

Calibration of Arduino-based Temperature Sensors for Parabolic Solar Collectors with Phase Change Material

Kalibrasi Sensor Suhu Berbasis Arduino untuk Kolektor Surya Parabolik yang Dilengkapi dengan *Phase Change Material*

Ahmadi¹, Adi Setiawan^{1,2*}, Gunawati³, Rozanna Dewi⁴

Abstract

The development of energy storage materials requires facilities for testing the materials' ability to store and release energy effectively. This study focuses on the development and calibration of a temperature measurement system for parabolic solar collectors equipped with heat storage media. We employed type-K thermocouples and MAX6675 modules with Arduino as our measurement tools. The calibration process involved comparing sensor measurements with those obtained from commercially calibrated instruments using seven different test materials. The calibration results demonstrated that our sensors exhibited an error rate ranging from 0.66 to 0.73, indicating their accuracy and suitability for monitoring temperature fluctuations in solar thermal collectors.

Keywords

Arduino, thermocouple k-type, MAX6675 module, thermal energy storage, calibration.

Abstrak

Pengembangan material penyimpan energi thermal membutuhkan sarana untuk uji coba kemampuan bahan dalam menyimpan dan melepaskan energi. Penelitian ini fokus pada pengembangan dan kalibrasi sistem pengukuran temperatur untuk kolektor surya parabola yang memiliki media penyimpanan panas. Kami menggunakan sensor termokopel tipe-K dan modul MAX6675 dengan Arduino sebagai alat pengukuran. Proses kalibrasi melibatkan perbandingan hasil pengukuran sensor dengan alat komersil yang sudah terkalibrasi pada tujuh bahan uji yang berbeda. Hasil kalibrasi menunjukkan bahwa sensor kami memiliki tingkat kesalahan antara 0.66 hingga 0.73, menunjukkan bahwa sensor kami sudah akurat dan dapat digunakan untuk memonitor perubahan suhu pada kolektor surya termal.

Kata Kunci

Arduino, termokopel tipe-k, modul MAX6675, penyimpanan energi termal, kalibrasi.

¹ *Departement of Renewable Energy Engineering, Universitas Malikussaleh*

Jalan Batam, Bukit Indah, Muara Satu, 24354, Lhokseumawe, Indonesia

² *Departement of Mechanical Engineering, Universitas Malikussaleh*

Jalan Batam, Bukit Indah, Muara Satu, 24354, Lhokseumawe, Indonesia

³ *Departement of Physics, Universitas Syiah Kuala*

Darussalam, 23111, Banda Aceh, Indonesia

⁴ *Departement of Chemical Engineering, Universitas Malikussaleh*

Jalan Batam, Bukit Indah, Muara Satu, 24354, Lhokseumawe, Indonesia

* adis@unimal.ac.id

Submitted : February 10, 2023. Accepted : October 16, 2023. Published : October 27, 2023.

PENDAHULUAN

Permintaan energi secara besar-besaran dan penurunan sumber daya alam akan bahan bakar fosil serta krisis energi telah menjadi isu global. Habisnya sumber daya alam, percepatan permintaan energi, harga bahan bakar yang berfluktuasi dan meningkatnya tingkat polutan dan emisi gas rumah kaca mendorong para pembuat kebijakan dan perencana untuk mencari sumber energi alternatif [1]. Sumber daya energi terbarukan diharapkan dapat memainkan peran penting dalam pembangunan berkelanjutan karena merupakan sumber daya energi yang ramah lingkungan. Diantara semua energi terbarukan, energi matahari merupakan energi tertua yang digunakan di berbagai bidang dari pemanasan cairan domestic/industry, memasak hingga produksi listrik.

Teknologi konversi radiasi matahari tergolong ke dalam sistem energi fotovoltaik, yaitu mengubah radiasi matahari menjadi listrik [2], sedangkan energi termal mengubah radiasi matahari menjadi panas [3]. Dalam meningkatkan efisiensi penyediaan energi, diperlukan suatu teknologi sistem penyimpanan energi yang efektif. Teknologi penyimpanan energi terdiri dari beberapa metode, antara lain penyimpanan energi mekanik, penyimpanan energi listrik, dan penyimpanan energi termal [4]. Saat ini, thermal energy storage merupakan energi yang perlu dikembangkan karena memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan energy storage lainnya. Thermal Energy Storage (TES) atau bisa disebut dengan heat and cold storage, merupakan suatu metode penyimpanan energi panas yang menggunakan prinsip heat or cold storage untuk penggunaan dimasa yang akan datang [5], [6]. Material yang digunakan untuk menyimpan energi panas adalah Phase Change Materials (PCM) [7]–[9].

