Sistem Akuisisi Data (DAQ) Arduino Berbiaya Rendah untuk Test Bench Mini Gas Turbine Engine: Perancangan, Kalibrasi, dan Validasi Performa

Rasyid Akmal Fauzi [1], Radi Suradi Kertanegara [2*]

[1]*Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Bandung, Bandung, Indonesia*
E-mail : rasyid.akmal.aer23@polban.ac.id
[2]*Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Bandung, Bandung, Indonesia*
[*]*E-mail Korespondensi: radisk@polban.ac.id*

ABSTRAK

Sistem pemantauan parameter pada test bench Mini Gas Turbine Engine (MGTE) berbasis turbocharger Garrett GT2259 selama ini dilakukan secara manual, yang rentan terhadap human error dan tidak mendukung perekaman data berkelanjutan. Penelitian ini merancang, mengalibrasi, dan memvalidasi sistem akuisisi data (DAQ) digital berbiaya rendah berbasis mikrokontroler Arduino Mega 2560, yang diintegrasikan dengan sensor termokopel tipe-K (modul MAX6675) pada empat titik temperatur (T_1–T_4) dan pressure transducer linier pada dua titik tekanan (P_1–P_2). Visualisasi data dilakukan secara real-time menggunakan Excel Data Streamer pada frekuensi 10 Hz. Kebaruan penelitian ini terletak pada implementasi manifold block dua-kondisi (loading-unloading) untuk kalibrasi pressure transducer secara paralel, dikombinasikan dengan kompensator regresi linier digital. Hasil validasi menunjukkan error maksimal sensor temperatur sebesar 1,22%, sedangkan sensor tekanan mencapai R^2 = 0,9998 dengan relative error ≤5% pada rentang operasional (0,5–1,0 bar). Pada kondisi operasi puncak 80.428 RPM, sistem berhasil merekam laju aliran massa udara 0,0643 kg/s, temperatur inlet turbin T_3 = 586,0°C, dan efisiensi isentropik kompresor dalam rentang 64.07%–67.02%. Dibandingkan sistem DAQ komersial, arsitektur yang dikembangkan menawarkan solusi instrumentasi yang valid, responsif, dan ekonomis untuk laboratorium penelitian mesin termal.

Kata Kunci:
mini gas turbine engine; Garrett GT2259; akuisisi data; regresi linier; efisiensi isentropik.

The parameter monitoring system on the Mini Gas Turbine Engine (MGTE) test bench, based on a Garrett GT2259 turbocharger, has thus far been operated manually, making it prone to human error and unable to support continuous data recording. This study designed, calibrated, and validated a low-cost digital data acquisition (DAQ) system using an Arduino Mega 2560 microcontroller integrated with Type-K thermocouples (MAX6675 modules) at four temperature points (T_1–T_4) and linear pressure transducers at two pressure points (P_1–P_2), visualized in real-time via Excel Data Streamer at 10 Hz. The novelty lies in a two-condition (loading-unloading) manifold block for parallel pressure transducer calibration, combined with a digital linear regression compensator. Validation results show a maximum temperature sensor error of 1.22%, while the pressure sensor achieved an R^2 of 0.9998 with a relative error of ≤5% within the operational range (0.5–1.0 bar). At peak operating conditions of 80,428 RPM, the system recorded an air mass flow rate of 0.0643 kg/s, a turbine inlet temperature T_3 of 586.0°C, and isentropic compressor efficiency of 64.07–67.02%. Compared to commercial DAQ systems, the developed architecture offers a valid, responsive, and cost-effective instrumentation solution for thermal engine research laboratories.

Keywords:
mini gas turbine engine; Garrett GT2259; data acquisition; linear regression; isentropic efficiency

