

PERANCANGAN DAN PENGUJIAN PROTOTYPE SISTEM PENDINGIN ES KRIM OTOMATIS MENGGUNAKAN TERMOELEKTRIK BERBASIS ARDUINO UNO**Krisna Mukti, Puput Wanarti Rusimamto, Endryansyah, I Gusti Putu Asto Buditjahjanto**S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya
krisna.19071@mhs.unesa.ac.id**Abstract**

The demand for efficient portable cooling systems is increasing, especially to maintain the quality of frozen products like ice cream in high-temperature environments. This study aims to design and test the performance of an automated ice cream cooling prototype based on thermoelectric technology with control using Arduino Uno. The background of this research stems from the need for an efficient and environmentally friendly portable cooling system, particularly in tropical regions like Indonesia, where high ambient temperatures pose challenges in storing frozen products such as ice cream. The developed prototype utilizes a Peltier module (TEC-12706) as the cooling element, a DS18B20 temperature sensor for temperature monitoring, and a relay to control current flow. The system is equipped with a servo motor and a 16x2 LCD display as part of the automation mechanism. Testing was conducted to evaluate the system's ability to maintain the ice cream temperature within the optimal range, as well as to analyze power consumption and overall system efficiency. The experimental results show that the system can gradually lower the temperature to near freezing, with an automatic response to temperature changes. Simulations using PID control provided better stability performance compared to the ON/OFF control method. This prototype is expected to serve as a practical solution for small businesses and individual users to maintain the quality of frozen products efficiently, without relying on conventional cooling systems.

Article History*Submitted: 18 July 2025**Accepted: 27 July 2025**Published: 28 July 2025***Key Words***thermoelectric, ice cream cooler, Arduino Uno, PID control, automatic control, temperature sensor***Abstrak**

Kebutuhan akan sistem pendingin portabel yang efisien semakin penting, khususnya untuk menjaga kualitas produk beku seperti es krim dalam lingkungan dengan suhu tinggi. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan menguji kinerja prototipe sistem pendingin es krim otomatis yang berbasis teknologi termoelektrik dan dikendalikan oleh Arduino Uno. Latar belakang penelitian ini didorong oleh kebutuhan akan solusi pendingin yang efisien dan ramah lingkungan, terutama di wilayah beriklim tropis seperti Indonesia, di mana suhu tinggi sering menjadi kendala dalam penyimpanan produk beku seperti es krim. Prototipe yang dikembangkan menggunakan modul Peltier (TEC-12706) sebagai elemen pendingin, sensor suhu DS18B20 untuk pemantauan suhu, serta relay untuk mengatur aliran arus. Sistem ini dilengkapi dengan motor servo dan layar LCD 16x2 untuk otomatisasi dalam pengaturan suhu. Pengujian sistem dilakukan untuk mengevaluasi kemampuannya dalam menjaga suhu es krim pada rentang optimal, serta menganalisis konsumsi daya dan efisiensi operasional. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa sistem dapat menurunkan suhu secara bertahap hingga mendekati titik beku, dengan respons otomatis terhadap perubahan suhu. Simulasi menggunakan kontrol PID memberikan performa yang lebih stabil dibandingkan dengan kontrol On/Off. Prototipe ini diharapkan dapat menjadi solusi praktis bagi pelaku usaha kecil dan pengguna individu

Sejarah Artikel*Submitted: 18 July 2025**Accepted: 27 July 2025**Published: 28 July 2025***Kata Kunci***Termoelektrik, Pendingin Es Krim, Arduino Uno, Kontrol PID, Kontrol Otomatis, Sensor Suhu*

untuk menjaga kualitas produk beku secara efisien, tanpa ketergantungan pada sistem pendingin konvensional.

Pendahuluan

Es krim adalah emulsi makanan yang kompleks, terdiri dari kristal es, lemak, udara, dan protein yang membentuk struktur tidak beku secara kontinu. Biasanya, es krim disimpan dalam freezer untuk menjaga kualitasnya. Namun, ketika dikeluarkan dari pendingin, es krim cenderung cepat mencair dan terkontaminasi. Untuk mempertahankan kualitasnya, es krim perlu disimpan pada suhu di bawah 5°C. Jika tidak segera dikonsumsi, es krim yang mencair dapat mengalami kerusakan tekstur, perubahan rasa, serta berpotensi menimbulkan risiko kesehatan akibat pertumbuhan mikroorganisme patogen (Husna dkk., 2021). *Dry ice* atau es kering, yang terbuat dari karbondioksida padat, memiliki suhu sangat rendah dan digunakan dalam industri untuk menjaga produk beku tetap beku. Meskipun efektif, penggunaan es kering dalam skala kecil seringkali tidak praktis dan ekonomis (Novianti & Darmawati, 2010).

Di Indonesia, dengan iklim tropis yang panas, suhu tinggi menjadi tantangan dalam penyimpanan makanan dan minuman beku, termasuk es krim. Dengan suhu harian yang sering melebihi 30°C, kebutuhan akan sistem pendingin yang efisien dan mudah diakses menjadi mendesak, terutama bagi usaha kecil seperti pedagang es krim keliling atau penjual minuman dingin di pasar tradisional. Selain itu, gaya hidup yang semakin dinamis mendorong peningkatan permintaan terhadap solusi pendinginan portabel yang praktis untuk kegiatan di luar ruangan, seperti saat berlibur ke pantai atau perjalanan panjang (Bisau, 2023). Dalam konteks ini, penggunaan kotak pendingin termoelektrik berbasis *Thermo Electric Cooler* (TEC) atau modul Peltier dapat menjadi solusi. Teknologi ini memanfaatkan efek Peltier, di mana arus listrik menciptakan perbedaan suhu antara dua sisi semikonduktor, menghasilkan pendinginan pada satu sisi dan pemanasan pada sisi lainnya. Keunggulannya terletak pada ukuran yang kompak dan tidak memerlukan bahan pendingin konvensional, menjadikannya ramah lingkungan dan hemat energi (Bisau, 2023).

Prototipe kotak pendingin termoelektrik yang dikembangkan dapat membantu pelaku usaha kecil, seperti pedagang es krim keliling, untuk menjaga suhu produk mereka meskipun berada dalam lingkungan panas. Dengan demikian, kualitas dan keamanan produk dapat terjaga hingga sampai ke konsumen. Konsumen juga diuntungkan karena dapat membawa es krim atau minuman dingin secara praktis tanpa khawatir produk akan mencair.

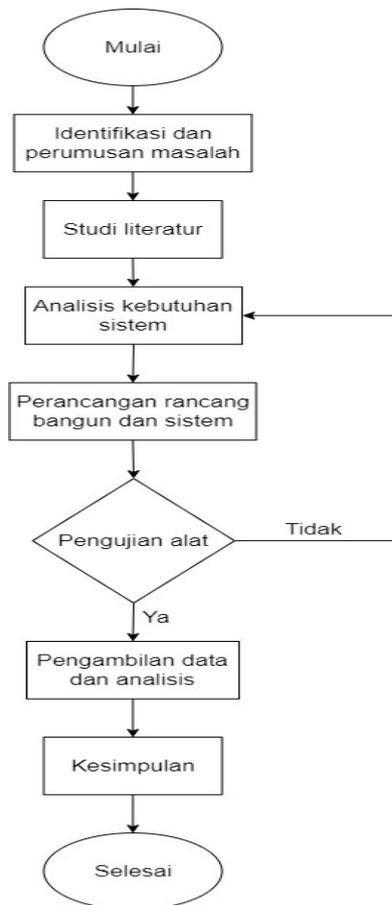
Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan rancang bangun untuk merancang dan membuat prototipe sistem pendingin es krim berbentuk balok persegi panjang dengan mempertimbangkan batasan masalah yang telah ditentukan. Penelitian ini melibatkan tiga tahapan utama, yaitu pemrograman, pengujian mikrokontroler yang digunakan, dan pengoptimalan prototipe sistem pendingin es krim. Pada tahap pengujian, dilakukan pengujian menggunakan modul relay, sensor suhu, dan elemen pendingin Peltier untuk mengevaluasi kinerja sistem yang telah dibangun.