Kolektor surya adalah alat yang secara efektif memanfaatkan energi panas matahari yang diaplikasikan untuk pemanas, pembangkit listrik, dan lain-lain [10], [11]. Prinsip kerja kolektor surya adalah mengubah radiasi matahari menjadi energi panas sehingga panas yang dihasilkan kemudian ditransfer melalui fluida kerja [11]. Dalam uji kinerja *phase change material* garam untuk *thermal energy storage* terdapat parameter yang penting digunakan yaitu temperature [7]. Dengan perkembangan teknologi saat ini, untuk mendapatkan data secara *real time* diperlukan data logger yaitu Arduino sebagai system data akuisisi yang apabila sensor terkalibrasi dengan baik [12]. Jika ingin menggunakan termokopel tipe K dan Arduino untuk data akuisisi temperature, maka diperlukan modul yang berfungsi sebagai *cold junction* termokopel [13]. Modul MAX6675 adalah modul yang kompatibel dengan Arduino. Diantaranya banyak modul, MAX6675 dipilih karena jangkauan pengukurannya yang luas dan dapat mengukur suhu pada hot junction 0- 1024°C [2].

MAX6675 terdiri dari *cold-junction* yang outputnya didigitalkan oleh sinyal termokopel tipe-K. Data keluaran memiliki resolusi 12-bit dan mendukung komunikasi mikrokontroler SPI. Data dapat dibaca dengan mengubah data yang dibaca menjadi 12-bit data [3]. Fungsi termokopel adalah untuk mengetahui perbedaan temperature di bagian ujung dari dua bagian metal. Termokopel tipe *hot junction* dapat mengukur mulai dari 0°C hingga +1023,75°C. Modul MAX6675 memiliki bagian ujung *cold end* yang hanya dapat mengukur -20°C hingga +85°C [3]. Bagian *cold end* dari MAX6675 dapat secara akurat mengukur perbedaan suhu di bagian lain. Sedangkan bagian *cold-junction* dapat melakukan koreksi atas perubahan pada temperature ambient. MAX6675 melakukan pengukuran actual untuk mengukur tegangan dari output termokopel dan tegangan dari sensor diode [14].

Dari hasil pengukuran kalibrasi yang telah dilakukan oleh Reski Septiana, dkk, 2019, mereka hanya melakukan metode kalibrasi untuk sensor termokopel tipe K dan MAX6675 berbasis Arduino dengan pembanding thermistor DS18B20 yang sebelumnya telah dikalibrasi dengan termometer ASTM-117C, dimana hasil dari studi ini adalah metode sederhana untuk meningkatkan presisi dan akurasi sensor termokopel tipe-K dan MAX6675 dalam membaca nilai temperatur menggunakan Arduino DAQ [13], akan tetapi mereka tidak mengaplikasikan

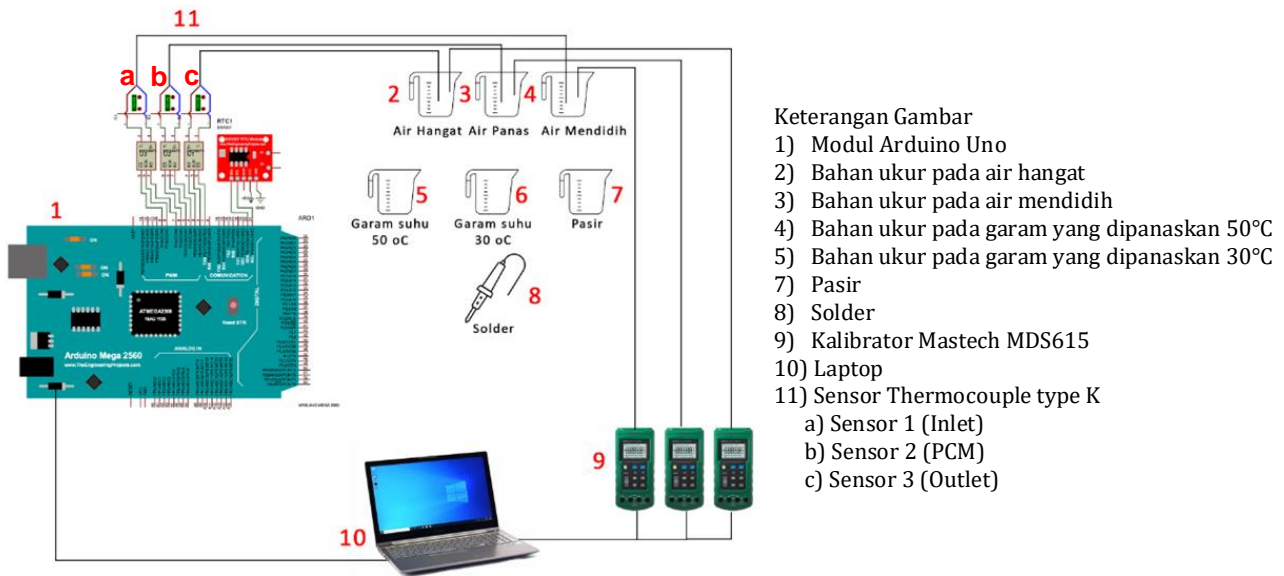
hasil kalibrasi tersebut ke alat kolektor surya. Pada penelitian lain yang dilakukan oleh Gunawati, dkk [15], pengukuran suhu dilakukan dengan menggunakan termometer digital komersial (MASTECH MS6514) data disimpan secara otomatis dalam format Microsoft Excel yang hanya mampu merekam data selama 8 jam. Pada penelitian tersebut, pengukuran suhu tetap dilakukan melalui proses pencatatan untuk 4 titik berbeda, setiap 5 menit sekali selama 8 jam. Jika pengukuran suhu dilakukan lebih dari 8 jam, maka pengukuran secara kontinu tidak dapat dilakukan. Oleh karena itu pada penelitian ini dilaksanakan untuk merancang dan merakit sistem akuisisi data yang mampu merekam secara terus menerus. Secara spesifik kajian ini bertujuan untuk mengkalibrasi sensor termokopel tipe-K modul MAX6675 untuk alat uji kinerja *phase change material* berbahan baku garam untuk *thermal energy storage* dengan menggunakan Arduino sebagai data akuisi.

METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang dilakukan yaitu membuat rancangan modul Arduino Uno yang dihubungkan langsung dengan tiga sensor termokopel tipe-K, yaitu sensor 1 (mengukur temperature *inlet*), sensor 2 (mengukur temperature PCM) dan sensor 3 (mengukur temperature *outlet*). Selanjutnya masing-masing sensor dilakukan pengujian kalibrasi dengan menggunakan media berupa air hangat, air mendidih, air garam yang dipanaskan hingga suhu 50°C dan 30°C serta pasir. Hasil pengukuran tersebut di sesuaikan dengan data logger Mastech MDS6514 yang direkam langsung hasil pengukuran pada laptop. Hasil kalibrasi yang dihasilkan berupa nilai konstanta error dilakukan substitusi nilai konstanta error untuk pengurangan pada program *microcontroller*. Setelah kalibrasi sensor dilakukan, kemudian sensor ini digunakan untuk pengukuran alat uji PCM untuk *thermal energy storage*.

Rancangan Modul Arduino

Rancangan modul Arduino terdiri dari beberapa komponen utama yaitu modul MAX6675, sensor thermocouple, bahan ukur, pasir, kalibrator data logger Mastech MDS6514 dan laptop. Proses pengukuran seperti yang ditampilkan pada [Gambar 1](#). Sensor termokopel tipe-K yang digunakan pada alat uji kinerja *phase change material* untuk *thermal energy storage* ada tiga unit yang terhubung dengan modul MAX6675 yaitu sensor 1 (*inlet*) digunakan untuk mengukur suhu ambien air sebelum melewati proses pertukaran panas *heat exchanger*; sensor 2 (PCM) digunakan untuk mengukur suhu garam di dalam tabung *heat exchanger*; dan sensor 3 (*outlet*) untuk mengukur suhu air panas di letakkan pada *fluida* air yang keluar setelah melewati *heat exchanger*.

