Perancangan *General Dry Box* Menggunakan *Closed Air Circulation System* untuk Menjaga Suhu dan Kelembaban

Imam Junaedi
Program Studi Teknik Komputer Kontrol, Jurusan Teknik, Politeknik Negeri Madiun
e-mail : imam.junaedi@pnm.ac.id

Liya Yuni Astuti, Fachruddin Ari Setiawan, Delan Novit Widhiyoga
Program Studi Teknik Komputer Kontrol, Jurusan Teknik, Politeknik Negeri Madiun

Abstrak

Komponen elektronik dan filamen 3D printing memerlukan pengondisian lingkungan mikro yang presisi dan terisolasi untuk menjaga keandalan operasionalnya. Penelitian ini merancang general dry box berbasis closed air circulation system menggunakan mikrokontroler ESP32, sensor SHT41, modul dehumidifier Peltier TEC-12706 (60W), PTC heater (50W), serta algoritma kendali On-Off Histeresis (toleransi 3,0°C dan 3,0% RH). Kalibrasi sensor SHT41 mengonfirmasi akurasi tinggi dengan relative error rata-rata 3,2% pada suhu dan 3,3% pada kelembaban relatif. Pengujian menggunakan peltier saja berhasil menurunkan kelembaban relatif (RH) dari 65,2% menjadi 40,0% dalam 20 menit. Pada penggunaan kombinasi Peltier dan PTC heater, RH diturunkan dari 58,6% menjadi 40,2% dalam jangka waktu 10 menit. Uji kebocoran pasif selama 45 menit saat sistem mati membuktikan kerapatan mekanik yang cukup baik, di mana suhu meluruh lambat dari 38,0°C ke 31,9°C dan RH internal hanya mengalami kenaikan tipis dari 40,0% RH ke 44,1% RH pada suhu eksternal 27,0°C dan kelembapan eksternal 56,0% RH. Uji pembebanan mencapai set point 42,0% RH dalam 17 menit (kapasitas 50%) dan 48 menit (kapasitas 100%). Pada pengujian gangguan pintu dibuka 1 menit (suhu eksternal 27,0°C dan dan kelembapan eksternal 56,0% RH), suhu turun ke 31,2°C dan kelembapan naik ke 48,8% RH, namun suhu terpulihkan ke 38,0°C dalam 10 menit dan RH terpulihkan kembali ke set point 40,0% RH dalam 12 menit. Total akumulasi energi selama pengujian 95 menit adalah 62,158 Wh (0,06216 kWh) dengan duty cycle operasional modul Peltier sebesar 15,79% dan PTC heater sebesar 47,37%.
Kata Kunci: *dry box, esp32, sht41, closed air circulation system, hysteresis.*

Abstract

Electronic components and 3D printing filaments require storage conditions with maintained temperature and humidity to ensure optimal quality, reliability, and lifespan. Conventional dry boxes using silica gel or air heating have limitations in maintaining stable environmental conditions and may increase the storage chamber temperature. This study aims to design and realize a general dry box based on a closed air circulation system capable of automatically controlling temperature and humidity. The system uses ESP32 as the main controller, SHT41 sensor to measure temperature and humidity, a Peltier module as a condensation-based dehumidifier, a PTC heater as a temperature controller, and an on-off hysteresis control method to reduce actuator switching frequency. The research methodology includes literature review, requirements analysis, design, fabrication, testing, and evaluation. Test results demonstrate that the system effectively controls temperature and humidity within hysteresis limits, with the PTC heater experiencing only one switching cycle over 39 minutes (off at 38°C, on at 35°C) and the Peltier module one cycle over 67 minutes (off at 40% RH, on at 43% RH), successfully minimizing chattering. The system is also capable of reducing humidity from 65.2% RH to 45% RH in approximately 12 minutes without significant temperature rise. Furthermore, leak test results show that the internal temperature and humidity within the dry box remain more stable compared to the external environment, proving the designed system suitable for storing temperature- and humidity-sensitive materials.
Keywords: *dry box, esp32, sht41, closed air circulation system, hysteresis*.

PENDAHULUAN

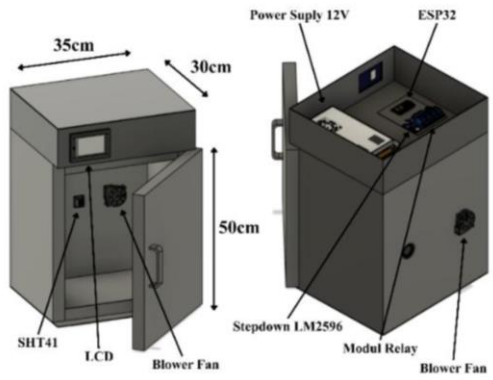
Penyimpanan ialah salah satu upaya pengamanan yang berkaitan dengan aspek waktu dan bertujuan untuk mempertahankan serta menjaga kualitas komoditi serta mencegah dan meminimalkan berbagai faktor yang berpotensi menyebabkan penurunan kualitas maupun kuantitas (Ma'mun dan Haryuni, 2024). Suhu dan kelembaban merupakan faktor utama yang sangat berpengaruh pada kualitas barang yang disimpan (Ardani Bimanta dkk., 2022). Pengaruh ini menjadi semakin signifikan pada barang-barang yang sensitif terhadap perubahan lingkungan, seperti komponen elektronik yang dimana tingkat kelembaban yang tinggi dapat menyebabkan korosi yang dapat mengakibatkan terjadinya kerusakan

