



Optimasi Sistem Pendingin pada Inkubator Mikrobiologi Menggunakan Teknologi Termal dari Teknik Mesin

Optimization of Cooling System in Microbiology Incubators Using Thermal Technology from Mechanical Engineering

Herlina¹, Fider Lumban Batu^{2*}

¹Institut Kesehatan Medistra Lubuk Pakam

²Universitas Pembinaan Masyarakat Indonesia

Corresponding Author: fiderlbatu@gmail.com*

Abstrak

Inkubator mikrobiologi berfungsi untuk menyediakan kondisi lingkungan yang stabil guna mendukung pertumbuhan mikroorganisme, di mana kestabilan suhu menjadi faktor kritis. Namun, banyak inkubator konvensional yang mengalami kesulitan dalam mempertahankan suhu secara presisi, terutama dalam lingkungan yang bervariasi. Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan sistem pendingin pada inkubator mikrobiologi menggunakan teknologi termal dari disiplin Teknik Mesin. Sistem yang dikembangkan mengintegrasikan modul Peltier sebagai pendingin aktif, heatsink berfin untuk meningkatkan dissipasi panas, ventilasi termal pasif untuk mendistribusikan udara dingin secara merata, dan sistem kontrol suhu otomatis berbasis algoritma PID. Pengujian dilakukan dengan tiga sistem: inkubator konvensional, inkubator dengan sistem Peltier, dan inkubator dengan kombinasi Peltier, ventilasi pasif, serta kontrol PID. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem dengan teknologi termal dari Teknik Mesin berhasil menurunkan fluktuasi suhu hingga $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$, meningkatkan efisiensi energi sebesar 20%, serta mempercepat pencapaian suhu setpoint hingga 12 menit dibandingkan sistem konvensional yang memerlukan 27 menit. Selain itu, simulasi CFD (Computational Fluid Dynamics) menunjukkan distribusi suhu yang lebih merata dalam ruang inkubasi berkat penerapan ventilasi pasif. Penelitian ini menunjukkan bahwa integrasi teknologi termal teknik mesin dapat meningkatkan performa inkubator mikrobiologi dalam hal kestabilan suhu, efisiensi energi, dan waktu respons terhadap fluktuasi suhu.

Kata kunci: Inkubator Mikrobiologi; Sistem Pendingin; Teknologi Termal; Peltier; Kontrol PID.

Abstract

Microbiology incubators serve to provide stable environmental conditions to support the growth of microorganisms, where temperature stability is a critical factor. However, many conventional incubators have difficulty in maintaining precise temperatures, especially in variable environments. This study aims to optimize the cooling system in microbiology incubators using thermal technology from the discipline of Mechanical Engineering. The developed system integrates a Peltier module as an active cooler, a finned heatsink to increase heat dissipation, passive thermal ventilation to distribute cold air evenly, and an automatic temperature control system based on the PID algorithm. Tests were conducted with three systems: a conventional incubator, an incubator with a Peltier system, and an incubator with a combination of Peltier, passive ventilation, and PID control. The test results showed that the system with thermal technology from Mechanical Engineering succeeded in reducing temperature fluctuations by $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$, increasing energy efficiency by 20%, and accelerating the achievement of the setpoint temperature by up to 12 minutes compared to the conventional system which required 27



All Fields of Science J-LAS

Jurnal Penelitian

Availabel Online: <https://j-las.lemkomindo.org/index.php/AFoSJ-LAS/index>



minutes. In addition, CFD (Computational Fluid Dynamics) simulations show a more even temperature distribution in the incubation chamber due to the application of passive ventilation. This study shows that the integration of mechanical engineering thermal technology can improve the performance of microbiological incubators in terms of temperature stability, energy efficiency, and response time to temperature fluctuations.

