

12-31-2025

Uji Kelayakan Teknis dan Performa AUVEST: Rompi Pendingin Otomatis Berbasis Wearable Thermoelectric Cooler untuk Mitigasi Risiko Heat Stress

Muchammad Adam Wildan
Airlangga University, wildanadam011@gmail.com

Amelia Avril Rayhana
Airlangga University, ameliaavril88@gmail.com

Nadia Hanifan Nabila
Airlangga University, nadiahanifan@gmail.com

Bian Shabri Putri Irwanto
Universitas Airlangga, Indonesia, bianshabri1234@fkm.unair.ac.id

Follow this and additional works at: <https://scholarhub.ui.ac.id/njohs>



Part of the [Biomedical Engineering and Bioengineering Commons](#), and the [Occupational Health and Industrial Hygiene Commons](#)

Recommended Citation

Wildan, Muchammad Adam; Rayhana, Amelia Avril; Nabila, Nadia Hanifan; and Irwanto, Bian Shabri Putri (2025) "Uji Kelayakan Teknis dan Performa AUVEST: Rompi Pendingin Otomatis Berbasis Wearable Thermoelectric Cooler untuk Mitigasi Risiko Heat Stress," *National Journal of Occupational Health and Safety*. Vol. 6: No. 2, Article 5.

DOI: 10.7454/njohs.v6i2.1133

Available at: <https://scholarhub.ui.ac.id/njohs/vol6/iss2/5>

This Original Article is brought to you for free and open access by UI Scholars Hub. It has been accepted for inclusion in National Journal of Occupational Health and Safety by an authorized editor of UI Scholars Hub.

Uji Kelayakan Teknis dan Performa AUVEST: Rompi Pendingin Otomatis Berbasis Wearable Thermoelectric Cooler untuk Mitigasi Risiko Heat Stress

Cover Page Footnote

The authors would like to express their gratitude to the Faculty of Public Health, Universitas Airlangga, for providing support and facilities during the research process.

Uji Kelayakan Teknis dan Performa AUVEST: Rompi Pendingin Otomatis Berbasis *Wearable Thermoelectric Cooler* untuk Mitigasi Risiko *Heat Stress*

Muchammad Adam Wildan, Amelia Avril Rayhana, Nadia Hanifan Nabila*, Bian Shabri Putri Irwanto

Departemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja Fakultas Kesehatan Masyarakat Universitas Airlangga

Corresponding author: nadiahanifan@gmail.com

Info Artikel	Abstrak
Riwayat Artikel Diterima: 1 November 2025 Direvisi: 4 November 2025 Diterbitkan: 23 Januari 2026	<p><i>Heat stress</i> merupakan risiko kesehatan serius pada pekerja konstruksi akibat akumulasi panas metabolik tubuh dan lingkungan. Inovasi rompi pendingin yang tersedia saat ini masih memiliki keterbatasan. Penelitian ini bertujuan melakukan uji kelayakan teknis dan analisis kinerja awal <i>Automatic Vest</i> (AUVEST), rompi pendingin otomatis berbasis <i>Wearable Thermoelectric Cooler</i> dan <i>Internet of Things</i> (IoT). Metode yang digunakan adalah uji teknis pada subjek tunggal pekerja konstruksi di lingkungan luar dan dalam ruangan. AUVEST dilengkapi sensor suhu (DS18B20, TMP102) dan kelembapan (DHT11), dengan pengolahan data oleh mikrokontroler ESP8266 yang mengaktifkan modul Peltier secara otomatis berdasarkan indikator <i>Heat Stress Indeks</i> (HSI) $\geq 28^{\circ}\text{C}$ dan suhu mikroklimat $\geq 35^{\circ}\text{C}$. Hasil pengujian menunjukkan bahwa AUVEST mampu mengaktifkan sistem pendingin secara otomatis pada lingkungan luar ruangan, dengan penurunan suhu maksimum sebesar $6,91^{\circ}\text{C}$ pada menit ke-7 dan stabil pada kisaran $6,65^{\circ}\text{C}$. Dengan berat hanya 992 gram dan daya tahan operasi hingga 8 jam, AUVEST menunjukkan performa lebih unggul dibandingkan rompi pendingin konvensional. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa AUVEST merupakan solusi inovatif, ergonomis, dan cerdas untuk memitigasi risiko <i>heat stress</i> pada pekerja konstruksi.</p>
Kata Kunci: <i>heat stress</i> ; konstruksi; rompi pendingin; <i>wearable thermoelectric cooler</i>	

Technical Feasibility and Performance Test of AUVEST: An Automatic Cooling Vest Based on Wearable Thermoelectric Cooler for Heat Stress Risk Mitigation

Article Info	Abstract
Article History Received: November 1, 2025 Revised: November 4, 2025 Published: January 23, 2026	<p><i>Heat stress is a serious health risk for construction workers due to the accumulation of metabolic and environmental heat. Existing cooling vest innovations still have several limitations. This study aims to conduct a technical feasibility study and preliminary performance analysis of the Automatic Vest (AUVEST), an automatic cooling vest based on a Wearable Thermoelectric Cooler and Internet of Things (IoT). The method used was a technical trial on a single subject construction worker in both outdoor and indoor environments. AUVEST is equipped with temperature sensors (DS18B20, TMP102) and a humidity sensor (DHT11), with data processed by an ESP8266 microcontroller that automatically activates the Peltier module based on Heat Stress Index (HSI) $\geq 28^{\circ}\text{C}$ and microclimate temperature $\geq 35^{\circ}\text{C}$. Performance testing showed that AUVEST was able to automatically activate the cooling system in outdoor environments, with a maximum temperature reduction of 6.91°C at the 7th minute and stabilizing at 6.65°C. With a weight of only 992 grams and an operating duration of up to 8 hours, AUVEST demonstrates superior performance compared to conventional cooling vests. Thus, it can be concluded that AUVEST is an innovative, ergonomic, and intelligent solution for mitigating heat stress risks in construction workers.</i></p>
Keywords: <i>heat stress</i> ; construction; cooling vest; wearable thermoelectric cooler	