maupun malfungsi, sedangkan suhu yang tinggi dapat menurunkan efisiensi dan umur pakai komponen (Hidayat dan Tamaji, 2024). Untuk menghindari potensi terjadinya hal tersebut, maka diperlukan suhu dalam rentang antara 18ºC-28ºC dan kelembaban relatif berkisar antara 40%-60% (Sudaryanto dkk., 2022). Selain komponen elektronik, beberapa plastik jenis thermoplastik yang digunakan sebagai filamen 3D printing seperti PLA dan PETG yang memiliki sifat higroskopis, yakni mudah menyerap kelembaban udara. Akibatnya ketika disimpan di lingkungan lembab, kadar air dalam material meningkat sehingga akan menurunkan kualitas hasil cetak yang membuat produk menjadi rapuh dan berpermukaan kasar (Setyawan dan Ngadiyono, 2022). Kondisi ini sejalan dengan temuan Muflikhun (2025), yang menunjukkan bahwa peningkat kelembaban lingkungan dan suhu perendaman memicu deformasi struktur permukaan serta degradasi termal pada material polimer cetak 3D FDM maupun SLA. Untuk filamen PLA memerlukan tingkat kelembaban relatif di bawah 30% dan suhu stabil antara 20ºC-30°C. Sementara itu, PETG menuntut kondisi yang lebih kering, yaitu di bawah 20% RH, dengan rentang suhu 20ºC-40ºC (Hupli, 2025). Sehingga, diperlukan sistem penyimpanan secara tertutup yang mampu mempertahankan kondisi lingkungan internal yang stabil dan terkontrol.

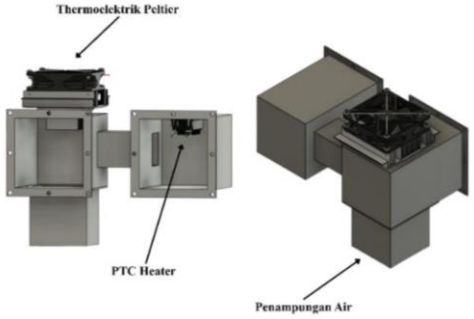
Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini mengembangkan Perancangan General Dry Box Menggunakan Closed Air Circulation System untuk Menjaga Suhu dan Kelembaban, yaitu sistem penyimpanan dengan sirkulasi udara tertutup yang bekerja tanpa adanya pertukaran udara dengan lingkungan luar sehingga seluruh proses pengkondisian berlangsung secara terisolasi dan terkontrol. Sistem ini dirancang untuk menjaga kestabilan kondisi lingkungan penyimpanan melalui pengendalian suhu dan kelembaban secara otomatis. Udara di dalam dry box disirkulasikan secara tertutup menuju kompartemen pengolahan, di mana pengendalian kelembaban dilakukan melalui proses dehumidifikasi berbasis kondensasi dengan efek pendinginan dari thermoelectric peltier, sehingga kandungan uap air di dalam udara dapat dipisahkan sebelum udara dialirkan kembali menuju kompartemen penyimpanan. Sistem dehumidifier berbasis elemen termoelektrik Peltier dan sensor kelembaban telah terbukti efektif oleh Suryantoro (2023) dalam menurunkan kelembaban relatif ruang laboratorium dari kondisi lembab (70% RH) menuju rentang ideal (55% RH) secara terkontrol. Namun, proses tersebut dapat menyebabkan penurunan suhu udara, sehingga sistem dilengkapi PTC heater yang akan aktif secara otomatis ketika suhu berada di bawah set point untuk menstabilkan kembali suhu udara. Seluruh proses pengendalian ini dikendalikan oleh mikrokontroler ESP32 yang berfungsi sebagai pusat pengolahan data dan pengambilan keputusan, dengan sensor SHT41 sebagai pengukur suhu dan kelembaban yang memiliki tingkat akurasi dan reliabilitas tinggi. Data hasil pengukuran dari lingkungan pengujian digunakan sebagai dasar pengendalian sistem secara otomatis dengan menerapkan metode kendali berbasis On-Off histerisis, di mana aktuator bekerja berdasarkan batas atas dan batas bawah set point untuk mencegah terjadinya switching secara berulang dan meningkatkan kestabilan kerja sistem. Selain itu, sistem dilengkapi dengan antarmuka berbasis LCD TFT yang berfungsi sebagai media tampilan dan kendali, sehingga dapat dilakukan pemantauan kondisi suhu dan kelembaban secara real-time serta melakukan pengaturan parameter sesuai dengan kebutuhan penyimpanan.

Penelitian ini bertujuan untuk menghasilkan sebuah general dry box yang fleksibel dalam penggunaannya serta mampu menjaga kestabilan suhu dan kelembaban secara aman dan efektif melalui penerapan closed air circulation system dengan proses dehumidifikasi berbasis kondensasi. Alat yang dikembangkan diharapkan dapat memberikan perlindungan yang lebih handal dan aman terhadap berbagai komponen maupun material sensitif dari risiko kerusakan akibat kondisi lingkungan penyimpanan yang tidak terkontrol.