Keywords: Microbiological Incubator; Cooling System; Thermal Technology; Peltier; PID Control

PENDAHULUAN

Inkubator mikrobiologi merupakan alat laboratorium yang sangat penting dalam penelitian dan pengembangan di bidang mikrobiologi, bioteknologi, dan ilmu kesehatan. Fungsi utama dari inkubator adalah menyediakan kondisi lingkungan yang stabil, khususnya suhu dan kelembaban, agar pertumbuhan mikroorganisme dapat berlangsung secara optimal. Suhu merupakan parameter paling kritis karena berbagai jenis mikroba memiliki kisaran suhu pertumbuhan tertentu yang sangat spesifik. Sebagai contoh, bakteri mesofilik seperti *Escherichia coli* tumbuh optimal pada suhu 37°C, sedangkan mikroorganisme termofilik dapat tumbuh pada suhu di atas 45°C (Madigan et al., 2015).

Sayangnya, banyak inkubator konvensional masih menghadapi permasalahan dalam menjaga kestabilan suhu, terutama dalam kondisi lingkungan tropis yang panas atau saat terjadi fluktuasi suhu eksternal yang tinggi. Sistem pendingin pada inkubator konvensional biasanya masih bergantung pada metode konveksi alami atau kipas sirkulasi sederhana yang kurang efisien dan tidak mampu mengontrol suhu secara presisi. Ketidakstabilan suhu dalam inkubator dapat menyebabkan variabilitas hasil penelitian, kegagalan kultur, dan bahkan kontaminasi silang antar spesimen (Pelczar et al., 2008).

Teknologi termal dari bidang teknik mesin menawarkan potensi solusi yang inovatif untuk mengatasi tantangan ini. Teknologi seperti modul Peltier (termoelektrik), sistem heat exchanger, ventilasi termal pasif, dan kontrol suhu otomatis berbasis PID telah terbukti efektif dalam sistem pendingin elektronik dan industri otomotif (Rowe, 2005; Incropera & Dewitt, 2007). Modul Peltier, misalnya, bekerja dengan prinsip efek Seebeck dan memungkinkan pendinginan tanpa komponen mekanik yang bergerak, sehingga lebih hening, efisien, dan mudah dikendalikan secara elektronik. Dalam konteks inkubator mikrobiologi, integrasi teknologi ini diharapkan dapat meningkatkan efisiensi energi serta stabilitas suhu ruang inkubasi secara keseluruhan.

Selain itu, pendekatan sistem kontrol suhu berbasis algoritma PID (Proportional-Integral-Derivative) juga memberikan keunggulan dalam menjaga suhu pada nilai setpoint dengan fluktuasi minimum. Kontrol PID banyak digunakan dalam proses industri yang membutuhkan kestabilan suhu tinggi dan respons cepat terhadap perubahan lingkungan (Åström & Hägglund, 2006).

Melihat pentingnya kestabilan suhu dalam inkubator mikrobiologi dan potensi besar dari penerapan teknologi termal teknik mesin, maka perlu dilakukan penelitian untuk mengembangkan dan menguji sistem pendingin alternatif yang lebih efisien dan presisi. Optimalisasi ini tidak hanya akan meningkatkan kualitas penelitian mikrobiologi, tetapi

juga memberikan kontribusi terhadap efisiensi energi dan keberlanjutan lingkungan laboratorium modern.

KAJIAN PUSTAKA

1. Inkubator Mikrobiologi dan Kebutuhan Termal

Inkubator mikrobiologi merupakan perangkat laboratorium yang digunakan untuk menciptakan lingkungan yang terkendali dalam hal suhu, kelembaban, dan kadang-kadang kadar gas (seperti CO₂) guna menunjang pertumbuhan mikroorganisme (Madigan et al., 2015). Suhu yang stabil adalah aspek krusial dalam kultur mikroba karena ketidaksesuaian suhu dapat menyebabkan pertumbuhan tidak optimal, bahkan kematian mikroorganisme. Inkubator konvensional umumnya menggunakan pemanas resistif dan sirkulasi udara konveksi untuk mempertahankan suhu, namun sistem ini memiliki keterbatasan terutama dalam hal kestabilan suhu jangka panjang dan efisiensi energi (Pelczar et al., 2008).

Suhu inkubator biasanya dijaga dalam kisaran 25–45°C, tergantung pada jenis mikroorganisme. Mikroba mesofilik, seperti *E. coli*, membutuhkan suhu sekitar 37°C, sementara mikroba psikofilik dan termofilik memerlukan suhu yang lebih rendah atau lebih tinggi. Oleh karena itu, teknologi pendinginan yang adaptif dan responsif terhadap fluktuasi suhu sangat penting dalam inkubator modern (Prescott et al., 2005).

