

SISTEM KENDALI PENGERING HELM DAN SEPATU BERBASIS IoT MELALUI TELEGRAM

**Mohammad Taftazzani Roy Satrio, Aris Budiman S.T., M.T.
Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah**

Abstrak

Perubahan cuaca di Indonesia yang tidak menentu sering menjadi kendala dalam proses pengeringan sepatu dan helm yang digunakan dalam aktivitas sehari-hari. Metode pengeringan konvensional yang masih mengandalkan sinar matahari dinilai kurang efektif, terutama pada musim hujan. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membangun alat pengering sepatu dan helm berbasis *Internet of Things* (IoT) yang mampu bekerja secara otomatis serta dapat dimonitoring dan dikontrol melalui handphone. Sistem ini menggunakan mikrokontroler ESP32 sebagai pusat pengendali yang mengolah data dari sensor DHT22 untuk mendeteksi suhu dan kelembapan di dalam ruang pengering. Heater berdaya 220V/800W digunakan sebagai sumber panas untuk meningkatkan suhu ruangan, sedangkan kipas DC berfungsi untuk menyebarkan panas secara merata sehingga proses pengeringan dapat berlangsung secara optimal. Selain itu, integrasi aplikasi Telegram memungkinkan pengguna melakukan monitoring dan pengontrolan sistem secara real-time melalui jaringan internet. Hasil perancangan dan pengujian menunjukkan bahwa alat pengering sepatu dan helm berbasis ESP32 ini mampu mengontrol suhu secara otomatis sehingga kelembapan objek dapat dikurangi secara efektif, sehingga bisa mempercepat proses pengeringan, serta mengurangi ketergantungan terhadap kondisi cuaca. Dengan demikian, alat ini diharapkan dapat menjadi solusi yang efektif, efisien, dan praktis dalam memenuhi kebutuhan pengeringan sepatu dan helm bagi masyarakat.

Kata Kunci: pengering sepatu dan helm, Telegram, ESP32, internet of things, heater, sensor DHT22

Abstract

Unpredictable weather conditions in Indonesia often become an obstacle in the drying process of shoes and helmets used in daily activities. Conventional drying methods that rely on sunlight are considered ineffective, especially during the rainy season. Therefore, this study aims to design and develop an Internet of Things (IoT) based shoe and helmet drying system that operates automatically and can be monitored and controlled via a mobile phone. The system utilizes an ESP32 microcontroller as the main controller, which processes data from a DHT22 sensor to detect temperature and humidity inside the drying chamber. A 220V/800W heater is used as the heat source to increase the chamber temperature, while a DC fan functions to distribute heat evenly, ensuring an optimal drying process. In addition, integration with the Telegram application allows users to monitor and control the system in real time through the internet. The results of the design and testing show that the ESP32-based shoe and helmet dryer is capable of automatically controlling temperature so that the humidity of the object can be effectively reduced, thereby accelerating the drying process and reducing dependence on weather conditions. Thus, this system is expected to provide an effective, efficient, and practical solution for meeting the community's shoe and helmet drying needs.

Keywords: Shoe and Helmet Dryer; Telegram; ESP32; Internet of Things; Heater; DHT22 Sensor

1. PENDAHULUAN

Mesin pengering pada umumnya digunakan untuk mengeringkan berbagai hasil pertanian, seperti jagung, gabah, dan daun tembakau. Seiring dengan perkembangan teknologi dan meningkatnya kebutuhan masyarakat, penggunaan mesin pengering tidak hanya terbatas pada sektor agroindustri, tetapi juga telah meluas ke berbagai bidang industri dan kebutuhan rumah tangga. Penerapan mesin pengering saat ini mencakup pengering kertas, pakaian, sepatu, helm, penutup kepala, hingga kaos kaki. Hal ini menunjukkan bahwa teknologi pengering memiliki peran yang sangat penting dalam meningkatkan efisiensi, kenyamanan, dan kualitas aktivitas sehari-hari. Peningkatan aktivitas masyarakat yang didominasi oleh penggunaan sepeda motor sebagai alat transportasi utama menjadikan sepatu dan helm sebagai perlengkapan yang digunakan hampir setiap hari. Berdasarkan data Badan Pusat Statistik (BPS, 2023), jumlah sepeda motor di Indonesia pada akhir tahun 2022 mencapai 125,3 juta unit, menjadikan sepeda motor sebagai moda transportasi yang paling dominan di masyarakat. Pada musim penghujan, tingginya curah hujan menyebabkan sepatu dan helm sering mengalami kebasahan, baik akibat paparan air hujan secara langsung maupun karena keringat saat digunakan dalam perjalanan jarak dekat maupun jarak jauh. Kondisi sepatu dan helm yang lembap tidak hanya menimbulkan ketidaknyamanan bagi pengguna, tetapi juga berpotensi memicu munculnya bau tidak sedap, pertumbuhan jamur, serta perkembangan bakteri yang dapat mengganggu kesehatan (Suharjo, 2020).

Berdasarkan laporan Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) Surakarta tahun 2024, intensitas curah hujan di wilayah Solo Raya mengalami peningkatan setiap tahunnya (BMKG Surakarta, 2024). Kondisi ini menyebabkan proses pengeringan secara alami dengan mengandalkan sinar matahari menjadi kurang efektif dan tidak dapat diandalkan. Selama ini, masyarakat masih terbiasa mengeringkan sepatu dan helm dengan cara menjemur secara konvensional. Padahal, paparan sinar ultraviolet (UV) matahari yang berlebihan dapat berdampak negatif terhadap material sepatu, seperti mempercepat pelapukan, perubahan warna, serta menurunkan kualitas bahan. Selain itu, jasa laundry sepatu dan helm di wilayah Solo–Klaten juga mengalami peningkatan permintaan, namun sebagian besar proses pengeringan masih mengandalkan kipas angin atau ruangan terbuka, sehingga membutuhkan waktu yang relatif lama dan kurang efisien.

Sejalan dengan kondisi tersebut, tingkat konsumsi sepatu di Indonesia menunjukkan tren peningkatan setiap tahun. Baskaran dkk. (2021) menyatakan bahwa kebutuhan akan teknologi pengeringan sepatu yang lebih efektif semakin berkembang seiring meningkatnya kesadaran masyarakat terhadap kenyamanan dan kualitas sepatu yang digunakan. Meskipun demikian, sebagian besar masyarakat hingga saat ini masih melakukan proses pengeringan sepatu secara manual, yang tidak hanya memakan waktu lama, tetapi juga berisiko merusak material sepatu apabila dilakukan secara tidak tepat.

Selain sepatu, helm sebagai perlengkapan keselamatan berkendara yang wajib digunakan sesuai peraturan lalu lintas juga menghadapi permasalahan yang serupa. Helm yang digunakan setiap hari sangat rentan menjadi lembap akibat keringat maupun air hujan. Helm yang basah tidak nyaman digunakan dan dapat menimbulkan bau menyengat. Data dari Satuan Lalu Lintas menunjukkan bahwa sebagian besar masyarakat di Indonesia menggunakan helm setiap hari, sehingga kebutuhan akan alat pengering helm yang cepat, aman, dan efektif menjadi sangat penting. Penelitian oleh Maryana dkk. (2023) menunjukkan bahwa prinsip termodinamika pada alat pengering konvensional masih memiliki keterbatasan, seperti distribusi panas yang tidak merata serta belum dilengkapi dengan sistem monitoring suhu dan kelembapan yang memadai secara real-time.

Perkembangan teknologi digital, khususnya Internet of Things (IoT), membuka peluang besar dalam pengembangan sistem pengering yang lebih modern dan efisien. Teknologi IoT memungkinkan perangkat fisik untuk saling terhubung, mengirimkan data, serta dikendalikan secara jarak jauh melalui jaringan internet (Tisna dkk., 2024). Mikrokontroler ESP32 merupakan salah satu platform IoT yang banyak digunakan karena telah dilengkapi dengan koneksi WiFi dan Bluetooth bawaan serta mampu mengolah data sensor secara real-time (Hariyanto & Nugroho, 2022; Yuliana & Pradana, 2022). Integrasi ESP32 dengan aplikasi Telegram memungkinkan pengguna untuk memantau kondisi suhu dan kelembapan di dalam alat pengering, sekaligus mengontrol kinerja heater dan kipas melalui smartphone dari jarak jauh.

Dibandingkan dengan penelitian sejenis yang telah disebutkan sebelumnya, seperti penjemur pakaian otomatis berbasis ESP32 dan Telegram Bot (Suharjo, 2020) maupun lemari pengering dan pensterilisasi pakaian bayi otomatis berbasis IoT (Rahmi & Yelfianhar, 2023), penelitian ini menawarkan kebaruan pada tiga aspek utama. Pertama, objek pengeringan berupa kombinasi helm dan enam jenis sepatu dengan karakteristik material yang berbeda-beda, sehingga efektivitas sistem diuji pada rentang material yang lebih luas. Kedua, penerapan kontrol hysteresis dengan dead zone $\pm 2^{\circ}\text{C}$ yang nilai setpoint-nya dapat diatur pengguna secara langsung melalui push button maupun perintah Telegram Bot, bukan sekadar kontrol on-off sederhana. Ketiga, dilakukan analisis kuantitatif konsumsi daya dan biaya operasional secara rinci untuk setiap kombinasi setpoint dan jenis objek, sehingga memberikan gambaran efisiensi ekonomis sistem yang belum banyak dibahas pada penelitian-penelitian terdahulu.

Berdasarkan berbagai permasalahan tersebut, diperlukan sebuah inovasi berupa sistem pengering sepatu dan helm yang mampu bekerja secara efektif, cepat, aman, serta dapat dimonitoring dan dikontrol secara jarak jauh. Dengan memanfaatkan sensor DHT22 sebagai pendeteksi suhu dan kelembapan, Solid State Relay (SSR) sebagai komponen pengendali heater, serta sistem monitoring dan kontrol berbasis Telegram, diharapkan proses pengeringan dapat berlangsung lebih efisien tanpa merusak material sepatu maupun helm. Oleh karena itu, penelitian dengan judul “ **sistem kendali pengering helm dan sepatu**

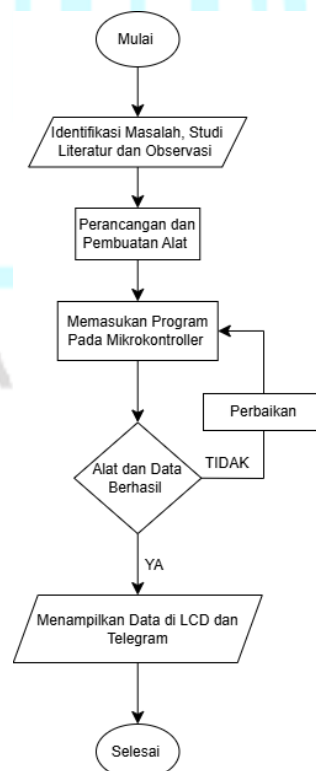
berbasis IoT melalui Telegram ” dilakukan untuk memberikan solusi terhadap permasalahan pengeringan sepatu dan helm yang sering dialami masyarakat. Penelitian ini bertujuan untuk merancang, membangun, dan menguji perangkat pengering berbasis IoT yang mampu bekerja secara otomatis, aman, serta memberikan informasi kondisi pengeringan secara real-time kepada pengguna. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat langsung bagi masyarakat serta menjadi referensi bagi pengembangan teknologi pengering sepatu dan helm yang lebih canggih di masa mendatang.