METODE



Gambar 1. Desain Mekanik General Dry Box



Gambar 2. Desain Mekanik Closed Air Circulation System

Metode yang digunakan ialah rancang bangun yang

dilaksanakan di Laboratorium. Metode ini mencakup tahapan perancangan dan pembangunan sistem yang dilakukan secara terintegrasi. Tahap perancangan merupakan proses sistematis untuk menerjemahkan hasil studi literatur, analisa kebutuhan dan spesifikasi sistem ke dalam bentuk model, rancangan teknis, serta bahasa pemrograman, sehingga diperoleh gambaran yang rinci mengenai struktur, fungsi, dan implementasi setiap komponen sistem. Tahap perancangan yang dilakukan antara lain merancang sistem closed air circulation, desain diagram blok sistem general dry box, serta algoritma untuk pengendalian suhu dan kelembaban. Selanjutnya, tahap pembangunan merupakan proses merealisasikan rancangan tersebut melalui pembuatan, dan pengujian sistem, baik sebagai sistem baru maupun sebagai pengembangan maupun penyempurnaan dari sistem yang telah ada. Desain mekanik general dry box ditunjukkan pada gambar 1.

Sistem Closed Air Circulation

Metode closed air circulation system menerapkan prinsip konservasi massa udara dalam ruang tertutup terisolasi (m_{air} = konstan). Berbeda dengan sistem sirkulasi terbuka (open-loop) yang secara kontinyu memasukkan udara ambien dengan entalpi dan beban kelembaban yang berfluktuasi, sistem tertutup ini mengondisikan volume udara yang sama secara berulang (closed-loop air circulation). Udara lembab di dalam ruang penyimpanan dialirkan secara terarah melewati permukaan dingin thermoelectric cooler (peltier) yang dikondisikan berada di bawah titik embun (dew point). Proses ini memaksa uap air terintersepsi dan mengembun menjadi fasa cair, sehingga menurunkan kelembaban spesifik (humidity ratio) udara secara efektif. Udara yang telah mengalami dehumidifikasi dan penyesuaian suhu oleh PTC heater kemudian didistribusikan kembali secara merata ke seluruh kompartemen penyimpanan tanpa mengalami gangguan perubahan kondisi akibat pengaruh lingkungan eksternal. Gambar 2 menunjukkan desain mekanik pada bagian closed air circulation system.

Pemilihan metode closed air circulation system didasari oleh kebutuhan untuk mengeliminasi beban kelembaban eksternal (ambient moisture load) di iklim tropis, sehingga proses mengondisikan udara berlangsung dalam ruang tertutup yang terisolasi sepenuhnya dari lingkungan luar. Isolasi ini secara signifikan meningkatkan efisiensi energi aktuator Peltier dan PTC heater, yang terbukti dapat menekan frekuensi switching dan mencegah fenomena chattering pada relay. Pemanfaatan unit termoelektrik pada sirkulasi udara tertutup ini juga menawarkan efisiensi sirkulasi termal yang tinggi tanpa adanya bagian mekanis bergerak, sehingga mampu mengkondensasikan uap air sekaligus memulihkan suhu udara pengering secara optimal (Tikhomirov dkk., 2024). Selain itu, sirkulasi udara tertutup mampu melindungi material sensitif seperti komponen elektronik dan filamen 3D printing dari kontaminasi debu eksternal, sekaligus mengatasi keterbatasan metode konvensional seperti silika gel yang mudah jenuh maupun pemanas udara biasa yang berisiko merusak komponen akibat lonjakan suhu berlebih.

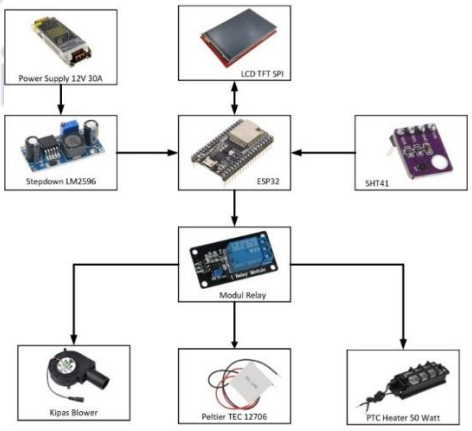
Nilai relative error pembacaan sensor SHT41 terhadap perubahan suhu dan kelembapan perlu dilakukan dengan menggunakan persamaan (1), dimana nilai aktual diperoleh dari pembacaan alat pembanding berupa hygrometer Tapo T315, dan nilai terukur diperoleh dari hasil pembacaan sensor SHT41. Nilai relative error digunakan sebagai indikator performa dari sensor SHT41 dalam pembacaan nilai suhu dan kelembapan di dalam closed air circulation system.

$$Relative\ error(\%) = \frac{|nilai\ aktual - nilai\ terukur|}{nilai\ aktual} x100\% \qquad (1)$$

Blok Diagram General Dry Box

Blok diagram general dry box ditunjukkan pada gambar 3. Sistem memperoleh catu daya dari power supply 12V 30A yang digunakan untuk menyuplai beban utama, sedangkan modul step-down LM2596 menurunkan tegangan menjadi 5V sebagai catu daya ESP32. Sensor SHT41 berfungsi mengukur suhu dan kelembaban di dalam ruang penyimpanan, kemudian data hasil pengukuran dikirimkan ke ESP32 untuk diproses. Nilai suhu, kelembaban, serta status sistem ditampilkan pada LCD TFT SPI sebagai antarmuka pengguna. Hasil pengolahan tersebut ditampilkan secara real-time pada LCD TFT serta digunakan sebagai dasar dalam pengendalian sistem on-off histerisis.