2. Teknologi Termal dalam Teknik Mesin

Teknik mesin memiliki cabang ilmu yang secara khusus menangani masalah perpindahan panas dan kontrol suhu, yakni teknik termal (thermal engineering). Teknologi termal dalam teknik mesin telah banyak diterapkan pada sistem pendingin kendaraan, perangkat elektronik, HVAC (Heating, Ventilation, and Air Conditioning), dan kini berkembang ke aplikasi biomedis (Incropera & Dewitt, 2007).

Salah satu konsep dasar dalam teknik termal adalah perpindahan panas, yang dapat terjadi melalui konduksi, konveksi, dan radiasi. Pemanfaatan konduktor panas yang efisien seperti aluminium dan tembaga dapat mempercepat distribusi panas. Selain itu, penggunaan heat sink atau sirip pendingin dengan desain permukaan besar membantu mempercepat pelepasan panas ke lingkungan sekitar. Desain termal seperti ini penting untuk menjaga suhu internal sistem agar tetap stabil (Bejan, 2013).

3. Modul Peltier (Thermoelectric Cooling)

Modul Peltier merupakan salah satu teknologi pendingin solid-state yang bekerja berdasarkan prinsip efek termoelektrik. Saat arus listrik mengalir melalui sambungan dua

material konduktor berbeda, terjadi perpindahan panas dari satu sisi ke sisi lainnya, menghasilkan efek pendinginan di satu sisi dan pemanasan di sisi lain (Rowe, 2005). Keunggulan Peltier dibanding sistem pendingin kompresi adalah tidak adanya bagian mekanis yang bergerak, bentuk yang ringkas, dan kemampuan untuk dikontrol secara elektronik.

Dalam aplikasi inkubator mikrobiologi, penggunaan modul Peltier berpotensi menggantikan atau melengkapi sistem pendingin konvensional dengan keunggulan efisiensi energi dan presisi pengaturan suhu. Namun, modul Peltier juga memiliki kelemahan dalam disipasi panas dari sisi panasnya, yang membutuhkan penggunaan heatsink dan kipas tambahan agar tidak terjadi overheating (Riffat & Ma, 2003).

4. Ventilasi Termal Pasif dan Sirkulasi Udara

Ventilasi termal pasif adalah teknik pengelolaan udara yang memanfaatkan perbedaan suhu dan tekanan alami untuk mengalirkan udara, tanpa memerlukan energi eksternal. Konsep ini banyak digunakan dalam desain bangunan hijau dan sistem pendinginan pasif. Dalam konteks inkubator mikrobiologi, ventilasi pasif dapat membantu mendistribusikan udara hangat atau dingin secara merata, serta mengurangi titik-titik panas (hotspots) yang sering terjadi akibat desain inkubator yang tertutup rapat (Givoni, 1998).

Sistem ventilasi yang dirancang dengan prinsip thermal buoyancy atau efek cerobong (chimney effect) dapat meningkatkan sirkulasi internal tanpa peningkatan konsumsi energi. Integrasi ventilasi pasif dengan pendinginan aktif seperti Peltier menciptakan sistem hibrida yang efisien.

5. Sistem Kontrol Suhu Otomatis: PID Controller

Untuk menjaga kestabilan suhu secara akurat dalam inkubator, sistem kontrol suhu otomatis seperti PID (Proportional-Integral-Derivative) sangat diperlukan. Kontrol PID bekerja dengan membaca suhu aktual, membandingkannya dengan suhu target (setpoint), dan menghitung selisih kesalahan untuk kemudian mengatur arus listrik atau kerja modul pendingin/pemanas secara presisi (Åström & Hägglund, 2006). Sistem ini sudah terbukti dalam berbagai aplikasi industri untuk menjaga kestabilan suhu pada nilai setpoint dengan toleransi rendah.

Dalam inkubator mikrobiologi, integrasi kontrol PID dengan modul Peltier memungkinkan respons cepat terhadap fluktuasi suhu lingkungan atau akibat pembukaan pintu inkubator. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa penerapan PID dapat menjaga

suhu dalam toleransi $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$, jauh lebih baik dibandingkan pengaturan manual atau sistem termostat sederhana (Ogata, 2010).

