

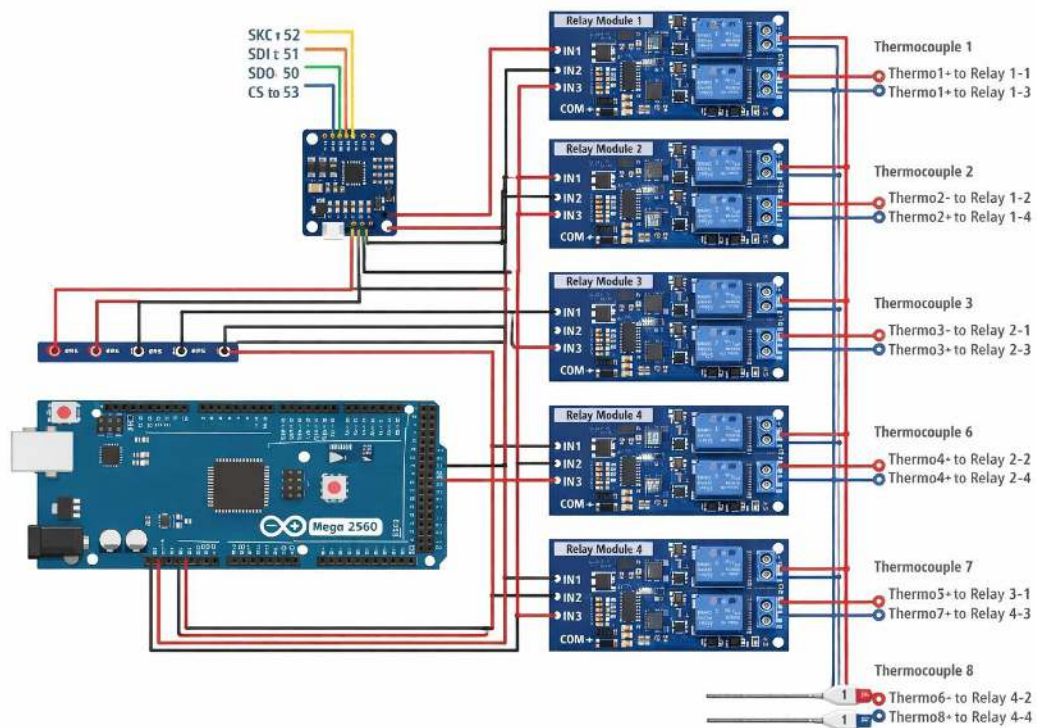
BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil dan pembahasan pada alat akuisisi data untuk peraga refrigeran pada laboratorium konversi energi adalah berdasarkan dari proses fabrikasi dan pengujian untuk mengetahui kemampuan alat bekerja serta memperoleh data sesuai dengan teori yang direncanakan.

4.1 Proses Perakitan Sensor

Proses perakitan sensor dilakukan dengan bertujuan agar sensor dapat diaktifkan dan membaca suhu yang dihasilkan dari alat peraga refrigeran. Berikut ini adalah skema dan alur perakitan sensor *thermocouple* yang menggunakan 8 relay, 1 modul, dan 1 mikrokontroler.



Gambar 4.1 Skema Perakitan Sensor

Berdasarkan gambar 4.1 menunjukkan proses perakitan sistem dilakukan

dengan merancang jalur penghubung antara sensor *thermocouple*, modul pembaca sensor, mikrokontroler, dan relay. Sistem ini dirancang sebagai bagian dari sistem akuisisi data suhu yang mampu membaca beberapa sensor secara bergantian menggunakan metode *multiplexing* berbasis relay.

Pada konfigurasi sistem, setiap sensor *thermocouple* dihubungkan dengan satu buah relay melalui terminal positif (+) dan negatif (-). Relay berfungsi sebagai saklar elektronik yang mengatur jalur sinyal dari sensor menuju modul pembaca sensor. Dengan mekanisme ini, hanya satu sensor yang terhubung ke modul pembaca pada satu waktu sehingga proses pembacaan data dapat dilakukan secara bergantian.

