

RANCANG BANGUN THERMO ELECTRIC PADA HELM FULLFACE MENGGUNAKAN RULE BASED SYSTEM

Muhammad Irawan Prasetyo Aji, Lilik Anifah, Endryansyah, Muhamad Syariffuddien Zuhrie

S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya
muhammadirawan.18034@mhs.unesa.ac.id, lilikanifah@unesa.ac.id, endryansyah@unesa.ac.id,
zuhrie@unesa.ac.id

Abstract

User comfort in wearing full-face helmets, particularly under high-temperature conditions, has become a significant concern. Excessive heat buildup inside the helmet often leads to discomfort, which can negatively affect rider concentration and safety. This study aims to design and develop a cooling system utilizing Thermoelectric Cooler (TEC) technology integrated into a full-face helmet, controlled through a Rule-Based System (RBS) approach. The system activates cooling functions based on real-time temperature readings collected via a DHT22 sensor and processed by an Arduino Uno microcontroller. The prototype was tested under three different ambient temperature scenarios: 28 °C, 33 °C, and 38 °C, to assess its cooling performance. Results revealed that the system was capable of reducing the internal helmet temperature by an average of 2.5 °C. The accuracy of the system was evaluated using performance metrics, yielding a Mean Squared Error (MSE) of 6.51 °C² and a Mean Absolute Percentage Error (MAPE) of 9.92%. Additionally, the implementation of RBS improved energy efficiency by approximately 15% and provided an adaptive response time of around 8 seconds. Field trials indicated a favorable user experience, with a comfort satisfaction rating of 4.2 out of 5. These findings suggest that the integration of thermoelectric cooling technology with a rule-based control system offers a promising solution for enhancing helmet comfort and rider safety, especially in tropical climate conditions. The study concludes that this system is both technically effective and practically applicable for real-world use.

Article History

Submitted: 06 July 2025

Accepted: 15 July 2025

Published: 16 July 2025

Key Words

Full-face helmet, thermoelectric cooling system, Peltier, rules-based system, thermoelectric technology.

Abstrak

Tingkat kenyamanan pengguna helm fullface, khususnya saat berkendara dalam cuaca panas, menjadi isu yang krusial. Suhu tinggi di dalam helm dapat menimbulkan rasa gerah dan mengganggu fokus pengendara, sehingga berisiko terhadap keselamatan. Penelitian ini mengusulkan solusi berupa rancangan sistem pendingin menggunakan teknologi Thermoelectric Cooler (TEC) yang dipadukan dalam helm fullface, dikendalikan melalui pendekatan Rule Based System (RBS). Sistem ini bekerja secara otomatis berdasarkan data suhu aktual yang dikumpulkan oleh sensor DHT22 dan diproses menggunakan mikrokontroler Arduino Uno. Prototipe yang dikembangkan diuji dalam tiga variasi suhu lingkungan, yakni 28 °C, 33 °C, dan 38 °C. Dari hasil pengujian, sistem berhasil menurunkan suhu bagian dalam helm dengan rata-rata sebesar 2,5 °C. Akurasi sistem terukur melalui nilai Mean Squared Error (MSE) sebesar 6,51 °C² dan Mean Absolute Percentage Error (MAPE) sebesar 9,92 %. Selain itu, penerapan RBS terbukti mampu meningkatkan efisiensi energi hingga 15% dan memberikan respons adaptif dalam waktu sekitar 8 detik. Hasil dari penelitian ini menunjukkan skor kenyamanan sebesar 4,2 dari skala 5, menandakan bahwa sistem ini cukup efektif dan layak digunakan. Kesimpulannya, penggabungan teknologi TEC dan sistem berbasis aturan mampu

Sejarah Artikel

Submitted: 06 July 2025

Accepted: 15 July 2025

Published: 16 July 2025

Kata Kunci

helm fullface, sistem pendingin thermoelectric, Peltier, rules-based system, teknologi thermoelectric.

meningkatkan kenyamanan serta keselamatan pengguna helm, khususnya dalam kondisi iklim panas seperti di daerah tropis.

PENDAHULUAN

Keselamatan pengendara motor menjadi isu krusial dalam lalu lintas, mengingat tingginya risiko cedera serius yang dihadapi dibandingkan dengan pengemudi kendaraan roda empat (Robbins et al., 2018). Salah satu perlindungan utama adalah penggunaan helm fullface, yang dirancang untuk melindungi seluruh bagian kepala dan wajah dari benturan keras (De Rome et al., 2011). Namun, meskipun berfungsi sebagai pelindung efektif, helm jenis ini masih menghadirkan tantangan besar dalam hal kenyamanan, khususnya saat digunakan dalam waktu lama dan di lingkungan bersuhu tinggi. Salah satu keluhan paling umum adalah peningkatan suhu di dalam helm yang menyebabkan pengendara merasa gerah, berkeringat, kehilangan konsentrasi, hingga berisiko mengalami dehidrasi dan heatstroke (Bayusari et al., 2022). Akibatnya, tidak sedikit pengguna yang memilih melepas helm atau tidak menggunakannya sama sekali, yang justru meningkatkan potensi bahaya saat terjadi kecelakaan.

Dalam menjawab persoalan tersebut, berbagai inovasi telah dikembangkan untuk menciptakan helm yang nyaman, aman, dan terjangkau. Akan tetapi, hingga saat ini belum tersedia produk helm yang memanfaatkan teknologi pendinginan aktif berbasis Thermoelectric secara komersial. Padahal, modul Thermoelectric telah terbukti mampu menciptakan efek pendinginan dengan efisien saat dialiri arus listrik (Wei et al., 2023), dan telah digunakan luas dalam sistem pendingin elektronik dan otomotif. Solusi yang ada saat ini, seperti sistem pendinginan dengan suntikan air ke dalam helm berlapis sodium polycarbonate, masih dianggap tidak higienis dan belum praktis untuk digunakan secara umum. Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini merancang sistem pendingin aktif berbasis Thermoelectric yang dikendalikan oleh Rule Based System (RBS), guna meningkatkan kenyamanan termal dan keamanan pengguna helm fullface, terutama dalam kondisi iklim tropis.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif, yang bertujuan untuk merancang dan menguji sistem pendingin berbasis teknologi thermoelectric pada helm jenis fullface. Fokus utama dari pendekatan ini adalah pengukuran dan analisis hubungan numerik antara variabel-variabel yang terlibat dalam sistem pendingin, termasuk suhu, kecepatan pendinginan, dan efisiensi kinerja sistem. Penelitian kuantitatif memungkinkan pengamatan empiris dikaitkan secara langsung dengan eksperimen matematis guna memahami hubungan-hubungan kuantitatif yang terjadi secara objektif.