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Sistem Kendali Universitas Negeri Surabaya, yang dipilih karena fasilitas dan peralatan yang diperlukan tersedia lengkap di laboratorium tersebut. Lokasi penelitian ini mendukung kelancaran eksperimen dan pengujian sistem pendingin yang sedang dikembangkan. Untuk merancang prototipe sistem pendingin es krim otomatis, diperlukan beberapa perangkat keras dan perangkat lunak, antara lain relay, motor servo, power supply 12V, kabel penghubung, terminal kabel, styrofoam,

Arduino IDE, sensor suhu DS18B20, termoelektrik Peltier, LCD display 16x2, Arduino Uno, dan saklar geser. Semua komponen ini digunakan dalam perancangan dan pengujian untuk memastikan bahwa prototipe dapat berfungsi sesuai dengan desain yang diinginkan.

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah rancang bangun prototype dengan pendekatan kuantitatif. Proses pengerjaan penelitian ini mengikuti tahapan-tahapan yang jelas, yang mencakup perancangan, pembuatan, dan pengujian prototipe. Tahapan-tahapan ini dijelaskan secara rinci dalam Gambar 1, yang menggambarkan alur kerja dari seluruh rangkaian penelitian ini.

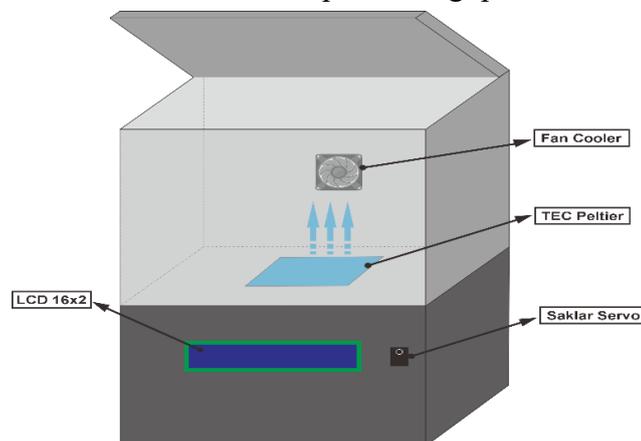


Gambar 1 Tahapan Pengerjaan

Penelitian ini dimulai dengan tahap identifikasi dan perumusan masalah, yang merupakan dasar dari latar belakang penelitian. Kebutuhan akan sistem pendingin yang efektif dan praktis menjadi sangat mendesak, khususnya dalam menyimpan produk beku seperti es krim. Proses identifikasi masalah bertujuan untuk memahami inti dari permasalahan yang dihadapi, sehingga dapat dirumuskan tujuan atau target penelitian yang jelas. Selanjutnya, studi literatur dilakukan untuk mengumpulkan, mengevaluasi, dan mensintesis berbagai sumber informasi yang relevan, seperti jurnal ilmiah, buku, artikel, dan laporan penelitian sebelumnya. Tujuan utama dari studi literatur adalah untuk memberikan pemahaman yang lebih luas mengenai topik penelitian, mengidentifikasi temuan penting yang telah dicapai sebelumnya, serta menilai metodologi yang digunakan. Hal ini juga membantu peneliti dalam merumuskan pertanyaan penelitian yang tepat, menyusun kerangka teoritis, dan merancang metodologi penelitian yang sesuai, serta membuka peluang untuk penelitian lanjutan di area yang belum terjamah.

Tahap berikutnya adalah analisis kebutuhan sistem, yang merupakan langkah awal dalam pengembangan perangkat lunak sistem pendingin es krim. Proses ini melibatkan pemahaman mendalam tentang tujuan sistem, masalah yang ingin diatasi, dan kebutuhan pengguna akhir. Kerja sama dengan pemangku kepentingan sangat penting dalam mengumpulkan informasi yang diperlukan untuk merumuskan persyaratan sistem yang tepat dan terukur. Pada penelitian ini, penulis mengacu pada berbagai jurnal dan penelitian terdahulu mengenai sistem pendingin konvensional berbasis mikrokontroler Arduino Uno, serta memberikan analisis lebih spesifik dalam aspek ukuran dan bahan prototipe yang digunakan. Prototipe sistem pendingin es krim berbasis Arduino Uno dirancang menggunakan bahan styrofoam sebagai wadah untuk pengujian, karena sifatnya yang mampu menjaga suhu di dalamnya dengan baik dan tidak mudah bocor saat diuji. Wadah prototipe tersebut berbentuk persegi panjang dengan ukuran panjang 26,8 cm, lebar 20,7 cm, dan tinggi 11,5 cm, yang diharapkan dapat mempertahankan suhu optimal untuk es krim.

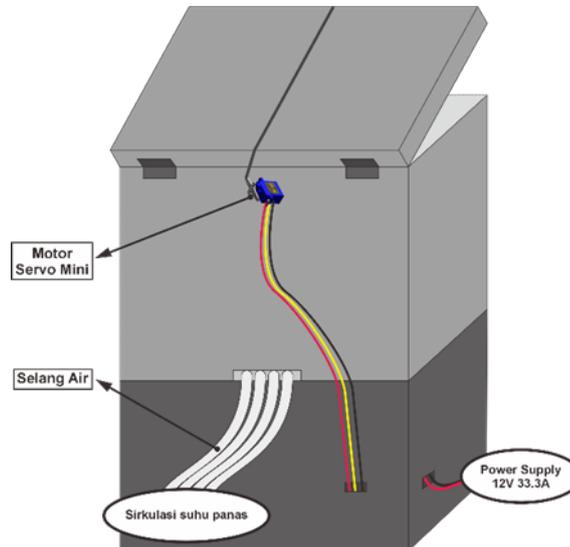
Pada tahap perancangan rancang bangun dan sistem, peneliti merinci bagaimana sistem pendingin es krim akan beroperasi dan menetapkan metode pengolahan informasi yang sesuai dengan analisis sistem yang dilakukan. Tahap ini berfokus pada pengaturan komponen-komponen sistem, seperti perangkat keras, perangkat lunak, dan mekanik, untuk memenuhi persyaratan yang diperlukan guna menyelesaikan penelitian. Penulis merencanakan langkah-langkah dalam desain prototipe yang mencakup kebutuhan perangkat keras dan perangkat lunak untuk mengembangkan sistem pendingin es krim. Perancangan ini juga mencakup aspek desain casing prototipe, yang berbentuk balok persegi panjang dengan bahan styrofoam, dan ukuran panjang 26,8 cm, lebar 20,7 cm, serta tinggi 11,5 cm. Semua tahap ini memastikan bahwa sistem pendingin yang dibangun dapat berfungsi sesuai dengan tujuan penelitian dan memberikan solusi praktis bagi pelaku usaha kecil.



Gambar 2 Desain prototype Tampak Depan

Pada tahap desain rancangan teknis, yang ditunjukkan pada Gambar 2, terdapat desain visual prototipe tampak depan yang dirancang dengan memperhatikan fungsionalitas dan efisiensi. Desain ini mencakup tempat untuk meletakkan es krim yang berada di tengah wadah, sehingga memungkinkan proses pendinginan dan pembekuan yang optimal. Berdasarkan perencanaan desain ini, tujuan utamanya adalah untuk memantau suhu es krim yang disimpan dalam wadah pendingin tersebut, yang akan ditampilkan pada LCD 16x2. Layar ini memberikan umpan balik suhu secara real-time, memudahkan pengguna untuk

memantau status produk beku tersebut. Selain itu, desain ini juga dilengkapi dengan saklar servo, yang digunakan untuk mengendalikan servo motor yang membuka dan menutup wadah tempat es krim. Penggunaan servo motor ini memungkinkan sistem untuk bekerja secara otomatis, memastikan wadah dapat tertutup rapat selama proses pembekuan dan terbuka saat es krim siap untuk diambil atau diperiksa.



Gambar 3 Desain Tampak Belakang

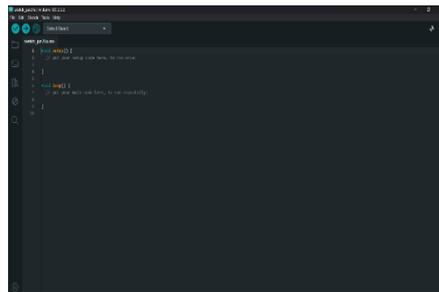
Gambar 3 menunjukkan desain tampak belakang dari prototipe sistem pendingin es krim berbasis termoelektrik. Pada bagian atas prototipe terdapat motor servo mini yang berfungsi untuk membuka dan menutup wadah tempat es krim secara otomatis. Motor servo ini dikendalikan oleh saklar servo, memastikan mekanisme pengoperasian berjalan lancar sesuai dengan suhu yang terdeteksi. Selain itu, terdapat selang air yang digunakan untuk mendukung sirkulasi suhu panas yang dihasilkan oleh modul termoelektrik. Selang ini mengalirkan panas dari dalam kotak pendingin dan membuangnya ke lingkungan sekitar, menjaga suhu di dalam wadah tetap stabil. Sirkulasi suhu panas ini merupakan bagian penting dalam proses pembuangan panas agar suhu dingin yang dihasilkan oleh modul termoelektrik dapat bertahan di dalam wadah. Prototipe ini juga dilengkapi dengan power supply 12V 33.3A, yang menyuplai daya untuk seluruh komponen sistem, termasuk modul termoelektrik, motor servo, dan sistem sirkulasi. Desain ini memastikan bahwa sistem pendingin dapat berfungsi dengan optimal, menjaga suhu es krim dalam kondisi yang sesuai untuk penyimpanan dan konsumsi.