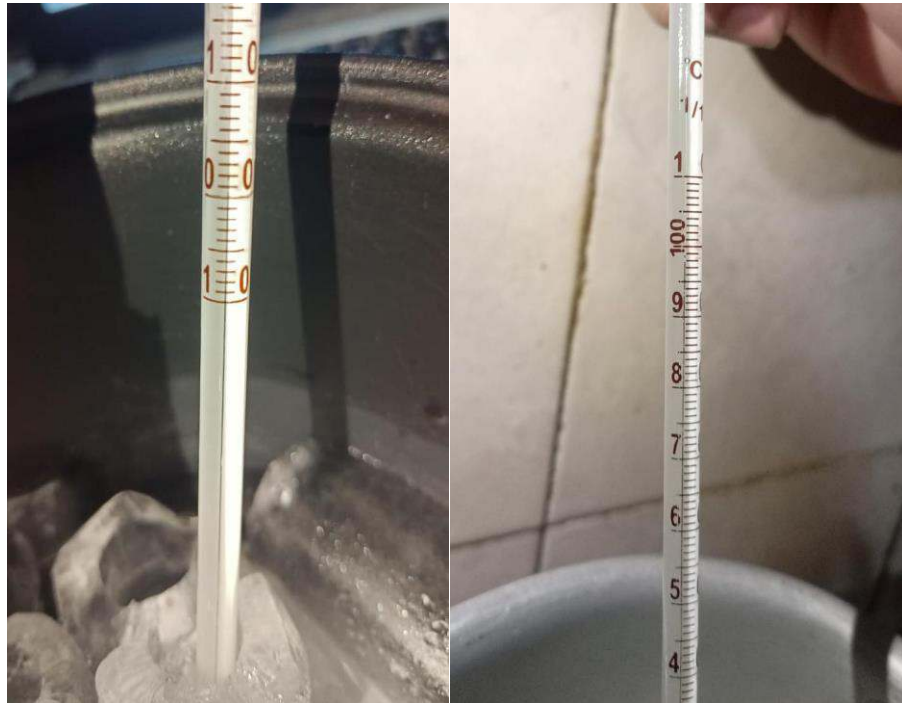
Proses akuisisi data dimulai ketika mikrokontroler mengaktifkan relay tertentu sehingga sensor *thermocouple* yang dipilih terhubung dengan modul pembaca sensor. Sinyal suhu yang dihasilkan oleh *thermocouple* kemudian diproses oleh modul dan selanjutnya dikirimkan ke mikrokontroler untuk dilakukan pengolahan data. Setelah proses pembacaan selesai, mikrokontroler akan mengaktifkan relay berikutnya sehingga sensor selanjutnya dapat melakukan proses pembacaan yang sama.

4.2 Proses Kalibrasi

Pada penelitian ini dilakukan uji kalibrasi sensor *thermocouple* dengan menggunakan termometer air raksa sebagai alat acuan (standar). Kalibrasi bertujuan untuk mengetahui tingkat keakuratan *thermocouple* dengan membandingkan hasil pengukurannya terhadap nilai suhu standar. Termometer air raksa dipilih karena memiliki kestabilan dan akurasi yang baik pada rentang suhu tertentu (Bentley, 2005).

4.2.1 Kalibrasi Termometer Air Raksa

Kalibrasi termometer air raksa dilakukan untuk mengetahui tingkat ketelitian alat ukur sebelum digunakan sebagai acuan pengukuran suhu. Proses kalibrasi dilakukan menggunakan dua kondisi pengujian, yaitu pada campuran air es dan pada air mendidih.



Gambar 4.2.1 Uji Kalibrasi Termometer Air Raksa

Pada pengujian menggunakan campuran air es, termometer air raksa menunjukkan suhu sebesar 0°C sehingga tidak terdapat selisih pengukuran pada titik rendah. Selanjutnya, pengujian dilakukan pada air mendidih di lokasi yang sama. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa termometer air raksa membaca suhu sebesar 99°C dengan fluktuasi sekitar $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa termometer air raksa masih bekerja dengan baik dan memiliki tingkat error yang kecil. Perbedaan pembacaan terhadap nilai teoritis 100°C dapat dipengaruhi oleh kondisi

lingkungan dan tekanan udara di lokasi pengujian, sehingga titik didih air tidak selalu tepat berada pada suhu 100°C. Dengan demikian, termometer air raksa dinyatakan masih layak digunakan sebagai alat acuan dalam proses pengukuran suhu.