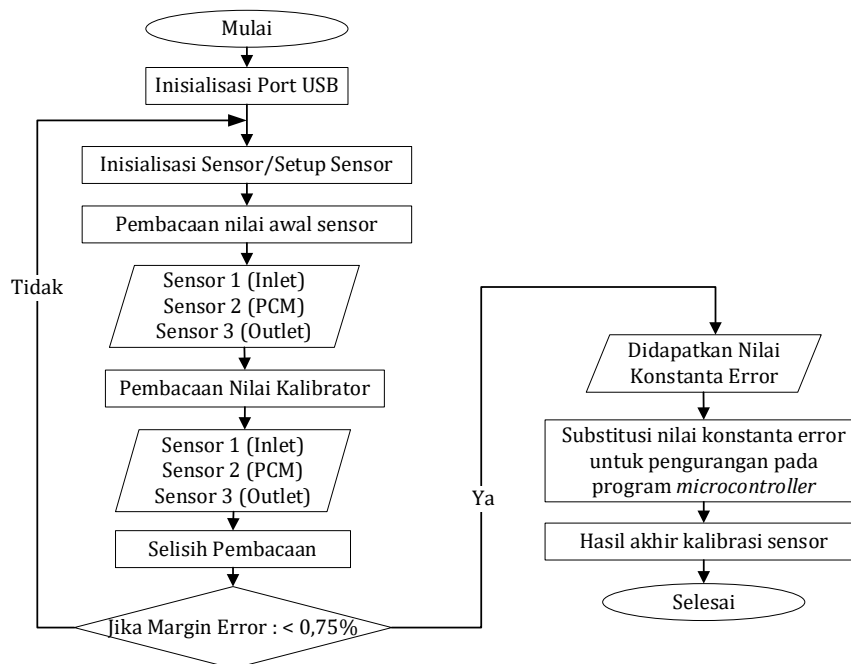


Gambar 1. Skema pengaturan eksperimental

Semua sensor suhu terhubung ke modul Arduino yang terhubung ke laptop untuk mengontrol proses pengambilan data. Modul Arduino sebagai *microprosesor* untuk menerima data dan melakukan literasi algoritma. *Software Sketh* Arduino berfungsi sebagai media perangkat lunak untuk menginput bahasa pemrograman ke Arduino dan mengarahkannya untuk menampilkan output data digital hasil pengukuran sensor temperature [16].

Pengukuran Kalibrasi Sensor Termokopel

Data pengukuran sensor termokopel tipe-K diambil satu kali pada masing-masing bahan uji, proses kalibrasi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. Pengambilan data dilakukan bersamaan dengan kalibratornya yaitu data logger Mastech MDS6514. Untuk mendapatkan akurasi sensor termokopel tipe-K, mengacu kepada kalibrator standarnya yaitu data logger Mastech MDS6514.



Gambar 2. Alur Proses Kalibrasi

Proses kalibrasi dilakukan dengan melakukan inialisasi port USB sensor dan setup sensor, kemudian dilakukan pengukuran melalui pembacaan awal sensor. Nilai akurasi dapat ditingkatkan dengan menyesuaikan antara pembacaan sensor dan kalibrator. Hal ini dimungkinkan karena kedua jenis sensor menunjukkan ritme yang sama selama pengukuran. Proses peningkatan akurasi dimulai dengan merata-ratakan nilai ketiga sensor termokopel tipe K dan modul MAX6675 yang masing-masing lebih akurat melalui proses rata-rata menggunakan rumus *Root Mean Square Error* (RMSE) [17]. Setelah ketiga sensor termokopel tipe K dan modul MAX6675 menunjukkan nilai yang sama kemudian dilakukan perhitungan antara data hasil rata-rata dengan data kalibrasinya. Setelah diperoleh selisih untuk setiap titik waktu, kemudian dirata-ratakan untuk mendapatkan nilai selisih error yang merupakan faktor koreksi sensor. Perhitungan selisih *error* ini dilakukan pada kondisi konstan yaitu pada masing-masing pengujian air suhu normal, air panas, air mendidih, garam yang dipanaskan hingga 50°C, garam yang dipanaskan hingga 30°C, pasir dan solder.

Sensor yang digunakan pada penelitian ini yaitu termokopel tipe-K dan modul MAX6675 sebagai sensor yang akan di kalibrasi. Termokopel tipe-K dapat mengkonversikan pengukuran *hot junction* mulai dari 0°C hingga +1023,75°C dan modul MAX6675 bagian *cold end* dapat mengukur -20°C hingga +85°C [3]. Sebelum mengubah tegangan termoelektrik menjadi nilai suhu yang sesuai, dilakukan pengukuran termokopel sisi persimpangan dingin (suhu sekitar MAX6675) dan referensi virtual 0 °C. Untuk termokopel tipe-K, perubahan tegangan sebesar 41µV/°C, yang mendekati karakteristik termokopel dengan nilai linier berikut.

$$V_{OUT} = (41\mu V / ^\circ C) \times (T_R - T_{AMB}) \quad (1)$$

Dimana:

- V_{OUT} = the thermocouple output voltage (µV)
- T_R = the temperature of the remote thermocouple junction (°C)
- T_{AMB} = the ambient temperature (°C)

Data logger Mastech MS6514 menggunakan termokopel dengan mikroprosesor sebagai sensor suhu [15]. Indikator RMSE dan SD tidak dapat digunakan untuk membandingkan MAT yang dihasilkan pada tempat atau waktu yang berbeda, karena nilainya bergantung pada kondisi setempat, seperti ukuran matriks N dan T. Dapat dilihat dibawah ini nilai N lebih besar RMSE, nilainya sama dengan nilai SD. Indikator %RMSE digunakan untuk membandingkan 2 MAT dengan nomor sel yang berbeda [15].

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (A_t - F_t)^2}{n}} \quad (2)$$

Dimana:

- A_t = Nilai data Aktual
- F_t = Nilai hasil peramalan
- N = banyaknya data
- Σ = Summation (jumlahkan keseluruhan nilai)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Proses kalibrasi berupa coding menggunakan prinsip pengoperasian komputer. Hasil yang diperoleh dari *coding* bukan hasil akhir, akan tetapi seluruh data awal dan data hasil kalibrasi merupakan variabel proses. Analisa hasil kalibrasi untuk melihat perubahan pada grafik sebelum dan sesudah dilakukan pengujian. Pembuktian keberhasilan metode kalibrasi yang diusulkan dengan melihat hasil pembacaan sensor termokopel tipe-K dan MAX6675 yang mendekati indikator suhu Mastech MDS6514.