Pada tahap desain visual perangkat keras untuk prototipe sistem pendingin es krim otomatis, Gambar 3 menggambarkan penempatan komponen-komponen utama dalam prototipe. Desain ini menunjukkan bahwa motor servo digunakan untuk membuka dan menutup wadah es krim secara otomatis, memungkinkan kontrol mekanisme yang mudah. Bagian bawah prototipe dipenuhi dengan komponen kelistrikan, termasuk Arduino Uno sebagai pengendali utama yang menjalankan program, serta relay yang berfungsi untuk mengatur modul termoelektrik dalam mematikan sistem pendingin secara otomatis sesuai dengan suhu yang telah ditentukan, menjaga suhu dalam wadah tetap stabil dan optimal.

Pada tahap analisis kebutuhan sistem, sangat penting untuk memahami perangkat keras dan perangkat lunak yang diperlukan agar penelitian berjalan sesuai dengan tujuan

yang ditetapkan. Komponen input, seperti motor servo, sensor suhu DS18B20, dan termoelektrik Peltier, digunakan untuk mengukur dan mengontrol suhu es krim dalam wadah pendingin. Data dari komponen ini diproses oleh Arduino Uno, yang mengirimkan hasil pengolahan ke Arduino IDE untuk pemrograman lebih lanjut. Hasil pemrosesan data suhu kemudian ditampilkan secara real-time pada LCD 16x2, memberikan informasi suhu yang terus diperbarui kepada pengguna. Selain itu, penulis juga mempertimbangkan koneksi internet sebagai faktor yang dapat memengaruhi pengambilan data, seperti potensi delay atau error akibat disconnection. Oleh karena itu, penulis mengantisipasi masalah ini dengan memastikan koneksi yang baik untuk kelancaran pengambilan dan pengolahan data.

Untuk perancangan perangkat lunak, sistem kontrol otomatis yang digunakan dalam prototipe ini bergantung pada Arduino IDE. Software ini digunakan untuk mengembangkan kode program yang mengendalikan suhu berdasarkan data yang diperoleh dari sensor suhu DS18B20 dan untuk menampilkan data suhu secara langsung pada LCD. Arduino IDE adalah software open-source yang memungkinkan pengguna untuk membuat, mengedit, dan mengunggah kode program ke Arduino Uno, yang berfungsi sebagai penghubung data antara sensor dan tampilan output. User interface dari Arduino IDE, yang ditunjukkan pada Gambar 4, mempermudah proses pengkodean dan pengoperasian mikrokontroler.



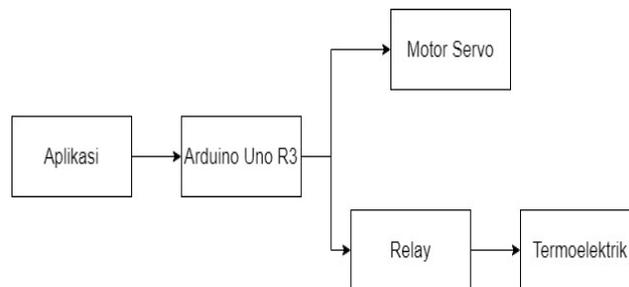
Gambar 4 Software Arduino IDE

Gambar 4 menunjukkan Arduino IDE yang digunakan untuk menulis dan mengedit kode program. Pada tampilan ini, bagian pertama adalah fungsi `setup()`, yang digunakan untuk menginisialisasi pengaturan awal perangkat keras, seperti pengaturan pin pada motor servo, sensor suhu, dan relay. Fungsi `loop()` akan menjalankan kode secara berulang, memantau suhu dalam wadah es krim, dan mengaktifkan atau mematikan komponen sesuai dengan logika kontrol yang telah diprogram. Dengan menggunakan Arduino IDE, peneliti dapat dengan mudah mengontrol pengoperasian sistem secara otomatis dan efisien.

Pada penelitian ini, pengendalian suhu dalam sistem pendingin es krim otomatis berbasis termoelektrik dilakukan menggunakan Arduino Uno R3 sebagai pusat kendali utama. Arduino Uno R3 menerima instruksi dari aplikasi dan data yang diterima dari sensor suhu DS18B20. Berdasarkan data suhu yang diperoleh, Arduino Uno R3 kemudian mengendalikan dua komponen utama, yaitu motor servo dan relay. Motor servo bertanggung jawab untuk membuka dan menutup wadah es krim secara otomatis, sedangkan relay mengontrol aliran arus ke modul termoelektrik Peltier, yang digunakan untuk mengatur suhu dalam wadah es krim.

Alur konektivitas antara komponen-komponen ini sangat penting untuk memastikan bahwa seluruh sistem dapat beroperasi dengan efisien dan sesuai dengan kondisi yang

diinginkan. Sistem pendingin ini dirancang untuk bekerja secara otomatis berdasarkan suhu yang telah terdeteksi, dengan tujuan menjaga kualitas es krim dalam kondisi optimal. Untuk menggambarkan lebih jelas bagaimana sistem ini berfungsi, berikut ini ditampilkan Gambar 5, yang menggambarkan alur konektivitas antara aplikasi, Arduino Uno R3, motor servo, relay, dan termoelektrik.



Gambar 5 Diagram Alur Konektivitas Arduino Uno

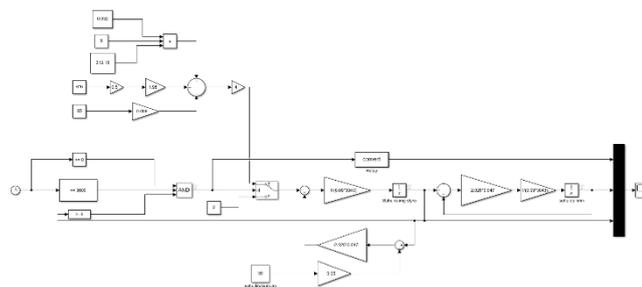
Gambar 5 memperlihatkan alir konektivitas antara aplikasi, Arduino Uno R3, motor servo, relay, dan termoelektrik dalam prototipe sistem pendingin es krim otomatis. Dalam gambar tersebut, alur dimulai dengan aplikasi yang mengirimkan perintah ke Arduino Uno R3. Arduino Uno R3 bertindak sebagai pengendali utama yang memproses data dan instruksi untuk mengendalikan motor servo dan relay. Motor servo digunakan untuk membuka dan menutup wadah es krim secara otomatis, sementara relay berfungsi untuk mengaktifkan atau mematikan modul termoelektrik (Peltier) berdasarkan pengaturan suhu yang telah ditentukan.

Pada tahap perancangan perangkat keras, penelitian ini menggunakan beberapa komponen utama untuk mendukung sistem pendingin es krim otomatis berbasis termoelektrik. Salah satu komponen utama adalah motor servo, yang berfungsi untuk membuka dan menutup wadah es krim secara otomatis. Motor servo ini diintegrasikan dengan mikrokontroler Arduino Uno, yang memungkinkan sistem beroperasi dengan efisien sesuai dengan data yang dibutuhkan dalam penelitian. Sistem ini juga dilengkapi dengan sensor suhu DS18B20 tipe waterproof, yang digunakan untuk mendeteksi suhu dalam wadah es krim. Sensor ini terhubung langsung dengan mikrokontroler untuk memungkinkan pengaturan suhu secara otomatis, yang kemudian ditampilkan pada LCD 16x2. Modul termoelektrik Peltier digunakan sebagai elemen pendingin untuk menghasilkan suhu rendah di dalam wadah, menjaga es krim tetap dalam kondisi beku. Untuk mengatur suhu secara otomatis, sistem ini menggunakan relay yang berfungsi sebagai saklar otomatis, mengaktifkan atau mematikan elemen pendingin sesuai dengan suhu yang terdeteksi. Selain itu, suplai daya yang dibutuhkan untuk mengoperasikan sistem ini adalah 12V DC, yang diperoleh dengan mengubah tegangan AC 220V menjadi DC 12V, memastikan bahwa semua komponen dapat berfungsi dengan maksimal.