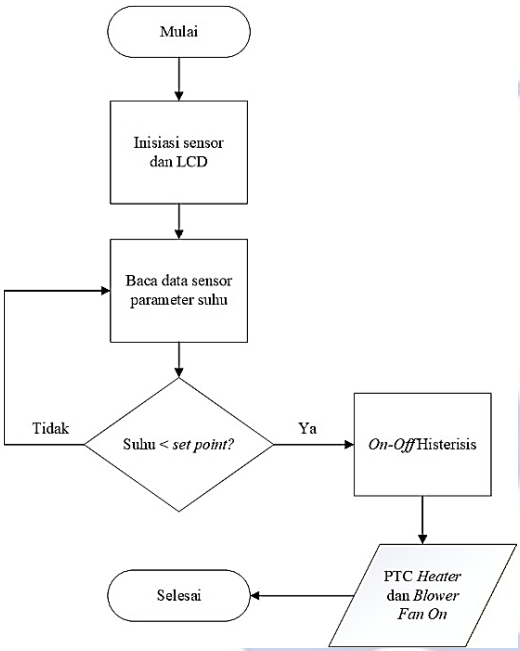
Pengendalian Suhu dan Kelembaban



Gambar 3. Blok Diagram General Dry Box

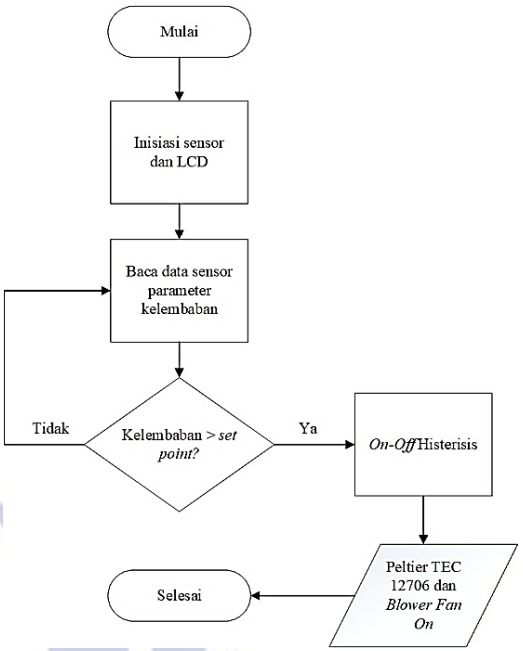
Pengendalian aktuator dilakukan berdasarkan batas atas dan batas bawah histerisis sehingga perubahan kondisi

aktuator tidak terjadi secara langsung akibat fluktuasi kecil pada nilai pembacaan sensor. Sistem mengendalikan suhu dengan membandingkan nilai suhu hasil pembacaan sensor terhadap set point. Ketika suhu berada di bawah set point, metode on-off histerisis mengaktifkan PTC heater dan blower fan hingga suhu mencapai batas atas histerisis. Parameter suhu sebagai nilai ambang batas dalam pengujian PTC heater adalah 38 ºC untuk batas atas (logika OFF) dan 35 ºC untuk batas bawah (logika ON). Logika pengendalian suhu ditunjukkan oleh diagram alir pada gambar 4.



Gambar 4. Flowchart Pengendalian Suhu

Selanjutnya, sistem mengendalikan kelembaban dengan membandingkan nilai kelembaban terhadap set point. Apabila kelembaban melebihi set point, metode on-off histerisis mengaktifkan Peltier TEC-12706 dan blower fan untuk melakukan proses dehumidifikasi melalui kondensasi hingga kelembaban mencapai batas bawah histerisis. Parameter kelembapan sebagai nilai ambang batas dalam pengujian peltier adalah 40 % untuk batas atas (logika OFF) dan 43% untuk batas bawah (logika ON). Logika pengendalian kelembapan ditunjukkan oleh diagram alir pada gambar 5.



Gambar 5. Flowchart Pengendalian Kelembapan

HASIL DAN PEMBAHASAN

Realisasi Perangkat Keras dan Mekanik System

Pengembangan mekanik dry box dilakukan menggunakan panel box berdimensi panjang 30 cm, lebar 40 cm, dan tinggi 30 cm sebagai model dasar. Model dasar tersebut selanjutnya dimodifikasi melalui penyesuaian pada struktur mekanik dan tata letak komponen agar mampu mengakomodasi seluruh kebutuhan sistem yang dirancang, meliputi sensor, aktuator, rangkaian elektronika, serta jalur sirkulasi udara. Modifikasi tersebut dilakukan untuk memastikan integrasi antar komponen dapat berjalan dengan baik serta mendukung kinerja sistem dalam proses pengendalian suhu dan kelembaban. Realisasi drybox ditunjukkan pada gambar 6.



Gambar 6. Realisasi Dry-Box

Mekanik closed air circulation system dipasang pada bagian belakang dry box dan terintegrasi secara langsung dengan dinding bagian belakang ruang penyimpanan. Konfigurasi tersebut dirancang untuk membentuk sistem sirkulasi udara tertutup sehingga aliran udara di dalam dry box dapat bersirkulasi secara kontinu melalui jalur yang

telah dirancang tanpa dipengaruhi oleh kondisi lingkungan eksternal. Dengan demikian, proses distribusi udara, perpindahan panas, dan proses dehumidifikasi dapat berlangsung secara lebih terkendali, sehingga mendukung peningkatan efektivitas sistem dalam mempertahankan kondisi penyimpanan yang stabil. Realisasi mekanik closed air circulation system pada drybox ditunjukkan pada gambar 6.



Gambar 7. Realisasi Mekanik Closed Air Circulation System

Pengujian Akurasi Sensor SHT41

Pengujian akurasi sensor SHT41 dilakukan dengan menempatkan Hygrometer Tapo T315 berdampingan denga sensor SHT41 di dalam dry box. Tapo T315 dipilih sebagai pembanding karena perangkat ini dapat beroperasi pada suhu minus 20ºC hingga 60ºC, dan pada kelembapan 0% RH hingga 99%RH. Tapo T315 memiliki akurasi pembacaan suhu sebesar ±0.3°C dan akurasi pembacaan kelembapan sebesar ±0.54°F.