Pendahuluan

Industri konstruksi merupakan sektor utama dalam pembangunan infrastruktur dan pertumbuhan ekonomi. Namun, di balik kontribusinya yang besar, sektor ini memiliki risiko keselamatan dan kesehatan kerja yang tinggi, terutama terkait paparan panas ekstrem yang dapat memicu *heat stress*. *Heat stress* adalah kondisi ketika tubuh mengalami tekanan panas melebihi kemampuan fisiologisnya untuk mengatur suhu internal, akibat kombinasi panas lingkungan, aktivitas fisik, serta penggunaan alat pelindung diri (CDC, 2024). Peningkatan suhu global turut memperburuk situasi tersebut, khususnya di negara tropis seperti Indonesia yang memiliki suhu rata-rata maksimum harian berkisar 32°C–38°C (BMKG, 2024).

Dampak paparan panas terhadap pekerja konstruksi tidak dapat dianggap ringan. Penelitian menunjukkan bahwa 60% pekerja konstruksi yang terpapar suhu kerja tinggi mengalami penurunan produktivitas signifikan (Han *et al.*, 2024). Permatasari *et al.* (2024) juga melaporkan gejala fisiologis seperti pusing, mual, kelelahan ekstrem, hingga kehilangan kesadaran, yang berpotensi berujung pada kematian jika tidak ditangani. Secara global, International Labour Organization (ILO, 2019) mengestimasi bahwa 19% total jam kerja sektor konstruksi hilang akibat paparan panas, setara kerugian ekonomi sebesar US\$2.400 miliar. Meskipun pemerintah telah menerapkan regulasi melalui Permenaker No. 5 Tahun 2018 mengenai pengendalian paparan panas melalui ventilasi, dengan mengatur waktu kerja dan menyediakan air minum, tetapi pendekatan tersebut masih bersifat eksternal dan belum mampu secara langsung mengatasi

penumpukan panas di dalam tubuh pekerja. Hal ini menunjukkan masih adanya kebutuhan untuk inovasi yang lebih efektif dan responsif terhadap kondisi fisiologis pekerja secara *real-time*.

Perkembangan teknologi *wearable* membuka peluang untuk menciptakan pendekatan yang lebih personal dan adaptif dalam mengelola beban panas tubuh. Beberapa inovasi seperti rompi pendingin berbasis sirkulasi air dan *Phase Change Material* (PCM) telah tersedia secara komersial, namun masih memiliki keterbatasan seperti risiko kebocoran, bobot yang berat (2–4 kg), dan kebutuhan aktivasi manual yang bergantung pada persepsi subjektif pekerja (Raza *et al.*, 2025; Gao *et al.*, 2012). Kondisi tersebut menegaskan perlunya solusi yang lebih ringan, ergonomis, dan mampu beroperasi secara otomatis berdasarkan kondisi fisiologis *real-time*.

Berangkat dari kebutuhan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dan menguji kelayakan *Automatic Vest* (AUVEST), yaitu rompi pendingin otomatis berbasis *Wearable Thermoelectric Cooler* yang terintegrasi dengan *Internet of Things* (IoT). Alat ini mempunyai sistem kontrol otomatis berbasis dua parameter, yaitu *Heat Stress Indeks* (HSI) dan suhu mikroklimat. Fokus penelitian ini adalah untuk menguji kelayakan teknis dan analisis kinerja awal prototipe AUVEST dalam menurunkan beban panas tubuh serta meningkatkan kenyamanan termal pekerja konstruksi pada berbagai kondisi lingkungan. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi kebaruan dalam bidang keselamatan dan kesehatan kerja (K3) melalui pengembangan sistem pendinginan

otomatis yang lebih responsif dibandingkan pendekatan konvensional maupun rompi komersial manual yang ada saat ini. Inovasi ini diharapkan menjadi alternatif yang lebih efektif dalam mencegah *heat stress* tanpa menurunkan produktivitas kerja pekerja konstruksi.

Metode

Jenis penelitian ini adalah studi uji kelayakan teknis (*technical feasibility study*) dengan pendekatan *repeated measures* pada subjek tunggal, yang berarti satu pekerja diuji dalam dua kondisi lingkungan berbeda untuk menguji keandalan alat dan respons sistem. Desain ini dipilih karena sesuai dengan tujuan utama penelitian, yaitu melakukan verifikasi fungsi dan analisis kinerja awal prototipe *Automatic Vest* (AUVEST) dalam mendeteksi serta merespons perubahan kondisi lingkungan secara otomatis. Menurut Suma'mur (2009), faktor seperti suhu udara, kelembapan, dan panas radiasi perlu dikendalikan dalam studi *heat stress*, sehingga desain ini memungkinkan peneliti membandingkan respons yang sama di bawah tingkat paparan panas yang berbeda. Penelitian ini dilaksanakan di dua lokasi utama, yaitu lingkungan *indoor* (Laboratorium Elektro dan Daya, Universitas Airlangga) yang cenderung terkendali, serta lingkungan *outdoor* (lokasi konstruksi Airlangga *Convention Center*) yang terpapar radiasi matahari langsung. Pengujian dilakukan selama dua hari dengan durasi pengambilan data 8 jam per hari, di mana subjek melakukan aktivitas konstruksi serupa di kedua lingkungan tersebut untuk membandingkan efektivitas alat dalam merespons beban panas yang berbeda. Keseluruhan pelaksanaan

penelitian berlangsung selama empat bulan, dimulai pada April hingga Agustus 2024.