Pada tahap simulasi sistem, sebelum melakukan pengujian fisik, dilakukan simulasi untuk menganalisis dan mengevaluasi kinerja sistem kendali otomatis. Simulasi ini bertujuan untuk menyempurnakan desain dan menyesuaikan parameter kontrol yang diperlukan.

Proses simulasi menggunakan fitur SIMULINK dalam perangkat lunak MATLAB, yang memungkinkan representasi perilaku keseluruhan sistem, mulai dari pembacaan suhu oleh sensor hingga pengendalian elemen pendingin melalui mekanisme relay. Dalam simulasi ini, ada dua pendekatan utama yang diuji: pertama, sistem yang menggunakan kendali relay berbasis logika ON/OFF, yang mengaktifkan elemen pendingin ketika suhu melampaui ambang batas dan memutuskan aliran daya ketika suhu turun; dan kedua, sistem yang menggunakan kendali Proportional-Integral-Derivative (PID) untuk mengoptimalkan kestabilan suhu dan efisiensi energi. Meskipun kendali relay sederhana lebih mudah diimplementasikan, metode PID menawarkan kestabilan suhu yang lebih baik dan efisiensi energi yang lebih tinggi.

Pada penelitian ini, sistem pendingin es krim otomatis berbasis termoelektrik menggunakan metode kontrol sederhana berbasis relay digital untuk mengatur suhu dalam wadah es krim. Proses pengaturan suhu dilakukan dengan membandingkan data suhu yang diperoleh dari sensor dengan ambang batas yang telah diprogram. Ketika suhu melampaui batas yang ditetapkan, sistem secara otomatis mengaktifkan modul termoelektrik untuk menurunkan suhu dan menjaga kualitas es krim tetap terjaga. Sebagai bagian dari simulasi sistem, digunakan logika ON/OFF berbasis relay untuk memudahkan pengendalian komponen pendingin. Untuk lebih jelasnya, berikut ini adalah Gambar 6, yang menunjukkan blok diagram sistem pendingin dengan kontrol relay.

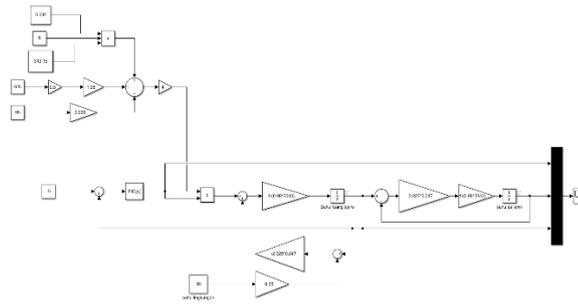


Gambar 6 Blok Diagram Sistem Pendingin dengan Kontrol Relay

Gambar 6 menggambarkan blok diagram sistem pendingin yang menggunakan kontrol relay dalam mengendalikan suhu dalam wadah es krim. Dalam diagram ini, data suhu yang diperoleh dari sensor suhu diproses dan dibandingkan dengan ambang batas yang telah ditetapkan. Jika suhu melebihi batas yang ditentukan, relay akan mengaktifkan modul termoelektrik, yang akan menurunkan suhu di dalam wadah es krim. Kontrol relay bekerja berdasarkan logika ON/OFF, dengan relay berfungsi sebagai saklar yang menghubungkan atau memutuskan aliran daya ke elemen pendingin. Sistem ini juga mencakup tampilan suhu pada LCD atau perangkat lain yang memungkinkan pemantauan suhu secara real-time. Dengan menggunakan metode ini, sistem dapat berfungsi otomatis, memastikan suhu es krim tetap pada tingkat yang optimal tanpa memerlukan intervensi manual.

Dalam merancang sistem kendali berbasis logika digital atau kendali umpan balik, diperlukan pemodelan dan simulasi yang akurat untuk memastikan bahwa sistem dapat berfungsi secara optimal. Salah satu metode yang sering digunakan dalam analisis dan pengujian sistem semacam ini adalah dengan menggunakan diagram blok. Diagram ini merepresentasikan aliran data dan proses logika yang terjadi di dalam sistem secara visual, sehingga memudahkan analisis performa maupun identifikasi potensi kesalahan. Gambar

berikut ini menunjukkan salah satu bentuk implementasi pemodelan sistem kendali berbasis blok diagram yang umum digunakan dalam lingkungan simulasi seperti MATLAB Simulink.



Gambar 7 Blok Diagram Sistem Pendingin dengan Kendali Kontrol PID

Pada gambar 7, terlihat bagaimana sinyal masukan diproses melalui berbagai elemen logika, termasuk pemilih (mux), penguat, serta unit logika kontrol. Rangkaian ini juga mencakup elemen feedback yang memungkinkan sistem melakukan penyesuaian terhadap output secara otomatis berdasarkan input yang diterima. Tujuan utama dari struktur ini adalah untuk menjaga kestabilan dan ketepatan output sistem, meskipun terjadi perubahan kondisi di lingkungan atau beban sistem. Dengan pendekatan ini, sistem mampu memberikan performa yang lebih responsif dan adaptif sesuai kebutuhan operasional.

Pada tahap pengujian sistem, komponen-komponen utama seperti sensor dan motor servo diuji untuk memastikan bahwa semua bagian berfungsi dengan baik dan sesuai dengan spesifikasi yang telah ditentukan. Pengujian dilakukan dengan cermat untuk memeriksa ketepatan dan kecermatan sistem dalam mengukur variabel yang relevan. Hasil dari pengujian ini kemudian dianalisis untuk menentukan koefisien yang mengindikasikan keberhasilan atau kegagalan sistem, yang menjadi indikator utama dalam menilai keberhasilan penelitian secara keseluruhan. Pengambilan data dilakukan dengan mengumpulkan hasil pengujian dari berbagai komponen yang diuji.

Data yang diperoleh kemudian dicatat dalam format yang sesuai untuk memudahkan pengolahan lebih lanjut. Analisis terhadap data ini penting untuk menemukan pola atau tren yang dapat menjelaskan performa sistem. Dengan data yang terkumpul, peneliti dapat menarik kesimpulan yang lebih jelas tentang efektivitas sistem yang diuji serta potensi untuk pengembangan lebih lanjut. Pengolahan data dilakukan untuk mengevaluasi beban daya total yang digunakan oleh rangkaian sistem. Dengan menggunakan persamaan tertentu, perhitungan daya total akan dilakukan untuk memastikan bahwa konsumsi daya dalam sistem berada pada tingkat yang efisien dan tidak melebihi batas yang diinginkan. Analisis beban daya ini penting untuk memahami seberapa optimal sistem bekerja dalam konteks penggunaan energi.

$$P = V \cdot A \quad (1)$$

Keterangan:

P = Beban Daya

V = Tegangan

A = Arus

Panas jenis es krim populaire didasarkan pada pendekatan empiris yang mengacu

pada komposisi kimianya, yang dapat dijelaskan melalui persamaan (2) sebagai berikut.

$$C_p = X_n \cdot C_{p,n} \quad (2)$$

Keterangan:

C_p = Kapasitas panas jenis benda (J/g.°C)

X_n = Fraksi komponen

$C_{p,n}$ = Panas jenis masing-masing komponen (J/g.°C)

Untuk menentukan koefisien perpindahan panas konveksi (hhh) dalam proses pendinginan udang, pendekatan yang sering digunakan adalah berdasarkan hukum pendinginan Newton, yang dijelaskan melalui persamaan (3), (4), dan (5) berikut ini.

$$q = h \cdot A (T - T_\infty) \quad (3)$$

$$q = m \cdot C_p \cdot \frac{dT}{dt} \quad (4)$$

Persamaan turunan:

$$h = \frac{q}{A \cdot (T - T_\infty)} \quad (5)$$

Keterangan:

q = Laju perpindahan panas (W)

h = Koefisien perpindahan panas (W/m².°C)

A = Luas Permukaan *Styrofoam* (m²)

C_p = Kapasitas panas jenis benda (J/g.°C)

T = Suhu permukaan es krim (°C)

T_∞ = Suhu medium es krim (°C)