4.2.2 Kalibrasi *Thermocouple*

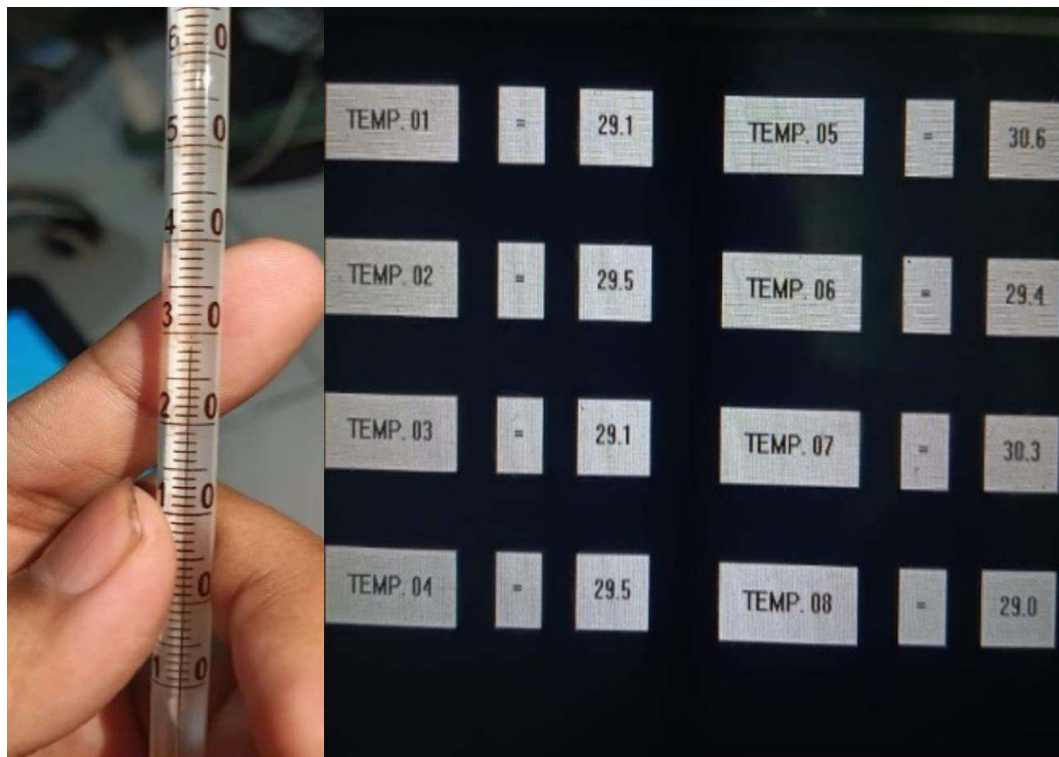
Kalibrasi thermocouple dilakukan untuk mengetahui kemampuan sensor dalam mengukur temperatur menggunakan media acuan pada kondisi suhu rendah dan suhu tinggi. Sebelum proses kalibrasi dilakukan, terlebih dahulu dilakukan pengujian pada kondisi suhu ruang untuk memastikan sistem akuisisi data, sensor thermocouple, dan HMI bekerja dengan baik serta menghasilkan pembacaan yang stabil pada kondisi operasional normal. Setelah sistem dipastikan berfungsi dengan baik, proses kalibrasi dilanjutkan menggunakan media air es sebagai acuan suhu rendah dan air mendidih sebagai acuan suhu tinggi. Hasil pembacaan delapan sensor thermocouple (T1–T8) kemudian dibandingkan dengan termometer air raksa sebagai alat ukur acuan.