2. METODE

Penelitian ini menggunakan metode perancangan dan implementasi sistem untuk mengembangkan sistem pengering berbasis Internet of Things (IoT) dengan sensor DHT 22 yang terintegrasi. Metode ini dipilih karena penelitian berfokus pada pembuatan perangkat keras dan perangkat lunak, integrasi sistem, serta pengujian kinerja alat dalam melakukan monitoring kondisi Helm dan Sepatu secara otomatis. Tahapan penelitian meliputi studi literatur, perancangan sistem, perakitan perangkat, pemrograman mikrokontroler, serta pengujian dan analisis hasil.

2.1 Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian dilakukan secara sistematis untuk memastikan sistem yang dikembangkan dapat berfungsi dengan baik. Tahapan tersebut meliputi studi literatur, perancangan sistem, perakitan perangkat keras, perancangan perangkat lunak, integrasi sistem, serta pengujian dan evaluasi kinerja alat.



Gambar 1 *Flowchart Tahapan Penelitian*

Gambar 1 Flowchart Tahapan Penelitian menjelaskan urutan langkah dalam penelitian secara sistematis, dimulai dari identifikasi masalah, studi literatur dan observasi, perancangan dan pembuatan alat, hingga pemasukan program pada mikrokontroler ESP32. Setelah program dimasukkan, dilakukan

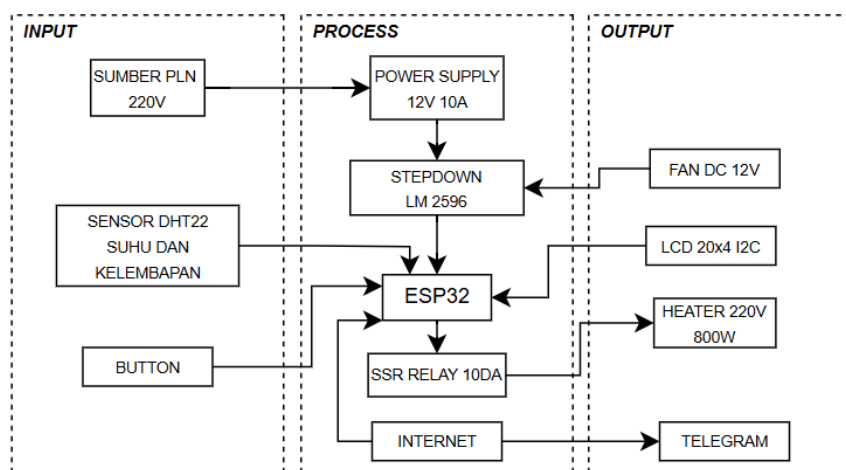
pengujian untuk mengevaluasi apakah alat dan data telah berhasil bekerja sesuai perancangan. Apabila hasil pengujian belum memenuhi kriteria keberhasilan, proses dikembalikan ke tahap perbaikan sebelum dilanjutkan kembali ke tahap pemrograman. Jika alat dan data dinyatakan berhasil, sistem akan menampilkan data suhu dan kelembapan pada LCD serta mengirimkannya ke aplikasi Telegram sebagai hasil akhir penelitian.

2.2 Perancangan Sistem

Perancangan sistem pengering helm dan sepatu berbasis *Internet of Things* (IoT) ini mencakup pengaturan alur komunikasi data antar komponen agar sistem dapat bekerja secara terintegrasi. Sensor DHT22 terhubung langsung ke mikrokontroler ESP32 melalui komunikasi digital, sehingga data hasil pengukuran suhu dan kelembapan dapat dikirimkan dengan tingkat keandalan yang baik. Data yang diterima kemudian diolah oleh ESP32 untuk ditampilkan dan dikirimkan ke media monitoring.

Selain sebagai pusat pengolahan data, ESP32 berperan dalam mengatur logika kerja sistem secara keseluruhan, termasuk proses pembacaan sensor, pengelolaan *timer* pengeringan, serta pengendalian aktuator berupa *heater* dan kipas DC. *Heater* dikendalikan melalui *Solid State Relay* (SSR) dengan logika *hysteresis*, di mana *heater* akan aktif apabila suhu aktual berada di bawah *setpoint* dan dimatikan secara otomatis ketika suhu telah mencapai nilai yang ditentukan. Sementara itu, kipas DC beroperasi secara kontinu selama proses pengeringan berlangsung untuk membantu sirkulasi udara panas di dalam ruang pengering. Informasi kondisi ruang pengering ditampilkan secara langsung melalui LCD I2C 20×4 agar pengguna dapat memantau keadaan sistem tanpa memerlukan perangkat tambahan.

Untuk mendukung monitoring jarak jauh, sistem dirancang terhubung dengan aplikasi *Telegram* melalui jaringan *internet* menggunakan fitur *Telegram Bot API*. Data hasil pembacaan sensor dikirimkan secara berkala sehingga pengguna dapat memantau kondisi ruang pengering secara *real-time* melalui perangkat *smartphone*. Selain itu, pengguna dapat memberikan perintah secara manual melalui *Telegram* untuk mengaktifkan atau menghentikan proses pengeringan sesuai kebutuhan, tanpa mengganggu pengaturan *timer* otomatis yang telah diprogram sebelumnya.



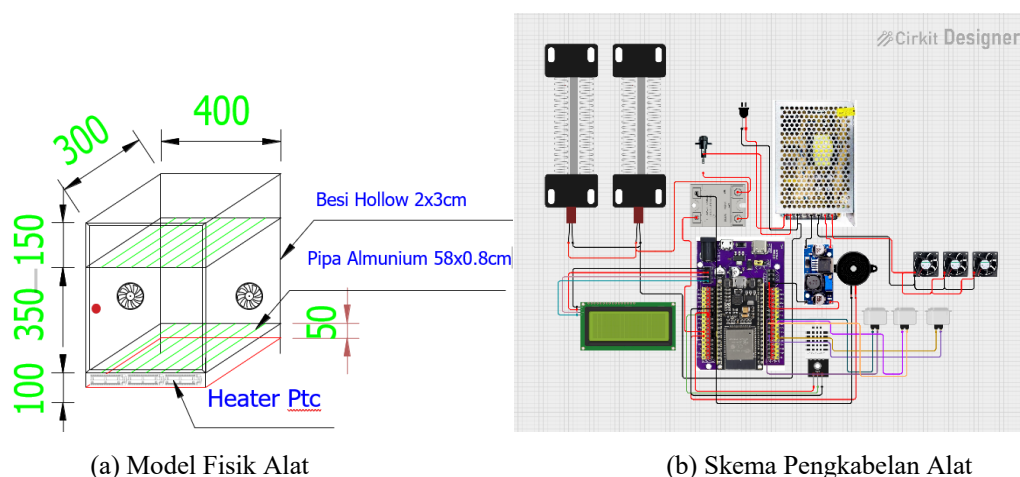
Gambar 2. Blok Diagram Sistem

Pada gambar blok diagram, sistem pengering helm dan sepatu berbasis IoT ini terdiri dari tiga bagian utama, yaitu *input*, *process*, dan *output*. Pada bagian *input*, sistem menerima sumber daya listrik dari PLN 220V sebagai catu daya utama, sensor DHT22 yang berfungsi untuk mendeteksi suhu dan kelembapan di dalam ruang pengering, serta *push button* yang digunakan sebagai input manual untuk mengaktifkan atau mengontrol sistem. Bagian proses diawali dengan *power supply* 12V 10A yang menurunkan tegangan dari PLN agar aman digunakan oleh seluruh komponen. Tegangan kemudian distabilkan menggunakan modul *step-down* LM2596 sebelum disalurkan ke mikrokontroler ESP32 sebagai pusat pengendali sistem. ESP32 memproses data dari sensor DHT22 dan input tombol, kemudian mengatur kerja sistem secara keseluruhan. Untuk mengendalikan beban bertegangan tinggi, ESP32 terhubung dengan SSR Relay 10DA yang berfungsi sebagai saklar elektronik. Selain itu, ESP32 juga terhubung ke jaringan *internet* untuk memungkinkan komunikasi data secara daring.

Pada bagian *output*, ESP32 mengontrol beberapa perangkat, yaitu kipas DC 12V sebagai sirkulasi udara pengering, *heater* 220V 800W sebagai sumber panas utama, serta LCD 20x4 berbasis I2C untuk menampilkan informasi suhu, kelembapan, dan status sistem secara lokal. Melalui koneksi *internet*, data dan status sistem juga dikirimkan ke aplikasi *Telegram* sehingga pengguna dapat memantau dan mengendalikan proses pengeringan secara *real-time* dari jarak jauh. Secara keseluruhan, sistem dirancang untuk bekerja secara mandiri dan berkelanjutan dengan mengintegrasikan fungsi monitoring kondisi ruang pengering dan pengendalian otomatis dalam satu kesatuan sistem yang efisien, aman, dan mudah dioperasikan oleh pengguna.

2.3 Perancangan Perangkat Keras

Perancangan perangkat keras pada sistem ini difokuskan pada integrasi komponen sensor dan aktuator yang mampu beroperasi secara sinkron dalam skema pengeringan otomatis berbasis IoT. Representasi fisik dari perancangan alat, termasuk tata letak komponen elektronik pada struktur ruang pengering, diilustrasikan secara mendetail pada Gambar 3a. Sementara itu, detail interkoneksi elektrik dan pemetaan pin antar komponen ditunjukkan pada skema pengkabelan di Gambar 3b.



Gambar 3. Rancangan Perangkat Keras

Unit kendali utama direalisasikan menggunakan mikrokontroler ESP32 yang dipilih karena ketersediaan pin antarmuka yang memadai serta modul komunikasi nirkabel WiFi terintegrasi untuk mendukung sistem monitoring dan kontrol berbasis Internet of Things (Espressif Systems, 2023). Pada modul akuisisi data, digunakan sensor DHT22 yang ditempatkan di dalam ruang pengering untuk membaca parameter suhu dan kelembapan secara real-time sebagai dasar pengambilan keputusan pengendalian sistem secara otomatis. Pada bagian keluaran (output), sistem mengendalikan dua buah kipas DC 12V yang dipasang pada sisi dinding ruang pengering sebagai mekanisme sirkulasi udara panas, serta dua elemen heater PTC 220V berdaya 300 W dan 500 W (total 800 W) yang ditempatkan pada bagian bawah ruang pengering sebagai sumber panas utama. Pengendalian heater bertegangan tinggi dilakukan melalui Solid State Relay (SSR) 10DA yang dikendalikan langsung oleh ESP32, sehingga sistem tetap aman meskipun bekerja pada tegangan AC 220V. Sebagai media informasi lokal, LCD I2C 20×4 dipasang pada panel kontrol untuk menampilkan data suhu, kelembapan, status heater, kipas, dan sisa waktu pengeringan secara langsung tanpa memerlukan perangkat tambahan. Sebagai pelengkap notifikasi, sistem dilengkapi buzzer yang diposisikan pada panel kontrol untuk memberikan sinyal suara kepada pengguna apabila proses pengeringan helm dan sepatu telah selesai.