$\frac{dT}{dt}$ = Laju perubahan suhu terhadap waktu (°C/s)

Hubungan antara konsumsi daya pada modul Peltier dan perbedaan suhu (ΔT Delta T) yang dihasilkannya bersifat nonlinier dan kompleks, karena melibatkan efek termoelektrik, konduksi panas, serta efisiensi dalam proses pendinginan. Persamaan (6) dan (7) dapat digunakan untuk menggambarkan hubungan tersebut, sebagai berikut.

$$Q_c = \alpha I T_c - \frac{1}{2} I^2 R - K \cdot \Delta T \quad (6)$$

$$P = I^2 R + \alpha I \cdot \Delta T \quad (7)$$

Keterangan:

Q_c = Panas yang diserap sisi dingin (Watt)

P = Total daya Listrik (Watt)

I = Arus Listrik modul (Ampere)

R = Resistansi modul (Ohm)

α = Koefisien seebeck total (V/K)

T_c = Suhu sisi dingin (C)

ΔT = Selisih suhu sisi panas dan dingin (C)

K = Konduktansi termal antara kedua sisi (W/K)

Untuk menghitung durasi waktu yang diperlukan agar suhu suatu benda berubah akibat perpindahan panas, digunakan pendekatan analisis sistem terpusat (*lumped system analysis*). Pendekatan ini berasumsi bahwa suhu di seluruh bagian benda tetap seragam

selama proses perpindahan panas, sehingga perubahan suhu dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (11) berikut.

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{hA}{mC_p} (T - T_\infty) \tag{8}$$

Integrasi persamaan:

$$\int_{T_0}^T \frac{dT}{T-T_\infty} = -\frac{hA}{mC_p} \int_0^T dt \tag{9}$$

$$\ln\left(\frac{T-T_\infty}{T_0-T_\infty}\right) = -\frac{hA}{mC_p} t \tag{10}$$

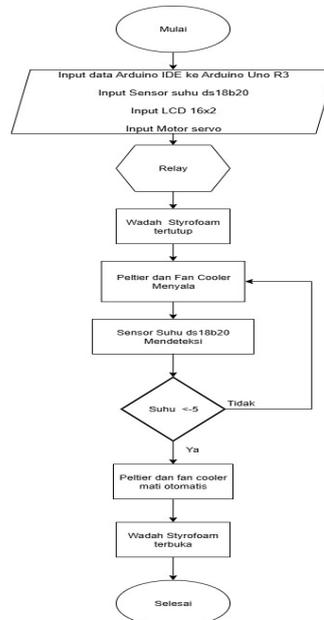
Persamaan turunan:

$$t = -\frac{mC_p}{hA} \ln\left(\frac{T-T_\infty}{T_0-T_\infty}\right) \tag{11}$$

Keterangan:

- T_0 = Suhu Awal benda ($^{\circ}\text{C}$)
- T = Suhu akhir benda yang diinginkan ($^{\circ}\text{C}$)
- T_∞ = Suhu lingkungan ($^{\circ}\text{C}$)
- A = Luas permukaan benda (m^2)
- m = Massa benda (g)
- h = Koefisien perpindahan panas konveksi ($\text{W}/\text{m}^2.\text{^{\circ}\text{C}}$)
- C_p = Kapasitas panas jenis benda ($\text{J}/\text{g}.\text{^{\circ}\text{C}}$)
- $\frac{dT}{dt}$ = Laju perubahan suhu terhadap waktu ($^{\circ}\text{C}/\text{s}$)

Perancangan flowchart Sistem Pendingin bertujuan untuk membuat proses kerja sistem menjadi lebih terstruktur dan mudah dipahami, sehingga mempermudah dalam merancang dan mengimplementasikan sistem tersebut. Flowchart dari sistem ini dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8 Flowchart Sistem Pendingin

Berdasarkan Flowchart Sistem Pendingin pada Gambar 8, tahapan pertama dalam sistem prototipe dimulai dengan menginput data dari Arduino IDE ke dalam Arduino Uno,

serta menghubungkan sensor suhu DS18B20 untuk mendeteksi suhu di dalam wadah. Relay berfungsi sebagai saklar otomatis yang digunakan untuk menyalakan dan mematikan sistem pendingin dalam wadah tersebut. Selama sensor suhu mendeteksi bahwa suhu belum mencapai -5 derajat Celsius, sistem pendingin akan tetap beroperasi berdasarkan perintah dari Arduino. Namun, ketika sensor mendeteksi suhu melebihi -5 derajat Celsius, sistem pendingin akan dimatikan, meskipun sensor suhu tetap aktif memantau suhu dalam wadah karena terhubung langsung ke Arduino, bukan melalui relay. Jika suhu kembali turun di bawah -5 derajat Celsius, sistem pendingin akan menyala kembali, dan proses ini akan berulang. Selain itu, jika es krim sudah membeku, laci pendingin akan terbuka, sementara jika es krim masih belum beku, laci akan tetap tertutup. Proses ini berlangsung secara berkelanjutan untuk memastikan suhu dalam sistem pendingin tetap stabil dan sesuai dengan kondisi yang diinginkan.

Hasil dan Pembahasan

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan, prototype sistem pendingin es krim otomatis ini menggunakan teknologi termoelektrik berbasis Arduino Uno. Gambar 8 menunjukkan desain dan pengujian prototipe yang terdiri dari wadah miniatur berbentuk balok persegi panjang. Wadah ini dibangun menggunakan dua lembar gabus (styrofoam), dengan satu sisi digunakan untuk menempatkan komponen kelistrikan, yang terletak di bagian bawah perangkat. Setiap komponen dalam sistem ini memiliki peran penting untuk mendukung kinerja prototipe yang optimal. Sensor suhu pada termoelektrik berfungsi untuk mengukur suhu di dalam wadah es krim. Data suhu yang terdeteksi kemudian diproses oleh algoritma yang diprogram dalam ARDUINO IDE dan ditampilkan pada LCD 16x2 untuk memberikan informasi suhu pada wadah. Berdasarkan informasi tersebut, relay akan secara otomatis mengaktifkan atau mematikan termoelektrik untuk menjaga suhu es krim tetap sesuai dengan yang diinginkan.



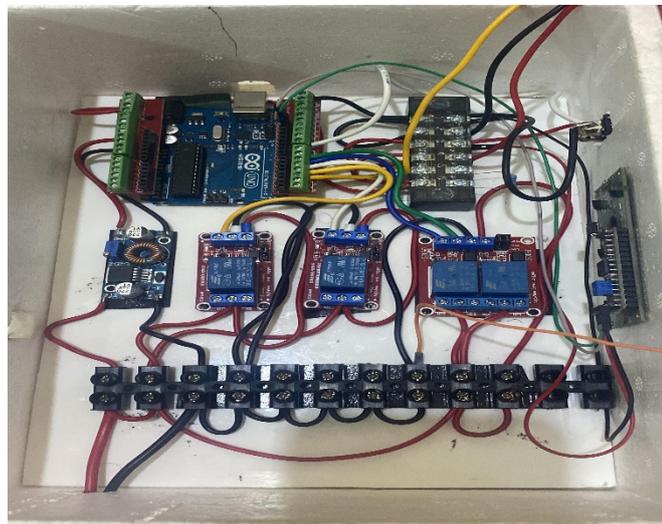
Gambar 9 Prototipe Pendingin es krim otomatis

Tampilan utama pada Gambar 10 menunjukkan hasil dari program Arduino yang berfungsi sebagai sistem monitoring untuk semua komponen dalam prototipe penelitian. Data yang ditampilkan mencakup suhu di dalam wadah es krim, yang selalu dijaga sesuai dengan nilai yang diinginkan. Sistem ini memungkinkan pemantauan suhu secara real-time, sehingga kinerja prototipe dapat terkontrol dengan baik.



Gambar 10 Tampilan suhu pada wadah es krim

Sistem kinerja pada prototype sistem pendingin es krim otomatis diuji pada berbagai waktu, yakni pagi hari, siang hari, dan sore hari, sesuai dengan kebutuhan yang diinginkan. Proses dimulai dengan *power supply* yang mengalirkan arus listrik untuk mengoperasikan Arduino Uno sebagai sistem kontrol utama. Arduino Uno kemudian mengelola operasional sistem menggunakan relay sebagai saklar otomatis. Sistem ini berfungsi untuk mengatur nyala dan matinya komponen berdasarkan sinyal yang diterima dari sensor suhu. Sinyal tersebut diproses melalui kode yang ditulis di software Arduino IDE, yang menentukan kapan termoelektrik harus aktif atau non-aktif sesuai dengan suhu yang telah ditetapkan. Tampilan kinerja sistem ini dapat dilihat pada Gambar 11.