6. Studi Terkait

Beberapa studi sebelumnya telah mengkaji pengembangan sistem inkubator modern. Misalnya, penelitian oleh Ranjbar et al. (2017) mengenai inkubator bayi dengan sistem pendingin termoelektrik menunjukkan bahwa sistem berbasis Peltier dapat menjaga suhu lebih stabil dengan konsumsi energi lebih rendah. Sementara itu, penelitian oleh Prasetyo dan Wulandari (2020) mengembangkan inkubator mikrobiologi berbasis Arduino dan sensor DHT22, tetapi belum mengintegrasikan sistem pendinginan termal aktif secara optimal.

Kekosongan literatur masih terlihat pada aplikasi teknologi termal teknik mesin secara menyeluruh dalam desain inkubator mikrobiologi. Oleh karena itu, kajian ini menjadi relevan untuk menjembatani kebutuhan presisi suhu laboratorium dengan pendekatan teknik mesin.

METODE

1. Jenis dan Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif eksperimental yang bertujuan untuk merancang, mengimplementasikan, dan menguji performa sistem pendingin pada inkubator mikrobiologi berbasis teknologi termal dari teknik mesin. Pendekatan eksperimental dipilih karena memungkinkan analisis hubungan sebab-akibat antara desain sistem pendingin dengan kestabilan suhu dan efisiensi energi inkubator (Sugiyono, 2016).

Selain pendekatan eksperimental, penelitian ini juga mengintegrasikan simulasi numerik berbasis Computational Fluid Dynamics (CFD) untuk menganalisis distribusi suhu dan aliran udara dalam ruang inkubasi. Simulasi ini sangat berguna untuk mengidentifikasi titik panas (hotspot), distribusi gradien suhu, serta menguji efektivitas sirkulasi udara tanpa harus membuat prototipe fisik berulang kali (Versteeg & Malalasekera, 2007).

2. Desain Sistem Pendingin Inkubator

Sistem pendingin yang dikembangkan pada penelitian ini terdiri atas beberapa komponen utama, yaitu:

- a. Modul Peltier tipe TEC1-12706 sebagai inti pendingin aktif.
- b. Heatsink aluminium berfin lebar untuk membuang panas dari sisi panas modul Peltier.

- c. Kipas DC 12V sebagai pendingin tambahan pada heatsink.
- d. Sensor suhu digital (DS18B20) untuk memantau suhu ruang inkubasi.
- e. Mikrokontroler Arduino Uno sebagai pengendali sistem otomatis.
- f. Algoritma kontrol PID untuk menjaga suhu tetap stabil pada setpoint.
- g. Ventilasi termal pasif untuk mendukung sirkulasi udara alami.

Seluruh sistem dirancang dan dirakit pada inkubator berkapasitas 20 liter yang dimodifikasi dari inkubator laboratorium standar. Modul Peltier ditempatkan pada dinding atas inkubator untuk memaksimalkan distribusi udara dingin secara konvektif.

3. Prosedur Penelitian

a. Tahap Desain dan Perakitan

Pada tahap ini, rancangan sistem pendingin digambar menggunakan perangkat lunak CAD (SolidWorks), lalu dilakukan perakitan sistem pendingin di ruang laboratorium teknik mesin. Prinsip kerja sistem didasarkan pada efektivitas perpindahan panas dan respons terhadap fluktuasi suhu internal.

b. Simulasi CFD

Untuk menganalisis aliran udara dan distribusi suhu, dilakukan simulasi numerik menggunakan perangkat lunak ANSYS Fluent. Geometri ruang inkubasi dimodelkan dalam bentuk tiga dimensi, dan kondisi batas ditentukan berdasarkan spesifikasi termal material serta intensitas pendinginan dari modul Peltier.

c. Pengujian Eksperimen

Inkubator dioperasikan dengan tiga perlakuan:

- 1) Kontrol: Inkubator tanpa pendingin aktif.
- 2) Peltier saja: Pendingin aktif tanpa ventilasi pasif.
- 3) Peltier + ventilasi pasif + kontrol PID: Sistem lengkap.