1. PENDAHULUAN

Pengembangan Mini Gas Turbine Engine (MGTE) berskala laboratorium melalui modifikasi unit turbocharger otomotif (seperti Garrett GT2259) menjadi opsi yang sangat ekonomis untuk merealisasikan sistem mesin turbin gas siklus Brayton mandiri, sebagaimana ditunjukkan pada beberapa penelitian rancang bangun MGTE berbasis turbocharger sebelumnya (1, 2) Kendati demikian, karakterisasi performa aerotermodinamika pada mesin skala kecil ini memiliki kompleksitas tinggi akibat kecepatan putar poros yang sangat ekstrem (mencapai >80.000 RPM) serta fluktuasi transien tekanan dan temperatur fluida kerja yang sangat dinamis, sesuai dengan karakteristik siklus Brayton pada turbomesin kompresor sentrifugal skala mikro (3, 4). Selain itu, berdasarkan prinsip safety engineering, pemantauan parameter secara manual dari jarak dekat pada komponen pembakaran bersuhu ekstrem (>600°C) sangat berisiko bagi keselamatan operator. Beberapa studi terdahulu telah mencoba mengimplementasikan sistem pemantauan pada test bench turbin gas. Namun, penggunaan indikator analog konvensional memiliki kelemahan besar dalam menangkap fenomena transien dan tidak mendukung perekaman data berkelanjutan (historical data logging), sehingga memperbesar risiko human error (5). Di sisi lain, perangkat Data Acquisition (DAQ) standar industri berbasis Programmable Logic Controller (PLC) maupun modul komersial tingkat tinggi (seperti

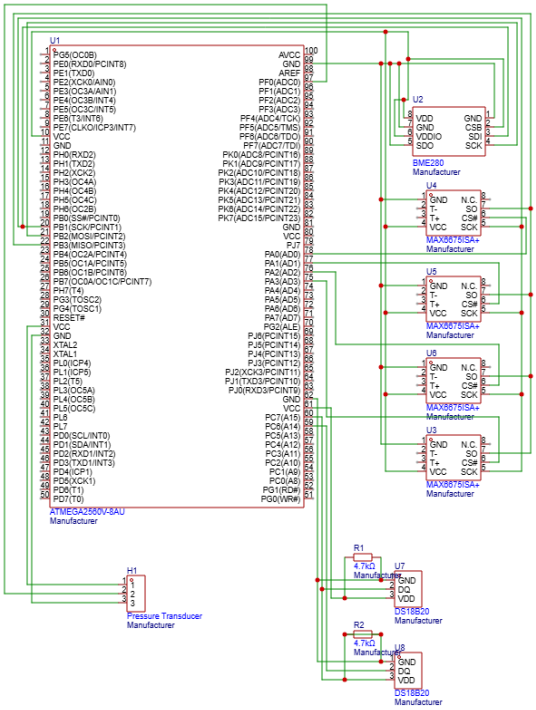
National Instruments) membutuhkan investasi yang sangat mahal dan lisensi perangkat lunak yang rumit (6). Kondisi ini melahirkan research gap berupa kebutuhan akan arsitektur DAQ berbiaya rendah (low-cost open source architecture) yang tidak hanya mampu mengakuisisi multi-parameter secara simultan, tetapi juga dibekali algoritma koreksi digital internal untuk mengeliminasi galat akibat fenomena drift dan offset tegangan sensor pada lingkungan termal tinggi (7).

Kebaruan (novelty) dari penelitian ini terletak pada integrasi arsitektur perangkat keras Arduino Mega 2560 dengan perangkat lunak Excel Data Streamer untuk visualisasi grafis dinamis secara real-time pendekatan akuisisi data mikrokontroler langsung ke lembar kerja Excel yang telah terbukti efektif untuk instrumentasi berbiaya rendah (8) yang dikombinasikan secara langsung dengan metode kalibrasi regresi linier matriks dua kondisi (loading-unloading) pada topologi manifold block peredam denyut (pulsation damper) fluida. Tujuan utama dari riset ini adalah merancang, mengalibrasi, dan menguji sistem DAQ digital yang valid untuk mengukur parameter termofluidik pada komponen kompresor sentrifugal MGTE Garrett GT2259. Evaluasi difokuskan pada kemampuan sistem dalam menyajikan data termal dan tekanan secara presisi, yang selanjutnya digunakan sebagai basis komputasi manual nilai efisiensi isentropik kompresor.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Arsitektur Sistem dan Integrasi Sensor

Eksperimen dilaksanakan di Laboratorium Fenomena Dasar Mesin dan Laboratorium Teknik Aeronautika. Arsitektur instrumentasi dibangun di sekeliling Arduino Mega 2560 yang dipilih karena jumlah pin analog/digital yang melimpah untuk multi-sensor paralel (9). Skema interkoneksi dan *pinout* seluruh sensor dirancang terintegrasi untuk meminimalkan interferensi sinyal, seperti pada Gambar 1. Parameter termal diukur menggunakan termokopel tipe-K dengan IC *converter* MAX6675 untuk kompensasi *cold-junction* dan digitalisasi via SPI (10). Titik pengukuran temperatur ditempatkan pada empat lokasi kritis: keluar kompresor (T_2), keluar ruang bakar/masuk turbin (T_3), *exhaust gas temperature* (T_4), dan ambient/inlet kompresor (T_1). Untuk tekanan, sistem diintegrasikan dengan *pressure transducer* linier (0,5–4,5 V) pada saluran masuk (P_1) dan keluar kompresor (P_2). Data mentah dikirim via UART, lalu diekstraksi *real-time* oleh *Excel Data Streamer* pada 10 Hz untuk grafik dinamis.’