Pengukuran suhu ruang dilakukan pada dua kondisi waktu yang berbeda, yaitu malam hari dan siang hari. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kemampuan sistem akuisisi data dalam melakukan pembacaan temperatur lingkungan pada kondisi operasional normal sebelum dilakukan pengujian pada media dengan temperatur ekstrem. Seluruh sensor *thermocouple* mampu mendeteksi temperatur lingkungan dan menampilkan hasil pembacaan secara stabil pada HMI. Perbedaan temperatur yang diperoleh antara pengukuran malam dan siang hari dipengaruhi oleh kondisi

lingkungan saat pengujian berlangsung. Meskipun demikian, seluruh titik pengukuran menunjukkan pola pembacaan yang relatif seragam sehingga sistem akuisisi data mampu melakukan pemantauan temperatur secara konsisten.

Selanjutnya, dilakukan pengujian menggunakan dua media dengan temperatur ekstrem, yaitu air mendidih dan air es. Pengujian air mendidih dilaksanakan pada siang hari, sedangkan pengujian air es dilakukan pada malam hari sesuai dengan waktu pelaksanaan eksperimen. Kedua pengujian tersebut digunakan sebagai dasar untuk mengevaluasi tingkat akurasi sistem melalui perhitungan persentase *error* dengan membandingkan hasil pembacaan *thermocouple* terhadap termometer air raksa sebagai alat ukur acuan.

1. Hasil Pengukuran Suhu Ruang



Gambar 4.2.2 Hasil Suhu Ruang Malam Hari

Tabel 4.2.1 Suhu Ruang Malam Hari

Titik	T Air Raksa(°C)	<i>Thermocouple</i> (°C)
T1	28.5	29.1
T2	28.5	29.5
T3	28.5	29.1
T4	28.5	29.5
T5	28.5	30.6
T6	28.5	29.4
T7	28.5	30.4
T8	28.5	29.0

Berdasarkan hasil pengukuran pada Tabel 4.2.1, temperatur ruang pada malam hari diukur menggunakan termometer air raksa sebagai alat ukur acuan dan dibandingkan dengan hasil pembacaan delapan sensor *thermocouple* (T1–T8). Hasil pengukuran menunjukkan bahwa seluruh sensor mampu membaca temperatur lingkungan dengan baik serta menampilkan data secara stabil pada HMI. Meskipun terdapat sedikit perbedaan nilai antar sensor, hasil pembacaan masih menunjukkan pola yang relatif seragam sehingga merepresentasikan kondisi temperatur ruang pada saat pengujian berlangsung. Perbedaan kecil tersebut dapat dipengaruhi oleh karakteristik masing-masing sensor, posisi sensor saat pengukuran, serta kondisi lingkungan di sekitar titik pengukuran.



Gambar 4.2.3 Hasil Suhu Ruang Siang Hari

Tabel 4.2.2 Suhu Ruang Siang Hari

Titik	T Air Raksa(°C)	<i>Thermocouple</i> (°C)
T1	29.0	30.0
T2	29.0	28.7
T3	29.0	28.5
T4	29.0	30.7
T5	29.0	30.8
T6	29.0	30.8
T7	29.0	30.3
T8	29.0	30.9