Sampel dalam penelitian ini adalah pekerja konstruksi yang aktif bekerja di lokasi proyek pembangunan Airlangga *Convention Center* dan berisiko terpapar *heat stress*. Teknik pengambilan sampel yang digunakan adalah *purposive sampling*. Sampel terdiri dari satu orang pekerja konstruksi yang memenuhi kriteria inklusi, yaitu: pekerja laki-laki berusia produktif (20-45 tahun), aktif bekerja di lokasi proyek pembangunan Airlangga *Education Center*, memiliki lama paparan panas rata-rata ≥ 6 jam per hari, sehat jasmani (tidak memiliki riwayat penyakit kardiovaskular atau gangguan termoregulasi), dan bersedia menjadi responden selama periode pengujian. Penggunaan satu subjek dalam uji awal ini sejalan dengan tujuan verifikasi fungsi alat, sebagaimana dilakukan dalam studi pengembangan prototipe Eunbin *et al.* (2015), yang menekankan konsistensi dan akurasi sistem dalam mendeteksi dan merespons perubahan kondisi lingkungan.

Penggunaan satu subjek ($N = 1$) dalam penelitian ini didasarkan pada tujuan penelitian sebagai uji kelayakan teknis dan verifikasi fungsi awal prototipe, sehingga penelitian ini lebih tepat dikategorikan sebagai *technical feasibility study* daripada studi efektivitas klinis. Pendekatan subjek tunggal umum digunakan pada tahap awal pengembangan *wearable cooling system* untuk menilai keandalan sensor, konsistensi logika kontrol otomatis, serta stabilitas performa sistem pada kondisi kerja nyata sebelum dilakukan pengujian berskala besar. Untuk meminimalkan potensi bias, pengujian dilakukan dengan desain *repeated measures*, yaitu pada subjek yang sama di dua kondisi

lingkungan berbeda (dalam dan luar ruangan), menggunakan *threshold* otomatis yang objektif, pencatatan data berbasis sensor, serta perbandingan dengan alat ukur referensi. Dengan demikian, meskipun jumlah subjek terbatas, data yang diperoleh tetap berfokus pada validasi fungsi sistem dan respons teknis AUVEST sesuai dengan tujuan awal penelitian.

Pengembangan dan pengujian AUVEST (*Automatic Vest*) menggunakan sejumlah alat dan bahan. Prototipe AUVEST dilengkapi dengan beberapa sistem, yaitu sistem sensor yang terdiri dari sensor DS18B20 dan sensor DHT11 untuk mengukur suhu lingkungan dan kelembapan, serta sensor TMP102 yang ditempatkan di bagian dalam rompi pada area samping kanan tubuh (sekitar pinggang bawah) untuk mengukur suhu mikroklimat (suhu antara kulit dan rompi). Sistem pendingin menggunakan modul Peltier TEC1-12706 12V DC 6A yang bekerja berdasarkan *Peltier Effect*, yakni perpindahan panas akibat aliran listrik pada dua material semikonduktor berbeda (Yudianto Eko, 2020). Untuk disipasi panas, digunakan *flexible heatsink* berbahan campuran silikon, *paraffin wax*, dan *graphite powder*. Subsistem ini dikendalikan oleh *mikrokontroler ESP8266 NodeMCU* sebagai pusat pemrosesan data dan konektivitas IoT (Alfian, 2022) dengan dukungan *relay 2 Channel 5V SSR High*, serta sumber daya berupa baterai Li-ion SH132 dan baterai Lipo. Bahan pendukung lainnya meliputi *temperature gun* dan *thermocouple Type K* sebagai pembanding akurasi sensor, *voltmeter*, dan *power supply* untuk proses suplai daya dan pengujian teknis, serta alat tulis dan perangkat lunak yang digunakan untuk pencatatan data selama pengembangan.

Sistem kontrol otomatis bekerja berdasarkan logika **AND** dengan ambang batas (*threshold*) yang diadopsi dari standar literatur *heat stress* dan kalibrasi sistem. Alat akan aktif (*ON*) jika *Heat Stress Index* (HSI) $\geq 28^{\circ}\text{C}$ dan suhu mikroklimat $\geq 35^{\circ}\text{C}$. Alat akan non-aktif (*OFF*) jika salah satu atau kedua syarat tidak terpenuhi.