Data pengukuran suhu diambil secara bersamaan antara sensor termokopel tipe-K dengan data logger Mastech MDS6514. Data pengukuran kemudian dicatat dalam bentuk tabel. Data pengukuran sensor termokopel tipe-K dan data logger Mastech MDS6514 kemudian dilakukan perhitungan nilai *average error* dengan menggunakan rumus *root mean square error* (RMSE), seperti pada persamaan 2.

Nilai data aktual adalah data sensor *thermocouple* dan data hasil pembandingan adalah data dari sensor kalibrator MDS6514. Pengambilan data pada sensor 1 dapat dilihat pada Tabel 1. Hasil yang dihasilkan dari pengambilan data pada sensor 1 yaitu nilai rata-rata *error* sensor pada sensor 1 diperoleh sebesar 0.690%, hal ini menunjukkan bahwa nilai tersebut dibawah dari margin error, sehingga dapat dikatakan bahwa pada sensor 1 (inlet) mengalami sedikit error dan hasil yang diperoleh setelah kalibrasi mendekati dengan nilai aktual.

Tabel 1. Data pengukuran suhu pada sensor 1

No	Bahan yang Diuji	Nilai Data Aktual (At)	Nilai Hasil Pembandingan (Ft)	At-Ft ²	Hasil Setelah Kalibrasi
1	Air normal	32.25	31.37	0.7744	31.56
2	Air panas	63.73	62.93	0.64	63.04
3	Air mendidih	101.63	100.83	0.64	100.94
4	Solder	119.4	118.74	0.4356	118.71
5	Pasir	31.35	30.89	0.2116	30.66
6	Garam yang telah dipanaskan selama lima menit pada suhu 50°C	48.21	47.58	0.3969	47.52
7.	Garam yang telah dipanaskan selama lima menit pada suhu 30°C	29.14	28.66	0.2304	28.45
Rata-Rata RMSE (%)				3.329	
Konstanta Error (K_E)				0.690	

Begitu juga dengan termometer tipe-K pada PCM (sensor 2) terdapat nilai rata-rata *error* 0.739%, seperti yang ditampilkan pada Tabel 2. Data yang diperoleh ini sebenarnya untuk sensor 2 ini sudah termasuk ke dalam nilai yang akurasi alat ukur Mastech MDS6514 yang berarti sensor tipe-K ini sudah layak digunakan namun demikian sensor pada PCM.

Tabel 2. Data pengukuran suhu pada sensor 2

No	Bahan yang Diuji	Nilai Data Aktual (At)	Nilai Hasil Pembandingan (Ft)	At-Ft ²	Hasil Setelah Kalibrasi
1	Air normal	31.84	30.94	0.81	31.10
2	Air panas	63.22	62.81	0.1681	62.48
3	Air mendidih	102.01	100.7	1.7161	101.27
4	Solder	20.04	119.62	0.1764	119.30
5	Pasir	31.88	31.14	0.5476	31.14
6	Garam yang telah dipanaskan selama lima menit pada suhu 50°C	49.25	48.66	0.3481	48.51
7.	Garam yang telah dipanaskan selama lima menit pada suhu	29.25	29.02	0.0529	28.51

30°C				
Rata-Rata RMSE (%)			3.819	
Konstanta Error (K_E)			0.739	

Sensor 3 digunakan untuk mengukur suhu air keluar. Setelah dihitung rata-rata *error*-nya diperoleh nilai yang memenuhi standar, yaitu nilai rata-rata *error* sebesar 0.748% sebagaimana disajikan pada Tabel 3. Hal ini menunjukkan bahwa hasil setelah dilakukan kalibrasi sensor 3 mendekati dengan nilai data aktual.

Tabel 3. Data pengukuran suhu pada sensor 3

No	Bahan yang Diuji	Nilai Data Aktual (At)	Nilai Hasil Perbandingan (Ft)	At-Ft ²	Hasil Setelah Kalibrasi
1	Air normal	32.4	31.52	0.7744	31.65
2	Air panas	62.53	63.4	0.7569	61.78
3	Air mendidih	100.99	100.4	0.3481	100.24
4	Solder	119.2	118.42	0.6084	118.45
5	Pasir	32.15	31.73	0.1764	31.40
6	Garam yang telah dipanaskan selama lima menit pada suhu 50°C	49.11	48.31	0.64	48.36
7.	Garam yang telah dipanaskan selama lima menit pada suhu 30°C	29.14	28.36	0.6084	28.39
Rata-Rata RMSE (%)				3.913	
Konstanta Error (K_E)				0.748	