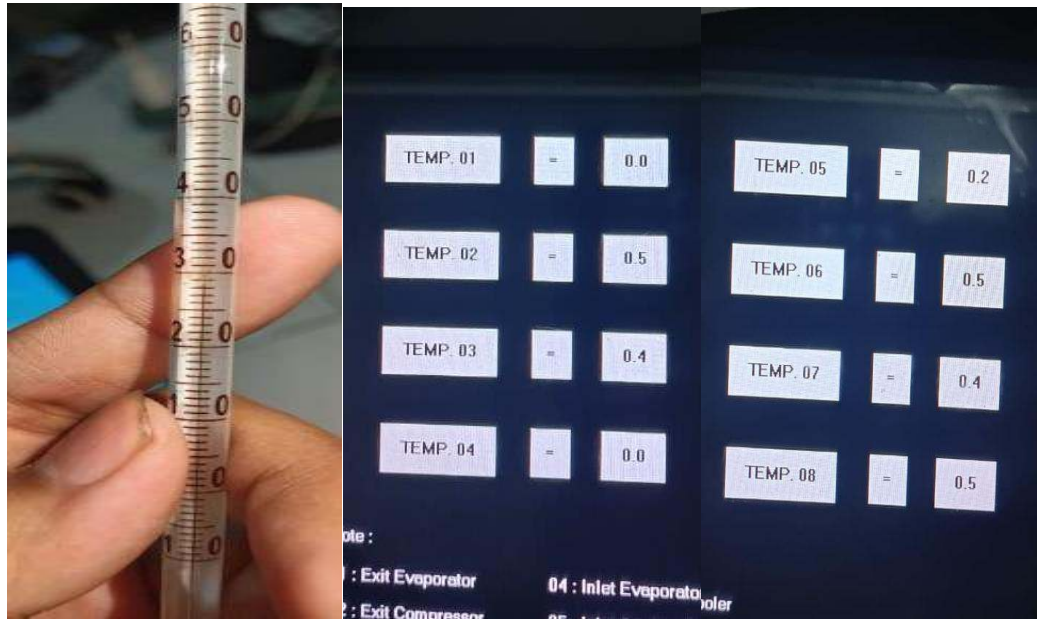
Berdasarkan hasil pengukuran pada Tabel 4.2.2, temperatur ruang pada siang hari menunjukkan nilai yang lebih tinggi dibandingkan hasil pengukuran pada malam hari. Kondisi tersebut dipengaruhi oleh perubahan temperatur lingkungan akibat meningkatnya suhu udara pada siang hari. Seluruh sensor *thermocouple* mampu mengikuti perubahan temperatur tersebut dengan baik dan menampilkan hasil pengukuran secara stabil pada HMI. Hasil pembacaan pada setiap titik pengukuran juga menunjukkan pola yang relatif seragam, sehingga sistem akuisisi data mampu memantau perubahan temperatur lingkungan secara konsisten pada kondisi pengujian yang berbeda.

Setelah dilakukan pengujian pada kondisi suhu ruang, pengujian dilanjutkan menggunakan dua media dengan temperatur ekstrem, yaitu air mendidih dan air es. Pengujian air mendidih dilaksanakan pada siang hari, sedangkan pengujian air es dilakukan pada malam hari sesuai dengan waktu pelaksanaan penelitian. Kedua media tersebut digunakan sebagai acuan untuk mengevaluasi tingkat akurasi sistem akuisisi data melalui perhitungan persentase error dengan membandingkan hasil pembacaan sensor *thermocouple* terhadap termometer air raksa sebagai referensi pengukuran. Besarnya error dihitung menggunakan persamaan:

$$Error (\%) = \left| \frac{T_{Standar} - T_{Ukur}}{T_{Standar}} \right| \times 100\%$$

Namun pada suhu 0°C digunakan error absolut karena tidak dapat dihitung dalam bentuk persen. Persentase error hasil kalibrasi *thermocouple* terhadap suhu standar ditunjukkan pada Tabel berikut.

2. Uji Kalibrasi Suhu Dingin



Gambar 4.2.4 Uji Kalibrasi Suhu Dingin

Tabel 4.2.3 Error Absolut Suhu Dingin

Titik	T Air Raksa(°C)	<i>Thermocouple</i> (°C)	Error Absolut (°C)
T1	0	0.0	0.0
T2	0	0.5	0.5
T3	0	0.4	0.4
T4	0	0.0	0.0
T5	0	0.2	0.2
T6	0	0.5	0.5
T7	0	0.4	0.4
T8	0	0.5	0.5

Pengujian suhu dingin dilakukan menggunakan media campuran air dan es sebagai kondisi acuan temperatur rendah. Pengujian ini dilaksanakan pada malam hari sesuai dengan waktu pelaksanaan penelitian. Pada kondisi malam hari, temperatur lingkungan yang lebih rendah dibandingkan siang

hari membantu menjaga kestabilan media pengujian sehingga campuran air dan es dapat mempertahankan temperatur mendekati titik beku selama proses kalibrasi berlangsung. Kondisi tersebut mendukung proses pengambilan data agar setiap sensor memperoleh kondisi pengukuran yang relatif seragam.