Setiap perlakuan diuji selama 24 jam dalam ruang tertutup pada suhu lingkungan 30°C. Data suhu dicatat setiap 1 menit.

d. Analisis Data

Data suhu dianalisis menggunakan statistik deskriptif untuk mengukur kestabilan suhu (simpangan baku), waktu pencapaian suhu setpoint, dan konsumsi energi (dihitung menggunakan wattmeter digital). Hasil dari simulasi CFD dibandingkan dengan hasil eksperimen untuk validasi distribusi suhu.

4. Variabel Penelitian

- a. Variabel bebas: Jenis sistem pendingin (konvensional vs. Peltier vs. hibrida).

- b. Variabel terikat: Kestabilan suhu ($^{\circ}\text{C}$), waktu pencapaian suhu setpoint, dan konsumsi energi (Watt).
- c. Variabel kontrol: Volume ruang inkubator, suhu lingkungan, jenis sensor, spesimen dummy.

5. Instrumen Penelitian

Instrumen yang digunakan dalam penelitian ini meliputi:

- a. Sensor suhu DS18B20 untuk akuisisi data suhu.
- b. Multimeter dan wattmeter untuk mengukur arus dan daya listrik.
- c. ANSYS Fluent untuk simulasi CFD.
- d. Arduino IDE dan MATLAB untuk pemrograman kontrol PID dan analisis data.

6. Validitas dan Reliabilitas

Untuk memastikan validitas data, dilakukan kalibrasi sensor suhu menggunakan thermometer laboratorium bersertifikat. Pengukuran diulang sebanyak tiga kali pada setiap perlakuan untuk memperoleh reliabilitas hasil. Simulasi CFD divalidasi dengan data eksperimen menggunakan metode perbandingan visual dan kuantitatif berdasarkan nilai rata-rata suhu dan gradien.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Hasil Pengujian Sistem Pendingin

Penelitian ini menghasilkan sistem pendingin inkubator mikrobiologi berbasis teknologi termal yang terdiri dari modul Peltier, heatsink berfin, kontrol suhu otomatis (PID), dan ventilasi termal pasif. Sistem tersebut diuji pada prototipe inkubator berukuran 20 liter dengan tiga skenario:

- a. Sistem Konvensional (tanpa pendingin aktif)
- b. Sistem Peltier Aktif Tanpa Ventilasi
- c. Sistem Peltier + Ventilasi Pasif + Kontrol PID (Optimalisasi Termal)

Pengujian dilakukan selama 24 jam dalam kondisi suhu lingkungan konstan sebesar $\pm 30^{\circ}\text{C}$.

a. Stabilitas Suhu

Hasil pengukuran suhu menunjukkan bahwa sistem konvensional mengalami fluktuasi suhu tinggi hingga $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ dari suhu target 37°C , terutama setelah pembukaan pintu inkubator. Sistem dengan Peltier saja berhasil menurunkan fluktuasi hingga $\pm 0.8^{\circ}\text{C}$, sedangkan sistem lengkap dengan kontrol PID dan ventilasi pasif mampu menstabilkan suhu dengan deviasi hanya $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$.

Temuan ini sejalan dengan literatur yang menyatakan bahwa penggunaan kontrol PID dalam sistem termal dapat menstabilkan suhu secara efektif dengan respons waktu yang cepat (Åström & Hägglund, 2006). Fluktuasi suhu yang rendah sangat penting dalam pertumbuhan mikroorganisme, terutama mikroba sensitif seperti *Lactobacillus* atau *Mycobacterium*, yang memiliki kisaran suhu optimal sangat sempit (Madigan et al., 2015).

b. Waktu Pencapaian Suhu Setpoint

Pengujian menunjukkan bahwa sistem konvensional membutuhkan waktu ± 27 menit untuk mencapai suhu setpoint 37°C . Sementara itu, sistem Peltier mampu mencapainya dalam waktu ± 18 menit. Dengan tambahan ventilasi pasif dan algoritma PID, waktu pencapaian suhu berkurang hingga ± 12 menit. Hal ini menunjukkan bahwa sinergi antara sistem pendingin aktif dan ventilasi pasif dapat meningkatkan efisiensi termal ruang inkubasi.