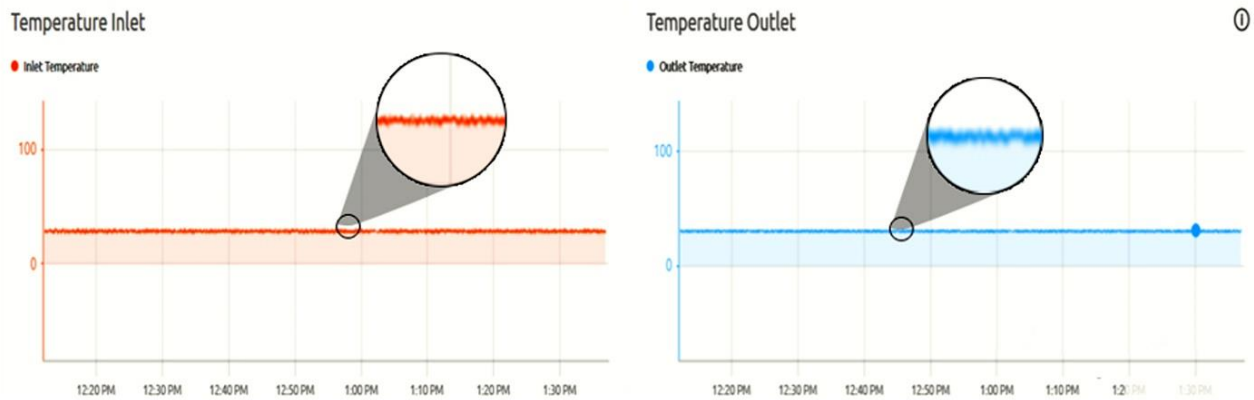
Setelah mendapatkan nilai rata-rata setiap sensor, kemudian nilai tersebut dimasukkan ke dalam program arduino sebagai proses kalibrasi sensor. Sehingga akurasi masing-masing sensor dibawah rata-rata margin *error* sensor yaitu +/-0.75%. Setelah kalibrasi sensor dilakukan, kemudian sensor ini digunakan untuk pengukuran alat uji PCM untuk *thermal energy storage*. Dimana sensor 1 digunakan sebagai data ukur suhu air masuk (*inlet*), sensor 2 untuk data ukur suhu PCM dan sensor 3 untuk data ukur suhu air keluar (*outlet*).

Analisa *Noise filtering* sensor *thermocouple type K* adalah serangkaian proses yang dilakukan untuk menghilangkan fluktuasi yang terkandung dengan data yang diperoleh dari infrastruktur atau pembacaan data [18]. Dimana fluktuasi pembacaan nilai sensor semakin jauh dengan aktual maka fluktuasi sensor semakin besar dan jika fluktuasi sensor mendekati pembacaan alat ukur aktual maka proses kalibrasi sensor temperatur berhasil dilakukan [19]. Data dalam bentuk *chart* atau grafik yang diperoleh perlu diolah, dan *noise* yang terkandung harus dihilangkan atau dikurangi.

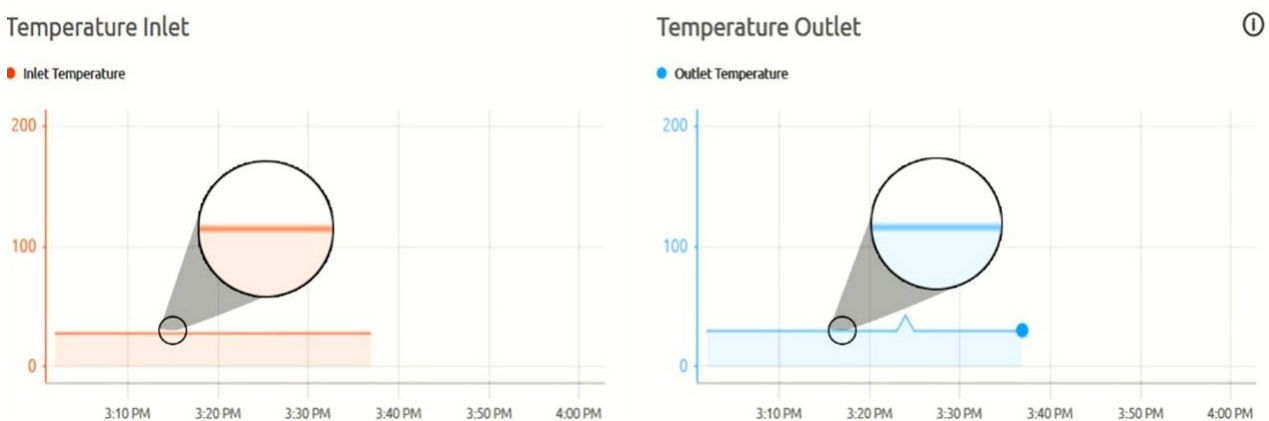
Data Inlet dan outlet dipilih dikarenakan lebih mudah dilakukan perbandingan dengan nilai yang hampir bisa dikatakan stabil dan membentuk grafik garis lurus. Dapat dilihat dari Gambar 3 menunjukkan temperature *inlet* dan *outlet* yang diambil sebelum *thermocouple* dilakukan kalibrasi, serta proses pengambilan data tersebut dilakukan pada pukul 12.00-13.30 WIB. Hasil dari bacaan sensor mengalami fluktuasi nilai pembacaan sensor yang signifikan sehingga tidak membentuk garis lurus yang mulus, dimana hal ini menunjukkan adanya fluktuasi data temperature yang terjadi pada sensor *thermocouple* saat proses perekaman temperature.