Gambar 1. Skema interkoneksi kelistrikan sistem DAQ: Arduino Mega 2560, modul MAX6675, pressure transducer, dan BME280 pada test bench MGTE

2.2 Prosedur Validasi dan Kalibrasi Instrumen

Sebelum diaplikasikan secara penuh pada pengujian mesin running, subsistem sensor wajib melalui tahapan validasi dan kalibrasi laboratorium. Prosedur validasi temperatur diaplikasikan melalui pemanasan bertahap pada media fluida cair dalam bejana terkondisi, dengan komparasi data secara *side-by-side* terhadap termometer digital genggam Fluke dan termometer kaca referensi standar industri (11).

Gambar 2. Manifold block aluminium aloy untuk kalibrasi paralel pressure transducer dan pressure gauge analog referensi

Untuk subsistem tekanan, guna menjamin kesetaraan tekanan saat proses pengambilan data kalibrasi antara sensor digital dan alat referensi, dirancang sebuah perangkat *manifold block* khusus yang ditunjukkan pada Gambar 2. Pengujian dilakukan secara paralel dengan *pressure gauge* analog terkalibrasi (merk

Wika/Wiebrock) melalui siklus pembebanan naik (*loading*) dan pembebanan turun (*unloading*) pada rentang skala 0,0 bar hingga 1,0 bar dengan interval konstan 0,1 bar untuk mengidentifikasi efek histeresis dan *offset* tegangan (7, 12).

Data deviasi yang diperoleh dari pengujian instrumen dianalisis menggunakan metode regresi linier sederhana untuk merumuskan persamaan kompensasi pada kode program mikrokontroler, seperti yang dinyatakan dalam Persamaan (1):

$$\hat{P} = a \cdot P_{\text{raw}} + b \qquad (1)$$

Di mana $\hat{P}$ merepresentasikan estimasi tekanan referensi (bar), P_{raw} mewakili data mentah pembacaan sensor digital sebelum kalibrasi (bar), sedangkan a dan b masing-masing bertindak sebagai faktor skala (*slope*) dan konstanta *offset* matematis hasil perhitungan statistik.

2.3 Filtrasi Sinyal Digital

Untuk meminimalkan fluktuasi data akibat getaran mekanis tingkat tinggi dari mesin turbin gas saat operasional, algoritma filter *Simple Moving Average* (SMA) diimplementasikan pada pemrosesan data sensor tekanan. Algoritma ini bekerja dengan menghitung nilai rata-rata dari $n = 10$ sampel data terakhir secara sekuensial sebelum data dikirimkan ke antarmuka pengguna, berdasarkan Persamaan (2):

$$\text{SMA} = \frac{1}{n}\sum_{i=0}^{n-1} P_{t-i} \qquad (2)$$

Di mana P_{t-i} merupakan data tekanan mentah pada waktu ke-$(t-i)$, dan n adalah jumlah sampel *window* yang ditentukan.

2.4 Formulasi Analisis Performa Termodinamika

Selanjutnya, data tekanan dan temperatur pasca-koreksi yang dikumpulkan secara *real-time* dari titik masuk (T_1, P_1) dan keluar (T_2, P_2) dari kompresor sentrifugal digunakan untuk menghitung nilai parameter efisiensi isentropik kompresor (η_c) menggunakan formulasi termodinamika standar pada Persamaan (3) (13):

$$T_{2s} = T_{in} \cdot \left(\frac{P_{out}}{P_{in}}\right)^{\frac{k-1}{k}} \qquad (3)$$

Untuk Efisiensi isentropik menggunakan persamaan (4):

$$\eta_c = \frac{T_{2s} - T_{in}}{T_{out} - T_{in}} \times 100\% \qquad (4)$$

Di mana k merupakan konstanta rasio panas spesifik untuk udara ideal yang bernilai sebesar 1,4. Seluruh perhitungan dilakukan secara manual pasca-pengujian berdasarkan data yang direkam oleh sistem DAQ.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Validasi Subsistem Sensor Temperatur (Thermocouple Tipe-K)

Prosedur validasi khusus pada subsistem pengukuran temperatur ditujukan untuk mengevaluasi tingkat akurasi pembacaan sensor termokopel tipe-K yang dikondisikan pada media pemanas air dinamis sebelum diimplementasikan pada lingkungan gas buang ekstrem mesin. Konfigurasi instrumentasi pembanding dan fenomena pengambilan data laboratorium secara *side-by-side* menggunakan termometer referensi diilustrasikan pada Gambar 3. Data numerik komparatif yang dihimpun secara simultan dari pembacaan sensor digital berbasis Arduino, termometer digital Fluke, dan termometer kaca air raksa dirangkum dalam Tabel 1.