Sumber tegangan utama berasal dari PLN 220V yang diturunkan menggunakan power supply switching 12V 10A, kemudian distabilkan kembali menggunakan modul step-down LM2596 sebelum disalurkan ke ESP32 dan seluruh komponen pendukung lainnya. Seluruh rangkaian memiliki ground yang terhubung secara bersama (common ground) agar sistem bekerja stabil dan terhindar dari gangguan tegangan. Melalui koneksi WiFi, ESP32 terhubung ke jaringan internet dan berkomunikasi dengan Telegram Bot, sehingga pengguna dapat memantau kondisi ruang pengering serta mengendalikan sistem secara real-time dari jarak jauh melalui perangkat smartphone.

2.4 Perancangan Perangkat Lunak

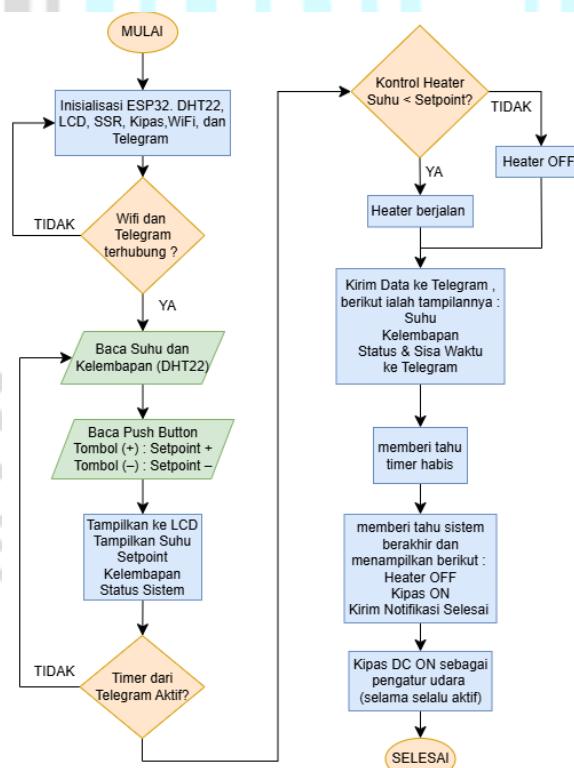
Perancangan perangkat lunak bertujuan untuk mengatur proses kerja sistem secara keseluruhan, mulai dari pembacaan data sensor hingga pengendalian pengeringan otomatis dan pengiriman data ke aplikasi monitoring. Perangkat lunak dikembangkan menggunakan bahasa pemrograman C/C++ dengan bantuan Arduino IDE sebagai lingkungan pengembangan utama.

Program yang dijalankan pada mikrokontroler ESP32 dirancang untuk membaca data dari sensor DHT22, kemudian mengolah data tersebut agar dapat ditampilkan dalam bentuk informasi yang mudah dipahami oleh pengguna. Hasil pembacaan sensor ditampilkan secara lokal melalui LCD I2C 20×4 dan dikirimkan ke aplikasi Telegram melalui jaringan internet untuk keperluan monitoring secara real-time menggunakan perangkat smartphone. Telegram adalah aplikasi pesan instan yang tersedia pada perangkat iOS maupun Android yang dapat dimanfaatkan untuk mengontrol berbagai perangkat keras melalui fitur Telegram Bot API. Melalui aplikasi ini, pengguna dapat memantau data suhu, kelembapan, status heater,

kipas, serta sisa waktu pengeringan, sekaligus memberikan perintah kendali secara manual kepada sistem dari jarak jauh.

Selain fungsi monitoring, perangkat lunak juga mengatur sistem pengeringan otomatis berdasarkan logika hysteresis dan timer yang diaktifkan melalui perintah Telegram. Ketika timer aktif, ESP32 akan memberikan sinyal kendali ke SSR Relay untuk mengaktifkan heater apabila suhu aktual berada di bawah nilai setpoint, dan mematikannya secara otomatis apabila suhu telah mencapai atau melampaui setpoint. Kipas DC beroperasi secara kontinu sejak sistem dinyalakan dan tetap aktif selama sistem beroperasi tanpa bergantung pada status timer maupun kondisi heater, berfungsi untuk memastikan sirkulasi udara di dalam ruang pengering selalu terjaga.

Setelah waktu pengeringan habis, sistem secara otomatis mematikan heater dan mengirimkan notifikasi kepada pengguna melalui Telegram sebagai tanda bahwa proses pengeringan helm dan sepatu telah selesai, sementara kipas DC tetap beroperasi secara kontinu untuk menjaga sirkulasi udara di dalam ruang pengering. Dengan adanya perancangan perangkat lunak ini, sistem diharapkan mampu bekerja secara mandiri, efisien, dan mudah dikendalikan tanpa memerlukan intervensi pengguna secara langsung.



Gambar 4 Diagram Alir Perancangan Perangkat Lunak

Diagram alir pada Gambar 4 menampilkan alur kerja perangkat lunak ESP32 yang meliputi inisialisasi perangkat, pengecekan koneksi WiFi dan Telegram, pembacaan data sensor DHT22, pembacaan push button, penampilan data pada LCD, pengecekan status timer, pengendalian heater berdasarkan logika hysteresis, serta pengiriman data secara berkala ke Telegram. Pada bagian pengendalian heater, diagram alir ini telah membedakan perlakuan untuk kondisi YA dan TIDAK secara eksplisit. Apabila suhu aktual berada di bawah nilai setpoint (YA), maka heater akan diaktifkan. Sebaliknya, apabila suhu telah mencapai

atau melampaui nilai setpoint (TIDAK), maka heater akan dimatikan secara otomatis. Seluruh proses berjalan secara berulang agar sistem dapat bekerja secara real-time dan responsif terhadap setiap perubahan kondisi ruang pengering maupun perintah dari pengguna.

2.5 Algoritma dan Alur Sistem

Algoritma sistem dirancang untuk mengatur alur kerja perangkat secara terstruktur agar proses monitoring kondisi ruang pengering dan pengendalian pengeringan otomatis dapat berjalan sesuai dengan perancangan. Algoritma ini menggambarkan urutan kerja sistem mulai dari inisialisasi perangkat, pembacaan data sensor, hingga pengendalian *heater* dan kipas DC berdasarkan logika *hysteresis* dan *timer* yang telah ditentukan. Pada tahap awal, sistem melakukan inisialisasi terhadap seluruh perangkat yang digunakan, meliputi mikrokontroler ESP32, sensor DHT22, SSR Relay, kipas DC, LCD I2C 20×4, *buzzer*, serta koneksi jaringan internet dan *Telegram Bot*. Setelah inisialisasi selesai, ESP32 melakukan pengecekan koneksi WiFi dan *Telegram* untuk memastikan komunikasi data antara sistem dan pengguna dapat berjalan dengan baik sebelum proses pengeringan dimulai. Selanjutnya, sistem melakukan pembacaan data kondisi ruang pengering menggunakan sensor DHT22. Data yang diperoleh meliputi nilai suhu dan kelembapan di dalam ruang pengering. Data hasil pembacaan sensor kemudian diproses oleh ESP32 dan ditampilkan secara lokal pada LCD I2C 20×4 serta dikirimkan ke aplikasi *Telegram* melalui jaringan internet untuk keperluan monitoring secara *real-time*. Selain itu, sistem juga membaca masukan dari *push button* untuk menaikkan atau menurunkan nilai *setpoint* suhu *heater* sesuai kebutuhan pengguna.

Setelah proses monitoring dilakukan, sistem memeriksa status *timer* pengeringan yang diaktifkan melalui perintah *Telegram*. Apabila *timer* belum aktif, sistem berada dalam kondisi siaga (*standby*) dan terus melakukan pembacaan sensor secara berulang. Apabila *timer* aktif, ESP32 akan mengendalikan *heater* melalui SSR Relay berdasarkan logika *hysteresis* dengan *dead zone* sebesar $\pm 2^{\circ}\text{C}$ terhadap nilai *setpoint* yang telah ditentukan. Sistem menetapkan dua batas ambang dalam pengendalian suhu, yaitu *lower bound* dan *upper bound*. *Lower bound* ditetapkan pada nilai *setpoint* dikurangi 2°C , di mana pada kondisi ini *heater* akan diaktifkan karena suhu aktual berada di bawah batas minimum yang diizinkan. *Upper bound* ditetapkan pada nilai *setpoint* ditambah 2°C , di mana pada kondisi ini *heater* akan dimatikan secara otomatis karena suhu aktual telah melampaui batas maksimum yang ditentukan. Rentang suhu di antara kedua batas tersebut merupakan *dead zone* selebar $\pm 2^{\circ}\text{C}$ yang berfungsi untuk mencegah *heater* menyala dan mati secara berulang dalam waktu singkat (*switching* berlebihan), sehingga komponen SSR Relay dan *heater* dapat bekerja lebih stabil dan memiliki umur pakai yang lebih panjang. Dengan metode kontrol ini, suhu di dalam ruang pengering dapat dijaga secara konsisten mendekati nilai *setpoint* yang telah ditetapkan oleh pengguna.

Kipas DC tetap beroperasi secara kontinu selama sistem berjalan untuk menjaga sirkulasi udara panas di dalam ruang pengering tanpa bergantung pada status *timer* maupun kondisi *heater*. Setelah durasi pengeringan terpenuhi, *heater* akan dimatikan secara otomatis dan sistem mengirimkan notifikasi kepada

pengguna melalui *Telegram* sebagai tanda bahwa proses pengeringan helm dan sepatu telah selesai, sementara kipas DC tetap beroperasi secara kontinu untuk menjaga sirkulasi udara di dalam ruang pengering. Sistem kemudian kembali ke proses pembacaan sensor dan pemantauan status *timer* secara berulang.

2.6 Prosedur Pengujian dan Validasi Sistem

Prosedur pengujian dan validasi sistem dilakukan untuk memastikan bahwa seluruh komponen pada sistem pengering helm dan sepatu berbasis IoT dapat bekerja sesuai dengan perancangan yang telah dibuat. Pengujian ini mencakup pengujian perangkat keras, perangkat lunak, sensor, serta sistem pengeringan otomatis, sehingga dapat diketahui kinerja dan keandalan alat secara menyeluruh.

Pengujian perangkat keras dilakukan dengan memeriksa koneksi dan fungsi setiap komponen, meliputi mikrokontroler ESP32, sensor DHT22, SSR Relay 10DA, heater PTC 220V, kipas DC 12V, LCD I2C 20×4, buzzer, serta modul step-down LM2596. Setiap komponen diuji secara bertahap untuk memastikan tidak terdapat kesalahan pada jalur komunikasi maupun suplai daya sebelum sistem dijalankan secara keseluruhan. Pengujian sensor dilakukan dengan menempatkan sensor DHT22 di dalam ruang pengering pada posisi yang dapat merepresentasikan kondisi suhu dan kelembapan secara akurat. Parameter yang diuji meliputi nilai suhu dan kelembapan di dalam ruang pengering. Hasil pembacaan sensor diamati melalui tampilan LCD serta aplikasi *Telegram* untuk memastikan data dapat terbaca dan diperbarui secara real-time.