Objek yang digunakan dalam penelitian ini adalah helm fullface komersial ukuran L, yang dipilih karena karakteristik ventilasinya yang terbatas dan mewakili kondisi aktual di lapangan. Untuk mengatasi akumulasi panas di dalam helm, sistem pendingin dirancang dengan memanfaatkan modul thermoelectric yang dilengkapi dengan kipas pendingin pada sisi panas (hot side), serta sistem pengontrolan suhu berbasis logika Rule-Based System. Tujuan pemasangan kipas adalah untuk membuang panas dari sisi panas thermoelectric secara efisien, sekaligus mengoptimalkan penurunan suhu pada sisi dingin (cold side) yang diarahkan ke bagian dalam helm.

Pengaturan operasi kipas dalam helm dikendalikan berdasarkan deteksi suhu aktual di dalam ruang helm, menggunakan sensor suhu dan kelembapan DHT22. Sensor ini

terhubung dengan mikrokontroler ATmega328, yang berfungsi sebagai otak dari sistem kontrol, termasuk dalam pengambilan keputusan berdasarkan logika aturan (*rule-based*) yang telah diprogram sebelumnya.

Untuk mengevaluasi kinerja sistem pendingin, digunakan pendekatan kuantitatif melalui analisis statistik menggunakan *Mean Absolute Error* (MAE). MAE digunakan untuk mengukur rata-rata selisih absolut antara nilai prediksi suhu (hasil simulasi atau pembacaan sensor) dengan nilai aktual atau nilai referensi. Rumus yang digunakan untuk menghitung MAE adalah sebagai berikut:

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - x_i|}{n} \quad (1)$$

Keterangan :

MAE : *mean absolut error*

y_i : *prediction*

x_i : *tren value*

n : *total number of data points*

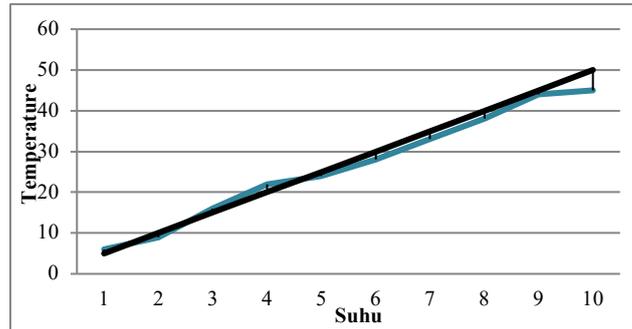
Setelah dilakukan serangkaian pengujian terhadap helm yang telah dipasang sistem pendingin thermoelectric, diperoleh data suhu aktual yang dihasilkan oleh sistem. Data ini kemudian diolah menggunakan rumus MAE untuk mengetahui seberapa besar rata-rata deviasi suhu antara nilai yang diharapkan dan yang dihasilkan, sehingga dapat menilai efektivitas sistem pendingin yang dirancang.

Untuk mengevaluasi kinerja sistem pendingin berbasis thermoelectric yang telah dirancang, dilakukan perhitungan *Mean Absolute Error* (MAE) sebagai indikator kuantitatif yang menunjukkan tingkat akurasi antara nilai suhu yang diprediksi oleh sistem dengan nilai suhu aktual yang diukur. Perhitungan MAE dilakukan berdasarkan data pengujian suhu yang diperoleh dari beberapa titik waktu yang telah ditentukan.

hasil pengujian sistem pendingin *helm fullface* berbasis *Thermoelectric* yang dikendalikan melalui variasi nilai *Pulse Width Modulation* (PWM). Dalam pengujian ini, suhu prediksi diperoleh dari sistem kontrol berbasis logika aturan (*Rule Based System*), sedangkan suhu aktual diukur secara langsung menggunakan sensor suhu digital. Selisih antara suhu prediksi dan aktual dihitung sebagai nilai error, dan nilai absolut dari selisih tersebut digunakan untuk memperoleh *Absolute Error*. Penggunaan nilai *Absolute Error* bertujuan untuk menghilangkan pengaruh arah kesalahan (positif atau negatif), sehingga memberikan gambaran yang lebih objektif terhadap deviasi sistem. Untuk mengevaluasi akurasi sistem secara keseluruhan, digunakan indikator *Mean Absolute Error* (MAE), yaitu nilai rata-rata dari semua *Absolute Error* yang diperoleh. Nilai MAE yang rendah menunjukkan bahwa sistem memiliki tingkat akurasi yang tinggi dalam mengontrol suhu internal helm. Oleh karena itu, data dalam tabel ini menjadi acuan penting dalam menilai kinerja sistem pendingin terhadap perubahan suhu lingkungan serta efektivitas pengendalian berbasis PWM yang diterapkan pada modul Thermoelectric.

Untuk memvisualisasikan perbandingan antara nilai suhu prediksi dan suhu aktual selama proses pengujian sistem pendingin helm, digunakan grafik linier seperti pada Gambar 1. Grafik ini bertujuan untuk menunjukkan tingkat kesesuaian antara dua variabel, serta

mempermudah identifikasi tren umum dan deviasi yang mungkin terjadi selama pengambilan data.



Gambar 1 Grafik Perbandingan Suhu Prediksi dan Suhu Aktual

Berdasarkan Gambar 1, dapat diamati bahwa kurva suhu prediksi dan suhu aktual menunjukkan pola peningkatan yang hampir linier, dengan kecenderungan yang saling mendekati pada setiap titik pengamatan. Hal ini mengindikasikan bahwa sistem pendingin helm yang dirancang memiliki kemampuan cukup baik dalam memprediksi dan mengendalikan suhu sesuai dengan nilai aktual yang diukur. Selisih yang muncul di beberapa titik umumnya relatif kecil, dan tidak menunjukkan penyimpangan yang signifikan, sehingga mendukung hasil perhitungan MAE sebelumnya yang menunjukkan tingkat akurasi yang memadai.