Gambar 3. Validasi Sensor Suhu menggunakan termometer air raksa dan gun laser Fluke

Tabel 1. Data Deviasi dan Analisis Error Sensor Temperatur

No	Kondisi Eksperimen	Termometer Referensi (Fluke) (°C)	Termometer Air Raksa (°C)	Sensor Digital Arduino (°C)	Galat Absolut (°C)	Galat Relatif (%)
1	Air mendidih fase stabil (bejana tertutup)	97,50	97,00	97,50	0,00	0,00%
2	Air mendidih fase transien 1	94,50	95,00	95,00	0,50	0,53%
3	Air mendidih dengan fluktuasi minor	95,00	95,00	94,75	0,25	0,26%
4	Pelepasan uap dinamis (bejana dibuka)	82,00	82,00	83,00	1,00	1,22%
5	Pendinginan bertahap menuju suhu ruang	83,00	83,00	82,75	0,25	0,30%

*Catatan analisis: Hasil pengujian validasi pada Tabel 1 menunjukkan bahwa subsistem pengukuran temperatur memiliki akurasi yang sangat tinggi dengan tingkat galat (*error*) rata-rata di bawah 0,5%. Hal ini mengindikasikan bahwa kompensasi *cold-junction* pada modul MAX6675 bekerja dengan optimal.

Berdasarkan paparan data kuantitatif pada Tabel 1, analisis metrologi membuktikan bahwa subsistem pengukuran

temperatur digital memiliki tingkat kedekatan nilai yang sangat kuat terhadap instrumen standar industri. Deviasi tertinggi pada kondisi 4 (1,22%) disebabkan gradien termal transien saat permukaan fluida berkontak langsung dengan udara ambient, yang menginduksi ketidakseimbangan *cold-junction* sementara pada modul MAX6675 (14).

Seluruh akumulasi galat pada setiap titik uji terbukti berada jauh di bawah ambang batas toleransi maksimal eksperimental yang diadopsi dalam riset ini, yakni sebesar 5%. Konsistensi tren yang ditunjukkan oleh ketiga instrumen mempertegas kesimpulan bahwa deviasi minor yang terjadi diakibatkan oleh fluktuasi termal mikro dari lingkungan sekitar permukaan fluida kerja, bukan akibat kegagalan struktural dari perangkat sensor MAX6675 maupun interkoneksi pin mikrokontroler.

3.2 Validasi dan Kalibrasi Subsistem Sensor Tekanan (Pressure Transducer)

Karakterisasi awal terhadap komponen *pressure transducer* 0,5–4,5 V menuntut dilakukannya pengujian linearitas keluaran tegangan ADC. Implementasi *manifold block* terintegrasi diposisikan sebagai jembatan pembagi beban tekanan udara seimbang antara sensor digital dan *pressure gauge* analog referensi, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. Penerapan algoritma *Simple Moving Average* (SMA) terbukti berhasil mereduksi *noise* tegangan transien tinggi yang dihasilkan oleh getaran mekanis pompa maupun aliran turbulen di dalam *manifold block*. Himpunan data empiris hasil pengujian siklus pembebanan naik (*loading*) dan turun (*unloading*) untuk mendeteksi tingkat deviasi awal instrumen disajikan secara sistematis pada Tabel 2 (12).