Validasi data sensor dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan sensor DHT22 terhadap alat ukur termometer dan hygrometer sebagai pembanding. Perbandingan dilakukan untuk melihat kesesuaian nilai dan kecenderungan data yang dihasilkan oleh sensor terhadap alat ukur standar. Perbedaan nilai yang muncul dianalisis secara deskriptif untuk mengetahui tingkat akurasi dan persentase error sensor DHT22 dalam kondisi operasional alat pengering. Pengujian sistem pengeringan otomatis dilakukan dengan mengaktifkan timer pengeringan melalui perintah *Telegram* dan mengatur nilai setpoint suhu menggunakan push button. Sistem diamati untuk memastikan heater dapat dikendalikan secara otomatis berdasarkan logika hysteresis dengan dead zone $\pm 2^{\circ}\text{C}$ sesuai nilai setpoint yang telah ditetapkan. Setelah durasi pengeringan terpenuhi, heater diharapkan dapat berhenti secara otomatis dan sistem mengirimkan notifikasi kepada pengguna melalui *Telegram*. Hasil pengujian ini digunakan untuk menilai keandalan sistem dalam menjalankan fungsi pengeringan tanpa campur tangan pengguna secara langsung. Selain itu juga dilakukan pengujian integrasi sistem untuk memastikan seluruh fungsi, mulai dari pembacaan sensor, penampilan data pada LCD, pengiriman data monitoring ke *Telegram*, pengendalian heater melalui SSR Relay, hingga notifikasi selesai pengeringan dapat berjalan secara terpadu. Hasil dari seluruh pengujian dan validasi ini kemudian dicatat dan digunakan sebagai dasar analisis pada tahap pembahasan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan hasil pengujian dan pembahasan dari sistem pengering helm dan sepatu berbasis Internet of Things (IoT) yang telah dikembangkan. Pembahasan meliputi hasil implementasi dan perakitan sistem, pengujian akurasi sensor, pengambilan dan monitoring data suhu serta kelembapan, serta analisis pengaruh kontrol hysteresis terhadap kinerja pengeringan pada berbagai variasi setpoint suhu. Selain itu, dibahas pula efektivitas pengeringan terhadap berbagai jenis helm dan sepatu, konsumsi daya dan biaya operasional sistem, keterbatasan yang ditemukan selama pengujian, serta potensi pengembangan sistem ke depan.

3.1 Hasil Implementasi dan Perakitan Sistem

Implementasi sistem menunjukkan bahwa seluruh komponen perangkat keras dan perangkat lunak pada sistem pengering helm dan sepatu berbasis *Internet of Things* (IoT) telah berhasil dirakit dan diintegrasikan sesuai dengan rancangan. Sistem menggunakan mikrokontroler ESP32 sebagai pusat pengolah data, sensor DHT22 sebagai instrumen utama pengukuran suhu dan kelembapan di dalam ruang pengering, LCD I2C 20×4 sebagai tampilan lokal, aplikasi *Telegram* sebagai media pemantauan dan pengendalian jarak jauh, *heater* PTC 220V sebagai sumber panas utama, serta kipas DC 12V sebagai aktuator sirkulasi udara panas secara kontinu.

Seluruh rangkaian elektronik dirakit pada panel kontrol yang terpasang pada struktur rangka ruang pengering agar terlindung dari paparan panas berlebih dan lebih rapi secara instalasi. Sensor DHT22 ditempatkan di dalam ruang pengering pada posisi yang dapat merepresentasikan kondisi suhu dan kelembapan secara akurat selama proses pengeringan berlangsung. Berdasarkan uji awal, sistem dapat beroperasi dengan stabil, seluruh komponen merespons sesuai fungsi, dan tidak ditemukan kendala pada suplai daya maupun komunikasi antarkomponen.



(a) Rangkaian Listrik

(b) Rangkaian Mekanik

Gambar 5. Implementasi dan Perakitan Sistem

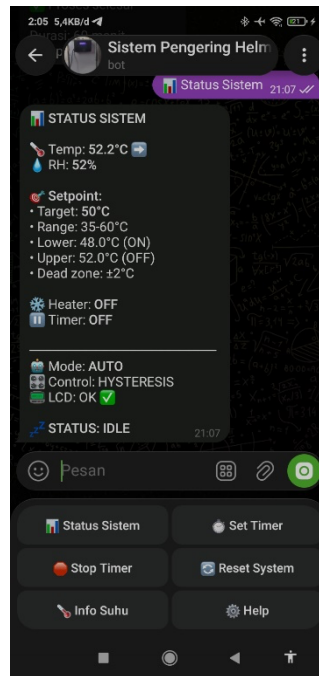
3.2 Sistem Program *Internet of Things (IoT)*

Sistem program dibuat dan diatur menggunakan Arduino IDE dengan bahasa pemrograman C/C++. Program utama yang digunakan pada sistem ini dirancang untuk mengintegrasikan pembacaan sensor DHT22, pengendalian heater otomatis berbasis kontrol hysteresis, serta pengiriman data ke aplikasi Telegram secara real-time. Program ini mengatur komunikasi antara ESP32 dan seluruh komponen pendukung, dengan mekanisme pengecekan koneksi WiFi dan Telegram Bot secara berkala untuk memastikan sistem monitoring tetap berjalan stabil. Setiap data suhu dan kelembapan yang diterima dari sensor DHT22 kemudian diolah oleh ESP32 sebagai dasar pengambilan keputusan pengendalian heater melalui SSR Relay 10DA berdasarkan nilai setpoint dan batas hysteresis yang telah ditentukan.

Selain fungsi pembacaan sensor, program juga mengelola timer pengeringan yang diaktifkan melalui perintah Telegram Bot. Heater dikendalikan dengan logika hysteresis menggunakan dead zone $\pm 2^{\circ}\text{C}$, di mana heater aktif apabila suhu berada di bawah lower bound (setpoint $- 2^{\circ}\text{C}$) dan dimatikan apabila suhu melampaui upper bound (setpoint $+ 2^{\circ}\text{C}$). Pengguna dapat mengatur nilai setpoint suhu secara langsung melalui push button yang tersedia pada panel kontrol, dengan rentang pengaturan antara 35°C hingga 60°C . Kipas DC tetap beroperasi secara kontinu selama sistem berjalan tanpa bergantung pada status timer maupun kondisi heater, untuk memastikan sirkulasi udara panas di dalam ruang pengering selalu terjaga.

```
CODE_TUGAS_AKHIR.ino
1  #include <WiFi.h>
2  #include <WiFiClientSecure.h>
3  #include <UniversalTelegramBot.h>
4  #include <DHT.h>
5  #include <LiquidCrystal_I2C.h>
6  #include <ArduinoJson.h>
7  #include <Wire.h>
8
9  // ===== PIN CONFIGURATION =====
10 #define DHTPIN 4 // Sensor DHT22
11 #define DHTTYPE DHT22
12
13 #define RELAY_HEATER 18 // SSR untuk Heater
14 #define BUZZER_PIN 19 // Buzzer alarm
15 #define BTN_UP 32 //Button UP
16 #define BTN_DOWN 26 //Butoon DOWN
17 #define BTN_EMG 27 //Button EMG
18
19 // ===== WIFI & TELEGRAM =====
20 const char* ssid = "KOSAYAH";
21 const char* password = "ekoroyabdu1123";
22
23 #define BOT_TOKEN "8246071960:AAH4qbGCEpyED06XPsfdwSJkoP13-VIDywQ"
```

Gambar 6. Program Monitoring



Gambar 7. Tampilan Telegram

Program juga mengatur tampilan LCD I2C 20×4 yang menampilkan informasi suhu aktual, nilai setpoint, kelembapan, lower bound, upper bound, status heater, dan status sistem secara real-time seperti yang terlihat pada Gambar 5 yang menampilkan keterangan pada layarnya, sehingga memudahkan pemantauan langsung di lapangan tanpa memerlukan perangkat tambahan. Pada sisi IoT, data suhu, kelembapan, setpoint, status heater, timer, dan mode operasi sistem dikirimkan secara berkala ke aplikasi Telegram melalui Telegram Bot seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7. Pengguna dapat mengakses informasi sistem melalui tombol perintah yang tersedia pada antarmuka Telegram Bot, meliputi **Status Sistem**, **Set Timer**, **Stop Timer**, **Reset System**, **Info Suhu**, dan **Help**. Setiap kali timer pengeringan selesai, sistem secara otomatis mengirimkan notifikasi kepada pengguna sebagai tanda bahwa proses pengeringan helm dan sepatu telah selesai. Dengan struktur ini, keseluruhan alur program berjalan teratur mulai dari inisialisasi perangkat, pembacaan sensor, pengendalian heater berbasis hysteresis, pengelolaan timer, penampilan data pada LCD, hingga pengiriman data dan notifikasi ke Telegram secara terpadu dan berkelanjutan.

3.3 Pengujian Akurasi Sensor DHT22 dengan Termometer

Pengujian akurasi dilakukan dengan membandingkan pembacaan sensor DHT22 terhadap termometer standar sebagai alat ukur standar pada empat titik suhu, yaitu 35°C, 40°C, 45°C, dan 50°C. Dari hasil pengujian yang ditunjukkan pada Tabel 1, diperoleh bahwa sensor DHT22 secara konsisten membaca suhu lebih rendah 0,5°C dibandingkan termometer acuan pada seluruh titik pengukuran. Rata-rata persentase error yang diperoleh adalah sebesar 1,18%, dengan error tertinggi sebesar 1,41% pada suhu 35°C dan error terendah sebesar 0,99% pada suhu 50°C. Nilai error yang semakin kecil seiring meningkatnya suhu menunjukkan bahwa sensor DHT22 memiliki kinerja yang lebih baik pada suhu yang lebih tinggi. Secara keseluruhan, nilai error rata-rata sebesar 1,18% masih berada dalam batas toleransi spesifikasi

akurasi sensor DHT22 sebesar $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ (Puspasari dkk., 2020), sehingga sensor ini dinyatakan layak digunakan sebagai instrumen pengukuran suhu pada sistem pengering helm dan sepatu ini.

Tabel 1 . Hasil pengujian perbandingan akurasi *DHT22* dan *Termometer*

Percobaan	DHT22 ($^{\circ}\text{C}$)	Termometer ($^{\circ}\text{C}$)	Error ($^{\circ}\text{C}$)	Error (%)
1	35	35,5	-0.5	1.40
2	40	40,5	-0.5	1.23
3	45	45,5	-0.5	1.09
4	50	50,5	-0.5	0.99
Rata-rata	42,5	43	-0.5	1,18

Rumus perhitungan persentase error yang digunakan dalam pengujian ini adalah sebagaimana di atas, di mana TA adalah nilai suhu yang terbaca oleh sensor DHT22 dan TE adalah suhu referensi yang terbaca oleh termometer standar. Sebagai contoh pada percobaan pertama dengan suhu target 35°C , sensor DHT22 membaca 35°C sedangkan termometer membaca $35,5^{\circ}\text{C}$, sehingga diperoleh error sebesar 1,408%. Pola error yang konsisten pada setiap percobaan menunjukkan bahwa sensor DHT22 memiliki karakteristik offset sistematis yang stabil dan dapat diprediksi, sehingga masih sangat layak digunakan dalam aplikasi sistem pengering ini.

$$\text{Error \%} = \left| \frac{TA - TE}{TE} \right| \times 100\%$$

$$\% = \left| \frac{35 - 35.5}{35.5} \right| \times 100\% = 1.408$$

Keterangan:

- TA = Suhu yang terbaca oleh sensor DHT22 ($^{\circ}\text{C}$)
- TE = Suhu yang terbaca oleh termometer inframerah sebagai alat ukur standar ($^{\circ}\text{C}$)



Gambar 8. Pengujian dengan Termometer

Gambar 8 menunjukkan proses pengujian sensor DHT22 secara langsung menggunakan termometer standar sebagai alat pembanding. Pengujian dilakukan di dalam ruang pengering pada kondisi operasional nyata dengan suhu bervariasi dari 35°C hingga 50°C . Hasil visual pengujian memperlihatkan bahwa kedua alat ukur menampilkan nilai yang sangat berdekatan, mengonfirmasi bahwa selisih pembacaan yang terjadi konsisten dan berada dalam batas toleransi yang dapat diterima untuk keperluan sistem kendali pengeringan ini.