Teknik pengumpulan data dalam penelitian ini dilakukan melalui dua pendekatan utama, yaitu observasi langsung serta pengukuran fisiologis dan lingkungan. Observasi langsung dilakukan untuk mengamati kinerja AUVEST di lapangan, khususnya dalam memantau waktu aktif sistem pendingin berbasis modul Peltier yang bekerja secara otomatis sesuai dengan ambang batas suhu dan kelembapan yang telah ditentukan. Selain itu, pengukuran fisiologis dan lingkungan dilakukan untuk memperoleh data kuantitatif terkait kinerja AUVEST selama digunakan oleh pekerja konstruksi. Variabel yang diukur meliputi suhu internal, suhu lingkungan, kelembapan, dan nilai *Heat Stress Index* (HSI). Nilai HSI dihitung secara otomatis oleh sistem aplikasi berdasarkan algoritma psikometri yang mengintegrasikan ketiga variabel tersebut. HSI dipilih sebagai indikator utama karena mampu merepresentasikan suhu lingkungan, suhu internal, dan kelembapan sebagai faktor risiko *heat stress* secara komprehensif (Cvijanovic, 2023).

Hasil

AUVEST merupakan sebuah rompi pendingin inovatif yang dirancang khusus untuk pekerja konstruksi. Prototipe ini dibuat dari bahan *American Drill* berwarna oranye AM 618 dengan reflektor *scotlite* 5 cm untuk

memenuhi standar *safety vest*. Desainnya mencakup saku racis berukuran 6x6 cm di bagian depan dan belakang untuk menempatkan komponen inti, yaitu *flexible heatsink*. *Flexible heatsink* dikembangkan dari campuran silikon, *paraffin wax*, dan *graphite powder* dengan konduktivitas termal sebesar 0,451 W/m·K. Komposisi ini menghasilkan material yang ringan, fleksibel, dan mampu menyerap serta melepaskan panas secara efisien melalui mekanisme *natural convection*, sehingga tidak mengganggu mobilitas pekerja. Komponen ini bekerja mendukung sistem *wearable thermoelectric cooler*, yaitu inti dari mekanisme pendinginan AUVEST yang mengombinasikan modul Peltier dengan *flexible heatsink*. Modul Peltier dipilih karena sifatnya yang ramah lingkungan (tidak menggunakan freon), tidak menimbulkan kebisingan, serta mudah dalam perawatan.

Sistem kendali AUVEST berbasis *Internet of Things* (IoT) dengan mikrokontroler ESP8266 sebagai pusat pemrosesan data. Sensor-sensor yang terintegrasi meliputi DS18B20 untuk suhu lingkungan, DHT11 untuk kelembapan, dan TMP102 yang ditempatkan pada bagian samping kanan pinggang bawah tubuh untuk mengukur suhu mikroklimate (suhu di antara kulit dan rompi). Sensor TMP102 dipilih karena memiliki akurasi tinggi ($\pm 0,5^{\circ}\text{C}$) tanpa perlu kalibrasi (Eunbin, 2020). Data dari sensor-sensor ini kemudian ditransmisikan secara *real-time* ke sebuah aplikasi *mobile*. Keunggulan prototipe AUVEST terletak pada beratnya yang ringan (<1 kg) dibandingkan

produk sejenis di pasaran yang bisa mencapai 2-4 kg. Desain yang ringan menjadi faktor penting dalam menjaga mobilitas pekerja. Selain itu, ketahanan baterai selama 8 jam dinilai memadai untuk satu *shift* kerja penuh. Aplikasi *mobile* IoT berfungsi sebagai *dashboard* pemantauan dan kendali, memungkinkan pengguna melihat data *real-time* dari berbagai sensor. Spesifikasi teknis AUVEST disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi AUVEST

Spesifikasi	Data
Dimensi Prototipe	44 x 62 cm
Berat	992 gram (< 1 kg)
Daya Tahan Maksimum	8 Jam
Voltase Total	29.6 V
Arus Total	2,273 Ampere
Daya	0.53 kW/8 jam
Rata-Rata Suhu Peltier	18°C - 25°C
Kendali Jarak Jauh	Aplikasi <i>Smartphone</i>

AUVEST menggunakan sistem otomatisasi penuh tanpa memerlukan intervensi manual pengguna di lapangan. Sistem aktif berdasarkan algoritma dengan mengintegrasikan dua parameter risiko, yaitu *Heat Stress Indeks* (HSI) dan suhu mikroklimate. Selain menampilkan data sensor, aplikasi juga memberikan fitur pengaturan *threshold* atau batas ambang untuk mengaktifkan dan menonaktifkan sistem pendingin secara manual sesuai dengan kondisi lingkungan yang dihadapi. Keberadaan sistem aplikasi ini merupakan kebaruan inovasi dari rompi pendingin konvensional yang bekerja secara manual. Pemantauan *real-time* memungkinkan deteksi dini kondisi yang berpotensi menyebabkan *heat stress*. *Threshold* pada setiap indikator dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Threshold Aktivasi Sistem Pendingin AUVEST

Nilai HSI (°C)	Suhu Mikroklimate (°C)	Status Peltier
≥ 28	≥ 35	ON
< 28	< 35	OFF

Tabel 3. Hasil Uji Performa AUVEST

Rentan Waktu	Suhu Lingkungan (°C)	Suhu Mikroklimat (°C)	Nilai HSI	Status Peltier
Dalam Ruangan				
08.00 – 09.00	31,2	33	20	Off
09.00 – 10.00	31,4	34	21	Off
10.00 – 11.00	32,2	33	21	Off
11.00 – 12.00	34,6	34,5	24	Off
13.00 – 14.00	34,3	34,5	25	Off
14.00 – 15.00	32,3	34	22	Off
15.00 – 16.00	32,4	34	22	Off
16.00 – 17.00	31,3	33,5	21	Off
Luar Ruangan				
08.00 – 09.00	34,3	34,5	25	Off
09.00 – 10.00	36,4	35,5	26	Off
10.00 – 11.00	36,2	35,6	28	On
11.00 – 12.00	37,1	36,3	29	On
13.00 – 14.00	36,4	36	28	On
14.00 – 15.00	36,2	35,8	27	Off
15.00 – 16.00	35,5	35,3	26	Off
16.00 – 17.00	35,5	35,2	26	Off