Gambar 11 sistem prototype pendingin es krim otomatis

Pada Gambar 11, terlihat sistem kinerja sistem secara nyata, yang menunjukkan bagaimana semua komponen bekerja bersama-sama. Di bagian kanan, tampak LCD 16x2, yang juga diperlihatkan pada Gambar 10, yang menampilkan suhu secara real-time. Di bagian bawah kiri, terpasang Arduino Uno yang terhubung dengan step-down converter untuk menurunkan tegangan dari 12V power supply menjadi 5V, memastikan bahwa sistem dapat beroperasi

secara optimal. Tiga buah relay digunakan sebagai saklar otomatis untuk mengontrol operasi termoelektrik peltier, dengan sinyal logika yang diterima dari Arduino Uno. Di bawah step-down converter, terdapat modul terminal shield yang memudahkan penyambungan kabel. Di sebelah kanan Arduino Uno, terdapat terminal blok distribusi yang berfungsi untuk merapikan dan menyederhanakan sambungan kabel dari sensor suhu DS18B20, saklar switch, dan LCD 16x2. Semua rangkaian ini diletakkan dalam kotak styrofoam bagian bawah untuk melindungi dan merapikan komponen-komponen tersebut.

Pengolahan dan analisis data dilakukan untuk membandingkan hasil perhitungan teoritis dengan data yang diperoleh dari pengujian langsung. Tujuan dari perhitungan ini adalah untuk memungkinkan analisis yang lebih mendalam mengenai kinerja sistem pendingin es krim otomatis, serta untuk memastikan akurasi dan efektivitasnya. Perhitungan panas yang diserap oleh sisi dingin (Q_c) dan konsumsi daya modul peltier (P) dilakukan dengan menggunakan rumus-rumus berikut: (6) dan (7), yang akan digunakan untuk menganalisis efisiensi energi dari sistem ini.

Diketahui:

$$\alpha = 0,032 \text{ V/K}$$

$$K = 0,006 \text{ W/K}$$

$$I = 6 \text{ A}$$

$$R = 1,98 \text{ } \Omega$$

$$T_c = 40^\circ\text{C} = 313,15 \text{ K}$$

$$T_h = 105^\circ\text{C} = 378,15 \text{ K}$$

$$\Delta T = 65 \text{ K}$$

$$Q_c = \alpha I T_c - \frac{1}{2} I^2 R - K \cdot \Delta T \quad (6)$$

$$Q_c = 0,032 \cdot 6 \cdot 313,15 - \frac{1}{2} 6^2 \cdot 1,98 - 0,006 \cdot 65$$

$$Q_c = 60,124 - 35,64 - 0,39$$

$$Q_c = 24,0948 \text{ W}$$

$$P = I^2 R + \alpha I \cdot \Delta T \quad (7)$$

$$P = 6^2 \cdot 1,98 + 0,032 \cdot 6 \cdot 65$$

$$P = 71,28 + 12,48$$

$$P = 83,76 \text{ W}$$

Berdasarkan perhitungan terhadap panas yang diserap di sisi dingin dan konsumsi daya dari modul peltier, diperoleh nilai Q_c sebesar 24,0948 W dan daya listrik (PP) sebesar 83,776 W. Hasil ini menunjukkan bahwa untuk setiap perubahan suhu di sisi dingin, diperlukan daya sebesar 83,76 W. Namun, setelah suhu mencapai titik tertentu, penambahan arus hanya akan meningkatkan konsumsi daya listrik tanpa memberikan peningkatan pendinginan yang sebanding. Dengan demikian, kedua hasil perhitungan ini tidak menunjukkan hubungan yang langsung, melainkan menggambarkan bahwa efisiensi sistem cenderung menurun seiring

dengan bertambahnya perbedaan suhu (ΔT).

Untuk perhitungan panas jenis es krim, percobaan ini menggunakan jenis es krim yang berwadah plastik, yaitu Populaire. Panas jenis es krim Populaire dihitung dengan merujuk pada pendekatan empiris berdasarkan komposisi bahan pembuatannya. Komposisi bahan pada jenis es krim Populaire dapat dilihat pada Tabel 1.

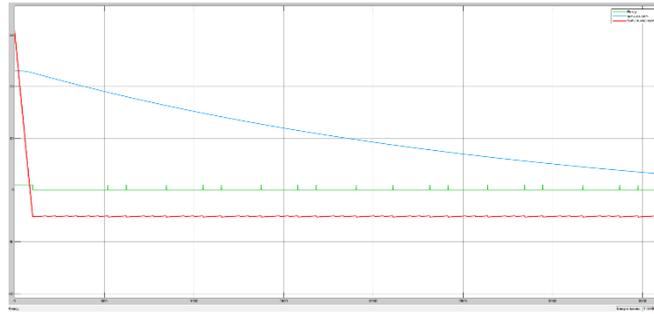
Tabel 1 Komposisi Bahan Es Krim Populaire

Bahan yang terkandung	Presentase (%)	Rata-rata (%)
Air	55 - 64 %	60 %
Gula	10%	10 %
Lemak	3,73%	3,73 %
Padatan susu	8,6%	8,6 %

Tabel 1 menunjukkan komposisi bahan yang terkandung dalam es krim Populaire, yang digunakan dalam percobaan ini. Berdasarkan tabel 1, dapat dilihat bahwa air merupakan bahan utama dengan presentase berkisar antara 55% hingga 64%, dengan rata-rata 60%. Gula menyumbang 10%, sedangkan lemak sebesar 3,73%. Padatan susu dalam es krim ini tercatat sebesar 8,6%.

Setelah melihat komposisi bahan dalam es krim Populaire pada Tabel 1, kita dapat memperkirakan nilai panas jenis es krim berdasarkan persentase bahan yang terkandung di dalamnya. Panas jenis es krim akan dipengaruhi oleh kandungan air, gula, lemak, dan padatan susu, yang masing-masing memiliki nilai spesifik dalam proses perubahan suhu. Pendekatan empiris ini memungkinkan kita untuk lebih memahami bagaimana komposisi bahan mempengaruhi performa pendinginan dan konsumsi daya dalam sistem pendingin es krim otomatis.

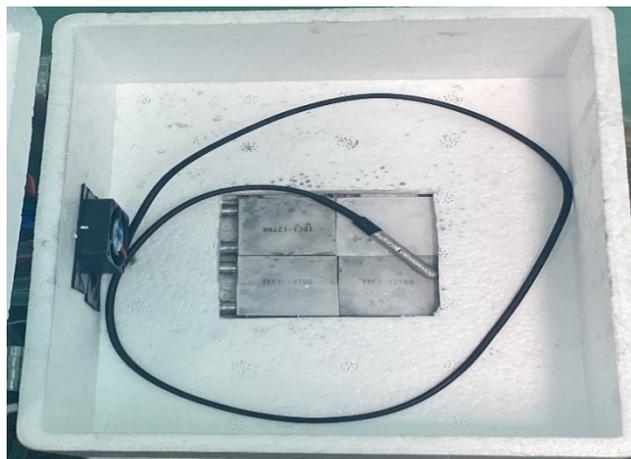
Simulasi kontrol otomatis dilakukan untuk menguji kinerja sistem pendingin udang yang dirancang menggunakan mikrokontroler Arduino Uno, sensor suhu DS18B20, modul pendingin TEC-12706, dan relay sebagai aktuator. Tujuan utama dari simulasi ini adalah untuk membandingkan dua metode pengendalian, yaitu kontrol ON/OFF berbasis relay digital dan kontrol PID (*Proportional-Integral-Derivative*), dalam menjaga suhu ruang pendingin agar tetap stabil sesuai dengan suhu yang diinginkan. Simulasi dibangun menggunakan platform MATLAB Simulink, dengan mempertimbangkan karakteristik termal ruang dan mekanisme perpindahan panas antara lingkungan, ruang pendingin, dan sistem pendingin. Parameter yang digunakan dalam simulasi ini diperoleh melalui perhitungan berdasarkan persamaan yang telah disusun sebelumnya. Hasil simulasi ini akan memberikan gambaran tentang efisiensi dan stabilitas kinerja sistem pendingin, serta dapat menjadi acuan untuk pengendalian lebih lanjut.