3.4 Pengujian Pengeringan Helm dan Sepatu dengan Kontrol Hysteresis

Pengujian pengeringan helm dan sepatu dilakukan menggunakan kontrol hysteresis pada empat variasi setpoint suhu, yaitu 35°C, 40°C, 45°C, dan 50°C, masing-masing selama 60 menit. Hasil ringkasan performa kontrol hysteresis ditampilkan pada Tabel 2. Dari data tersebut terlihat bahwa nilai overshoot pada seluruh percobaan adalah konstan sebesar 2°C, yang sesuai dengan batas dead zone yang telah ditetapkan sebesar $\pm 2^\circ\text{C}$. Settling time meningkat seiring naiknya setpoint suhu, dari 5 menit pada suhu 35°C menjadi 25 menit pada suhu 45°C dan 50°C, yang menunjukkan bahwa semakin tinggi suhu target, semakin lama waktu yang dibutuhkan sistem untuk mencapai kondisi stabil. Steady state error yang konsisten sebesar 1°C pada semua setpoint menunjukkan bahwa sistem kontrol bekerja secara stabil dan dapat diprediksi. Frekuensi switching SSR meningkat dari 3 kali/jam pada suhu 35°C menjadi 6 kali/jam pada suhu 50°C, namun tetap berada pada tingkat yang aman dan tidak menyebabkan keausan berlebih pada komponen relay.

Tabel 2 . Ringkasan Performa Kontrol Hysteresis

Setpoint (°C)	Overshoot (°C)	Settling Time (menit)	Steady State Error (°C)	SSR Switching (kali/jam)
35	2	5	1	3
40	2	20	1	4
45	2	25	1	5
50	2	25	1	6

Rumus berikut ini digunakan untuk menghitung persentase kandungan air yang berhasil diuapkan dari objek selama proses pengeringan, dengan membandingkan selisih berat basah (W_b) dan berat kering (W_k) terhadap berat basah awal. Dengan adanya rumus ini, persentase kelembapan hilang dapat dihitung dengan lebih presisi, sebagaimana ditunjukkan pada perhitungan berikut ini :

Rumus Kelembapan Hilang :

$$\begin{aligned}\text{Kelembapan Hilang \%} &= \left| \frac{W_b - W_k}{W_b} \right| \times 100\% \\ &= \left| \frac{776,2 - 731,1}{776,2} \right| \times 100\% = 5,81\%\end{aligned}$$

Keterangan:

- W_b = Berat basah objek sebelum pengeringan (gram)
- W_k = Berat kering objek setelah pengeringan (gram)

Berdasarkan contoh perhitungan di atas, dengan berat basah objek sebesar 776,2 gram dan berat kering sebesar 731,1 gram, diperoleh persentase kelembapan hilang sebesar 5,81%. Nilai ini termasuk dalam kategori "Baik" karena berada di atas ambang batas 5%, yang menandakan bahwa proses pengeringan berhasil menghilangkan sebagian besar kandungan air pada objek dalam durasi pengeringan yang ditentukan. Hasil ini juga mengindikasikan bahwa kombinasi suhu dan waktu pengeringan yang digunakan pada pengujian ini sudah cukup optimal untuk menurunkan tingkat kelembapan objek secara signifikan.

Dari Tabel 3 di bawah ini menyajikan perbandingan efektivitas pengeringan pada berbagai suhu target dengan durasi pengeringan seragam selama 60 menit menggunakan objek uji campuran helm dan sepatu. Hasil pengujian menunjukkan bahwa semakin tinggi setpoint suhu, semakin besar persentase kelembapan yang berhasil dihilangkan dari objek yang dikeringkan. Pada setpoint 35°C, kelembapan yang hilang hanya sebesar 1,99%, yang tergolong hasil “Kurang” (di bawah 2%). Pada setpoint 40°C diperoleh 3,38% yang tergolong “Cukup”, sedangkan pada setpoint 45°C dan 50°C masing-masing diperoleh 5,30% dan 6,65% yang keduanya tergolong “Baik” (di atas 5%). Berdasarkan data ini, setpoint 45°C dan 50°C merupakan pengaturan yang direkomendasikan untuk pengeringan efektif dalam durasi 60 menit, dengan mempertimbangkan keamanan material helm dan sepatu dari paparan suhu berlebih.

Tabel 3 . Perbandingan waktu pengeringan berbagai suhu Hysteresis

Target (°C)	Lower Bound (°C)	Upper Bound (°C)	Waktu Pengeringan	Berat Basah (kg)	Berat Kering (kg)	Kelembapan Hilang (%)	Hasil
35	33	37	60	1,86	1,823	1.98	Kurang
40	38	42	60	1,60	1,546	3.37	Cukup
45	43	47	60	1.64	1,553	5.30	Baik
50	48	52	60	1,58	1,475	6.64	Baik
*Penilaian Hasil : < 2% Kurang, 2% – 5% Cukup , > 5% Baik							

Pengujian perobjek dilakukan untuk mengevaluasi kinerja pengeringan secara spesifik pada masing-masing jenis helm dan sepatu yang berbeda. Data dari Tabel 4 hingga Tabel 9 memperlihatkan hasil pengujian pengeringan pada enam jenis objek, yaitu Helm Full Face, Helm Half Face, Sepatu Canvas, Sepatu Kulit, Sepatu Goretex, dan Sepatu Suede, masing-masing diuji pada empat variasi setpoint suhu (35°C, 40°C, 45°C, dan 50°C) selama 60 menit. Perbedaan karakteristik material setiap objek memberikan respons yang berbeda terhadap proses pengeringan, sehingga hasil kelembapan yang hilang pun bervariasi antar jenis objek.

3.5 Pengujian Pengeringan Helm dan Sepatu Perobjek

Pengujian pengeringan perobjek atau persatu objek ini dilakukan menggunakan empat variasi setpoint suhu, yaitu 35°C, 40°C, 45°C, dan 50°C, masing-masing selama 60 menit dengan kontrol hysteresis $\pm 2^\circ\text{C}$. Terdapat enam jenis objek yang diuji secara satu per satu. Untuk hasil pengujian dinilai berdasarkan persentase kelembapan yang berhasil dihilangkan selama 60 menit, dengan kriteria penilaian: di bawah 2% dikategorikan Kurang, antara 2%–5% dikategorikan Cukup, dan di atas 5% dikategorikan Baik. Untuk bisa melihat hasil ini, selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 4 hingga Tabel 9 sebagai berikut :

Tabel 4 . Pengujian Pengeringan Helm Full Face

Percobaan	Jenis Item	Jumlah	Target (°C)	Waktu	Berat Basah (g)	Berat Kering (g)	Kelembapan Hilang (%)	Hasil
1	Helm Full Face	1 buah	35	60	1,073	1,055	1,67	Kurang
2	Helm Full Face	1 buah	40	60	1,052	934,2	11,19	Baik
3	Helm Full Face	1 buah	45	60	1,013	881,6	12,97	Baik
4	Helm Full Face	1 buah	50	60	1,735	1017	41,38	Baik
*Penilaian Hasil : < 2% Kurang, 2% – 5% Cukup , > 5% Baik								

Berdasarkan data pada Tabel 4, pengujian pengeringan Helm Full Face menunjukkan bahwa efektivitas pengeringan meningkat secara signifikan seiring kenaikan suhu setpoint. Pada setpoint 35°C, kelembapan yang berhasil dihilangkan hanya sebesar 1,68%, tergolong hasil “Kurang” akibat panas yang belum cukup menembus lapisan dalam helm. Kenaikan setpoint ke 40°C meningkatkan hasil menjadi 11,20% (Baik), yang menunjukkan bahwa suhu tersebut sudah mampu mengaktifkan proses evaporasi secara efektif. Hasil terbaik diperoleh pada setpoint 50°C dengan kelembapan hilang mencapai 41,38%, yang mengindikasikan bahwa konstruksi busa dan lapisan dalam Helm Full Face sangat responsif terhadap paparan panas tinggi. Nilai ini juga lebih besar dibandingkan objek lainnya pada setpoint yang sama, yang menandakan bahwa Helm Full Face menyerap dan melepaskan kelembapan lebih banyak akibat volume material bagian dalam yang lebih besar.

Tabel 5 . Pengujian Pengeringan Helm Half Face

Percobaan	Jenis Item	Jumlah	Target (°C)	Waktu	Berat Basah (g)	Berat Kering (g)	Kelembapan Hilang (%)	Hasil
1	Helm Half Face	1 buah	35	60	875,3	869,3	0,68	Kurang
2	Helm Half Face	1 buah	40	60	865,8	855,2	1,22	Kurang
3	Helm Half Face	1 buah	45	60	869,3	840,2	3,34	Cukup
4	Helm Half Face	1 buah	50	60	873,2	748,7	14,25	Baik
*Penilaian Hasil : < 2% Kurang, 2% – 5% Cukup , > 5% Baik								

Tabel 5 menyajikan hasil pengujian pengeringan Helm Half Face pada empat variasi setpoint suhu. Dibandingkan dengan Helm Full Face, persentase kelembapan yang hilang pada Helm Half Face secara umum lebih rendah di semua setpoint. Pada suhu 35°C dan 40°C, hasilnya masing-masing hanya 0,69% dan 1,22%, keduanya tergolong “Kurang”, karena Helm Half Face memiliki material lebih tipis dan volume ruang yang lebih terbuka sehingga kandungan air awal lebih sedikit. Pada setpoint 45°C, kelembapan yang hilang meningkat menjadi 3,35% (Cukup), sedangkan pada 50°C mencapai 14,26% (Baik). Pola ini menunjukkan bahwa meski Helm Half Face membutuhkan suhu lebih tinggi untuk mencapai efektivitas pengeringan yang baik, sistem kontrol hysteresis tetap mampu mengoptimalkan waktu ON heater sesuai kebutuhan termal objek.

Tabel 6 . Pengujian Pengeringan Sepatu Canvas

Percobaan	Jenis Item	Jumlah	Target (°C)	Waktu (menit)	Berat Basah (g)	Berat Kering (g)	Kelembapan Hilang (%)	Hasil
1	Sepatu Canvas	1 pasang	35	60	773.5	758.5	1,93	Kurang
2	Sepatu Canvas	1 pasang	40	60	778.1	755.8	2,86	Cukup
3	Sepatu Canvas	1 pasang	45	60	764.8	734.4	3,97	Cukup
4	Sepatu Canvas	1 pasang	50	60	776.2	731.1	5,81	Baik

***Penilaian Hasil : < 2% Kurang, 2% – 5% Cukup , > 5% Baik**

Data pada Tabel 6 menunjukkan hasil pengujian pengeringan Sepatu Canvas selama 60 menit pada empat setpoint suhu yang berbeda. Pada setpoint 35°C, kelembapan yang hilang hanya sebesar 1,94% (Kurang), mengindikasikan bahwa suhu tersebut belum cukup untuk menguapkan kelembapan yang terserap pada serat kanvas secara kurang optimal. Setpoint 40°C dan 45°C menghasilkan persentase masing-masing 2,87% dan 3,97%, keduanya tergolong “Cukup”, menunjukkan respons penguapan yang semakin baik namun belum maksimal. Hasil terbaik diperoleh pada setpoint 50°C dengan kelembapan hilang 5,81% (Baik), yang menegaskan bahwa material kanvas memerlukan suhu pengeringan yang cukup tinggi agar serat-seratnya dapat melepaskan kandungan air secara efektif dalam durasi 60 menit.