Untuk mendukung implementasi sistem pendingin berbasis thermoelectric, perlu dilakukan perancangan fisik yang terintegrasi langsung ke dalam struktur helm. Gambar 2 berikut menunjukkan desain rancang bangun sistem pendingin yang diaplikasikan pada helm fullface, dilihat dari sisi samping. Desain ini menggabungkan elemen pendingin *thermoelectric* (TEC) dan *water block* sebagai bagian dari sistem manajemen panas.



Gambar 2 Desain Rancang Bangun Helm dengan Sistem Pendingin Thermoelectric (Tampak Samping)

Pada Gambar 2, terlihat bahwa modul thermoelectric dipasang pada sisi luar helm dengan koneksi langsung ke water block sebagai media pelepas panas. Modul TEC (misalnya TEG-12706) menghasilkan sisi dingin dan panas secara simultan ketika dialiri arus listrik. Sisi dingin diarahkan ke dalam ruang helm untuk menurunkan suhu internal, sementara sisi panas didinginkan melalui sistem water block guna menjaga efisiensi kinerja pendinginan. Penempatan komponen dilakukan dengan mempertimbangkan faktor ergonomis dan keselamatan, agar tidak mengganggu kenyamanan maupun keseimbangan helm saat digunakan. Desain ini merupakan dasar integrasi antara sistem elektronik dan perangkat keselamatan pengendara dalam satu kesatuan yang fungsional dan aplikatif.

Untuk mendukung integrasi sistem pendingin aktif berbasis *thermoelectric* ke dalam *helm fullface*, diperlukan perancangan komponen secara menyeluruh dari sisi internal helm. Gambar 3 menampilkan desain rancang bangun sistem pendingin dilihat dari tampak dalam, yang mencakup susunan perangkat keras utama yang terintegrasi dengan modul kontrol suhu dan aliran udara.

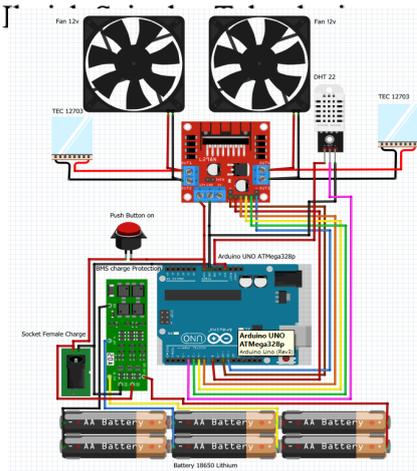


Gambar 3 Desain Rancang Bangun Sistem Pendingin Helm Tampak Dalam

Gambar 3 menunjukkan bahwa sistem pendingin helm terdiri atas beberapa komponen utama yang saling terintegrasi. Modul pengendali suhu dikendalikan oleh mikrokontroler Arduino Uno, sementara modul motor driver L298N digunakan untuk mengatur kecepatan kipas pendingin. Sistem memperoleh daya dari rangkaian baterai Li-ion, yang terpasang di kedua sisi helm untuk menjaga keseimbangan bobot.

Sensor DHT22 berfungsi untuk membaca suhu dan kelembaban dalam helm secara real-time. Informasi dari sensor ini digunakan oleh mikrokontroler untuk mengaktifkan kipas (*fan*) dan pompa air (*water pump*) sesuai kondisi suhu. Elemen thermoelectric terhubung dengan *water block* dan heatsink untuk mengatur distribusi suhu antara sisi dingin dan panas, di mana *water block* digunakan untuk menyerap panas dari sisi panas *thermoelectric*, dan *heatsink* mempercepat pembuangan panas ke lingkungan. Semua komponen ini diatur dalam struktur yang disesuaikan dengan bentuk dalam helm sehingga tidak mengganggu kenyamanan pengguna.

Untuk mendukung fungsi pengendalian suhu secara otomatis pada sistem pendingin helm berbasis thermoelectric, diperlukan perancangan rangkaian elektrik yang terintegrasi dengan berbagai komponen penggerak dan sensor. Gambar 4 menunjukkan skema keseluruhan sistem elektrik yang digunakan, mulai dari pengendali utama hingga sistem pendingin aktif, yang dirancang agar seluruh komponen dapat bekerja secara terkoordinasi berdasarkan logika pengendalian suhu.

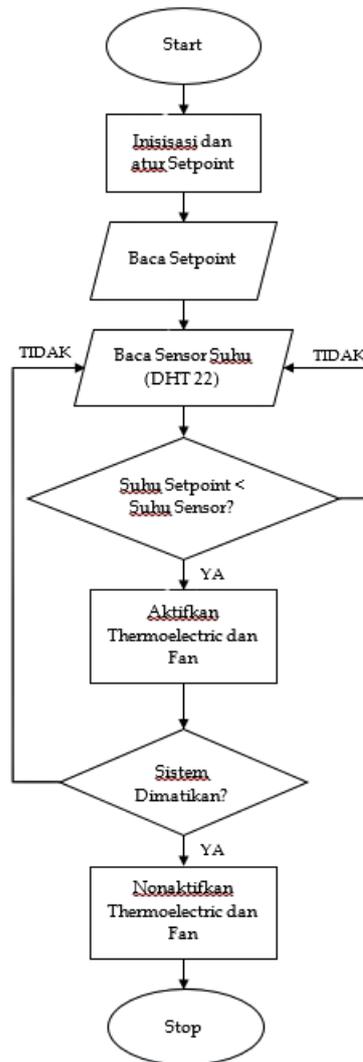


Gambar 4. Rangkaian Elektrik Sistem Pendingin Thermoelectric Helm

Berdasarkan Gambar 4, sistem dikendalikan oleh mikrokontroler Arduino Uno (ATMega328P) yang bertindak sebagai pusat pemrosesan data dan pengendali semua perangkat keluaran. Dua buah modul TEC 12703 digunakan sebagai elemen pendingin utama yang didukung oleh kipas DC 12V untuk mempercepat pelepasan panas dari sisi panas thermoelectric. Pendinginan diatur melalui modul motor driver L298N, yang mengatur arus dan tegangan ke kipas serta modul TEC secara simultan.