Uji coba prototipe dilakukan pada satu pekerja konstruksi dalam dua kondisi berbeda, yakni di dalam ruangan dan di luar ruangan. Hasil pengukuran selama 8 jam kerja disajikan pada Tabel 3. Data menunjukkan bahwa sistem kontrol otomatis berfungsi sesuai dengan logika yang diprogram. Hasil ini membuktikan bahwa sistem otomatis AUVEST bekerja secara optimal. Pada kondisi lingkungan luar ruangan yang lebih panas ($HSI \geq 28^{\circ}\text{C}$ dan suhu mikroklimat $\geq 35^{\circ}\text{C}$), modul peltier berhasil aktif secara otomatis. Sebaliknya, dalam ruangan yang kondisinya lebih sejuk ($HSI < 28^{\circ}\text{C}$ dan suhu mikroklimat $< 35^{\circ}\text{C}$), modul peltier tetap non-aktif. Hasil tersebut memperlihatkan bahwa sensor serta logika kendali yang diterapkan melalui *mikrokontroler* ESP8266 mampu bekerja secara optimal. Keakuratan data ini didukung oleh kinerja sensor yang memiliki tingkat presisi tinggi, sebagaimana terlihat pada Tabel 4, sehingga hasil analisis dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah.

Untuk mengukur kapasitas pendinginan intrinsik (*cooling capacity*) dan respons termal sistem, dilakukan pengujian

kinerja termal terpisah. Semakin besar daya yang diberikan, maka semakin tinggi kecepatan pendinginan atau kapasitas peltier dalam memindahkan panas. Rumus yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$\frac{\Delta T}{t} = \frac{P}{MC}$$

Keterangan

- ΔT : Selisih suhu *cool side* peltier dengan *flexible heatsink* (°C)
- t : Waktu (detik)
- P : Daya (W)
- M : Massa (Kg)
- C : Kalor Jenis (J/Kg°C)

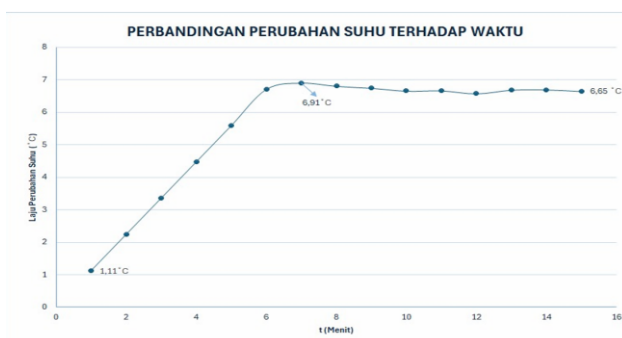
Tabel 4. Validasi Komparatif Sensor Suhu

Komponen	Akurasi	Error
DS18B20	±0,5	1,3%
TMP102	±0,5	1,3%
THERMOCOUPLE	±0,25	0,66%
DHT11	±0,%	5,2%

Berdasarkan rumus tersebut, didapatkan rata-rata kecepatan peltier per menitnya sebesar 0,5°C/menit. Perbandingan perubahan suhu per detik dalam 1 menit disajikan pada Gambar 1. Grafik pada gambar tersebut menunjukkan hubungan linier antara waktu dan perubahan suhu (ΔT). Pada detik ke-60, sistem telah mampu menurunkan suhu sebesar 1,11°C.



Gambar 1. Grafik Perubahan Suhu 60 Detik Pertama



Gambar 2. Grafik Perubahan Suhu Terhadap Waktu dalam 15 Menit

Hasil pengukuran perubahan suhu (ΔT) terhadap waktu dalam 15 menit disajikan pada Gambar 2. Laju perubahan suhu meningkat dengan cepat pada menit-menit awal dan mencapai puncaknya pada menit ke-7 ($\Delta T = 6,91^{\circ}\text{C}$). Setelah itu, suhu stabil pada kisaran $\Delta T = 6,65^{\circ}\text{C}$ hingga menit ke-15. Peningkatan perubahan suhu (ΔT) pada fase awal menunjukkan adanya penurunan suhu yang terjadi dalam durasi singkat berdasarkan hasil pengukuran. Sementara itu, kestabilan suhu pada menit-menit berikutnya menjamin kenyamanan berkelanjutan tanpa menyebabkan *thermal shock* karena penurunan suhu yang terlalu drastis. Fase stabilisasi ini menjamin kenyamanan termal pekerja tanpa risiko *thermal shock* akibat penurunan suhu yang terlalu ekstrem. Transmisi data melalui platform IoT bekerja secara *real-time* dengan jeda waktu (*delay*) eksekusi yang minimal, memastikan respons

pendinginan yang adaptif terhadap kondisi kerja dinamis.