Tabel 7 . Pengujian Pengeringan Sepatu Kulit

Percobaan	Jenis Item	Jumlah	Target (°C)	Waktu	Berat Basah (g)	Berat Kering (g)	Kelembapan Hilang (%)	Hasil
1	Sepatu Kulit	1 pasang	35	60	971,2	946,9	2,50	Cukup
2	Sepatu Kulit	1 pasang	40	60	981,6	947,5	3,47	Cukup
3	Sepatu Kulit	1 pasang	45	60	989,2	955,6	3,39	Cukup
4	Sepatu Kulit	1 pasang	50	60	988,9	945,2	4,41	Cukup

***Penilaian Hasil : < 2% Kurang, 2% – 5% Cukup , > 5% Baik**

Tabel 7 memperlihatkan hasil pengujian pengeringan Sepatu Kulit pada berbagai setpoint suhu. Berbeda dengan objek lain, Sepatu Kulit menghasilkan kategori “Cukup” pada semua setpoint (35°C hingga 50°C) dengan rentang kelembapan hilang antara 2,50% hingga 4,42%. Hal ini disebabkan oleh karakteristik material kulit yang memiliki struktur rapat dan densitas tinggi, sehingga proses evaporasi berlangsung lebih lambat. Meskipun peningkatan suhu dari 35°C ke 50°C meningkatkan kelembapan yang hilang dari 2,50% menjadi 4,42%, nilai tersebut tidak pernah melampaui batas 5% untuk kategori “Baik” dalam durasi 60 menit. Hasil ini mengindikasikan bahwa Sepatu Kulit mungkin memerlukan durasi pengeringan yang lebih panjang atau setpoint suhu yang lebih tinggi agar mencapai pengeringan optimal.

Tabel 8. Pengujian Pengeringan Sepatu Goretex

Percobaan	Jenis Item	Jumlah	Target (°C)	Waktu	Berat Basah (g)	Berat Kering (g)	Kelembaban Hilang (%)	Hasil
1	Sepatu GORETEX	1 pasang	35	60	503,8	482,3	4,26	Cukup
2	Sepatu GORETEX	1 pasang	40	60	521,2	486,6	6,63	Baik
3	Sepatu GORETEX	1 pasang	45	60	520,9	477,1	8,40	Baik
4	Sepatu GORETEX	1 pasang	50	60	541,7	479,4	11,50	Baik
*Penilaian Hasil : < 2% Kurang, 2% – 5% Cukup , > 5% Baik								

Berdasarkan data Tabel 8, Sepatu Goretex menunjukkan performa pengeringan yang paling baik di antara seluruh objek uji sepatu pada penelitian ini. Bahkan pada setpoint terendah 35°C pun, kelembapan yang hilang sudah mencapai 4,27% (Cukup), menandakan bahwa membran Goretex yang bersifat semi-permeabel memungkinkan aliran uap air yang lebih mudah ke luar material. Pada setpoint 40°C, hasilnya meningkat tajam menjadi 6,64% (Baik), dan terus meningkat hingga 8,41% pada 45°C dan 11,50% pada 50°C. Pola peningkatan yang konsisten dan signifikan ini membuktikan bahwa material Goretex memiliki karakteristik penguapan yang sangat responsif terhadap kenaikan suhu, menjadikannya objek yang paling efisien untuk dikeringkan menggunakan sistem ini.

Tabel 9 . Pengujian Pengeringan Sepatu Suede

Percobaan	Jenis Item	Jumlah	Target (°C)	Waktu	Berat Basah (g)	Berat Kering (g)	Kelembaban Hilang (%)	Hasil
1	Sepatu SUEDE	1 pasang	35	60	706,2	692,2	1,98	Kurang
2	Sepatu SUEDE	1 pasang	40	60	711,4	692,1	2,71	Cukup
3	Sepatu SUEDE	1 pasang	45	60	710,2	684,6	3,60	Cukup
4	Sepatu SUEDE	1 pasang	50	60	722,4	693,5	4,00	Cukup
*Penilaian Hasil : < 2% Kurang, 2% – 5% Cukup , > 5% Baik								

Tabel 9 menyajikan hasil pengujian pengeringan Sepatu Suede yang memperlihatkan performa berada di antara Sepatu Canvas dan Sepatu Kulit. Pada setpoint 35°C, kelembapan yang hilang hanya 1,98% (Kurang), yang hampir mendekati ambang batas kategori “Cukup”. Peningkatan suhu ke 40°C menghasilkan 2,71% (Cukup), diikuti 3,60% pada 45°C dan 4,00% pada 50°C, semuanya masih dalam kategori “Cukup”. Material suede yang memiliki permukaan berbulu halus (nap) memang dikenal lebih sensitif terhadap panas berlebih, sehingga penggunaan setpoint tinggi harus dilakukan dengan hati-hati agar tidak merusak struktur serat. Hasil ini menegaskan bahwa setpoint optimal untuk Sepatu Suede berada pada kisaran 45°C–50°C dengan durasi pengeringan yang mungkin perlu diperpanjang untuk hasil yang lebih maksimal.

3.6 Konsumsi Daya dan Biaya Operasional

Pada perhitungan rumus konsumsi daya dan biaya operasional dilakukan untuk mengukur efisiensi energi sistem pengering. Disini perhitungan didasarkan pada lamanya heater aktif (Heater ON) selama proses pengeringan, bukan total durasi 60 menit, karena kontrol hysteresis menyebabkan heater bekerja

secara siklus ON-OFF otomatis. Disini heater yang digunakan berdaya 800 W dengan tarif listrik acuan Rp 1.444/kWh sesuai tarif PLN golongan rumah tangga. Berikut adalah rumus perhitungan Konsumsi Daya :

Rumus Konsumsi Daya :

$$\text{Konsumsi Daya (kWh)} = \frac{\text{Daya Heater (W)} \times \text{Waktu Heater ON (menit)}}{1000 \times 60}$$

Keterangan:

- Konsumsi Daya (kWh) = Energi listrik yang digunakan selama heater menyala.
- Daya Heater (W) = Besarnya daya listrik heater dalam satuan Watt.
- Waktu Heater ON (menit) = Lama waktu heater aktif atau menyala.
- 1000 = Faktor konversi dari Watt (W) ke kilowatt (kW).
- 60 = Faktor konversi dari menit ke jam.

Contoh Perhitungan Percobaan 1 (35°)

Diketahui:

- Daya Heater = 800 W
- Heater ON = 7,25 menit

$$\begin{aligned} \text{Konsumsi Daya} &= \frac{800 \times 7,25}{1000 \times 60} \\ &= \frac{5800}{60000} = 0,0966667 \text{ kWh} \end{aligned}$$

Untuk rumus konsumsi daya di atas digunakan untuk menghitung total energi listrik (dalam satuan kWh) yang dikonsumsi oleh heater selama proses pengeringan berlangsung. Untuk prinsip dasar rumus ini adalah mengalikan daya heater (dalam Watt) dengan durasi heater dalam kondisi ON (dalam menit), lalu dikonversi ke satuan kilowatt-jam (kWh) menggunakan faktor pembagi 1.000×60 . Dan perlu dicatat juga bahwa yang dihitung hanyalah waktu heater benar-benar aktif (Heater ON), bukan total durasi pengeringan 60 menit, karena kontrol hysteresis menyebabkan heater bersiklus ON-OFF secara otomatis. Hal ini membuat nilai konsumsi daya aktual jauh lebih rendah dibandingkan jika heater menyala terus-menerus selama 60 menit penuh (yang akan mengonsumsi $800 \text{ W} \times 60 \text{ menit} / 60.000 = 0,800 \text{ kWh}$), Kemudian dengan heater 800 W yang aktif selama 7,25 menit pada pengujian setpoint 35°C, diperoleh konsumsi daya sebesar 0,0967 kWh. Nilai ini sangat kecil karena pada setpoint rendah (35°C), suhu ruang pengering relatif cepat mencapai batas target, sehingga heater hanya perlu menyala sebentar. Selanjutnya, perhitungan biaya operasional dijelaskan menggunakan rumus berikut :

Rumus Biaya Operasional :

$$\text{Biaya Operasional (Rp)} = \text{Konsumsi Daya (kWh)} \times \text{Tarif Listrik (Rp/kWh)}$$

Keterangan:

- Biaya Operasional (Rp) = Biaya listrik yang dikeluarkan selama alat beroperasi.
- Konsumsi Daya (kWh) = Energi listrik yang digunakan.
- Tarif Listrik (Rp/kWh) = Harga listrik per kilowatt-hour.
- Rp = Satuan mata uang Rupiah.

Contoh Perhitungan Percobaan 1 (35°)

Diketahui:

- Konsumsi Daya = 0,0966667 kWh
- Tarif Listrik = Rp 1.444/kWh

$$\begin{aligned} \text{Biaya Operasional} &= 0,0966667 \times 1444 \\ &= 139,5867 \approx \text{Rp } 139,59 \end{aligned}$$

Rumus biaya operasional di atas digunakan untuk mengonversi nilai konsumsi daya (kWh) menjadi satuan biaya dalam Rupiah, dengan mengalikannya menggunakan tarif listrik yang berlaku. Tarif listrik yang digunakan sebagai acuan dalam penelitian ini adalah sebesar Rp 1.444/kWh, sesuai tarif listrik PLN untuk golongan rumah tangga daya 1.300 VA hingga 2.200 VA berdasarkan ketentuan yang berlaku pada periode penelitian ini. Perhitungan ini dilakukan untuk memberikan gambaran nyata tentang biaya yang harus dikeluarkan pengguna setiap kali mengoperasikan alat pengering helm dan sepatu ini. Dari contoh perhitungan di atas, biaya operasional untuk satu sesi pengeringan pada setpoint 35°C dengan heater aktif 7,25 menit hanya sebesar Rp 139,59. Nilai ini menunjukkan bahwa sistem pengering yang dikembangkan sangat hemat energi berkat mekanisme kontrol hysteresis yang mengatur heater agar tidak menyala terus-menerus. Sebagai perbandingan, apabila heater menyala selama 60 menit penuh, biaya operasional yang diperlukan adalah sekitar Rp 1.155,20 per sesi. Dengan kontrol hysteresis ini, biaya dapat ditekan hingga lebih dari 80% apabila menggunakan setpoint rendah. Perhitungan konsumsi daya dan biaya operasional yang lebih rinci untuk masing-masing setpoint dan jenis objek akan dibahas pada sub-bagian berikut.

a. Konsumsi Daya dan Biaya Operasional pada Pengujian Kontrol Hysteresis

Konsumsi daya dan biaya operasional sistem pengering pada pengujian kontrol hysteresis dengan objek campuran helm dan sepatu. Pengujian dilakukan menggunakan heater 800 W dengan tarif listrik Rp 1.444/kWh. Data tersebut menunjukkan bahwa durasi total pengeringan pada setiap percobaan adalah tetap 60 menit, sedangkan lama heater aktif (Heater ON) bervariasi sesuai dengan setpoint suhu yang ingin digunakan.