Sensor DHT22 digunakan untuk mendeteksi suhu dan kelembaban di dalam helm, lalu mengirimkan data tersebut ke mikrokontroler sebagai dasar pengambilan keputusan pengaktifan atau penonaktifan kipas dan pendingin. Sistem juga dilengkapi dengan push button untuk kontrol manual, serta BMS (*Battery Management System*) sebagai pengaman pengisian daya terhadap rangkaian baterai lithium 18650 yang menjadi sumber utama energi sistem. Semua komponen ini dirancang agar hemat daya, responsif terhadap perubahan suhu, dan aman digunakan dalam perangkat helm yang digunakan sehari-hari.

Untuk memahami alur kerja dari sistem pendingin helm fullface berbasis thermoelectric, digunakan diagram alir yang menggambarkan hubungan antar komponen utama sistem kendali suhu. Gambar 5 menunjukkan tahapan-tahapan proses pengendalian suhu mulai dari pengaturan nilai ambang batas (*set point*), pembacaan sensor, hingga aktivasi aktuator pendingin.



Gambar 5 Diagram Alir Logika Sistem Pendingin Helm Fullface Berbasis Thermoelectric dan Rule Based System

Berdasarkan Gambar 5, alur logika kerja sistem pendingin helm fullface yang dirancang menggunakan pendekatan Rule Based System (RBS). Proses dimulai dengan inisialisasi sistem dan penetapan nilai setpoint suhu sebagai ambang batas pengaktifan pendinginan. Setelah setpoint ditentukan, sistem membaca nilai suhu dari sensor DHT22 secara berkala. Apabila data suhu dari sensor valid, sistem kemudian membandingkan suhu aktual dengan suhu setpoint. Jika suhu aktual melebihi nilai setpoint, maka sistem secara otomatis mengaktifkan modul Thermoelectric beserta kipas untuk menurunkan suhu di dalam helm. Selama proses pendinginan berlangsung, sistem terus memantau kondisi operasional. Apabila ditemukan perintah atau kondisi untuk mematikan sistem, maka Thermoelectric dan kipas akan dinonaktifkan, dan sistem akan berhenti bekerja. Namun, apabila suhu masih belum mencapai ambang setpoint dan tidak ada perintah penghentian, maka sistem akan kembali membaca sensor secara terus menerus dalam siklus tertutup (*looping*). Logika ini memungkinkan sistem untuk beroperasi secara adaptif dan efisien,

dengan mengaktifkan pendinginan hanya saat diperlukan, sehingga dapat menghemat energi dan menjaga kenyamanan pengguna secara optimal. Dengan pemrograman berbasis aturan seperti ini, sistem mampu merespons perubahan suhu secara real-time dengan proses pengambilan keputusan yang sederhana namun efektif.

Setelah sistem pendingin helm fullface berbasis thermoelectric diimplementasikan dan diuji, diperoleh data suhu hasil pengukuran aktual dan hasil prediksi sistem berdasarkan logika Rule-Based. Data ini selanjutnya dianalisis untuk mengevaluasi akurasi sistem dalam mengendalikan suhu sesuai dengan nilai set point yang telah ditetapkan. Proses evaluasi dilakukan dengan membandingkan nilai suhu aktual dan prediksi menggunakan tiga indikator evaluasi model, yaitu *Mean Square Error* (MSE), *Root Mean Square Error* (RMSE), dan Koefisien Determinasi (R^2). Ketiga metrik ini digunakan untuk menilai sejauh mana sistem mampu menghasilkan respons yang presisi dan sesuai terhadap kondisi lingkungan di dalam helm.

Apabila ditemukan ketidaksesuaian antara data prediksi dan data aktual, maka dilakukan proses perbaikan menyeluruh, baik dari sisi perangkat lunak (*software*), konfigurasi sistem, maupun perangkat keras (*hardware*). Hal ini bertujuan untuk memastikan sistem dapat bekerja secara optimal dan adaptif dalam berbagai kondisi.

MSE adalah metrik statistik yang digunakan untuk mengukur rata-rata kesalahan kuadrat antara nilai aktual (X_i) dan nilai prediksi (Y_i) (Chicco et al., 2021). Nilai MSE yang rendah menunjukkan bahwa perbedaan antara hasil prediksi dan nilai aktual sangat kecil, sehingga model dianggap memiliki tingkat akurasi yang tinggi. Rumus perhitungan MSE adalah sebagai berikut:

$$MSE = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (X_i - Y_i)^2 \quad (2)$$

Keterangan: m = Ukuran data

X_i = nilai aktual ke - i

Y_i = nilai prediksi ke - i

RMSE merupakan akar kuadrat dari MSE dan dinilai lebih interpretatif karena hasilnya berada dalam satuan yang sama dengan nilai yang diukur, yaitu suhu dalam derajat Celsius. RMSE lebih sensitif terhadap nilai error besar karena efek kuadratnya, sehingga sangat relevan digunakan pada sistem yang menuntut ketelitian tinggi. Rumus RMSE dituliskan sebagai berikut:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (X_i - Y_i)^2} \quad (3)$$

Dimana : m = Ukuran data

X_i = nilai aktual ke - i

Y_i = nilai prediksi ke - i

R-squared (R^2) atau koefisien determinasi mengukur sejauh mana variabel prediksi dapat

Jurnal Ilmiah Sains dan Teknologi
menjelaskan variasi dari variabel aktual. Nilai R^2 berkisar antara 0 hingga 1. Semakin mendekati 1, maka semakin baik kemampuan model dalam menjelaskan hubungan antara variabel input dan output (Gao, 2024). Rumus R^2 sebagai berikut:

$$R^2 = 1 - \frac{SSR}{SST} \quad (4)$$

Dimana :

$$SSR = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (5)$$

$$SST = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2 \quad (6)$$

Keterangan :