Penurunan waktu ini diperoleh dari peningkatan sirkulasi udara akibat desain ventilasi yang mengandalkan efek cerobong termal dan aliran konvektif alami (Givoni, 1998). Sirkulasi ini membantu pemerataan suhu sehingga suhu setpoint dapat dicapai lebih cepat.

c. Efisiensi Energi

Pengukuran konsumsi daya menggunakan wattmeter menunjukkan bahwa sistem konvensional menggunakan daya rata-rata 26 watt/jam, sedangkan sistem dengan Peltier dan kontrol PID hanya menggunakan ± 20 watt/jam. Efisiensi ini terjadi karena sistem PID mampu memutuskan daya saat suhu stabil tanpa mengorbankan presisi pengaturan suhu.

Rowe (2005) menyatakan bahwa sistem Peltier memiliki efisiensi tinggi untuk aplikasi berdaya rendah seperti inkubator portabel, terutama bila dikombinasikan dengan sistem kontrol cerdas. Hasil ini mendukung potensi teknologi Peltier untuk pengembangan inkubator hemat energi.

2. Hasil Simulasi CFD (Computational Fluid Dynamics)

Simulasi menggunakan perangkat lunak ANSYS Fluent dilakukan untuk menganalisis distribusi suhu dan arah aliran udara dalam inkubator. Simulasi dilakukan pada kondisi steady-state dengan suhu dinding 37°C dan input panas dari komponen Peltier.

a. Distribusi Suhu

Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem ventilasi pasif berhasil menyebarkan udara dingin dari modul Peltier secara merata ke seluruh ruang inkubator. Tanpa

ventilasi, udara cenderung menumpuk di bagian atas dan menghasilkan gradien suhu vertikal hingga 4°C antara bagian atas dan bawah ruang inkubator. Dengan ventilasi pasif, gradien suhu berkurang menjadi <1.2°C.

Temuan ini menunjukkan pentingnya desain termal dalam sistem pendingin mikro. Bejan (2013) menjelaskan bahwa distribusi suhu yang seragam bergantung pada manajemen aliran konvektif internal, bukan hanya pada kapasitas pendingin semata.

b. Validasi Simulasi terhadap Data Eksperimen

Hasil simulasi CFD divalidasi dengan data eksperimen suhu aktual. Terdapat kesesuaian tren antara simulasi dan data lapangan dengan rata-rata error absolut <5%. Validasi ini memperkuat keandalan model numerik dalam memprediksi perilaku termal sistem inkubator.

3. Pembahasan Umum

Hasil penelitian ini memperkuat pandangan bahwa penerapan teknologi termal dari teknik mesin terutama modul Peltier, ventilasi pasif, dan kontrol PID dapat meningkatkan performa sistem pendingin inkubator mikrobiologi secara signifikan.

Sistem konvensional yang hanya mengandalkan pemanas resistif dan kipas terbukti kurang presisi dalam mengontrol suhu serta memiliki konsumsi energi yang lebih tinggi. Sementara itu, sistem hibrida yang dikembangkan dalam penelitian ini menunjukkan peningkatan dalam tiga aspek utama: presisi suhu, waktu pemanasan, dan efisiensi energi.

Dari perspektif teknik mesin, inovasi ini juga menunjukkan sinergi antara disiplin teknik dan kebutuhan bioteknologi. Hal ini sejalan dengan studi Ranjbar et al. (2017), yang menemukan bahwa sistem inkubator bayi berbasis termoelektrik lebih stabil dan hemat energi dibandingkan sistem berbasis pemanas konvensional.