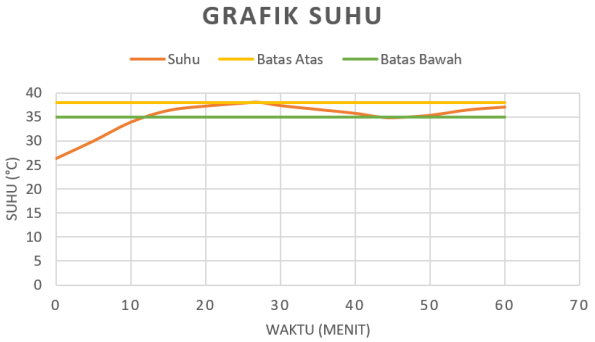
Data hasil pengujian sensor SHT41 ditunjukkan pada tabel 1. Hasil pengujian sensor menunjukkan bahwa sensor memiliki nilai rata-rata relative error sebesar 3,2% pada pembacaan suhu dan nilai rata-rata relative error sebesar 3,3% pada pembacaan kelembapan.

Tabel 1. Pengujian Sensor SHT41

Titik Ukur	Sensor SHT 41 (Suhu ºC/ RH %)	Tapo T315 (Suhu ºC/ RH %)	Selisih mutlak	Error relative Suhu (%)	Error relative Kelembapan (%)
1	26,3 °C / 47,8%	25,2 °C / 49,0%	1,1 °C / 1,2%	4,3%	2,4%
2	28,4 °C / 45,4%	27,1 °C / 47,0%	1,3 °C / 1,6%	4,7%	3,4%
3	30,5 °C / 44,3%	29,4 °C / 46,0%	1,1 °C / 1,7%	3,7%	3,6%
4	33,0 °C / 42,1%	31,8 °C / 44,0%	1,2 °C / 1,9%	3,7%	4,3%
5	35,1 °C / 40,3%	33,9 °C / 42,0%	1,2 °C / 1,7%	3,5%	4,0%
6	37,2 °C / 37,9%	35,8 °C / 39,0%	1,4 °C / 1,1%	3,9%	2,8%
7	40,0 °C / 35,7%	38,9 °C / 37,0%	1,1 °C / 1,3%	2,8%	3,5%
8	43,0 °C / 33,0%	41,6 °C / 34,0%	1,4 °C / 1,0%	3,3%	2,9%
9	45,1 °C / 31,7%	44,0 °C / 31,0%	1,1 °C / 0,7%	2,5%	2,3%
10	47,0 °C / 31,8%	47,0 °C / 31,0%	0,0 °C / 0,8%	0,0%	2,6%
Rata-rata			1,1 °C / 1,3%	3,2%	3,3%

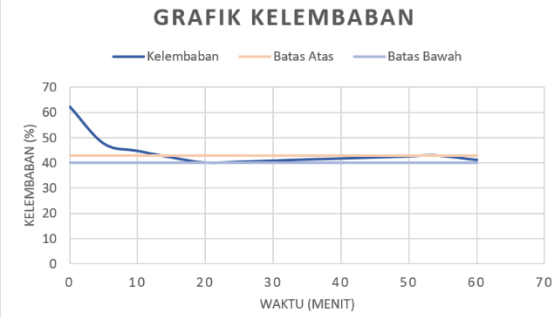
Pengujian PTC Heater

Untuk mengevaluasi kemampuan metode hysteresis maka dilakukan pengujian on-off histerisis. Gambar 8 menunjukkan hasil pengujian on-off histerisis dalam menjaga kestabilan suhu. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu bekerja sesuai dengan rancangan dalam mengendalikan suhu dan kelembaban secara otomatis. Aktuator PTC Heater tetap aktif hingga suhu mencapai batas atas histerisis sebesar 38°C, kemudian dimatikan sehingga suhu menurun secara bertahap. Aktuator baru diaktifkan kembali ketika suhu mencapai batas bawah sebesar 35°C, sehingga tidak terjadi perubahan kondisi aktuator secara berulang akibat fluktuasi suhu di sekitar set point.



Gambar 8. Hasil Pengujian On-Off Histerisis dalam Menjaga Kestabilan Suhu

Gambar 9 menunjukkan hasil pengujian on-off histerisis dalam menjaga kestabilan kelembapan. Peltier TEC-12706 dan blower fan diaktifkan ketika kelembaban berada di atas batas atas histerisis dan tetap bekerja hingga kelembaban turun mencapai batas bawah sebesar 40% selama 20 menit, kemudian dimatikan. Aktuator baru kembali aktif saat kelembaban meningkat hingga batas atas sebesar 43%, sehingga kelembaban dipertahankan berada pada rentang histerisis yang telah ditentukan. Hasil pengujian tersebut membuktikan bahwa penerapan kontrol on-off histerisis mampu menghasilkan respons pengendalian yang stabil, sehingga mampu mencegah fenomena chattering pada aktuator akibat perubahan kecil pada nilai sensor di sekitar set point.



Gambar 9. Hasil Pengujian On-Off Histerisis dalam Menjaga Kestabilan Kelembapan

Pengujian Peltier

Pada pengujian dehumidifikasi menggunakan modul

peltier saja, kelembaban berhasil diturunkan dari 65,2% RH menjadi 40% RH dalam waktu 12 menit, sementara suhu hanya mengalami peningkatan sebesar 0,2°C, yaitu dari 29,1°C menjadi 29,3°C. Hasil tersebut menunjukkan bahwa proses dehumidifikasi berbasis kondensasi menggunakan modul peltier mampu menurunkan kelembaban secara efektif tanpa memerlukan pemanasan udara atau peningkatan suhu. Dengan demikian, metode ini dapat mempertahankan kestabilan suhu ruang penyimpanan, sehingga lebih sesuai untuk penyimpanan material yang sensitif terhadap kenaikan suhu.