Berdasarkan tabel pengujian suhu dingin tersebut, dilakukan perbandingan hasil pengukuran antara termometer air raksa dan sensor *thermocouple* pada delapan titik pengukuran (T1–T8). Pada kondisi suhu dingin, termometer air raksa menunjukkan nilai acuan sebesar 0°C pada seluruh titik pengujian. Sementara itu, sensor *thermocouple* menghasilkan pembacaan suhu yang berada pada rentang 0,0°C hingga 0,5°C.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa beberapa titik pengukuran memiliki nilai yang sama dengan alat acuan, yaitu pada titik T1 dan T4 dengan error absolut sebesar 0,0°C. Hal ini menunjukkan bahwa sensor *thermocouple* mampu membaca suhu dingin dengan sangat baik pada titik tersebut. Namun, pada titik lainnya terdapat selisih pengukuran sebesar 0,2°C hingga 0,5°C. Error absolut terbesar terjadi pada titik T2, T6, dan T8 dengan nilai sebesar 0,5°C, sedangkan error terkecil selain nol terjadi pada titik T5 dengan nilai sebesar 0,2°C.

Nilai rata-rata error absolut pengujian suhu dingin dihitung menggunakan persamaan berikut:

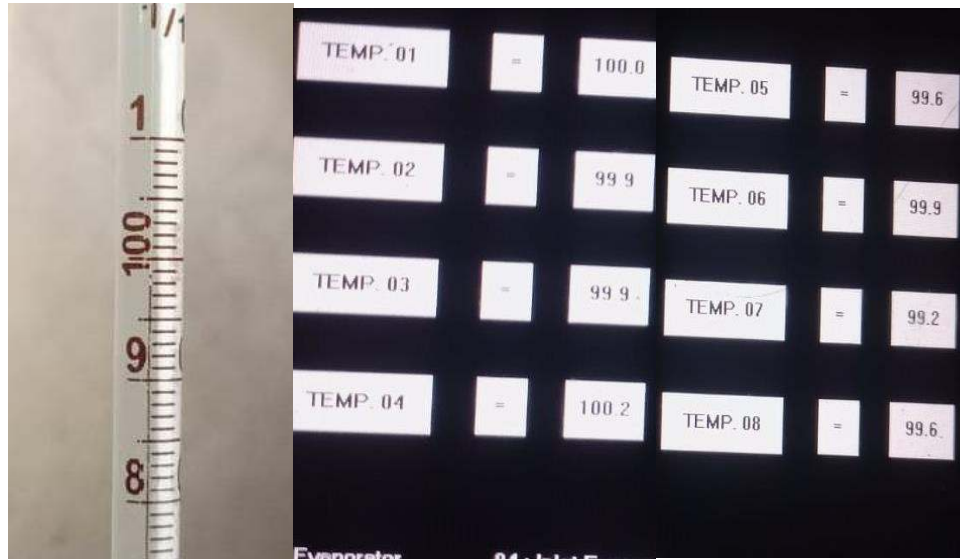
$$\bar{E} = \frac{\sum E}{n}$$

Dengan hasil:

$$\bar{E} = \frac{0+0.5+0.4+ 0+0.2+0.5+0.4+0.5}{8}$$

$$= \frac{2.5}{8} = 0.31^{\circ}\text{C}$$

3. Uji Kalibrasi Suhu Panas



Gambar 4.2.5 Uji Kalibrasi Suhu Panas

Tabel 4.2.4 Persentase Error Suhu Panas

Titik	T Air Raksa(°C)	<i>Thermocouple</i> (°C)	Error (%)
T1	99	100	1.01
T2	99	99.9	0.91
T3	99	99.9	0.91
T4	99	100.2	1.21
T5	99	99.6	0.61
T6	99	99.9	0.91
T7	99	99.2	0.20
T8	99	99.6	0.61