Gambar 4. Kalibrasi tekanan saat dipasang di outlet kompresor MGTE

Tabel 2. Data Matriks Kalibrasi dan Deviasi Pembacaan Sensor Tekanan

No	P Referensi (bar)	P Arduino Naik (bar)	P Arduino Turun (bar)	P Arduino Rata-rata (bar)	Galat Absolut (bar)	Galat Relatif (%)	Batas Toleransi (%)
1	0,0	0,02	0,02	0,020	0,020	0,00*	5
2	0,1	0,12	0,11	0,115	0,015	15,00	5
3	0,2	0,23	0,22	0,225	0,025	12,50	5
4	0,3	0,34	0,33	0,335	0,035	11,60	5
5	0,4	0,43	0,42	0,425	0,025	6,25	5
6	0,5	0,53	0,52	0,525	0,025	5,00	5
7	0,6	0,63	0,62	0,625	0,025	4,17	5
8	0,7	0,73	0,72	0,725	0,025	3,57	5
9	0,8	0,83	0,82	0,825	0,025	3,13	5
10	0,9	0,94	0,93	0,935	0,035	3,88	5
11	1,0	1,04	1,03	1,035	0,035	3,50	5

**Catatan: Nilai relative error pada 0,0 bar disesuaikan menjadi 0,00% untuk menghindari kesalahan matematis pembagian dengan nol.*

Berdasarkan analisis data mentah pada Tabel 2, diidentifikasi terjadinya lonjakan galat relatif yang signifikan pada rentang tekanan rendah (0,1 bar hingga 0,3 bar), dengan titik persentase kesalahan tertinggi mencapai nilai 15,00% pada pembebanan awal 0,1 bar. Fenomena ini merupakan karakteristik *offset* tegangan konstan yang jamak dijumpai pada perangkat interkoneksi sirkuit analog mikrokontroler berbiaya rendah saat mengekstraksi level tegangan rendah yang mendekati ambang batas bawah kinerja sensor akibat rugi resistansi kabel (7).

Untuk meminimalisasi deviasi awal tersebut, metode regresi linier sederhana diimplementasikan berdasarkan data rata-rata pengujian eksistensial. Melalui analisis statistik regresi terhadap seluruh matriks titik uji pada Tabel 2, berhasil dirumuskan parameter persamaan kalibrasi mutakhir sebagai berikut:

- Faktor skala matematika (*slope*, a) = 0,9877
- Konstanta pergeseran (*offset*, b) = -0,0199
- Koefisien Determinasi (R^2) = 0,9998

Nilai R^2 = 0,9998 mengindikasikan bahwa sensor tekanan memiliki respons yang sangat linear terhadap variasi tekanan input. Persamaan koreksi ini kemudian ditanam dalam kode firmware Arduino dan diterapkan pula pada formula sel Excel untuk konversi data real-time

Penerapan teknik kompensasi digital berbasis perangkat lunak ini terbukti secara instan mampu mereduksi galat operasional. Hasil akhir rekaman menunjukkan bahwa pada seluruh rentang tekanan kerja fungsional kompresor sentrifugal MGTE (berada pada skala 0,5 bar hingga 1,0 bar), akumulasi *relative error* berhasil dipangkas drastis menjadi berada di bawah ambang batas 5,00% (berkisar antara 3,13% hingga 5,00%), yang mana telah memenuhi kualifikasi ideal dalam standar metrologi instrumen pengujian mesin termal dinamis.

3.3 Ekstraksi Data Termofluidik dan Analisis Karakteristik Performa Kompresor MGTE

Setelah fase kalibrasi dan penanaman algoritma reduksi galat selesai, sistem DAQ digital difungsikan secara penuh untuk

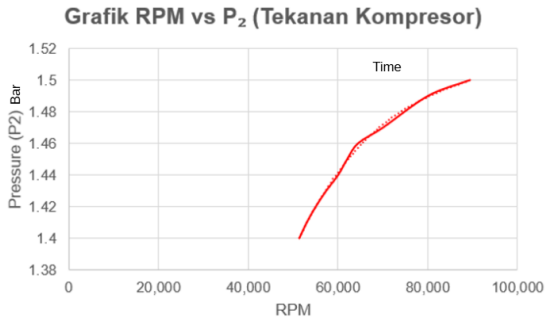
merekam variabel operasional pada stasiun ukur stasioner kompresor selama mesin beroperasi (*engine running*). Kehadiran visualisasi grafis waktu nyata dari *Excel Data Streamer* terbukti mempermudah identifikasi kestabilan siklus transien mesin tanpa adanya gejala kehilangan data (*data loss*), seperti yang diilustrasikan pada Gambar 5. Denyut tekanan udara keluar kompresor (P_2) akibat pengaruh turbulensi aerodinamika bilah rotor dapat diredam dengan baik oleh komponen *manifold block*, sehingga menghasilkan pembacaan kurva data yang kontinu tanpa interferensi derau (*noise*).