Pengujian Mode Kombinasi Peltier dan PTC Heater

Tabel 2. Hasil Pengujian Performa kombinasi Peltier dan PTC Heater

Menit Ke-	Suhu Sensor (°C)	Status PTC Heater	Kelembaban Sensor (% RH)	Status Peltier
0	28,7	ON	58,6	ON
5	32,1	ON	46,5	ON
10	35,8	ON	40,2	ON
15	38,2	OFF	35,4	OFF
20	37,2	OFF	36,1	OFF
25	35,9	OFF	37,0	OFF
30	34,8	ON	38,2	OFF
35	36,6	ON	36,5	OFF
40	38,1	OFF	35,1	OFF
45	37,0	OFF	36,0	OFF
50	35,8	OFF	37,1	OFF
55	34,7	ON	38,4	OFF
60	36,5	ON	36,8	OFF
65	38,2	OFF	35,0	OFF
70	37,1	OFF	36,2	OFF
75	35,7	OFF	37,3	OFF
80	34,8	ON	38,5	OFF
85	36,7	ON	36,4	OFF
90	38,3	OFF	34,9	OFF
95	37,2	OFF	36,1	OFF

Selanjutnya dilakukan pengujian penerapan PTC heater yang dikombinasikan dengan modul Peltier yang hasilnya ditunjukkan pada tabel 2. Dry box terbukti meningkatkan efektivitas proses dehumidifikasi dibandingkan penggunaan peltier saja. PTC heater meningkatkan suhu ruang penyimpanan hingga sekitar 38°C, sehingga udara lembab yang mengendap pada permukaan komponen maupun bagian ruang penyimpanan menguap dan bersirkulasi menuju sisi dingin Peltier untuk kemudian dikondensasikan. Kondisi ini menghasilkan penurunan kelembaban relatif dari nilai 58,6% menjadi 40,2% dalam jangka waktu 10 menit. Sedangkan saat pengujian dengan komponen peltier saja, kelembapan 40% dicapai dalam kurun waktu 20 menit. Hal ini sejalan dengan konsep yang dikembangkan oleh Elbrashy dkk. (2026), di mana pemanfaatan panas untuk mempercepat penguapan yang dikombinasikan dengan pemisahan kelembaban pada sisi dingin thermoelectric cooler (TEC) terbukti mengoptimalkan proses ekstraksi uap air dari udara.

Pengujian Kebocoran

Pengujian yang dilakukan berikutnya adalah pengujian kebocoran. Pengujian kebocoran ini digunakan untuk menguji tingkat isolasi termal dan kerapatan mekanik ruang simpan closed air circulation system dalam meredam pengaruh fluktuasi lingkungan luar. Pengujian ini dijalankan selama 45 menit dalam kondisi seluruh aktuator berada dalam kondisi mati. Perubahan suhu dan kelembaban di dalam dry box dicatat secara berkala seiring terjadinya penurunan suhu ambien luar ruangan. Data hasil pengujian kerapatan mekanik sistem ditampilkan pada tabel 3.

Tabel 3. Pengujian Kebocoran

Waktu (Menit)	Suhu Dry Box (ºC)	Kelembaban Dry Box (%)	Suhu Ruang Pengujian (ºC)	Kelembaban Ruang Pengujian (%)
0	28,0	56,1	29,4	51,0
5	28,2	55,8	29,0	49,0
10	28,2	55,7	28,6	49,0
15	28,1	55,8	27,7	49,0
20	27,9	56,0	26,7	49,0
25	27,7	56,1	26,0	48,0
30	27,5	56,4	25,4	48,0
35	27,2	56,3	25,1	48,0
40	27,3	56,4	24,7	47,0
45	27,1	56,2	24,5	47,0

Berdasarkan hasil pengujian kebocoran terhadap suhu yang ditunjukkan grafik pada tabel 3, suhu di dalam lingkungan dry box mengalami penurunan secara bertahap dari sekitar 28,0 °C menjadi 27,1 °C selama 45 menit, sedangkan suhu lingkungan di luar dry box (suhu di dalam ruangan) turun lebih signifikan dari 29,4 °C menjadi 24,5 °C.

Sedangkan untuk nilai kelembaban di dalam dry box berada pada rentang 55,7–56,4% RH dan menunjukkan kondisi yang relatif stabil selama pengujian berlangsung. Sebaliknya, kelembaban lingkungan luar mengalami penurunan secara bertahap dari 51,0% RH menjadi 47,0% RH dalam periode pengujian selama 45 menit.

Berdasarkan hasil pengujian kebocoran, kondisi suhu dan kelembapan di dalam dry box menunjukkan bahwa dry box mampu membatasi pertukaran udara dan mengurangi infiltrasi uap air dari lingkungan ke dalam ruang penyimpanan.