Tabel 10 . Konsumsi Daya dan Biaya Operasional

Percobaan	Target (°C)	Waktu	Heater ON (menit)	Heater OFF (menit)	Daya (kWh)	Biaya (Rp)
1	35	60	7,25	52,75	0,096	139,58
2	40	60	3,11	29,89	0,401	579,71
3	45	60	32,37	27,63	0,431	623,23
4	50	60	35,34	24,65	0,471	680,41
Rata-rata					0,350	505,73

Data pada Tabel 10 menunjukkan hubungan yang sangat jelas antara setpoint suhu dan konsumsi energi sistem. Pada setpoint 35°C, heater hanya aktif selama 7,25 menit dari total 60 menit durasi pengeringan, menghasilkan konsumsi daya sebesar 0,097 kWh dengan biaya operasional hanya Rp 139,59. Hal ini disebabkan suhu ruang pengering yang relatif cepat mencapai batas atas hysteresis (37°C) sehingga heater lebih banyak dalam kondisi OFF. Sebaliknya, pada setpoint 50°C, heater aktif selama 35,34 menit dan mengonsumsi 0,471 kWh senilai Rp 680,41, karena dibutuhkan energi yang jauh lebih besar untuk mempertahankan suhu pada rentang 48–52°C. Secara keseluruhan, rata-rata konsumsi daya pada pengujian

hysteresis ini adalah 0,350 kWh dengan biaya rata-rata Rp 505,74 per sesi pengeringan 60 menit, yang tergolong sangat ekonomis untuk keperluan pengeringan helm dan sepatu sehari-hari.

b. Konsumsi Daya dan Biaya Operasional pada Pengujian Perobjek (Satu – Satu)

Selain pengujian kontrol hysteresis secara gabungan, dilakukan pula konsumsi daya dan biaya operasional pada pengujian pengeringan perobjek (satu per satu). Pengujian ini menggunakan heater 800 W dengan tarif listrik acuan Rp 1.444/kWh, dan dilakukan pada enam jenis objek, yaitu Helm Full Face, Helm Half Face, Sepatu Canvas, Sepatu Kulit, Sepatu Goretex, dan Sepatu Suede, masing-masing pada empat variasi setpoint suhu (35°C, 40°C, 45°C, dan 50°C) selama 60 menit. Lama heater aktif (Heater ON) pada setiap percobaan bervariasi bergantung pada karakteristik termal masing-masing objek dan setpoint suhu yang digunakan. Berikut adalah hasil yang dapat dilihat pada Tabel 11 hingga Tabel 17 :

Tabel 11 . Konsumsi Daya dan Biaya Operasional Helm Full Face

Percobaan	Target (°C)	Waktu	Heater ON (menit)	Heater OFF (menit)	Daya (kWh)	Biaya (Rp)
1	35	60	4,15	55,85	0,055	79,90
2	40	60	10,63	49,37	0,141	204,66
3	45	60	27,59	32,41	0,367	531,19
4	50	60	33,1	25,68	0,441	637,28
Rata-rata					0,251	363,26

Tabel 11 menampilkan data konsumsi daya dan biaya operasional khusus untuk pengujian Helm Full Face. Terlihat bahwa waktu heater aktif meningkat signifikan dari 4,15 menit pada setpoint 35°C menjadi 33,10 menit pada setpoint 50°C. Konsekuensinya, konsumsi daya juga meningkat dari 0,055 kWh (Rp 79,90) menjadi 0,441 kWh (Rp 637,29). Rata-rata konsumsi daya untuk Helm Full Face adalah 0,252 kWh per sesi dengan biaya rata-rata Rp 363,26, yang sejalan dengan tingginya efektivitas pengeringan yang diperoleh pada objek ini.

Tabel 12 . Konsumsi Daya dan Biaya Operasional Helm Half Face

Percobaan	Target (°C)	Waktu	Heater ON (menit)	Heater OFF (menit)	Daya (kWh)	Biaya (Rp)
1	35	60	5,5	54,5	0,073	105,89
2	40	60	12,95	47,05	0,172	249,33
3	45	60	20,5	39,17	0,273	394,69
4	50	60	30,53	29,47	0,407	587,80
Rata-rata					0,231	334,43

Tabel 12 memperlihatkan konsumsi daya pengujian Helm Half Face dengan rata-rata heater ON yang lebih bervariasi. Pada setpoint 35°C, heater aktif 5,50 menit dengan konsumsi 0,073 kWh (Rp 105,89). Nilai ini sedikit lebih tinggi dibandingkan Helm Full Face pada setpoint yang sama, yang dapat disebabkan oleh perbedaan kondisi awal dan distribusi panas pada ruang pengering. Pada setpoint 50°C, heater aktif selama 30,53 menit dengan konsumsi 0,407 kWh (Rp 587,80). Rata-rata konsumsi daya Helm Half Face

sebesar 0,232 kWh per sesi dengan biaya Rp 334,43, sedikit lebih rendah dari Helm Full Face, yang mencerminkan volume material yang lebih kecil dan kebutuhan energi pengeringan yang lebih rendah.

Tabel 13 . Konsumsi Daya dan Biaya Operasional Sepatu Canvas

Percobaan	Target (°C)	Waktu	Heater ON (menit)	Heater OFF (menit)	Daya (kWh)	Biaya (Rp)
1	35	60	7,79	52,21	0,103	149,98
2	40	60	12,95	47,05	0,172	249,33
3	45	60	21,80	38,20	0,290	419,72
4	50	60	32,24	27,73	0,429	620,72
Rata-rata					0,249	359,94

Berdasarkan Tabel 13 ini, konsumsi daya pengeringan Sepatu Canvas menunjukkan pola yang konsisten meningkat seiring kenaikan setpoint. Pada setpoint 35°C, heater aktif 7,79 menit dengan konsumsi 0,104 kWh (Rp 149,98), sedangkan pada 50°C meningkat menjadi 32,24 menit dengan konsumsi 0,430 kWh (Rp 620,73). Rata-rata konsumsi daya Sepatu Canvas sebesar 0,249 kWh per sesi dengan biaya Rp 359,94. Nilai ini hampir setara dengan Helm Full Face, yang mengindikasikan bahwa kebutuhan energi untuk mengeringkan sepatu kanvas relatif sebanding dengan helm, meskipun dimensi fisik dan jenis materialnya berbeda.

Tabel 14 . Konsumsi Daya dan Biaya Operasional Sepatu Kulit

Percobaan	Target (°C)	Durasi Total (menit)	Heater ON (menit)	Heater OFF (menit)	Daya (kWh)	Biaya (Rp)
1	35	60	6.96	53.04	0.0928	134.0032
2	40	60	15.13	44.87	0.201733333	291.3029333
3	45	60	21.18	38.82	0.2824	407.7856
4	50	60	39.38	20.62	0.525066667	758.1962667
Rata-rata					0.2755	397.822

Tabel 14 menunjukkan bahwa Sepatu Kulit memiliki konsumsi daya yang bervariasi cukup signifikan antar setpoint. Pada setpoint 35°C, heater aktif hanya 6,96 menit (0,093 kWh, Rp 134,00), namun pada setpoint 50°C meningkat tajam menjadi 39,38 menit (0,525 kWh, Rp 758,20)—menjadi nilai konsumsi daya tertinggi kedua di antara semua objek uji per sesi. Rata-rata konsumsi daya sebesar 0,276 kWh dengan biaya Rp 397,82 per sesi ini juga lebih tinggi dibanding Sepatu Canvas, padahal hasil pengeringannya justru lebih rendah. Hal ini mengindikasikan bahwa material kulit membutuhkan energi lebih besar untuk memanaskan permukaannya, namun proses pelepasan uap air dari dalam material berlangsung lebih lambat dibanding material lainnya.

Tabel 15 . Konsumsi Daya dan Biaya Operasional Sepatu Goretex

Percobaan	Target (°C)	Waktu	Heater ON (menit)	Heater OFF (menit)	Daya (kWh)	Biaya (Rp)
1	35	60	8,15	51,85	0,108	156,91
2	40	60	20,77	39,23	0,276	399,89
3	45	60	26,03	33,97	0,347	501,16
4	50	60	39,32	20,68	0,524	757,04
Rata-rata					0,314	453,75

Tabel 15 memperlihatkan konsumsi daya pengeringan Sepatu Goretex yang tertinggi di antara seluruh objek uji, dengan rata-rata 0,314 kWh per sesi dan biaya rata-rata Rp 453,75. Hal ini disebabkan membran Goretex yang aktif melepaskan uap air menyebabkan suhu di dalam ruang pengering lebih cepat turun, sehingga heater lebih sering aktif untuk mempertahankan suhu pada batas hysteresis. Waktu heater ON terlama terjadi pada setpoint 50°C yaitu 39,32 menit (0,524 kWh, Rp 757,04). Meskipun konsumsi dayanya tertinggi, efisiensi pengeringan Sepatu Goretex juga paling unggul dengan kelembapan hilang mencapai 11,50% pada 50°C, sehingga rasio antara energi yang dikonsumsi dan hasil pengeringan yang diperoleh tetap sangat baik.

Tabel 16 . Konsumsi Daya dan Biaya Operasional Sepatu Suede

Percobaan	Target (°C)	Waktu	Heater ON (menit)	Heater OFF (menit)	Daya (kWh)	Biaya (Rp)
1	35	60	7,75	52,27	0,103	149,21
2	40	60	17,73	42,27	0,236	341,36
3	45	60	23,44	36,56	0,312	451,29
4	50	60	32,24	27,76	0,429	620,72
Rata-rata					0,270	390,65

Berdasarkan Tabel 16 ini, konsumsi daya pengeringan Sepatu Suede berada pada kisaran menengah dengan rata-rata 0,271 kWh per sesi dan biaya Rp 390,65. Pada setpoint 35°C, heater aktif 7,75 menit (0,103 kWh, Rp 149,21), sedangkan pada 50°C meningkat menjadi 32,24 menit (0,430 kWh, Rp 620,73). Pola konsumsi ini mirip dengan Sepatu Canvas, yang dapat dijelaskan oleh kesamaan karakteristik tekstil pada kedua material meskipun jenis seratnya berbeda. Nilai konsumsi daya yang moderat pada Sepatu Suede ini sejalan dengan tingkat efektivitas pengeringannya yang juga tergolong sedang (kategori “Cukup”) pada semua setpoint.

Tabel 17 . Rata-rata Konsumsi Daya dan Biaya Operasional per Jenis Objek

Jenis Objek	Rata-rata Daya (kWh)	Rata-rata Biaya (Rp)
Helm Full Face	0,251	363,26
Helm Half Face	0,231	334,43
Sepatu Canvas	0,249	359,94
Sepatu Kulit	0,275	397,82
Sepatu Goretex	0,314	453,75
Sepatu Suede	0,270	390,65

Tabel 17 merangkum rata-rata konsumsi daya dan biaya operasional dari seluruh enam jenis objek uji yang telah diuji secara perobjek. Dari data tersebut tampak bahwa Sepatu Goretex memiliki rata-rata konsumsi daya tertinggi (0,314 kWh, Rp 453,75), diikuti Sepatu Kulit (0,276 kWh, Rp 397,82), Sepatu Suede (0,271 kWh, Rp 390,65), Helm Full Face (0,252 kWh, Rp 363,26), Sepatu Canvas (0,249 kWh, Rp 359,94), dan Helm Half Face (0,232 kWh, Rp 334,43) sebagai objek dengan konsumsi daya paling rendah. Perbedaan konsumsi daya antar objek ini mencerminkan perbedaan karakteristik termal dan kemampuan penyerapan kelembapan masing-masing material. Secara keseluruhan, seluruh objek menunjukkan biaya operasional yang sangat terjangkau, yaitu berkisar antara Rp 334 hingga Rp 454 per sesi pengeringan 60 menit, menegaskan bahwa sistem pengering berbasis IoT ini layak digunakan secara ekonomis baik pada skala rumah tangga maupun bengkel kendaraan bermotor.