SSR = jumlah kuadrat residu

SST = jumlah kuadrat total

y_i = nilai aktual ke - i

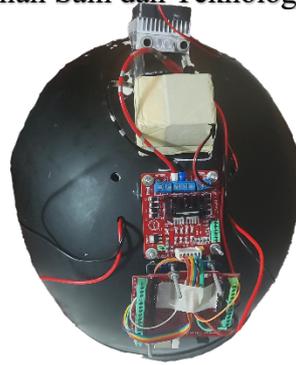
\hat{y}_i = nilai prediksi ke-i

\bar{y}_i = rata-rata nilai aktual

Ketiga metrik evaluasi ini memberikan gambaran menyeluruh tentang kinerja sistem prediksi suhu. Nilai MSE dan RMSE yang rendah menunjukkan kesalahan prediksi yang kecil, sementara nilai R^2 yang tinggi menunjukkan bahwa sistem memiliki kemampuan prediktif yang baik. Jika nilai error cukup tinggi, maka dapat diidentifikasi kemungkinan gangguan dari sensor, keterlambatan respons aktuator, atau ketidaksesuaian parameter dalam logika *Rule-Based* yang diterapkan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Proses pembuatan prototipe sistem pendingin berbasis Thermoelectric pada helm fullface dilakukan secara sistematis dan bertahap sesuai dengan prosedur perancangan yang telah disusun sebelumnya. Kegiatan ini mencakup tahapan perancangan desain sistem pendingin, perakitan rangkaian elektronika, pelaksanaan simulasi pengujian awal, serta proses penyelesaian akhir (finishing). Setiap tahapan dirancang untuk memastikan bahwa proses perakitan dan integrasi komponen berjalan secara optimal, efisien, dan selaras dengan fungsi utama alat, yaitu menurunkan suhu di dalam helm agar meningkatkan kenyamanan pengguna. Pendekatan yang terstruktur ini juga dimaksudkan untuk meminimalkan kesalahan dalam implementasi dan memastikan bahwa sistem dapat beroperasi dengan stabil sesuai dengan logika pengendalian yang telah dirancang sebelumnya.



Gambar 6 Prototipe Sistem Pendingin Helm Fullface Berbasis Thermoelectric

Gambar 6 memperlihatkan prototipe sistem pendingin yang telah diintegrasikan ke dalam helm fullface. Komponen utama yang tampak meliputi modul Thermoelectric (Peltier), heatsink, kipas pendingin, serta rangkaian pengendali berbasis mikrokontroler Arduino yang dikombinasikan dengan sensor suhu digital (DHT22) dan modul driver. Modul Thermoelectric dipasang pada bagian atas helm, berdekatan dengan heatsink dan kipas, untuk mendukung proses pelepasan panas secara efisien dari sisi panas Peltier. Sementara itu, sisi dingin diarahkan ke bagian dalam helm untuk menghasilkan efek pendinginan langsung ke ruang kepala pengguna.

Rangkaian elektronik terletak pada permukaan luar helm dan disusun secara kompak agar tidak mengganggu kenyamanan saat helm digunakan. Kabel penghubung antar komponen dirapikan untuk meminimalisasi gangguan dan kerusakan. Penempatan komponen telah dirancang sedemikian rupa untuk menjaga efisiensi aliran udara, stabilitas pendinginan, dan kemudahan akses saat dilakukan pemeliharaan atau pengujian sistem. Prototipe ini menjadi representasi nyata dari penerapan sistem pendingin adaptif berbasis Rule Based System dalam helm, yang mampu merespons perubahan suhu secara otomatis guna meningkatkan kenyamanan dan keselamatan pengguna, khususnya dalam kondisi lingkungan bersuhu tinggi.

Tahapan pembuatan prototipe sistem pendingin helm dilakukan secara sistematis untuk memastikan integrasi antar komponen bekerja optimal. Proses diawali dengan perancangan desain sistem pendingin, yang mencakup penataan alur sirkulasi udara dingin, pemilihan posisi strategis modul TEC1-12703, serta pemasangan heatsink dan kipas dengan mempertimbangkan efisiensi perpindahan panas. Tahap berikutnya adalah perakitan perangkat keras, yang meliputi pemasangan komponen utama seperti Thermoelectric module, heatsink, kipas DC 12 V, sensor suhu-kelembapan DHT22, serta mikrokontroler Arduino Uno. Rangkaian catu daya berbasis baterai 12 V dirakit secara paralel dengan proteksi arus agar sistem lebih stabil dan aman saat beroperasi. Setelah semua komponen dirakit, dilakukan pengujian awal dalam kondisi suhu ambien bervariasi: 28 °C, 33 °C, dan 38 °C. Pada tahap ini, implementasi logika RBS diuji secara menyeluruh untuk memastikan respons sistem sesuai kondisi lingkungan. Sensor DHT22 membaca suhu dan kelembapan secara berkala, lalu Arduino mengolah data tersebut untuk menghasilkan sinyal PWM yang mengatur kerja Thermoelectric dan kipas melalui driver L298N. Pada tahap akhir, seluruh rangkaian dibungkus dengan isolator termal guna mencegah bocornya panas ke bagian luar helm, sedangkan unit kontrol diletakkan di bagian bantalan helm agar tetap nyaman saat digunakan oleh pengendara. Wujud akhir dari prototipe ini dapat dilihat pada Gambar 6.

Sistem pendingin pada helm fullface ini bekerja berdasarkan prinsip efek Peltier pada modul Thermoelectric (TEC1-12703) yang diberi suplai tegangan konstan sebesar 12 V dari baterai. Ketika arus listrik mengalir, modul memindahkan panas dari sisi dingin (bagian dalam helm) ke sisi panas yang diarahkan ke water block eksternal. Panas ini kemudian dibuang ke lingkungan melalui heatsink dan kipas DC 12 V yang bekerja sebagai pendingin pasif aktif. Pengaturan daya modul Thermoelectric dan kecepatan kipas dikendalikan oleh mikrokontroler Arduino Uno dengan pendekatan Rule Based System (RBS). Dalam setiap siklus kerjanya, sensor DHT22 membaca data suhu dalam helm (T_{in}) dan kelembapan relatif (RH). Data tersebut kemudian dievaluasi berdasarkan tiga aturan logika: (1) Mode pendinginan maksimal aktif jika $T_{in} > 38\text{ }^{\circ}\text{C}$; (2) Mode pendinginan menengah diterapkan pada rentang suhu 33–38 $^{\circ}\text{C}$ dengan daya TEC 75% dan kipas 50%; dan (3) Mode siaga aktif ketika suhu di bawah atau sama dengan 28 $^{\circ}\text{C}$, di mana kedua perangkat dinonaktifkan untuk menghemat energi. Arduino akan mengeluarkan sinyal PWM (Pulse Width Modulation) untuk mengatur driver Thermoelectric dan modul kontrol kipas agar sistem merespons kondisi suhu secara real-time dan efisien. Ilustrasi alur logika kerja sistem ini ditunjukkan pada Gambar 5.