T1 (°C)	T2_actua	P1 (bar)	P2 (bar)	T1_K	T2_K	PR	T2s_K	v	TIME
12	23	0.92	1.05	285.15	296.15	1.1413	296.124	10.5665	19:58:33.22
12	22.75	0.92	1.03	285.15	295.9	1.11957	294.501	9.01175	19:58:32.70
12.25	22.5	0.92	1.03	285.4	295.65	1.11957	294.76	9.03519	19:58:32.19
14	22.75	0.92	1.03	287.15	295.9	1.11957	296.567	9.1386	19:58:31.68
12.25	23.25	0.92	1.04	285.4	296.4	1.13043	295.575	9.79691	19:58:31.16
11.25	22	0.92	1.01	284.4	295.15	1.09783	292.086	7.40597	19:58:30.65
13	22	0.92	1.04	286.15	295.15	1.13043	296.351	9.89018	19:58:30.14
16.75	23	0.92	1.03	289.9	296.15	1.11957	299.407	9.30662	19:58:29.63

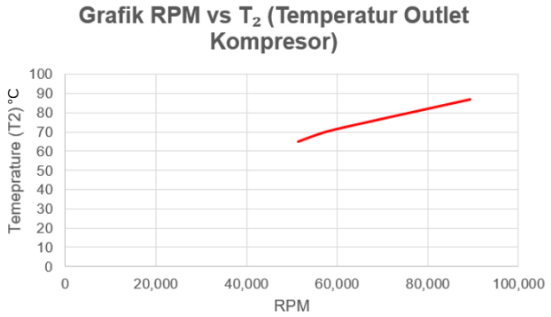
Gambar 5. Tampilan antarmuka Excel Data Streamer menampilkan tren real-time T_1–T_2 dan P_2

Data rata-rata pasca-kalibrasi yang diperoleh diintegrasikan ke dalam perhitungan performa melalui pemanfaatan formulasi efisiensi isentropik. Pada kondisi putaran poros menengah mesin sebesar 51.333 RPM, sistem merekam temperatur inlet T_1 menunjukkan kestabilan nilai 300,0 K (26,85°C) sepanjang pengujian, mengonfirmasi kondisi ambient laboratorium yang terkontrol, temperatur outlet T_2 sebesar 329,7 K, dengan tekanan pelepasan kompresor P_2 sebesar 1,23 bar abs. Substitusi parameter numerik ini ke dalam formulasi menghasilkan nilai efisiensi isentropik kompresor sentrifugal Garrett GT2259 sebesar 60,34%.

Ketika putaran poros ditingkatkan melalui pengaturan katup bahan bakar menuju kondisi beban penuh (Level 3) dengan putaran mesin rata-rata mencapai 80.428 RPM, sistem DAQ tetap mampu merekam parameter secara stabil. Pada kondisi puncak ini, tekanan pelepasan P_2 meningkat secara linier menjadi 1,56 bar abs (respons grafik ditunjukkan pada Gambar 6) disertai dengan peningkatan temperatur aktual outlet kompresor T_2 hingga mencapai 357,8 K (tren grafik ditunjukkan pada Gambar 7).



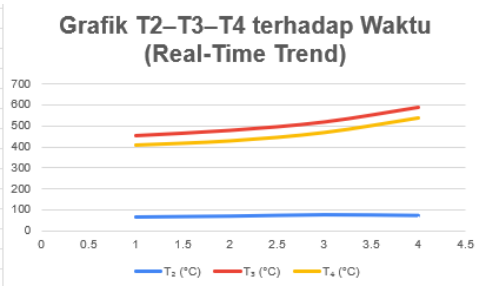
Gambar 6. Karakteristik kenaikan tekanan keluar kompresor (P_2, bar abs) terhadap putaran mesin (RPM)



Gambar 7. Karakteristik kenaikan temperatur keluar kompresor (T_2) terhadap putaran mesin (RPM)

Karakteristik kenaikan parameter ini sangat sesuai dengan hukum termodinamika di mana kompresi fluida gas berbanding lurus dengan energi mekanis yang disuplai oleh turbin penggerak poros. Selain itu, sistem berhasil mengekstraksi parameter laju aliran massa udara (m_a) masuk kompresor secara stabil sebesar 0,0643 kg/s.