Pengujian suhu panas dilakukan menggunakan media air mendidih sebagai kondisi acuan temperatur tinggi. Pengujian ini dilaksanakan pada siang hari sesuai dengan waktu pelaksanaan penelitian. Pada kondisi tersebut, proses pemanasan dan pendidihan air dapat dilakukan secara berkelanjutan sehingga temperatur media pengujian dapat dipertahankan dalam kondisi stabil selama proses kalibrasi berlangsung. Dengan kondisi

pengujian yang relatif stabil, setiap sensor *thermocouple* memperoleh kesempatan untuk mengukur temperatur pada media yang sama sehingga hasil pengukuran dapat dibandingkan dengan termometer air raksa sebagai alat ukur acuan.

Berdasarkan tabel pengujian suhu panas tersebut, dilakukan perbandingan hasil pengukuran antara termometer air raksa dan sensor *thermocouple* pada delapan titik pengukuran (T1–T8). Nilai suhu yang ditunjukkan oleh termometer air raksa sebagai alat acuan adalah sebesar 99°C pada seluruh titik pengujian. Sementara itu, hasil pembacaan sensor *thermocouple* berada pada rentang 99,2°C hingga 100,2°C.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor *thermocouple* memiliki hasil pengukuran yang mendekati nilai acuan. Persentase error yang diperoleh berkisar antara 0,20% hingga 1,21%. Error terkecil terjadi pada titik T7 dengan hasil pembacaan *thermocouple* sebesar 99,2°C dan nilai error sebesar 0,20%, sedangkan error terbesar terjadi pada titik T4 dengan hasil pengukuran sebesar 100,2°C dan error sebesar 1,21%.

Rata-rata persentase error suhu ruang dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$\bar{E} = \frac{\sum E}{n}$$

Dengan hasil:

$$\begin{aligned}\bar{E} &= \frac{1.01+0.91+0.91+ 1.21+0.61+0.91+0.20+0.61}{8} \\ &= \frac{6.37}{8} = 0.80\%\end{aligned}$$

Dengan demikian, dari hasil uji kalibrasi yang telah dilakukan, *thermocouple* dapat direkomendasikan sebagai sensor suhu yang lebih andal untuk digunakan dalam sistem akuisisi data, khususnya pada aplikasi yang membutuhkan respon cepat dan akurasi tinggi. Sementara itu, termometer digital tetap memiliki keunggulan dari segi kemudahan penggunaan, namun memerlukan proses kalibrasi berkala untuk menjaga keakuratan hasil pengukurannya.

4.3 Proses Uji Fungsional

Pada proses ini, alat akuisisi data dipasang pada mesin AC di laboratorium konversi energi untuk diuji. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam membaca, mengolah, dan menampilkan data suhu secara akurat melalui sensor *thermocouple* yang terhubung dengan mikrokontroler dan antarmuka Nextion.



Gambar 4.3.1 Uji Fungsional

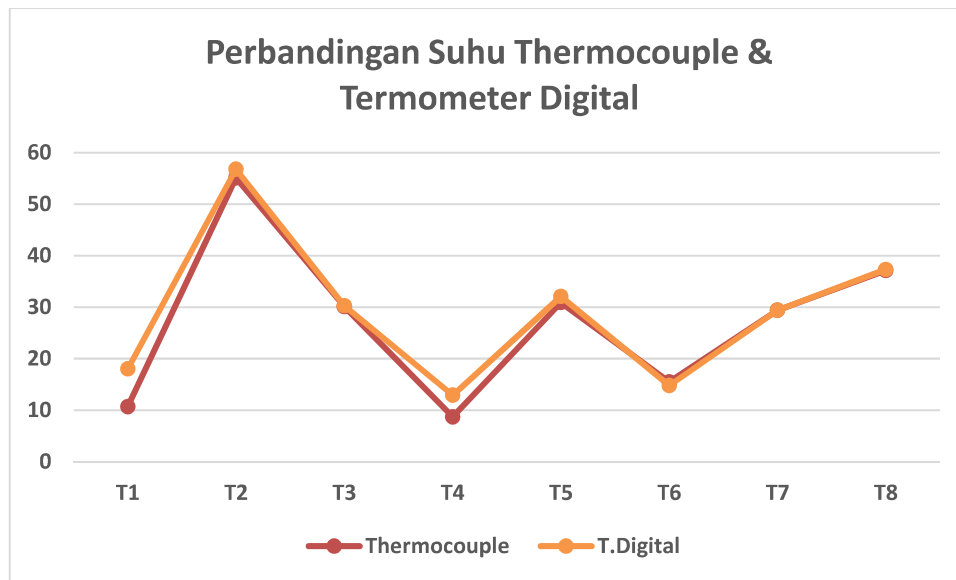
Parameter yang diamati dalam pengujian meliputi beberapa titik pada sisi evaporator dan kondensor. Pengambilan data dilakukan secara *real-time* untuk melihat respons sistem terhadap perubahan kondisi suhu selama mesin AC beroperasi. Berdasarkan hasil pengujian, pembacaan suhu menggunakan sensor *thermocouple* menunjukkan kestabilan dan konsistensi yang lebih baik dibandingkan dengan termometer digital konvensional, terutama dalam