Gambar 12 grafik sinyal output kontrol kendali otomatis dengan relay

Grafik yang ditunjukkan pada Gambar 12 menggambarkan hasil dari simulasi kontrol otomatis pada sistem pendingin udang, yang melibatkan pengaturan suhu dengan menggunakan sistem kontrol ON/OFF. Pada grafik ini, ada tiga kurva yang masing-masing mewakili aspek berbeda dari sistem yang dianalisis. Kurva merah menunjukkan suhu ruang pendingin, yang mulai turun secara tajam setelah sistem pendingin diaktifkan dan akhirnya stabil di sekitar suhu yang diinginkan. Kurva biru merepresentasikan suhu ideal atau setpoint, yang berfungsi sebagai target yang ingin dicapai oleh sistem untuk menjaga suhu tetap dalam batas yang aman bagi udang. Sementara itu, kurva hijau menggambarkan status dari sistem pendingin, dengan perubahan yang menunjukkan kapan sistem berada dalam kondisi aktif atau tidak aktif (ON/OFF). Grafik ini menunjukkan bahwa meskipun sistem berhasil menurunkan suhu sesuai target, fluktuasi kecil yang terlihat pada suhu akhir mengindikasikan bahwa kontrol ON/OFF kurang halus, yang dapat menyebabkan variasi suhu kecil sekitar titik stabilnya. Simulasi ini memberi gambaran tentang bagaimana sistem pendingin beroperasi dan memberikan wawasan tentang efisiensi kontrol yang diterapkan untuk menjaga suhu tetap optimal.

Uji kinerja sistem dilakukan untuk mengevaluasi operasional sistem yang telah dirancang dan untuk memastikan bahwa output yang dihasilkan sesuai dengan rencana awal. Pengujian ini dilakukan dalam dua percobaan, yang bertujuan untuk mengukur suhu ruang, suhu es krim, serta respons otomatis sistem. Pengujian suhu ruang bertujuan untuk menguji ketepatan sistem dalam menjalankan fungsi otomatisnya, termasuk menyalakan (ON), mematikan (OFF), dan menyalakan kembali (ON) berdasarkan suhu yang terdeteksi. Sistem dirancang agar aktif saat suhu ruang lebih dari -5°C dan nonaktif saat suhu kurang dari -5°C . Pengujian ini dilakukan pada rentang waktu pukul 13.00 hingga 14.00, dengan pengambilan data setiap 10 menit sekali. Hasil dari pengujian suhu ruang dapat dilihat pada Gambar 13.



Gambar 13 Pengujian Suhu Ruang sistem pendingin otomatis

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan, prototype sistem pendingin es krim otomatis berbasis termoelektrik menunjukkan performa yang cukup efektif dalam menurunkan suhu es krim secara bertahap hingga mendekati suhu beku. Sistem ini mampu membaca suhu secara real-time dan menampilkannya di LCD, serta merespons suhu dengan mekanisme ON/OFF berdasarkan sinyal dari sensor suhu DS18B20.

Pengujian suhu ruang menunjukkan bahwa sistem pendingin dapat menjaga suhu ruang dalam wadah es krim pada kisaran suhu yang telah ditentukan secara otomatis, yaitu sekitar -5°C . Respon relay terhadap pembacaan sensor suhu DS18B20 sangat akurat, ditandai dengan nyala dan matinya modul pendingin sesuai dengan suhu yang telah diprogram. Sistem kontrol ON/OFF menunjukkan respon yang cepat terhadap perubahan suhu, meskipun menghasilkan fluktuasi suhu yang relatif tinggi. Hal ini sesuai dengan karakteristik kontrol ON/OFF yang bekerja secara biner, tanpa mempertimbangkan perubahan suhu bertahap menuju suhu target.

Dalam pengujian suhu es krim, sistem berhasil menurunkan suhu es krim dari $23,75^{\circ}\text{C}$ menjadi $6,31^{\circ}\text{C}$ dalam waktu 60 menit. Meskipun suhu ini belum mencapai titik beku optimal untuk es krim, penurunan suhu yang konsisten menunjukkan bahwa sistem mampu memberikan efek pendinginan yang signifikan. Terutama dengan mempertimbangkan keterbatasan ukuran dan daya dari prototype yang digunakan. Dalam penggunaan sehari-hari, seperti oleh pedagang es krim keliling atau konsumen individu, penurunan suhu ini sudah cukup untuk menjaga kualitas tekstur dan rasa es krim selama beberapa jam.

Efektivitas sistem juga dibuktikan melalui perhitungan panas yang diserap oleh sisi dingin modul Peltier. Berdasarkan perhitungan kapasitas panas jenis es krim populair sebesar $3043 \text{ J/kg}^{\circ}\text{C}$, diperoleh gambaran energi yang diperlukan untuk menurunkan suhu es krim. Data ini digunakan untuk menghitung koefisien perpindahan panas dan estimasi waktu pendinginan. Koefisien perpindahan panas konveksi yang diperoleh sebesar $2,025 \text{ W/m}^2\text{.}^{\circ}\text{C}$ menunjukkan nilai yang relatif rendah, yang mengindikasikan laju perpindahan panas pada permukaan es krim masih terbatas. Hal ini bisa disebabkan oleh kurangnya sirkulasi udara di dalam wadah serta karakteristik material isolator seperti styrofoam, yang cenderung memperlambat pelepasan panas.

Dalam hal kontrol, perbandingan antara simulasi kontrol relay dan PID memberikan wawasan penting untuk perancangan sistem. Simulasi kontrol PID, setelah dilakukan tuning

parameter, menunjukkan hasil yang jauh lebih stabil dibandingkan kontrol relay. Overshoot suhu yang besar pada kontrol ON/OFF dapat dihindari dengan menggunakan PID, sehingga suhu target dapat dipertahankan dalam jangka panjang tanpa fluktuasi yang signifikan. Hal ini terlihat pada grafik simulasi yang menunjukkan kestabilan suhu pada titik -5°C setelah sekitar 2 jam. Dengan demikian, kontrol PID lebih unggul untuk menjaga suhu tetap konstan dan sesuai dengan kebutuhan.

Namun, dalam pengujian nyata, sistem pendingin tetap menggunakan kontrol ON/OFF. Ini disebabkan oleh keterbatasan perangkat keras dan kemampuan mikrokontroler dalam mengimplementasikan kontrol PID secara real-time dengan presisi tinggi. Oleh karena itu, untuk penelitian lanjutan, pengembangan algoritma PID berbasis mikrokontroler yang lebih canggih, seperti ESP32 atau Raspberry Pi, bisa menjadi alternatif yang lebih baik.

Konsumsi daya selama pengujian menunjukkan efisiensi sistem secara keseluruhan. Nilai konsumsi daya berkisar antara 299 W hingga 301 W, yang menunjukkan stabilitas suplai daya yang baik selama pengujian. Konsumsi daya yang relatif stabil ini juga menunjukkan bahwa sistem kelistrikan telah dirancang dengan baik, khususnya dalam penggunaan step-down converter dan distribusi arus pada terminal kabel. Selain itu, LCD 16x2 sebagai tampilan suhu menambah nilai ergonomis dan kemudahan penggunaan pada sistem.

Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem pendingin es krim otomatis berbasis termoelektrik ini berfungsi sesuai dengan harapan. Respon otomatis terhadap suhu, kestabilan konsumsi daya, dan efektivitas penurunan suhu menjadikan sistem ini praktis digunakan di lapangan. Sistem pendingin ini sangat cocok digunakan oleh pelaku usaha kecil yang membutuhkan solusi pendinginan portabel untuk menjaga kualitas produk es krim dalam waktu tertentu. Selain itu, sistem ini juga mendukung konsep sistem pendingin yang hemat energi dan ramah lingkungan karena tidak menggunakan bahan pendingin seperti freon.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian mengenai Perancangan dan Pengujian Prototype Sistem Pendingin Es Krim Otomatis Menggunakan Termoelektrik Berbasis Arduino Uno, dapat disimpulkan sebagai berikut: (1) Prototype sistem pendingin es krim otomatis berhasil dikembangkan dengan mengintegrasikan beberapa komponen utama, seperti sensor suhu DS18B20, modul pendingin termoelektrik TEC-12706, relay, motor servo, dan LCD 16x2. Semua komponen ini dikendalikan secara otomatis melalui pemrograman pada Arduino IDE dan disusun dalam wadah yang terbuat dari bahan styrofoam yang memiliki sifat isolatif. (2) Sistem pendingin otomatis menunjukkan performa yang sesuai dengan logika kontrol yang telah diprogram. Sistem ini mampu mengatur nyala dan mati-nya pendingin secara otomatis berdasarkan batas suhu yang telah ditentukan, yaitu sistem menyala ketika suhu lebih dari -5°C dan mati ketika suhu kurang dari -5°C . Sistem monitoring suhu melalui LCD berjalan dengan baik, memberikan informasi suhu secara real-time. Pada pengujian performa pendinginan, suhu ruang berhasil turun dari $31,44^{\circ}\text{C}$ menjadi sekitar 0°C dalam waktu 10 menit, sedangkan suhu es krim turun dari $23,75^{\circ}\text{C}$ menjadi $18,84^{\circ}\text{C}$ dalam waktu yang sama. Meskipun suhu es krim belum mencapai titik beku ideal, sistem ini terbukti efektif dalam memperlambat pencairan es krim dan menjaga kualitasnya dalam jangka waktu tertentu.