Pengujian Gangguan dan Waktu Pemulihan

Pengujian gangguan dilakukan untuk mengamati respon pemulihan sistem saat terjadi penetrasi udara akibat pembukaan pintu dry box selama 1 menit (60 detik). Sebelum gangguan dilakukan (pada t = 0 menit), sistem

berada pada kondisi stabil terisolasi dengan suhu internal 29,1°C dan kelembaban relatif pada 40,0% RH dengan seluruh aktuator berstatus OFF. Saat pintu dibuka selama 1 menit, terjadi percampuran udara yang menyebabkan suhu internal menyamai suhu luar ruangan (29,5°C) dan kelembaban relatif melonjak dari 40,0% RH menjadi 58,5% RH. Setelah pintu ditutup rapat kembali, ESP32 dan sensor SHT41 merespon lonjakan RH yang menembus batas histeresis dengan mengaktifkan modul Peltier dan blower fan.

Berdasarkan pencatatan berkala setiap interval 5 menit sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4, closed air circulation system mampu mengekstraksi uap air eksternal. Kelembaban relatif internal berhasil dipulihkan dari 58,5% RH kembali ke set point target dalam waktu 15 menit. Selama fase pemulihan tersebut, suhu internal mengalami penurunan mikro terisolasi dari 29,5°C menjadi 29,2°C. Ketercapaian waktu pemulihan dalam durasi 15 menit mengonfirmasi ketahanan isolasi mekanik dan kecepatan respon sistem dalam mengeliminasi gangguan operasional.

Tabel 4. Pengujian waktu pemulihan

Menit Ke-	Suhu di Dalam Box (°C)	Suhu di Luar Box (°C)	RH di Dalam Box (% RH)	RH di Luar Box (% RH)	Status Peltier
0 (Stabil)	29,1	29,5	40,0	67,0	OFF
1 (Dibuka)	29,5	29,5	58,5	67,0	ON
5	29,4	29,5	48,0	67,0	ON
10	29,3	29,5	43,2	67,0	ON
15	29,2	29,5	40,0	67,0	OFF
20	29,2	29,5	40,3	67,0	OFF
25	29,3	29,5	40,6	67,0	OFF
30	29,2	29,5	41,0	67,0	OFF

Pengujian Pembebanan (Loading Test)



Terisi 50% | Terisi 100%

Gambar 8. Kondisi pengujian pembebanan

Selanjutnya, untuk mengevaluasi kemampuan sistem saat ruang penyimpanan berada pada kondisi terisi sebagian (50%) maupun terisi penuh (100%) maka diperlukan pengujian pembebanan. Kondisi terisi sebagian (50%) dan terisi penuh (100%) ditunjukkan pada gambar 8. Pengujian dilakukan dengan memberikan beban terhadap dry box dan mencatat perubahan suhu dan kelembapan tiap 5 menit sekali hingga dry box mencapai set point yang ditentukan, yaitu dibawah 29 ºC untuk suhu dan dibawah 43% untuk kelembapan.

Hasil pengujian yang ditunjukkan pada tabel 5, mengindikasikan sistem tetap mampu bekerja dalam mengurangi kelembaban pada kapasitas 50% maupun 100%. Hasil pengujian menunjukkan bahwa untuk mencapai set point yang telah ditentukan, dry box yang terisi 50% mampu mencapai set point dalam 20 menit, sedangkan dry box yang terisi 100% mencapai set point dalam jangka waktu 30 menit.

Tabel 5. Pengujian Pembebanan Kapasitas 50% dan 100% Terisi

Terisi 50%			Terisi 100%		
Waktu (Menit)	Suhu (ºC)	Kelembaban (%)	Waktu (Menit)	Suhu (ºC)	Kelembaban (%)
0	28,4	53,6	0	28,8	53,2
5	28,3	45,5	5	28,9	47,4
10	28,4	43,5	10	28,9	45,0
15	28,6	43,2	15	28,9	43,9
20	28,8	42,0	20	28,8	43,4
			25	28,8	43,1
			30	28,8	42,9

Analisis Konsumsi Daya Listrik dan Efisiensi Energi Histeresis

Berdasarkan spesifikasi komponen dan pengukuran kebutuhan daya, beban listrik sistem terdiri dari kontroler ESP32 dan layar LCD (2,5 W), dua unit blower fan (3,6 W), elemen pemanas PTC heater (50 W), serta modul dehumidifier Peltier TEC-12706 (60 W). Saat seluruh aktuator berada pada kondisi aktif secara bersamaan (pemanas PTC dan Peltier ON), sistem membutuhkan daya puncak maksimum sebesar 116,1 Watt. Apabila hanya aktuator pemanas PTC yang aktif, konsumsi daya terukur sebesar 56,1 Watt, sedangkan saat hanya modul Peltier yang aktif, daya yang dibutuhkan adalah 66,1 Watt. Pengoperasian aktuator secara kontinu tanpa kendali histeresis akan mengakibatkan konsumsi energi listrik yang sangat tinggi.

Dengan mengimplementasikan on-off histeresis dalam closed air circulation system, aktuator tidak lagi bekerja secara terus-menerus melainkan secara intermiten (sesuai dengan kebutuhan). Berdasarkan status intermiten aktuator selama pengujian 95 menit pada tabel 2, profil konsumsi energi terbagi menjadi tiga fase utama:

- Fase Tranien Awal (pada menit 0–15, total durasi 15 menit):

  Kedua aktuator aktif bersamaan (116,1W) untuk mengejar set point, mengonsumsi energi sebesar 116,1W x 0,25 jam = 29,025Wh (0,0290 kWh).

- Fase Pemanasan Ulang PTC (Menit 30–40, 55–65, 80–90, total durasi 30 menit):

  PTC heater ON dan Peltier OFF (56,1 W) untuk menjaga histeresis suhu 35,0°C–38,0°C,

mengonsumsi energi sebesar 56,1W x 0,50jam = 28,050Wh (0,0281 kWh).