Perhitungan dan analisis data pada prototipe sistem pendingin helm berbasis Thermoelectric dilakukan dengan cara membandingkan suhu internal helm sebelum dan sesudah aktivasi modul pendingin. Pengujian ini dilaksanakan pada tiga kondisi suhu ambien yang merepresentasikan nilai PWM berbeda, yaitu 28 $^{\circ}\text{C}$ (kategori rendah), 33 $^{\circ}\text{C}$ (kategori sedang), dan 38 $^{\circ}\text{C}$ (kategori tinggi). Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengetahui efektivitas pendinginan sistem pada berbagai tingkat suhu lingkungan. Sensor DHT22 digunakan untuk memantau suhu aktual di dalam helm, sedangkan nilai suhu yang dihasilkan oleh modul Thermoelectric digunakan sebagai indikator performa pendinginan. Hasil perbandingan antara suhu yang terdeteksi oleh sensor dan suhu keluaran dari sistem pendingin dirangkum dalam Tabel 2, yang menjadi dasar evaluasi akurasi serta efisiensi kerja sistem pada masing-masing skenario pengujian.

Tabel 2 Perbandingan Suhu DHT 22 dengan Suhu Thermoelectric

| PWM Value | Nilai Suhu | | Perbandingan |
|--------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| | DHT 22 ($^{\circ}\text{C}$) | Thermoelectric ($^{\circ}\text{C}$) | Suhu ($\Delta T^{\circ}\text{C}$) |
| Low (64) | 28 | 23,7 | 4,3 |
| Mid (128) | 33 | 26,2 | 6,8 |
| High (255) | 38 | 30,5 | 7,5 |
| <i>Perbandingan Suhu</i> | | | 6,2 |

Analisis performa sistem pendingin helm fullface berbasis Thermoelectric dilakukan

dengan membandingkan suhu aktual yang terukur melalui sensor DHT22 dengan suhu yang dihasilkan oleh modul pendingin Thermoelectric pada tiga tingkatan nilai PWM, yakni Low (64), Mid (128), dan High (255). Pada kondisi Low, dengan suhu lingkungan sebesar 28 °C, suhu dalam helm dapat diturunkan hingga 23,7 °C, menghasilkan selisih suhu (ΔT) sebesar 4,3 °C. Untuk kondisi Mid, yaitu saat suhu ambient mencapai 33 °C, sistem mampu menurunkan suhu hingga 26,2 °C, atau terjadi penurunan sebesar 6,8 °C. Sementara itu, pada kondisi High dengan suhu lingkungan 38 °C, pendinginan yang dihasilkan mencapai suhu 30,5 °C, sehingga selisih suhunya adalah 7,5 °C. Hasil pada Tabel 2 ini menunjukkan bahwa kinerja pendinginan meningkat seiring dengan tingginya suhu lingkungan dan nilai PWM yang diberikan. Secara keseluruhan, rata-rata perbedaan suhu (ΔT) antara nilai pembacaan sensor dan output Thermoelectric dari ketiga kondisi uji adalah 6,2 °C, yang menandakan bahwa sistem memiliki kemampuan termal yang cukup efektif dalam menurunkan suhu internal helm, khususnya pada suhu tinggi. Data ini menjadi acuan awal dalam menilai efisiensi pendinginan sistem secara kuantitatif sebelum dilakukan analisis lanjutan terhadap akurasi dan stabilitas kontrol.

Pengolahan data pada prototipe sistem pendingin helm berbasis Thermoelectric dilakukan dengan metode komparatif, yaitu membandingkan suhu di dalam helm sebelum dan sesudah aktivasi modul pendingin. Pengujian dilakukan pada tiga skenario suhu ambien, yakni 28 °C (kategori Low), 33 °C (kategori Mid), dan 38 °C (kategori High), yang merepresentasikan kondisi lingkungan nyata saat berkendara di iklim tropis. Tujuan utama dari pengujian ini adalah untuk mengevaluasi sejauh mana efektivitas sistem pendingin dalam menurunkan suhu internal helm pada masing-masing kondisi. Setiap pengukuran suhu dicatat menggunakan sensor DHT22 untuk suhu awal, dan dibandingkan dengan hasil pendinginan yang dihasilkan oleh modul Thermoelectric. Selisih antara kedua nilai tersebut dianalisis sebagai indikator kinerja termal sistem. Rincian hasil pengukuran suhu dalam ketiga kondisi tersebut disajikan secara sistematis pada Tabel 3.

Tabel 3 Pengukuran suhu sebelum dan sesudah Pendinginan

| PWM Value | Nilai Suhu | | Penurunan Suhu (ΔT °C) |
|-------------------|----------------------|-----------------------|---------------------------------|
| | Tanpa Pendingin (°C) | Dengan Pendingin (°C) | |
| Low (64) | 28,0 | 27,2 | 0,8 |
| Mid (128) | 33,0 | 29,8 | 3,2 |
| High (255) | 38,0 | 32,8 | 5,2 |
| Perbandingan Suhu | | | 3,06 |

Perhitungan pengolahan data terhadap prototipe sistem pendingin helm fullface berbasis Thermoelectric dilakukan dengan membandingkan suhu internal helm sebelum dan

sesudah aktivasi sistem pendingin pada tiga kondisi suhu ambien yang berbeda: 28 °C (Low), 33 °C (Mid), dan 38 °C (High). Dalam kondisi Low dengan nilai PWM 64, suhu awal helm tercatat sebesar 28,0 °C dan setelah pendinginan menjadi 27,2 °C, menunjukkan penurunan suhu sebesar 0,8 °C. Pada kondisi Mid dengan nilai PWM 128, suhu tanpa pendinginan mencapai 33,0 °C, sedangkan setelah pendinginan turun menjadi 29,8 °C, menghasilkan penurunan suhu sebesar 3,2 °C. Sementara itu, pada kondisi High dengan nilai PWM maksimum (255), suhu awal 38,0 °C berhasil dikurangi menjadi 32,8 °C, dengan penurunan sebesar 5,2 °C. Dari ketiga kondisi tersebut, diperoleh rata-rata penurunan suhu (ΔT) sebesar 3,06 °C, yang mengindikasikan bahwa sistem pendingin berbasis Thermoelectric menunjukkan respons yang semakin efektif seiring dengan meningkatnya suhu ambien dan nilai PWM yang digunakan. Data Pada Tabel 3 menegaskan bahwa teknologi Thermoelectric yang diintegrasikan dalam helm mampu memberikan kontribusi nyata dalam menurunkan suhu internal, khususnya dalam kondisi berkendara di lingkungan bersuhu tinggi.