Secara keseluruhan, dari seluruh hasil pengujian yang telah dipaparkan di atas dapat diketahui bahwa alat pengering helm dan sepatu berbasis IoT yang dibuat telah bekerja sesuai dengan apa yang direncanakan, baik dari sisi akurasi sensor, kestabilan kontrol hysteresis, maupun keandalan sistem monitoring dan kontrol melalui Telegram. Namun demikian, terdapat beberapa temuan umum yang perlu menjadi catatan. Efektivitas pengeringan ternyata sangat dipengaruhi oleh karakteristik material objek, di mana Sepatu Goretex dan Helm Full Face menunjukkan respons paling baik terhadap kenaikan suhu, sedangkan Sepatu Kulit dan Sepatu Suede belum mencapai kategori pengeringan “Baik” pada rentang setpoint 35°C–50°C dalam durasi 60 menit sehingga membutuhkan setpoint yang lebih tinggi atau durasi pengeringan yang lebih lama. Selain itu, konsumsi daya dan biaya operasional juga turut meningkat seiring naiknya setpoint suhu, meskipun secara keseluruhan masih berada pada kisaran yang ekonomis untuk penggunaan sehari-hari.

4. PENUTUP

Berdasarkan rangkaian pengujian yang telah dilakukan terhadap sistem kendali pengering helm dan sepatu berbasis Internet of Things (IoT) ini, bagian ini menyajikan kesimpulan akhir yang merangkum capaian penelitian serta saran perbaikan untuk pengembangan sistem pada penelitian selanjutnya.

4.1 KESIMPULAN

Penelitian dan pengujian terhadap sistem kendali pengering helm dan sepatu berbasis Internet of Things (IoT) melalui Telegram ini telah dilakukan secara bertahap. Tahapan tersebut meliputi pengujian akurasi sensor, kinerja kontrol hysteresis, efektivitas pengeringan pada berbagai setpoint dan jenis material, hingga analisis konsumsi daya serta perbandingannya dengan penelitian sejenis sebelumnya. Berdasarkan keseluruhan hasil tersebut, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Pengujian integrasi sistem menunjukkan seluruh perangkat keras dan perangkat lunak, mulai dari sensor DHT22, mikrokontroler ESP32, SSR 10DA, heater PTC, kipas DC, LCD I2C, hingga Telegram Bot, berhasil bekerja sesuai rancangan tanpa kendala berarti.
2. Pengujian akurasi menunjukkan sensor DHT22 memiliki rata-rata error hanya 1,18% dibandingkan termometer inframerah sebagai alat ukur acuan, masih berada dalam batas toleransi spesifikasi sensor ($\pm 0,5^{\circ}\text{C}$).
3. Pengujian kontrol hysteresis dengan dead zone $\pm 2^{\circ}\text{C}$ menunjukkan kinerja yang stabil, dengan steady state error konsisten 1°C dan frekuensi switching SSR yang aman (3–6 kali/jam), lebih unggul dibandingkan kontrol on-off sederhana yang rawan switching berlebihan.
4. Perbandingan hasil pengujian pada empat variasi setpoint menunjukkan efektivitas pengeringan meningkat seiring naiknya suhu; setpoint 45°C dan 50°C menghasilkan kategori "Baik" (kelembapan hilang di atas 5%), sedangkan setpoint 35°C masih tergolong "Kurang" dalam durasi 60 menit yang sama.
5. Perbandingan antar objek uji menunjukkan efektivitas pengeringan dipengaruhi oleh karakteristik material: Sepatu Goretex dan Helm Full Face paling responsif terhadap panas, sedangkan Sepatu Kulit dan Sepatu Suede belum mencapai kategori "Baik" pada rentang setpoint 35°C – 50°C sehingga membutuhkan setpoint yang lebih tinggi atau durasi pengeringan yang lebih lama.
6. Perbandingan biaya operasional menunjukkan kontrol hysteresis dapat menghemat biaya listrik hingga lebih dari 80% dibandingkan apabila heater menyala terus-menerus, dengan rata-rata biaya per sesi pengeringan 60 menit yang tetap ekonomis, yaitu Rp 334 hingga Rp 454.
7. Dibandingkan dengan penelitian sejenis sebelumnya, seperti penjemur pakaian otomatis berbasis ESP32 dan Telegram Bot (Suharjo, 2020) serta lemari pengering dan pensterilisasi pakaian bayi otomatis berbasis IoT (Rahmi & Yelfianhar, 2023), sistem ini menawarkan kebaruan berupa keragaman objek uji (helm dan enam jenis sepatu), pengaturan setpoint yang dapat dilakukan

langsung oleh pengguna, serta analisis kuantitatif konsumsi daya dan biaya operasional yang lebih rinci.

8. Pengujian kendali dan monitoring melalui Telegram Bot menunjukkan sistem berjalan stabil dan responsif, sehingga proses pengeringan dapat dipantau dan dikendalikan dari jarak jauh secara lebih praktis dibandingkan metode penjemuran konvensional yang bergantung pada cuaca dan pengawasan langsung, sekaligus membuka potensi penerapan yang lebih luas baik pada skala rumah tangga maupun bengkel kendaraan bermotor.

4.2 SARAN

Berdasarkan kesimpulan yang telah dipaparkan, terdapat beberapa hal yang perlu menjadi perhatian agar hasil penelitian ini dapat dikembangkan lebih lanjut menjadi sistem yang lebih efektif dan efisien. Saran-saran tersebut antara lain:

1. Penggunaan alat ukur referensi yang lebih sesuai, seperti termo-higrometer digital terkalibrasi, disarankan untuk pengujian akurasi sensor DHT22 selanjutnya, mengingat termometer inframerah pada dasarnya mengukur suhu permukaan benda, bukan suhu udara seperti yang diukur oleh DHT22.
2. Pengembangan sistem dengan penambahan fitur pengaturan setpoint otomatis berdasarkan jenis material objek (misalnya kulit, suede, atau goretex) dapat dipertimbangkan, mengingat tiap material memiliki karakteristik respons panas yang berbeda.
3. Penambahan sensor arus atau daya secara real-time disarankan agar analisis konsumsi energi dapat diukur secara langsung, bukan hanya berdasarkan estimasi spesifikasi komponen.
4. Pengujian jangka panjang (long-term reliability test) terhadap komponen seperti heater PTC dan SSR perlu dilakukan untuk mengetahui daya tahan dan stabilitas sistem dalam penggunaan berkelanjutan.
5. Pengembangan sistem ke skala yang lebih besar, seperti penerapan pada bengkel kendaraan bermotor atau usaha cuci sepatu, dapat menjadi arah penelitian selanjutnya guna menguji efektivitas sistem dalam kapasitas dan intensitas penggunaan yang lebih tinggi.

PERSANTUNAN

Alhamdulillah, puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas segala rahmat, hidayah, dan kesehatan yang diberikan sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik. Penulis menyadari bahwa keberhasilan penelitian ini tidak lepas dari bimbingan dan dukungan berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis menyampaikan terima kasih yang tulus kepada:

1. Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan penelitian dan naskah publikasi ini dengan baik.
2. Keluarga, orang tua, dan saudara yang senantiasa memberikan doa, motivasi, serta dukungan moril maupun materil demi kelancaran tugas akhir ini.
3. Bapak Aris Budiman, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan ilmu, waktu, dan kesabaran dalam membimbing penulis hingga selesainya penelitian ini.
4. Rekan-rekan sejawat (Surya, Eko, Rijal Mulet, Ilham, Abdul, Ridho Uda, Edo) yang telah berbagi ilmu teknis, bantuan di lapangan, serta keceriaan selama masa pengerjaan penelitian.
5. Seluruh rekan mahasiswa Teknik Elektro yang telah memberikan dukungan, bantuan teknis, serta motivasi dalam lingkungan akademik yang kondusif selama masa studi dan penelitian.

Semoga penelitian ini dapat memberikan manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, khususnya di bidang sistem pengering berbasis IoT.



DAFTAR PUSTAKA

- Badan Pusat Statistik. (2023). *Statistik Indonesia 2023*. Badan Pusat Statistik. <https://www.bps.go.id/publication/2023/02/10/2098ee31ede31befe6dbc741/statistik-indonesia-2023.html>
- BMKG Surakarta. (2024). *Laporan Intensitas Curah Hujan Wilayah Solo Raya Tahun 2024*. Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika. <https://www.bmkg.go.id>
- Baskaran, A., Wibowo, S., & Santosa, R. (2021). Rancang bangun sistem pengering sepatu otomatis menggunakan sensor kelembapan suhu berbasis Arduino. *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, 12(3), 22–30. <https://doi.org/10.23960/jitet.v12i3>
- Espressif Systems. (2023). *ESP32 Technical Reference Manual* (Version 5.1). https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_technical_reference_manual_en.pdf
- Hariyanto, D., & Nugroho, A. (2022). Rancang bangun sistem pemantauan suhu dan kelembapan realtime berbasis ESP32. *Jurnal Teknologi dan Riset Terapan*, 3(1), 23–30.
- Maryana, Putri, N. D., & Nurmasyitah. (2023). Kajian termodinamika pada alat pengering tangan (hand dryer) sederhana. *Jurnal Pendidikan Indonesia*, 4(2), 185–195.
- Pranita, E., Wibowo, A., & Santoso, R. (2023). Rancang bangun sistem pengering gabah otomatis menggunakan metode fuzzy berbasis Arduino. *Jurnal Ilmiah Teknologi Elektro*, 23(1), 169–176.
- Puspasari, F., Fahrurrozi, I., Setyawan, T. P., Pamungkas, G., & Sa'adah, M. (2020). Analisis akurasi sistem sensor DHT22 berbasis Arduino terhadap thermohygrometer standar. *Jurnal Fisika dan Aplikasinya*, 16(1), 40–44. <https://doi.org/10.12962/j24604682.v16i1.5582>
- Rahmi, R., & Yelfianhar, I. (2023). Perancangan sistem lemari pengering dan pensterilisasi pakaian bayi otomatis berbasis IoT. *JTEIN: Jurnal Teknik Elektro Indonesia*, 4(2), 683–692. <https://doi.org/10.24036/jtein.v4i2.462>
- Suharjo, I. (2020). Prototype alat kendali otomatis penjemur pakaian menggunakan NodeMCU ESP32 dan Telegram Bot berbasis Internet of Things. *Journal of Information System and Artificial Intelligence*, 1(1), 17–24.
- Tisna, D. R., Putra, B. J. M., Maharani, T., & Hasnira, H. (2024). Pemanfaatan chatbot Telegram untuk monitoring dan kontrol kualitas air menggunakan ESP32. *JUPI (Jurnal Ilmiah Penelitian dan Pembelajaran Informatika)*, 9(3), 1292–1306.
- Yuliana, E., & Pradana, M. (2022). Implementasi Internet of Things pada sistem kontrol suhu ruangan dengan ESP32. *Jurnal Ilmiah Teknologi Informasi dan Sains*, 12(3), 145–152.