Gambar 4 menunjukkan pembacaan temperatur *inlet* dan *outlet* setelah sensor *thermocouple*. Data ini diperoleh setelah dilakukan kalibrasi, dimana proses pengambilan data

dilakukan pada pukul 14.20-15.40 WIB. Hasil bacaan sensor yang dihasilkan menunjukkan secara visual proses kalibrasi juga untuk mengurangi fluktuasi pembacaan sensor dari *range* data alat ukur aktual yang diperoleh sehingga garis yang dihasilkan membentuk garis lurus yang sempurna tanpa adanya fluktuasi nilai pengukuran yang terlihat [20]. Pembacaan sensor semakin akurat fluktuasi data berada di *range* 0.67 ± 0.73 pada *inlet* dan *outlet*.



Gambar 3. Suhu air *inlet* dan suhu *outlet* sebelum kalibrasi



Gambar 4. Suhu air *inlet* dan suhu air *outlet* sesudah kalibrasi

Hal ini dikarenakan proses kalibrasi dilakukan untuk membuat data pembacaan sensor semakin akurat juga bertujuan untuk memperkecil fluktuasi agar membatasi data berada di *range* dari nilai idealnya [16], [21], [22]. Jadi dapat disimpulkan baik dalam sistem yang sama proses kalibrasi sangat berguna dalam memproses data pembacaan sensor selain sebagai penambah akurasi juga bisa memfilter *noise* dan mengurangi fluktuasi data.

SIMPULAN DAN SARAN

Simpulan

Kalibrasi dengan menggunakan metode yang telah dilaksanakan melalui penelitian ini terbukti bahwa perhitungan matematika sederhana dapat digunakan untuk meningkatkan akurasi dan presisi sensor dengan menggunakan aplikasi Arduino. Kalibrasi dilakukan pada tujuh bahan uji mendapatkan nilai rata-rata error dan dijadikan referensi untuk modul MAX6675, selanjutnya dimasukkan *coding* ke arduino untuk proses kalibrasi. Dengan menggunakan rumus RMSE diperoleh pembacaan sensor yang semakin akurat dimana fluktuasi data sekitar 0.67 ± 0.73 pada inlet dan outlet.