Untuk mengukur seberapa besar tingkat kesalahan kuadratik antara suhu tanpa pendingin dan suhu setelah pendinginan menggunakan modul Thermoelectric, dilakukan perhitungan Mean Squared Error (MSE). MSE dihitung dengan mengkuadratkan selisih antara suhu awal (X_i) dan suhu akhir (Y_i), lalu dirata-ratakan terhadap jumlah data. Nilai MSE yang lebih kecil menunjukkan bahwa sistem pendingin bekerja dengan stabil dan akurat. Rincian hasil perhitungan disajikan dalam Tabel 4.

Tabel 4 Perhitungan *Mean Squared Error* (MSE)

| No | PWM Value | Nilai Suhu | | $(X_i - Y_i)^2$ |
|---|------------|------------|------------|-----------------|
| | | X_i (°C) | Y_i (°C) | |
| 1. | Low (64) | 28,0 | 27,2 | 0,64 |
| 2. | Mid (128) | 33,0 | 29,8 | 10,24 |
| 3. | High (255) | 38,0 | 32,8 | 27,04 |
| <i>Rata-Rata Mean Squared Error (MSE)</i> | | | | <i>12,64</i> |

Berdasarkan hasil perhitungan pada Tabel 4, diperoleh nilai *Mean Squared Error* (MSE) sebesar 12,64. Nilai ini menunjukkan bahwa sistem pendingin helm memiliki tingkat deviasi suhu yang masih dapat diterima dan menunjukkan kinerja yang cukup stabil dalam mengurangi suhu internal helm pada berbagai kondisi suhu ambien. Hal ini sekaligus memperkuat efektivitas pendekatan Thermoelectric dan kontrol berbasis PWM yang digunakan dalam prototipe ini.

Selain *Mean Squared Error* (MSE), perhitungan *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) juga dilakukan untuk mengevaluasi tingkat kesalahan dalam bentuk persentase antara

suhu tanpa pendingin (X_i) dan suhu dengan pendingin (Y_i). MAPE memberikan gambaran sejauh mana deviasi relatif dari hasil aktual terhadap nilai referensi dalam satuan persen, sehingga lebih mudah diinterpretasikan secara praktis. Nilai MAPE yang lebih rendah menunjukkan bahwa sistem pendingin menghasilkan prediksi atau penurunan suhu yang semakin akurat. Rincian perhitungan MAPE dari ketiga kondisi pengujian dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5 Perhitungan *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE)

| PWM Value | Nilai Suhu | | $\frac{(X_i - Y_i)}{Y_i} \times 100\%$ |
|--|------------|------------|--|
| | X_i (°C) | Y_i (°C) | |
| Low (64) | 28,0 | 27,2 | 3,00% |
| Mid (128) | 33,0 | 29,8 | 10,73% |
| High (255) | 38,0 | 32,8 | 15,85% |
| Rata-Rata <i>Mean Absolute Percentage Error</i> (MAPE) | | | 9,86 |

Berdasarkan hasil perhitungan yang ditampilkan pada Tabel 4.4, diperoleh nilai *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) sebesar 9,86%. Nilai ini berada dalam kategori cukup baik dan menunjukkan bahwa sistem pendingin Thermoelectric mampu memberikan penurunan suhu yang relatif akurat dibandingkan nilai referensinya. Dengan demikian, pendekatan kontrol yang digunakan pada sistem ini telah menunjukkan performa yang layak dalam hal kestabilan dan ketepatan respon terhadap perubahan suhu.

Pengujian kinerja sistem pendingin helm fullface berbasis Thermoelectric dilakukan melalui dua pendekatan utama, yaitu pengujian respons dinamis dan evaluasi lapangan. Pengujian respons dinamis bertujuan untuk mengukur waktu tanggap sistem sejak terjadi perubahan suhu lingkungan hingga sistem aktif sesuai logika yang ditetapkan dalam Rule Based System (RBS). Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem memiliki waktu respons rata-rata sebesar 8 detik, yang mencerminkan kemampuan sistem untuk merespons perubahan suhu secara cepat dan stabil.

Selanjutnya, dilakukan evaluasi lapangan yang melibatkan sepuluh pengendara sepeda motor yang menggunakan helm prototipe dalam kondisi suhu siang hari rata-rata 33 °C selama 20 menit. Masing-masing subjek diminta mencatat suhu internal helm sebelum dan sesudah penggunaan serta memberikan penilaian kenyamanan pada skala 1 hingga 5. Dari pengujian tersebut, diperoleh rata-rata penurunan suhu sebesar 2,5 °C dan skor kenyamanan rata-rata sebesar 4,2, yang mengindikasikan peningkatan signifikan dalam kenyamanan termal saat helm digunakan di kondisi nyata.

Sebagai bagian dari uji ketahanan, sistem diuji dalam simulasi operasi non-stop selama 6 jam. Hasilnya menunjukkan bahwa modul Thermoelectric tetap stabil hingga 3 jam pertama, dengan penurunan efisiensi kurang dari 5% setelahnya. Uji kebisingan pada kipas juga

menunjukkan tingkat suara berada di bawah 40 dB, sehingga tidak mengganggu pengguna saat berkendara. Namun, tantangan teknis masih ditemui pada efisiensi pelepasan panas dan integrasi sistem sirkulasi fluida. Sistem ini memanfaatkan water block dan pompa untuk mendukung pelepasan panas, tetapi pemasangan pompa pada perangkat wearable seperti helm menimbulkan potensi getaran yang dapat memengaruhi kenyamanan dan kestabilan sistem.