Diskusi

Hasil uji lapangan berdasarkan Tabel 3 menunjukkan bahwa sistem kontrol otomatis AUVEST berfungsi sesuai dengan logika yang diprogram. Sistem AUVEST mampu membedakan kondisi lingkungan dan mengaktifkan pendinginan hanya ketika kedua parameter, $\text{HSI} \geq 28^{\circ}\text{C}$ dan suhu mikroklimat $\geq 35^{\circ}\text{C}$, terpenuhi. Performa ini selaras dengan penelitian oleh Sitompul *et al.* (2022) yang menyatakan bahwa implementasi mikrokontroler ESP8266 berbasis IoT menunjukkan stabilitas respons dan keandalan dalam pemrosesan data secara otomatis dan *real-time*. Hal ini ditunjukkan dengan penurunan suhu yang cepat pada menit awal dan diikuti dengan stabilisasi dengan sangat ideal.

Pada Tabel 3 juga mengungkapkan bahwa meskipun sistem peltier dalam status aktif (*ON*), suhu mikroklimat masih bisa meningkat. Hal ini bukan merupakan kegagalan sistem AUVEST, melainkan memperjelas fungsi AUVEST yang sebenarnya. Dari hal ini dapat dijelaskan bahwa AUVEST tidak dirancang sebagai sistem pendinginan absolut yang dapat menurunkan suhu lingkungan, melainkan berperan sebagai penyangga *thermal (thermal buffer)*. Mekanisme ini bekerja dengan cara menahan laju kenaikan suhu di sekitar tubuh pekerja akibat beban panas lingkungan yang ekstrem. Selain itu, kecepatan pendinginan yang diatur secara bertahap bertujuan untuk mencegah terjadinya kejutan suhu (*thermal shock*) yang dapat mengganggu sistem termoregulasi alami tubuh manusia.

Berdasarkan Gambar 1 dan Gambar 2, AUVEST menunjukkan performa yang stabil dalam merespons paparan panas di lapangan. Sistem AUVEST mampu menurunkan suhu mikroklimat dengan hasil nyata sebesar $6,91^{\circ}\text{C}$ pada fase awal aktivasi dan mencapai stabilitas sekitar $6,65^{\circ}\text{C}$ selama responden melakukan pekerjaannya. Kecepatan pendinginan pada fase awal bertujuan untuk menurunkan suhu secara signifikan dan mencegah terjadinya *heat stress*. Kestabilan penurunan suhu menunjukkan bahwa hal tersebut mampu mempertahankan kenyamanan responden. Kecepatan dan kestabilan penurunan suhu ini dipengaruhi oleh efektivitas modul peltier dalam menyerap panas dan *flexible heatsink* dalam melepas panas melalui konveksi alami. Penurunan suhu ini lebih tinggi dibandingkan inovasi serupa yang dilakukan oleh Dąbrowska *et al.* (2024) yang hanya menurunkan suhu sebesar $2,66^{\circ}\text{C}$. Hal ini dapat terjadi mengingat adanya perbedaan desain komponen dan kapasitas modul peltier TEC1-12706 yang digunakan pada AUVEST, yang memiliki kemampuan pemindahan panas tiga kali lebih besar.

Integrasi sistem aplikasi berbasis IoT menjadi kebaruan AUVEST dibandingkan dengan rompi pendingin konvensional. Kemampuan AUVEST dalam memantau kondisi lingkungan dan fisiologis pengguna secara *real-time* memungkinkan intervensi yang lebih cerdas dan proaktif. Pendapat Wang *et al.* (2025) menyatakan bahwa penggunaan suhu mikroklimat, daripada suhu tubuh langsung, sebagai *feedback* kontrol menunjukkan kedalaman analisis tim pengembang dalam menghindari bias pengukuran, sehingga meningkatkan akurasi dan keakuratan sistem. Logika aktivasi

berbasis dua indikator, yaitu HSI dan suhu internal, seperti yang didukung oleh pernyataan Cvijanovic (2023), memastikan bahwa sistem pendingin hanya aktif ketika benar-benar dibutuhkan. Hal ini tidak hanya mencegah ketidaknyamanan akibat suhu yang terlalu dingin, tetapi juga mengoptimalkan konsumsi daya baterai, yang tercermin dari daya tahan operasional AUVEST hingga 8 jam.

Temuan dari pengujian kinerja AUVEST ini sejalan dengan penelitian lain yang menguji efektivitas sistem pendingin personal berbasis termoelektrik. Dąbrowska *et al.* (2024) menyatakan bahwa modul elektromagnetik pada pakaian aktif mampu menurunkan suhu kulit secara lokal selama aktivitas fisik, sehingga berkontribusi signifikan terhadap pengurangan beban panas eksternal. Fenomena tersebut sejalan dengan kinerja AUVEST yang dapat menurunkan suhu dengan cepat pada awal sistem diaktifkan, meskipun adanya perbedaan hambatan termal dan kondisi lingkungan yang dapat memengaruhi besarnya penurunan suhu yang dihasilkan.

Selain itu, hasil studi komparatif oleh Kim *et al.* (2024) menunjukkan bahwa efektivitas sistem pendinginan personal tidak hanya bergantung pada jenis teknologinya, tetapi juga pada kondisi lingkungan dan lamanya paparan panas. Dalam studi tersebut, sistem pendinginan aktif menunjukkan respons pendinginan yang lebih cepat dibandingkan *Phase Change Material* (PCM) atau evaporatif, namun performanya sangat bergantung pada efisiensi disipasi panas pada sisi panas perangkat. Hal ini menjelaskan mengapa desain *flexible heatsink* pada AUVEST menjadi faktor krusial. Efektivitas

disipasi panas pada *heatsink* inilah yang memungkinkan sistem mencapai fase stabilisasi dan mempertahankan performa pendinginan dalam jangka waktu yang lebih lama di lingkungan konstruksi yang dinamis.