merespons perubahan suhu yang cepat, sejalan dengan karakteristik *thermocouple* dalam sistem akuisisi data (Dally et al., 1993).



Gambar 4.3.2 Hasil Uji Fungsional

Berdasarkan data yang diperoleh, nilai dari beberapa titik yang dipasangkan dan terukur dari sensor *thermocouple* menunjukkan gradien temperatur yang lebih representatif terhadap kondisi aktual sistem, sehingga hasil perhitungan perpindahan panas menjadi lebih akurat, sesuai dengan teori perpindahan panas Incropera et al. (2007).



Gambar 4.3.3 Grafik Perbandingan Suhu Termometer Digital dan *Thermocouple*

Berdasarkan grafik perbandingan suhu antara termometer digital dan *thermocouple* pada titik pengukuran T1 hingga T8, terlihat kedua alat ukur memiliki pola perubahan suhu yang hampir sama. Grafik menunjukkan nilai suhu mengalami kenaikan dan penurunan yang searah pada setiap titik pengukuran, sehingga dapat diartikan bahwa *thermocouple* mampu mengikuti perubahan temperatur dengan baik.

Pada titik T1, *thermocouple* menunjukkan suhu sebesar 10,7°C sedangkan termometer digital membaca 18°C. Kemudian pada titik T2 terjadi peningkatan suhu yang cukup signifikan, yaitu 55,1°C pada *thermocouple* dan 56,8°C pada termometer digital. Setelah itu, suhu kembali menurun pada titik T3 dan T4, lalu meningkat lagi pada titik T5 sebelum turun pada titik T6 dan kembali naik pada titik T7 serta T8.

Selisih pembacaan antara kedua alat ukur pada sebagian besar titik pengukuran terlihat relatif kecil. Nilai yang dihasilkan *thermocouple* mendekati hasil pembacaan termometer digital, meskipun pada beberapa titik terdapat

sedikit perbedaan suhu. Perbedaan tersebut dapat dipengaruhi oleh sensitivitas sensor, waktu respon alat ukur, serta kondisi lingkungan saat pengambilan data dilakukan.

Secara keseluruhan, grafik menunjukkan hasil uji fungsional alat akuisisi data berbasis *thermocouple* mampu bekerja dengan baik dalam merekam dan menampilkan parameter suhu pada sistem AC, juga memberikan hasil pengukuran yang stabil.

Dilihat dari hasil perbandingan sebelumnya pada pengujian suhu ruang, suhu dingin, dan suhu panas, grafik ini memperkuat bahwa *thermocouple* memiliki tingkat akurasi yang cukup baik. Pada pengujian sebelumnya, nilai error yang diperoleh juga relatif kecil, terutama pada suhu panas dan suhu dingin. Hal tersebut menunjukkan bahwa sensor *thermocouple* mampu memberikan hasil pengukuran yang mendekati alat referensi, baik termometer air raksa maupun termometer digital.