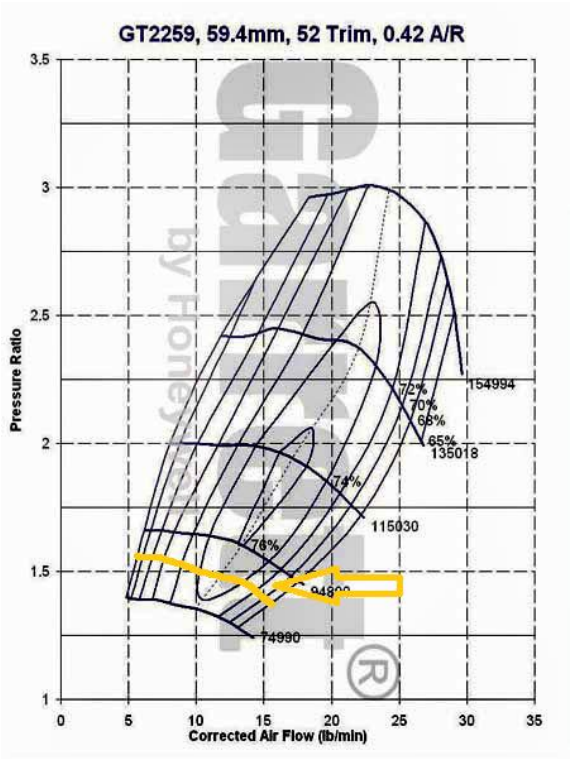
Pada kondisi ekstrem beban penuh ini, arsitektur DAQ secara andal memonitor area termal tinggi pada komponen turbin. Temperatur inlet turbin (T_3) tercatat menyentuh angka 586,0°C dan temperatur gas buang (T_4) sebesar 524,0°C. Tren fluktuasi perubahan temperatur komponen secara menyeluruh (T_1, T_2, T_3, T_4) divisualisasikan secara menyeluruh pada Gambar 8.



Gambar 8. Grafik Tren Perubahan Temperatur (T2,T3,T4)

Berdasarkan keseluruhan data termal yang dipasok oleh sistem DAQ, nilai perhitungan efisiensi isentropik kompresor (η_c) yang dihasilkan secara otomatis oleh sistem komputasi berada pada rentang 64% hingga 67%. Tren nilai ini terbukti sangat koheren dan konsisten dengan peta karakteristik standar pabrikan Garrett GT2259, sehingga menegaskan validitas tingkat akurasi data yang dipasok oleh arsitektur instrumentasi ini sesuai Gambar 9 (15).

Secara umum, kelebihan utama dari sistem DAQ yang dirancang ini adalah waktu respon pembacaan data yang sangat cepat terhadap perubahan *throttle* gas bahan bakar, kestabilan transmisi data tanpa adanya gejala hilangnya paket data (*data loss*) selama durasi pengujian kontinu 30 menit, serta biaya komponen kelistrikan yang sangat ekonomis jika dibandingkan dengan perangkat DAQ komersial (6).



Gambar 9. Compressor Map Garret GT2259

Namun, keterbatasan sistem ini terletak pada resolusi Konverter Analog-ke-Digital (ADC) internal Arduino Mega 2560 yang masih terbatas pada skala 10-bit. Untuk pengembangan selanjutnya, disarankan menambahkan modul ADC eksternal dengan resolusi 16-bit atau lebih tinggi guna meningkatkan sensitivitas deteksi fluktuasi tekanan mikro pada daerah inlet saluran isap kompresor (11).

4. KESIMPULAN

Rangkaian kegiatan rancang bangun, kalibrasi instrumen, serta pengujian fungsional terhadap sistem akuisisi data (DAQ) digital berbasis mikrokontroler Arduino Mega 2560 dan *Excel Data Streamer* pada *test bench mini gas turbine engine* (MGTE) Garrett GT2259 telah berhasil diselesaikan secara komprehensif. Pengujian operasional membuktikan bahwa sistem DAQ ini mampu merekam enam parameter aerotermodinamika secara simultan dengan tingkat akurasi yang memenuhi standar metrologi teknik.

Pada tahapan pengujian laboratorium, subsistem pengukuran temperatur menggunakan termokopel tipe-K dan konverter MAX6675 menyajikan performa pembacaan termal yang sangat stabil dengan batas *relative error* maksimal hanya sebesar **1,22%** terhadap alat referensi standar industri. Di sisi lain, galat bawaan (*offset*) pada komponen *pressure transducer* yang sempat mencapai **15,00%** pada area tekanan rendah berhasil dieliminasi menggunakan algoritma kalibrasi regresi linier digital dengan parameter matriks koreksi yang presisi (faktor skala $a = 0{,}9877$, konstanta *offset* $b = -0{,}0199$, dan koefisien determinasi $R^2 = 0{,}9998$). Optimasi perangkat lunak ini sukses menekan persentase galat efektif menjadi di bawah **5,00%** pada seluruh rentang tekanan kerja fungsional kompresor (0,5–1,0 bar). Selain itu, penerapan modifikasi fisik berupa *manifold block* dan integrasi filter digital *Simple Moving Average* (SMA) terbukti efektif meredam efek pulsasi fluida dinamis serta meminimalkan *noise* tegangan akibat getaran mekanis mesin.