KESIMPULAN DAN SARAN

1. Kesimpulan

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dan menguji sistem pendingin pada inkubator mikrobiologi dengan mengintegrasikan teknologi termal dari disiplin ilmu Teknik Mesin, khususnya melalui penerapan modul Peltier, heatsink berfin, ventilasi termal pasif, dan sistem kontrol suhu otomatis berbasis PID. Berdasarkan hasil pengujian eksperimental dan simulasi numerik (CFD), maka dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. **Sistem pendingin konvensional pada inkubator mikrobiologi memiliki kelemahan signifikan**, terutama dalam hal kestabilan suhu dan efisiensi energi. Fluktuasi suhu mencapai $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$, yang dapat mengganggu proses kultur mikroorganisme yang membutuhkan suhu sangat spesifik dan stabil.
2. **Penggunaan modul Peltier sebagai sistem pendingin aktif** terbukti mampu menurunkan suhu secara cepat dan presisi. Modul ini, jika dikombinasikan dengan heatsink dan kipas pendingin, dapat membuang panas dari sisi termal secara efektif dan menjaga suhu ruang inkubasi dalam batas deviasi $\pm 0.8^{\circ}\text{C}$. Hasil ini mendukung efektivitas modul termoelektrik untuk aplikasi laboratorium dengan ruang terbatas.
3. **Ventilasi termal pasif memainkan peran penting dalam mendistribusikan suhu secara merata di dalam ruang inkubasi**. Melalui prinsip efek cerobong (chimney effect), aliran udara yang ditimbulkan tanpa bantuan energi eksternal membantu mencegah terbentuknya gradien suhu vertikal, sehingga menciptakan lingkungan kultur yang lebih seragam.
4. **Integrasi sistem kontrol PID dengan sensor suhu digital** memungkinkan pengaturan suhu secara presisi, adaptif terhadap perubahan suhu lingkungan, dan responsif terhadap pembukaan pintu inkubator. Dengan sistem ini, fluktuasi suhu berhasil ditekan hingga $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ dan waktu pencapaian suhu setpoint dipercepat hingga 12 menit, dibandingkan 27 menit pada sistem konvensional.
5. **Efisiensi energi meningkat secara signifikan**. Konsumsi daya sistem pendingin optimal menurun hingga 20% dibandingkan sistem konvensional. Ini menunjukkan bahwa pendekatan teknik mesin tidak hanya meningkatkan performa teknis, tetapi juga berkontribusi terhadap penghematan energi dan keberlanjutan operasional laboratorium.

Secara keseluruhan, penelitian ini membuktikan bahwa penerapan teknologi termal dari Teknik Mesin sangat efektif dalam mengoptimalkan sistem pendingin inkubator mikrobiologi. Pendekatan ini dapat menjadi solusi inovatif dalam pengembangan perangkat laboratorium presisi tinggi, khususnya di negara-negara beriklim tropis seperti Indonesia.

2. Saran

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis yang telah dilakukan, maka beberapa saran yang dapat diajukan untuk pengembangan lebih lanjut adalah sebagai berikut:

1. Pengembangan Sistem Monitoring Berbasis IoT:

Diperlukan integrasi teknologi Internet of Things (IoT) untuk pemantauan suhu secara real-time melalui perangkat seluler atau komputer. Sistem ini akan sangat

berguna dalam laboratorium modern untuk meningkatkan kontrol jarak jauh dan pencatatan data otomatis.

2. **Uji Coba Jangka Panjang dan Berbasis Mikroorganisme Aktual:**

Penelitian ini dilakukan dengan uji suhu dalam kondisi laboratorium tanpa spesimen mikroba aktif. Uji lanjutan sebaiknya dilakukan dengan mikroorganisme sebenarnya untuk menilai secara langsung pengaruh kestabilan suhu terhadap pertumbuhan dan kualitas kultur mikrobiologi.

3. **Optimalisasi Material Termal yang Lebih Efisien:**

Penggunaan material heatsink berbahan dasar aluminium dalam penelitian ini dapat dikembangkan lebih lanjut dengan mengeksplorasi bahan dengan konduktivitas termal lebih tinggi seperti tembaga atau grafena. Selain itu, penerapan Phase Change Material (PCM) sebagai buffer termal dapat diteliti untuk memperpanjang kestabilan suhu tanpa konsumsi energi berlebih.

4. **Desain Inkubator Komersial Modular:**

Hasil penelitian ini dapat dijadikan dasar untuk pengembangan prototipe inkubator modular skala industri dengan fitur plug-and-play, efisien, dan hemat energi, khususnya untuk laboratorium pendidikan, rumah sakit daerah, atau klinik swasta yang membutuhkan inkubator portabel dengan presisi tinggi.

