dryout and temperature hysteresis in response to transient heat pulses exceeding the capillary limit," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 148, no. 1, pp. 1–7, 2020, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.119135.
- [12] T. M. Younes, "Novel Approach of Non-linearity Analyses of Resistive Temperature Sensors," *Rev. d'Intelligence Artif.*, vol. 33, no. 2, pp. 159–164, 2019, doi: 10.18280/ria.330212.
- [13] C. Karan and S. Swain, "Concept and Development of Fpga Calculation and Control Method of Dependant Temperature," *Int. J. Res. Eng. Sci.*, vol. 7, no. 10, pp. 5–11, 2019.
- [14] B. Trump, "Analog linearization of resistance temperature detectors," *Analog Appl. Journal, Texas Instruments Inc.*, vol. 4, no. 1, pp. 1–6, 2011.
- [15] A. Chen, H. Y. Chen, and C. Chen, "A software improvement technique for platinum resistance thermometers," *Instruments*, vol. 4, no. 2, pp. 1–12, 2020, doi: 10.3390/instruments4020015.
- [16] O. Boyko and O. Hotra, "Improvement of dynamic characteristics of thermoresistive transducers with controlled heating," *Prz. Elektrotechniczny*, vol. 95, no. 5, pp. 110–113, 2019, doi: 10.15199/48.2019.05.27.
- [17] G. Yang and Y. Wen, "A Controllable DCCS-Based PT Temperature Sensor in High Precision Molecular Spectroscopy Application," *IEEE Access*, vol. 8, no. 1, pp. 42519–42528, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2977163.
- [18] J. Jovanović and D. Denić, "Mixed-mode Method Used for Pt100 Static Transfer Function Linearization," *Meas. Sci. Rev.*, vol. 21, no. 5, pp. 142–149, 2021, doi: 10.2478/msr-2021-0020.
- [19] P. Carvalhaes-Dias, I. P. Ferreira, and L. F. C. Duarte, "Using the Non-linear Behavior of the Brokaw Bandgap Voltage Reference Cell to Linearize Resistance," *Sensors & Transducers*, vol. 229, no. 1, pp. 61–67, 2019.
- [20] P. Divyang et al., "Design of High Accurate Universal Intelligent Temperature Transmitter," *International Journal of Science Technology & Engineering*, vol. 4, no. 10, pp. 162–168, 2018.
- [21] S. Sumarkantini, "Evaluasi Kalibrasi Transducer RTD Pt100 dan Termokopel Type K," *Epic J. Electr. Power, Instrum. Control*, vol. 1, no. 2, pp. 1–9, 2018, doi: 10.32493/epic.v1i2.1328.
- [22] G. Ocokoljić, D. Damljanović, D. Vuković, and B. Rašuo, "Contemporary frame of measurement and assessment of wind-tunnel flow quality in a low-speed facility," *FME Trans.*, vol. 46, no. 4, pp. 429–442, 2018, doi: 10.5937/fmet1804429O.
- [23] G. Wijiatmoko, M. Taufiq, and W.I. Surya, "Implementation of ANOVA in the aerodynamics forces / moments measurement system in Indonesian Low Speed Tunnel Implementation of ANOVA in the aerodynamics forces / moments measurement system in Indonesian Low Speed Tunnel," in *Proceeding of The 6th Annual Basic Science International Conference*, 2021, pp. 1–4.
- [24] T. Hessian, "Gage Repeatability and Reproducibility (R&R)," *6 Sigma Study*, vol. 25, no. 1, pp. 213–225, 2018.
- [25] S. F. Beckert and W. S. Paim, "Critical analysis of the acceptance criteria used in measurement systems evaluation," *Int. J. Metrol. Qual. Eng.*, vol. 8, no. 23, pp. 1–9, 2017, doi: 10.1051/ijmqe/2017016.
- [26] S. J. Park and C. Ha, "Determination of optimal experimental design for ANOVA gauge R&R using stochastic programming," *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 156, no. 1, pp. 1–9, 2020, doi: 10.1016/j.measurement.2020.107612.
- [27] H. Suryawinata, D. Purwanti, and S. Sunardiyo, "Sistem Monitoring Pada Panel Surya Menggunakan Data Logger Berbasis Atmega 328 Dan Real Time Clock DS1307," *J. Tek. Elektro*, vol. 9, no. 1, pp. 30–36, 2017.