Ketika diuji pada kondisi operasional puncak (Level 3), sistem DAQ mampu mentransmisikan arus data secara kontinu tanpa adanya gejala kehilangan paket data (*data loss*). Pada putaran mesin rata-rata mencapai **80.428 RPM**, sistem secara andal merekam parameter termofluidik kritis, meliputi laju aliran massa udara ($\dot{m}_a$) sebesar **0,0643 kg/s**, temperatur inlet turbin (T_3) sebesar **586,0°C**, dan temperatur gas buang (T_4) sebesar **524,0°C**. Data termodinamika tersebut menghasilkan kalkulasi otomatis untuk nilai efisiensi isentropik kompresor sentrifugal (η_c) pada rentang **64,07% hingga 67,02%** yang memiliki konsistensi tinggi terhadap peta karakteristik standar pabrikan Gambar 9. Secara menyeluruh, arsitektur DAQ ini dinyatakan valid, aman, dan sangat berpotensi untuk diimplementasikan sebagai instrumen pengujian performa mesin termal berkecepatan tinggi yang ekonomis dan presisi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Kepala dan seluruh Teknisi Laboratorium Fenomena Dasar Mesin serta Laboratorium Teknik Aeronautika Politeknik Negeri Bandung atas fasilitasi tempat, bantuan teknis instalasi mesin, serta peminjaman instrumen kalibrasi standar selama seluruh tahapan penelitian ini berlangsung.

DAFTAR PUSTAKA

1. Nurulaulia N, Kertanegara Rs. Perancangan Sistem Kendali Bahan Bakar Mesin Gas Turbin Mini Berbasis Arduino. Prosiding IRWNS. 2025:1-6.
2. Munahar S, Wahyu M. Performance And Emission Analysis Of A Modified Small Gas Turbine Engine. J Tek Mesin J-MEEG. 2025;1(1):12-8.
3. Ahmed KBM, Khan MN. Aerothermodynamic Analysis Of A Centrifugal Compressor For Micro Gas Turbines. Aerosp Sci Technol. 2019;92:314-25.
4. Saravanamuttoo HIH, Rogers GFC, Cohen H. Gas Turbine Theory. 7TH Ed. London: Pearson Education; 2017.
5. Bisker TI, Et Al. Real-Time Gas Turbines Monitoring Using Adaptive Neuro-Fuzzy Prediction For Enhanced Efficiency And Availability. J Fail Anal Prev. 2025;25:960-95.

6. Samy MM, Et Al. Data Acquiring System For Gas Turbine Engine's Dynamic Performance; Build And Validate. Measurement. 2025;23(1):39-55.
7. Badra I. Design And Implementation Of Microcontroller-Based Data Acquisition For Turbocharger Test Bench. Int J Mech Eng. 2021;12(4):245-52.
8. Nichols D. Arduino-Based Data Acquisition Into Excel, Labview, And Matlab. Phys Teach. 2017;55:226-7.
9. Cvjetkovic V, Matijevic M. Overview Of Architectures With Arduino Boards As Building Blocks For Data Acquisition And Control Systems. Dalam: Proc 13TH Int Conf Remote Eng Virtual Instrum (REV); 2016. Hal. 114-26.
10. Maxim Integrated. MAX6675 Cold-Junction-Compensated K-Thermocouple-To-Digital Converter Datasheet. Sunnyvale: Maxim Integrated; 2014.
11. Figliola RS, Beasley DE. Theory And Design For Mechanical Measurements. 6TH Ed. New Jersey: John Wiley & Sons; 2015.
12. Beckwith TG, Marangoni RD, Lienhard JH. Mechanical Measurements. 6TH Ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall; 2007.
13. Cengel YA, Boles MA. Thermodynamics: An Engineering Approach. 9TH Ed. New York: Mcgraw-Hill; 2019.
14. Rahman MAA, Sukarnoto T. Calibration And Error Analysis Of K-Type Thermocouples For High-Temperature Gas Applications. J Instrum Metrol. 2023;8(2):89-96.
15. Garrett By Honeywell. GT2259 Turbocharger Catalog. Turbo Mechanika; 2012.