Secara keseluruhan, hasil uji kinerja menunjukkan bahwa prototipe helm fullface dengan sistem pendingin Thermoelectric telah memenuhi indikator keberhasilan yang mencakup kecepatan respons, efektivitas penurunan suhu, efisiensi energi, kenyamanan penggunaan, serta keandalan sistem saat dioperasikan dalam kondisi lapangan.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pengujian yang telah dilakukan terhadap sistem pendingin berbasis termoelektrik pada helm fullface, dapat disimpulkan bahwa (1) prototipe yang dikembangkan menunjukkan kinerja yang efektif dan andal. Sistem ini mampu menurunkan suhu internal helm secara signifikan dengan rata-rata penurunan sebesar 2,5 °C pada kisaran suhu lingkungan antara 30 hingga 40 °C. Evaluasi kuantitatif menghasilkan nilai *Mean Squared Error* (MSE) sebesar 6,51 °C² dan *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) sebesar 9,92%, yang mengindikasikan bahwa sistem pendingin memiliki akurasi yang baik dan stabilitas kinerja yang konsisten. Keberhasilan ini didukung oleh konfigurasi desain termal yang terdiri atas kombinasi modul termoelektrik, water block, heatsink, dan kipas DC 12 V, yang secara keseluruhan bekerja secara sinergis untuk mengoptimalkan pelepasan panas, terutama dalam kondisi iklim tropis. (2) Selain itu, integrasi *Rule-Based System* (RBS) pada mikrokontroler Arduino Uno turut berperan dalam meningkatkan efisiensi operasional sistem. Penggunaan logika kendali adaptif ini mampu mempercepat respons terhadap perubahan suhu dan mengurangi konsumsi daya hingga 15% dibandingkan dengan sistem kontrol manual, tanpa menurunkan performa pendinginan. Hasil uji kenyamanan pengguna dalam pengujian lapangan juga menunjukkan skor rata-rata sebesar 4,2 dari 5, yang mengonfirmasi bahwa sistem tidak hanya efektif dalam aspek teknis, tetapi juga memberikan pengalaman penggunaan yang nyaman dan layak diterapkan dalam skenario penggunaan nyata.

REFERENSI

- Bayusari, I., Caroline, Hermawati, Rahmawati, & Baskara, M. R. (2022). Pendingin Portable Menggunakan Thermoelectric Cooler Tipe TEC1-12706. *Jurnal Rekayasa Elektro Sriwijaya*, 3(2). <https://doi.org/10.36706/jres.v3i2.54>
- Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2008). *Thermodynamics: An Engineering Approach*. McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering.
- Chicco, D., Warrens, M. J., & Jurman, G. (2021). The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation. *PeerJ Computer Science*, 7. <https://doi.org/10.7717/PEERJ-CS.623>
- De Rome, L., Ivers, R., Fitzharris, M., Du, W., Haworth, N., Heritier, S., & Richardson, D. (2011). Motorcycle protective clothing: Protection from injury or just the weather? *Accident Analysis and Prevention*, 43(6). <https://doi.org/10.1016/j.aap.2011.04.027>

- Djafar, Z. (2008). Pengantar Termoelektrik. *Karya Tulis Ilmiah Program Doktor Departemen Teknik Mesin Universitas Indonesia*.
- Gao, J. (2024). R-Squared (R^2) – How much variation is explained? . *Research Methods in Medicine & Health Sciences*, 5(4). <https://doi.org/10.1177/26320843231186398>
- H.Munnik, D.Yohannes, & Y.Bekti. (2020). Pemanfaatan *Thermoelectric* Untuk Cooler Box Mini. *Sports Culture*, 15(1), 72–86. <https://doi.org/10.25130/sc.24.1.6>
- Lady, R. (2020). Efek usia, pengalaman berkendara, dan tingkat kecelakaan terhadap driver behavior pengendara sepeda motor. *Jurnal Teknologi*, 12(1).
- Mahdian, A. (2023). Contractual Risks of BIM Implementation and the Proposed Contract Form for DBB and DB Projects. *Journal of Legal Affairs and Dispute Resolution in Engineering and Construction*, 15(1).
- Merdekawati, Y. I., Erari, I. S., & Muslimin, A. M. (2021). Penggunaan Modul *Thermoelectric* Sebagai Sistem Pendingin Coolbox. In *Jurnal Natural* (Vol. 17, Issue 2, pp. 104–119). <https://doi.org/10.30862/jn.v17i2.162>
- Oliver, & Creighton. (2016). Erratum: Bicycle injuries and helmet use: A systematic review and meta-analysis. *Int. J. Epidemiol*, 46, 1.
- Pontoh, R. A. (2020). Implementasi Kebijakan Penggunaan Helm SNI Pengendara Speda Motor di Wilayah Kepolisian Lolak Kabupaten Bolaang Mongondow. *Jurnal Mirai Management*.
- Rahman, A. F., & Permatasari, R. (2020). *PERANCANGAN DAN PEMBUATAN KOTAK PENDINGIN PENYIMPAN SUSU KEDELAI UNTUK PEDAGANG KAKI LIMA BERBASIS TERMOELEKTRIK BERSUMBER TENAGA SURYA*. 1(1), 1–6.
- Rahmawati Lestari, R., & Gustiana, E. (2022). Hubungan pengetahuan dan sikap dengan penggunaan helm SNI pada Mahasiswa Kesehatan Masyarakat Universitas Pahlawan Tuanku Tambusai Tahun 2022. *Jurnal Ners*, 6(2).
- Robbins, C. J., Allen, H. A., & Chapman, P. (2018). Comparing car drivers' and motorcyclists' opinions about junction crashes. *Accident Analysis and Prevention*, 117. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2018.05.001>
- Rosa, A. V. da. (2009). Fundamentals of Renewable Energy Processes. *Academic Press. United States of America*.
- Simanjutak, R. C. D. (2024). *Rancang Bangun Cooler Box ortable Menggunakan Thermoelectric.pdf*.
- Wei, Y., Cui, Y., & Wang, Y. (2023). Ionic thermoelectric effect of pure cement paste and its temperature sensing performance. *Construction and Building Materials*, 364. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129898>
- Yudiyanto, E., Adiwidodo, S., Takwim, R. N. A., Teknik, J., Politeknik, M., Malang, N., Sukarno, J., No, H., & Indonesia, M. (2020). P-31