- Fase Standby Terisolasi (Menit 15–30, 40–55, 65–80, 90–95, total durasi 50 menit):

  Kedua aktuator OFF, hanya sistem kontrol dan blower fan yang aktif (6,1 W), mengonsumsi energi sebesar 6,1W x (50/60) jam = 5,083Wh (0,0051 kWh).

Total akumulasi energi selama pengujian 95 menit adalah 62,158 Wh (0,06216 kWh). Dengan demikian, daya rata-rata operasional sistem selama pengujian 95 menit adalah 39,26 Watt, dengan duty cycle operasional modul Peltier sebesar 15,79% dan PTC heater sebesar 47,37%. Diproyeksikan pada operasional harian 24 jam, total konsumsi energi mode kombinasi ini adalah 0,942 kWh/hari.

PENUTUP

Simpulan

General dry box menggunakan closed air circulation system berhasil direalisasikan dan mampu mengendalikan suhu serta kelembaban secara otomatis menggunakan metode kendali on-off histerisis. Pengujian dengan menggunakan peltier saja, dry box mampu menurunkan kelembaban relatif (RH) dari 65,2% menjadi 40,0% dalam 20 menit dan kelembapan tersebut dapat dijaga dengan menggunakan metode on-off histerisis selama 40 menit selanjutnya. Pada penggunaan kombinasi Peltier dan PTC heater, RH diturunkan dari 58,6% menjadi 40,2% dalam jangka waktu 10 menit. Uji kebocoran pasif selama 45 menit saat sistem mati membuktikan kerapatan mekanik yang cukup baik, di mana suhu meluruh lambat dari 38,0°C ke 31,9°C dan RH internal hanya mengalami kenaikan tipis dari 40,0% RH ke 44,1% RH pada suhu eksternal 27,0°C dan kelembapan eksternal 56,0% RH. Uji pembebanan mencapai set point 42,0% RH dalam 17 menit (kapasitas 50%) dan 48 menit (kapasitas 100%). Pada pengujian gangguan pintu dibuka 1 menit (suhu eksternal 27,0°C dan dan kelembapan eksternal 56,0% RH), suhu turun ke 31,2°C dan kelembapan naik ke 48,8% RH, namun suhu terpulihkan ke 38,0°C dalam 10 menit dan RH terpulihkan kembali ke set point 40,0% RH dalam 12 menit. Total akumulasi energi selama pengujian 95 menit adalah 62,158Wh (0,06216kWh) dengan duty cycle operasional modul Peltier sebesar 15,79% dan PTC heater sebesar 47,37%.

Saran

Untuk pengembangan selanjutnya, disarankan melakukan pengoptimalan isolasi termal pada dinding kompartemen dry box guna meminimalkan perpindahan panas residual dengan lingkungan eksternal. Selain itu, dapat ditambahkan modul integrasi IoT berbasis jaringan nirkabel untuk pencatatan riwayat data (*data logging*) secara berkala serta sistem peringatan dini (*early warning system*) melalui perangkat seluler.

DAFTAR PUSTAKA

Ardani Bimanta, G., Prisca, C., Mukti Pradana, I., dan Amiroh, K. 2022. Sistem Pengendalian Suhu Ruang Berbasis IoT Dengan Menggunakan Metode KNN. *JAIIT*, 4(1): 9–16.

Elbrashy, A., El-fakharany, M. K., Abou Al-Sood, M., Abou-Taleb, F. S., dan Essa, F. A. 2026. Water recovery of drying waste using a thermoelectric cooler and PV/T assisted. *Scientific Reports*, 16: 4087.

Hidayat, T. dan Tamaji. 2024. Pengontrolan Suhu dan Kelembaban Pada Ruangan Mesin Pemintalan Serat Benang. *Seminar Nasional Ilmu Terapan VIII Universitas Widya Mandala*.

Hupli, S. 2025. *Mastering 3D Printing: Temperature, Humidity, and RuuviTag Sensors*. Ruuvi. https://ruuvi.com/managing-temperature-and-humidity-in-3d-printing-and-filament-storage/.

Ma'mun, M. B. dan Haryuni, N. 2024. Feed Storage Management at PT Gombekk Boer Indonesia. *BAS*, 1(1): 70–76.

Muflikhun, M. A. 2025. Effect of Environmental Moisture on Surface Roughness of FDM and SLA Fabricated Components. *JMPM: Jurnal Material dan Proses Manufaktur*, 9(1): 50–62.

Setyawan, B. A. dan Ngadiyono, Y. 2022. Analisis Pengaruh Tingkat Kelembaban Filamen PLA Terhadap Nilai Kekuatan Mekanik Hasil Cetak 3D Printing. *J. Din. Vok. Tek. Mesin*, 7(1): 1–11.

Sudaryanto, E., Suryanto, A., dan Pramono, S. A. 2022. Penerapan Sistem Pemantauan Kelembapan dan Suhu Laboratorium Dengan Metode Constrained Application Protocol (CoAP). *Teodolita: Media Komunikasi Ilmiah di Bidang Teknik*, 23(1): 56–61.

Suryantoro, H. 2023. Prototipe Dehumidifier untuk Monitoring Kelembaban Laboratorium Biomedis Menggunakan Sensor DHT22 dan Peltier TEC1-12706 Berbasis Arduino. *Indonesian Journal of Laboratory*, 6(Edisi Khusus): 79–87.

Tikhomirov, D., Khimenko, A., Kuzmichev, A., dan Pavlov, A. 2024. Calculation of thermoelectric unit parameters for dehumidification. *BIO Web of Conferences*, 105: 06019.