Penelitian mengenai rompi/*vest* ventilasi berbasis termoelektrik dilakukan oleh Wang *et al.* (2025). Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa sistem pendinginan personal dengan kapasitas sekitar 25 W dapat menurunkan suhu permukaan tubuh dan memperlambat kenaikan suhu inti, sehingga meningkatkan kenyamanan termal pengguna. Mekanisme tersebut terjadi karena adanya perbedaan suhu antara kulit dan permukaan dingin modul termoelektrik, yang membuat panas berpindah dari tubuh ke perangkat hingga mencapai kondisi stabil. Pola tersebut sejalan dengan profil kinerja AUVEST, yang menunjukkan penurunan suhu cepat pada fase awal kemudian mencapai kestabilan termal, menunjukkan bahwa desain sistem pendinginan ini berfungsi sesuai dengan prinsip termofisik yang dijelaskan dalam penelitian tersebut.

Hasil penelitian lain juga menunjukkan bahwa efektivitas rompi/*vest* pendingin termoelektrik sangat dipengaruhi oleh kemampuan sistem dalam melepaskan panas serta tingkat kepraktisan alat saat digunakan. Penelitian yang dilakukan oleh Ang *et al.* (2024) menjelaskan bahwa modul termoelektrik dapat dirancang lebih ringan dan tetap memberikan performa pendinginan yang baik apabila struktur internalnya dioptimalkan. Temuan ini sejalan dengan desain AUVEST yang mengutamakan massa ringan (< 1 kg) untuk mendukung mobilitas pekerja konstruksi, namun tetap dapat mengelola panas yang muncul dan kemampuan

pendinginannya tetap dapat bertahan selama pemakaian.

Dalam hierarki pengendalian bahaya K3, AUVEST diposisikan sebagai *engineering control* berbasis *wearable*. AUVEST berfungsi sebagai intervensi teknis yang memodifikasi kondisi kerja melalui mekanisme pendinginan aktif. Dari aspek keamanan, sistem kelistrikan dan baterai telah diproteksi dalam boks khusus serta dilapisi kain jaring guna menghindari kontak langsung dengan keringat atau kulit pengguna. Sisi panas *heatsink* juga didesain menghadap keluar untuk memastikan panas buangan tidak kembali ke tubuh pekerja.

Meskipun evaluasi ergonomi kuantitatif belum dilakukan, hasil observasi kualitatif melalui wawancara berkala setiap satu jam menunjukkan bahwa responden tidak merasakan keluhan signifikan atau hambatan mobilitas. Hal ini didukung oleh desain rompi yang sangat ringan (< 1 kg). Untuk menjaga aspek higienitas penggunaan jangka panjang, rompi dirancang agar dapat dicuci melalui metode *dry cleaning*. Dengan estimasi biaya produksi sekitar Rp500.000 dan waktu pengisian daya baterai yang relatif singkat (2 jam), AUVEST memiliki potensi besar untuk dikembangkan lebih lanjut sebagai solusi proteksi pekerja konstruksi di daerah tropis.

Penelitian ini memiliki keterbatasan yang perlu menjadi perhatian. Sebagai sebuah uji kelayakan teknis awal, penggunaan subjek tunggal ($N = 1$) menyebabkan hasil penelitian ini bersifat observasional dan belum dapat digeneralisasi ke populasi pekerja konstruksi yang lebih luas. Selain itu, parameter fisiologis yang diukur hanya sebatas pada suhu mikroklimat di antara tubuh dan rompi. Untuk penelitian mendatang, disarankan adanya

pengujian dengan jumlah responden yang lebih besar, penggunaan kelompok kontrol (tanpa rompi), serta pengklasifikasian beban kerja (ringan, sedang, berat) guna memvalidasi efektivitas AUVEST secara statistik. Meskipun demikian, penelitian ini berhasil membuktikan konsep dan kelayakan teknis prototipe AUVEST sebagai solusi dalam memitigasi risiko *heat stress* di sektor konstruksi.

Kesimpulan

Prototipe rompi pendingin otomatis AUVEST telah berhasil dikembangkan sebagai suatu solusi inovatif sebagai solusi inovatif untuk memitigasi risiko *heat stress* pada pekerja konstruksi. Keefektifan AUVEST ditunjukkan melalui performanya dalam menurunkan suhu mikroklimat sebesar 6,91°C dan mencapai kestabilan pada kisaran 6,65°C. Selain itu, otomatisasi dengan *Heat Stress Index* dan suhu mikroklimat memungkinkan sistem pendingin aktif bila indikator di atas ambang batas dan non-aktif setelah di bawah ambang batas, sehingga berpotensi menjaga kenyamanan termal dan menahan laju peningkatan risiko *heat stress* selama aktivitas kerja. Dengan bobot yang ringan (< 1 kg) dan durasi operasional hingga 8 jam, AUVEST berhasil mengatasi keterbatasan rompi pendingin konvensional yang umumnya berat dan bersifat manual. Inovasi ini memiliki potensi besar untuk dikembangkan lebih lanjut guna meningkatkan standar keselamatan dan kesehatan kerja (K3) di sektor konstruksi. Penelitian di masa depan diharapkan dapat melibatkan jumlah subjek yang lebih luas dan parameter fisiologis yang lebih mendalam

untuk memvalidasi efektivitasnya secara komprehensif.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Fakultas Kesehatan Masyarakat Universitas Airlangga dan dosen pembimbing atas dukungan, bimbingan, serta fasilitas yang telah diberikan selama proses penelitian dan penyusunan artikel ini.