Referensi

- Abdul, M., Madagaskar, M., L., & Sukarmansyah. (2022). Perancangan Sistem Ukur Uji Konduktivitas Termal Bahan Laboratorium Fenomena Dasar Program Studi Teknik Mesin. *Jurnal Desiminasi Teknologi*, 10(2), 102–107. <https://univ-tridianti.ac.id/ejournal/index.php/teknik/article/view/940>
- Agus Salim, A. T., & Indarto, B. (2018). Studi Eksperimental Karakterisasi Elemen Termoelektrik Peltier Tipe TEC. *JEECAE (Journal of Electrical, Electronics, Control, and Automotive Engineering)*, 3(1), 179–182. <https://doi.org/10.32486/jeecae.v3i1.211>
- Biele, J., Grott, M., Zolensky, M. E., Benisek, A., & Dachs, E. (2022). *The specific heat capacity of astro-material I: Review of theoretical concepts, materials and techniques*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1409017/v1>
- Bisau, I. (2023). Rancang Bangun Box Pendingin Minuman Berkapasitas 5 Liter Yang Dilengkapi Dengan Sistem Termoelektrik Dan Tenaga Surya. *Perpustakaan UBT : Universitas Borneo Tarakan*. <https://repository.ubt.ac.id/repository/UBT27-06-2023-092548.pdf>
- Calvin, Irawan, A., & Utama, D. (2013). *Konsep Desain Sistem Kontrol Pada Perancangan Segway*. 9(2), 117. <https://journal.untar.ac.id/index.php/teknologi/article/view/257>
- Duda, P. (2023). Heat Transfer Coefficient Distribution—A Review of Calculation Methods. Dalam *Energies* (Vol. 16, Nomor 9). MDPI. <https://doi.org/10.3390/en16093683>
- Husna, N., Amri, C., Kemenkes Yogyakarta, P., & Tatabumi, J. (2021). Penggunaan Tudung Saji Insulator untuk Memperpanjang Masa Simpan Produk Es Krim. *Jurnal Kesehatan Lingkungan*, 13(1), 1–5. <http://journalsanitasi.keslingjogja.net/index.php/sanitasi>
- Imam, M., Apriaskar, E., & Djuniadi. (2019). Pengendalian Suhu Air Menggunakan Sensor Suhu Ds18b20. *Jurnal J-Ensitem*, 06(1). <https://jurnal.unma.ac.id/index.php/JE/article/view/2016>
- Kuncoro, H., & Sesario Gustiansyah, B. (2024). Pengaruh Variasi Thermoelectric Terhadap Performa Sistem Pendingin Cooler Box. Dalam *PRESISI* (Vol. 26, Nomor 1). <https://ejournal.istn.ac.id>
- Lienhard, J. H. (2020). *A Heat Transfer Textbook Fifth Edition*. <http://ahtt.mit.edu>
- Martin, F. (2010). *Newton's Law of Cooling – Formula, Examples and Applications _ Quadco Engineering*. <https://www.quadco.engineering/en/know-how/newtons-law-of-cooling.htm?>
- Muhammad, U., Mansur, A., Mukhlisin, Nuardi, & Aditya Bachri Maulana, M. (2021). Rancang Bangun Power Supply Adjustable Current pada Sistem Pendingin Berbasis Termoelektrik. *Journal Of Electrical Engginering (Joule)*, 2(2). <https://jurnal.politeknikbosowa.ac.id/index.php/JOULE/article/view/197>
- Novianti, K., & Darmawati, E. (2010). Mutu Jamur Merang (*Volvariella Volvaceae*) Pasca Thawing Pada Pembekuan Menggunakan Dry Ice. *IPB Repository*. <https://repository.ipb.ac.id/handle/123456789/54335>
- Novriandry, Y., Triyanto, D., & Suhardi. (2020). *Prototype Sistem Monitoring Dan Pengisian Token Listrik Prabayar Menggunakan Arduino Uno Berbasis Website*. <https://jurnal.untan.ac.id/index.php/jcskommipa/article/view/43320>
- Nurjaman, A., & Abidin, Z. (2019). Analisis Mesin Pemutar Es Krim Dengan Sistem Control Timer. *Jurnal Media Teknologi*, 06(01). <https://jurnal.unigal.ac.id/mediateknologi/article/view/2656>
- Parulian, I. S., Pangaribuan, T., & Simamora, A. (2021). Implementasi Kontrol Lup Tertutup Multi Point Pada Pengatur Temperatur Oven Panggang Roti. *Telecommunications & Control System-ELPOTecs Jurnal ELPOTecs*, 4(1).

- <https://ejournal.uhn.ac.id/index.php/elpotecs/article/view/450>
Prihartono, J., & Irhamsyah, R. (2022). Analisis Konduktivitas Termal Pada Material Logam (Tembaga, Alumunium Dan Besi). *PRESISI*, 24(2).
<https://ejournal.istn.ac.id/index.php/presisi/article/view/1322>
- Putra, C. F., & Repi, V. (2015). Perancangan Dan Pembuatan Kotak Pendingin Berbasis Termoelektrik Untuk Aplikasi Penyimpanan Vaksin Dan Obat-Obatan. *Jurnal Ilmiah GIGA*, 18(2), 73–80.
<https://journal.unas.ac.id/giga/article/view/577/460>
- Riffat, S. B., & Ma, X. (2004). Improving the coefficient of performance of thermoelectric cooling systems: A review. *International Journal of Energy Research*, 28(9), 753–768. <https://doi.org/10.1002/er.991>
- Rifky, & Vazri, M. (2022). Pengaruh Sifat Konduktivitas Termal Material Isolator (Kayu, Karet Dan Styrofoam) Terhadap Perpindahan Panas Dan Daya Keluaran Sistem Generator Thermoelectric. *Jurnal Manufaktur, Energi, Material Teknik*, 1(1), 8–15.
<https://journal.uhamka.ac.id/index.php/metalik/article/view/8464>
- Siswanto, A., Sitepu, R., Lestariningsih, D., Agustine, L., Gunadhi, A., & Andyardja, W. (2020). Meja Tulis Adjustable Dengan Konsep Smart Furniture. Dalam *Scientific Journal Widya Teknik* (Vol. 19, Nomor 2).
<https://media.neliti.com/media/publications/549052-none-fd740fd4.pdf>
- Sudrajat, R., & Rofifah, F. (2023). Rancang Bangun Sistem Kendali Kipas Angin dengan Sensor Suhu dan Sensor Ultrasonik Berbasis Arduino Uno. *remik*, 7(1), 555–564.
<https://doi.org/10.33395/remik.v7i1.12082>
- Tark, Z., Hamed, A. J., & Khalifa, A. H. N. (2022). Performance Study of the Thermoelectric Personal Cooler under Different Ambient Temperatures. *International Journal of Heat and Technology*, 40(1), 53–62. <https://doi.org/10.18280/ijht.400107>
- Wardoyo, S., Saepul, J., & Anggoro Suryo Pramudyo. (2013). *Rancang Bangun Sistem Uji Karakteristik Motor DC Servo, Battery, dan Regulator untuk Aplikasi Robot Berkaki*. 2(2). <https://jurnal.untirta.ac.id/index.php/jis/article/view/490>
- Wisjhnuadji, W., & Fauzi, I. (2017). Monitoring Ketinggian Dan Suhu Air Dalam Tangki Berbasis Web Menggunakan Arduino Uno & Ethernet Shield. *ISSN : 1693-9166*, 14(1).