5. **Simulasi CFD Lanjutan dengan Parameter Dinamis:**

Simulasi yang digunakan dalam penelitian ini bersifat steady-state. Untuk mendekati kondisi operasional nyata, perlu dilakukan simulasi transien (waktu-nyata) dengan berbagai skenario fluktuasi suhu dan kelembaban, sehingga sistem pendingin dapat dioptimalkan secara lebih akurat.

Penelitian ini diharapkan menjadi dasar pengembangan lanjutan dalam penerapan teknologi teknik mesin pada peralatan laboratorium bioteknologi. Konvergensi antara ilmu teknik dan biomedis merupakan langkah strategis menuju laboratorium yang lebih efisien, cerdas, dan berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Aström, K. J., & Hägglund, T. (2006). *Advanced PID Control*. Research Triangle Park, NC: ISA.
- Bejan, A. (2013). *Convection Heat Transfer* (4th ed.). Wiley.
- Givoni, B. (1998). *Climate Considerations in Building and Urban Design*. John Wiley & Sons.
- Incropera, F. P., & Dewitt, D. P. (2007). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (6th ed.). Wiley.
- Incropera, F. P., & Dewitt, D. P. (2007). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Wiley.

- Madigan, M. T., Martinko, J. M., Bender, K., Buckley, D., & Stahl, D. (2015). *Brock Biology of Microorganisms* (14th ed.). Pearson.
- Ogata, K. (2010). *Modern Control Engineering* (5th ed.). Prentice Hall.
- Pelczar, M. J., Chan, E. C. S., & Krieg, N. R. (2008). *Microbiology: An Application-Based Approach*. McGraw-Hill.
- Prasetyo, R. A., & Wulandari, D. (2020). "Pengembangan Inkubator Mikrobiologi Berbasis Arduino dengan Monitoring Suhu dan Kelembaban". *Jurnal Teknologi Laboratorium*, 12(2), 75–82.
- Prescott, L. M., Harley, J. P., & Klein, D. A. (2005). *Microbiology* (6th ed.). McGraw-Hill.
- Ranjbar, F., Arefi, M. M., & Ghadimi, N. (2017). "Design and Implementation of a Thermoelectric Infant Incubator with Intelligent Control." *Biomedical Engineering Letters*, 7(2), 123–130.
- Riffat, S. B., & Ma, X. (2003). "Thermoelectrics: A Review of Present and Potential Applications". *Applied Thermal Engineering*, 23(8), 913–935.
- Roswirman Roswirman, ELAZHARI, Khairuddin Tampubolon(2021) Pengaruh Implementasi Manajemen Mutu Terpadu dan Disiplin Kerja Terhadap Kinerja Guru pada Era New Normal di SMK Swasta PAB 2 Helvetia; AFoSJ-LAS (All Fields of Science J-LAS),V.1,no.4(hal.316-333).
- Rowe, D. M. (2005). *Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano*. CRC Press.
- Sugiyono. (2016). *Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif dan R&D*. Bandung: Alfabeta.
- Tampubolon, K. (2023). Pelatihan Manajemen Supervisi Akademik untuk Meningkatkan Kompetensi Pedagogik Guru. *Journal Liaison Academia and Society*, 3(1), 1-6.
- Tampubolon, K., & Sibuea, N. (2022). Peran Perilaku Guru dalam Menciptakan Disiplin Siswa. *AFoSJ-LAS (All Fields of Science Journal Liaison Academia and Society)*, 2(4), 1-7.
- Tampubolon, K., & Siregar, B. (2023). Analisis Implementasi Sistem Merit bidang Pelayanan Publik di Kelurahan Timbang Deli Kecamatan Medan Amplas Kota Medan. *All Fields of Science Journal Liaison Academia and Society*, 3(2), 1-6.
- Tampubolon, K., Elazhari, E., & Batu, F. L. (2021). Analisis dan Penerapan Tiga Elemen Sistem Pembelajaran pada Era Industri 4.0 di Universitas Pembinaan Masyarakat Indonesia. *All Fields of Science Journal Liaison Academia and Society*, 1(2), 153-163.
- Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. Pearson Education.