DAFTAR RUJUKAN

- [1] N. A. Lutsenko and S. S. F. A, "Effect of side walls shape on charging and discharging performance of thermal energy storages based on granular phase change materials," *Renewable Energy*, vol. 162, pp. 1–12, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.08.029>.
- [2] D. Risky, M. Yusuf, and A. Setiawan, "Preliminary study on the use of solar energy to drive biomass briquetting machines," *J. Polimesin*, vol. 18, no. 2, pp. 144–150, 2020.
- [3] R. Syarlihan, A. Abizar, and A. Setiawan, "Preliminary design of shrimp pond paddle wheel powered by solar energy," *J. Polimesin*, vol. 19, no. 1, pp. 1–6, 2021.
- [4] N. Goyal, A. Aggarwal, and A. Kumar, "Financial feasibility of concentrated solar power with and without sensible heat storage in hot and dry Indian climate," *J. Energy Storage*, vol. 52, p. 105002, Aug. 2022, doi: [10.1016/j.est.2022.105002](https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105002).
- [5] S. M.K and R. K.S., "Thermal energy storage system with a high-temperature nanoparticle enhanced phase change material: Charging and discharging characteristics upon integration with process preheating," *J. Energy Storage*, vol. 55, pp. 1–10, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105295>.
- [6] A. Anand, A. Shukla, and A. Sharma, *Thermal Energy Storage Using Phase Change Materials: An Overview*. 2020. doi: [10.1201/9780429328640-1](https://doi.org/10.1201/9780429328640-1).
- [7] G. Gunawati *et al.*, "Physical Characteristics of Aceh Traditional Salt and Its Potential as Raw Material for Thermal Energy Storage," *J. Ecol. Eng.*, vol. 23, no. 2, pp. 116–122, 2022.
- [8] I. K. G. W. I. M. Astika, I. N. S. Winaya, I. D. G. A. Subagia and I. G. K. D. I. G. N. Nitya Santhiarsa, I. K. Suarsana, I. G. N. Priambadi, "Phase Change Materials for Building Applications: A Review," in *Prosiding SNTTM XVIII*, 2019, vol. RM05, pp. 1–10. doi: [10.1016/j.enbuild.2010.03.026](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.03.026).
- [9] R. Senthil and M. Cheralathan, "Enhancement of the thermal energy storage capacity of a parabolic dish concentrated solar receiver using phase change materials," *J. Energy Storage*, vol. 25, no. June, p. 100841, 2019, doi: [10.1016/j.est.2019.100841](https://doi.org/10.1016/j.est.2019.100841).
- [10] B. Koçak, A. I. Fernandez, and H. Paksoy, "Review on sensible thermal energy storage for industrial solar applications and sustainability aspects," *Sol. Energy*, vol. 209, no. August, pp. 135–169, 2020, doi: [10.1016/j.solener.2020.08.081](https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.08.081).
- [11] S. Riskina, A. Setiawan, G. Gunawati, and R. Dewi, "Design of concentrated solar thermal powered heat exchanger completed with energy storage material," *AIP Conf. Proc.*, vol. 2719, no. 1, p. 50002, 2023, doi: [10.1063/5.0133276](https://doi.org/10.1063/5.0133276).
- [12] P. Itterheimová, F. Foret, and P. Kubáň, "High-resolution Arduino-based data acquisition devices for microscale separation systems," *Anal. Chim. Acta*, vol. 1153, p. 338294, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.aca.2021.338294>.
- [13] R. Septiana, I. Roihan, and J. Karnadi, "Calibration of K-Type Thermocouple and MAX6675 Module With Reference DS18B20 Thermistor Based on Arduino DAQ," *Pros. SNTTM XVIII*, pp. 9–10, 2019.
- [14] A. Hasibuan, R. Rosdiana, and D. S. Tambunan, "Design and Development of An Automatic Door Gate Based on Internet of Things Using Arduino Uno," *Bull. Comput. Sci. Electr. Eng.*, vol. 2, no. 1 SE-Articles, pp. 17–27, Jun. 2021, doi: [10.25008/bcsee.v2i1.1141](https://doi.org/10.25008/bcsee.v2i1.1141).
- [15] M. Gunawati. Nasruddin, M.N. Setiawan, Adi. Sebayang, K.A. Zakaria, "Design and Calibration of Temperature Monitoring Device for a Cold Box with Hydrated Salts as Phase Change Material (PCM)," in *Proceedings of the 2nd International Conference on Experimental and Computational Mechanics in Engineering*, 2021. doi: https://doi.org/10.1007/978-981-16-0736-3_20.

-
- [16] A. Hasibuan, Kartika, A. Qodri, and M. Isa, "Temperature Monitoring System using Arduino Uno and Smartphone Application," *Bull. Comput. Sci. Electr. Eng.*, vol. 2, no. 2 SE-Articles, pp. 46–55, Dec. 2021, doi: 10.25008/bcsee.v2i2.1139.
- [17] P. F. Pereira and N. M. M. Ramos, "Low-cost Arduino-based temperature, relative humidity and CO2 sensors - An assessment of their suitability for indoor built environments," *J. Build. Eng.*, vol. 60, no. June, p. 105151, 2022, doi: 10.1016/j.job.2022.105151.
- [18] R. Septiana, I. Roihan, and R. A. Koestoer, "Testing a calibration method for temperature sensors in different working fluids," *J. Adv. Res. Fluid Mech. Therm. Sci.*, vol. 68, no. 2, pp. 84–93, 2020, doi: 10.37934/ARFMTS.68.2.8493.
- [19] S. Zhao, J. Zhou, Y. Liu, J. Zhang, and J. Cui, "Application of Adaptive Filtering Based on Variational Mode Decomposition for High-Temperature Electromagnetic Acoustic Transducer Denoising," *Sensors (Basel)*, vol. 22, no. 18, Sep. 2022, doi: 10.3390/s22187042.
- [20] M. A. Rehan *et al.*, "Experimental performance analysis of low concentration ratio solar parabolic trough collectors with nanofluids in winter conditions," *Renew. Energy*, vol. 118, pp. 742–751, 2018, doi: 10.1016/j.renene.2017.11.062.
- [21] A. Caraballo, S. Galán-Casado, Á. Caballero, and S. Serena, "Molten salts for sensible thermal energy storage: A review and an energy performance analysis," *Energies*, vol. 14, no. 4, pp. 1–15, 2021, doi: 10.3390/en14041197.
- [22] B. O. Olorunfemi, N. I. Nwulu, and O. A. Ogbolumani, "Solar panel surface dirt detection and removal based on arduino color recognition," *MethodsX*, vol. 10, no. December 2022, p. 101967, 2023, doi: 10.1016/j.mex.2022.101967.