Referensi

- Alfian, M. and Purwanto, P., 2022. Prototipe sistem kendali smart home dengan menggunakan mikrokontroler ESP8266 NodeMCU V3 CH340 berbasis web. *Prosiding SENAFTI (Seminar Nasional Teknologi Informasi)*, 1(1), pp. 493–502. Jakarta: Universitas Budi Luhur.
- Ang, E.Y.M., Ng, P.S., Soh, C.B. and Wang, P.C., 2024. Wearable multistage thermoelectric cooler design and fabrication. *Journal of Fluid Flow, Heat and Mass Transfer*, 11, pp. 81–90. doi: 10.11159/jffhmt.2024.009.
- Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG)., 2024. *Buletin Meteorologi Edisi Juni 2024*. Jakarta: BMKG.
- Centers for Disease Control and Prevention (CDC)., 2024. *Heat stress and workers*. [online] Available at: <https://www.cdc.gov/niosh/heat-stress/about/index.html>.
- Cramer, M.N., Jay, O. and Flouris, A.D., 2022. Human temperature regulation under heat stress in health, disease, and injury. *Physiological Reviews*, 102(4), pp. 1907–1989. doi: 10.1152/physrev.00047.2021.

- Cvijanovic, I., Curry, C.L., Busecke, J.J.M., et al., 2023. Importance of humidity for characterization and communication of dangerous heatwave conditions. *npj Climate and Atmospheric Science*, 6(1), pp. 1–12. doi: 10.1038/s41612-023-00346-x.
- Dąbrowska, A., Kobus, M., Sowiński, P., Starzak, Ł. and Pękosławski, B., 2024. Integration of active clothing with a personal cooling system within the NGIoT architecture for the improved comfort of construction workers. *Applied Sciences*, 14(2), pp. 586. doi: 10.3390/app14020586.
- Eunbin, P., Kim, D., Lee, H., et al., 2020. Development of wearable temperature sensor based on Peltier thermoelectric device to change human body temperature. *Sensors and Materials*, 32(9), pp. 2959–2970. doi: 10.18494/SAM.2020.2885.
- Gao, C., Kuklane, K., Wang, F. and Holmér, I., 2012. Personal cooling with phase change materials to improve thermal comfort from a heat wave perspective. *Indoor Air*, 22(6), pp. 524–530. doi: 10.1111/j.1600-0668.2012.00778.x.
- Han, S., Lee, H., Park, S. and Kim, J., 2024. Heat exposure and its effects on construction workers' health and productivity: A meta-analysis. *BMC Public Health*, 24(1189), pp. 1–15. doi: 10.1186/s12889-024-20744-x.
- Hifumi, T., Kondo, Y., Shimizu, K. and Miyake, Y., 2018. Heat stroke. *Journal of Intensive Care*, 6(30), pp. 1–10. doi: 10.1186/s40560-018-0305-y.
- International Labour Organization (ILO), 2019. *Working on a warming planet: The impact of heat stress on work productivity and decent work*. Geneva: ILO.
- Kementerian Ketenagakerjaan Republik Indonesia., 2018. *Peraturan Menteri Ketenagakerjaan Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2018 tentang Keselamatan dan Kesehatan Kerja Lingkungan Kerja*. Jakarta: Kemenaker RI.
- Kim, S., Lee, S., Shin, S. and Lim, D., 2024. Cooling performance measurements of different types of cooling vests using thermal manikin. *Fashion and Textiles*, 11(15), pp. 1–18. doi: 10.1186/s40691-024-00381-z.
- Permatasari, V.J., Setyaningsih, Y. and Lestantyo, D., 2024. Pencegahan dan dampak efek paparan panas dan kelelahan otot pada pekerja industri dan konstruksi (Literature review). *MPPKI (Media Publikasi Promosi Kesehatan Indonesia)*, 7(5), pp. 1133–1140. doi: 10.56338/mparki.v7i5.5139.
- Raza, W., Berto, A., Tancon, M. and Moro, L., 2025. Enhancing thermal comfort: A comprehensive review of wearable cooling systems. *Next Materials*, 8(100762), pp. 1–25. doi: 10.1016/j.nxmate.2025.100762.
- Sitompul, E., Wulandari, T. and Galina, M., 2022. A prototype of an IoT-based production performance and quality monitoring system using NodeMCU ESP8266. *Techné: Jurnal Ilmiah Elektroteknika*, 21(1), pp. 45–62. doi: 10.31358/techne.v21i1.306.
- Suma'mur, P.K., 2009. *Higiene Perusahaan dan Kesehatan Kerja*. Jakarta: CV Sagung Seto.

- Wang, H., Zhang, G., Lin, H., et al., 2025. Study on a ventilating vest with thermoelectric cooling to improve thermal comfort and cognitive ability. *Energy and Buildings*, 328(115188), pp. 1–14. doi: 10.1016/j.enbuild.2024.115188.
- WorkSafeBC., 2007. Heat Stress. [online] Available at: <https://www.worksafebc.com/en/health-safety/hazards-exposures/heat-stress>.
- Yudianto, E., Adiwidodo, S. and Takwim, R.N.A., 2020. Pemanfaatan Peltier sebagai sistem pendinginan untuk medicine cooler box. *Prosiding SENTRINOV (Seminar Nasional Terapan Riset Inovatif)*, 6(1), pp. 213–218. Balikpapan: Politeknik Negeri Balikpapan.