

**ANALISIS PENGGUNAAN SMARTWATCH DALAM
PEMANTAU DATA FISIOLOGIS PENDAKI
GUNUNG GENERASI Z**



Disusun Oleh:

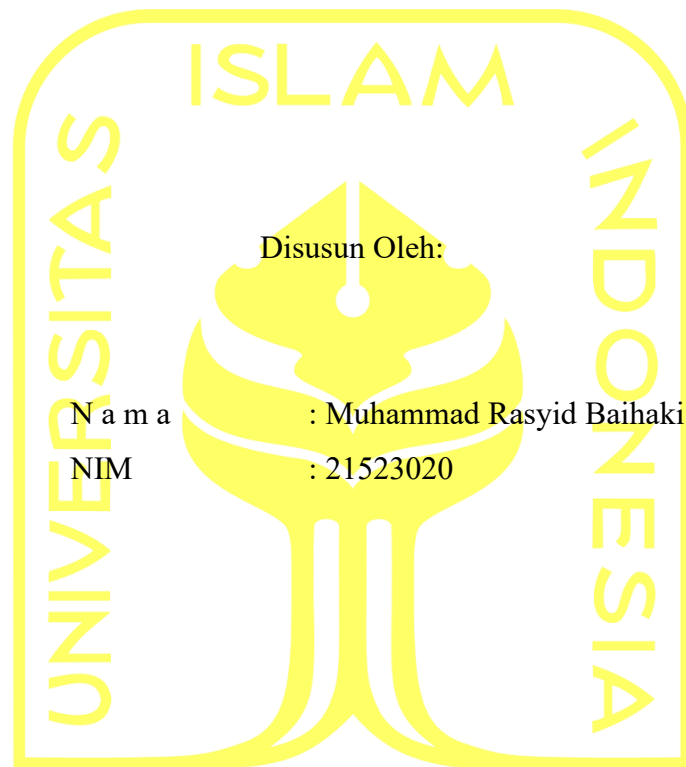
N a m a : Muhammad Rasyid Baihaki
NIM : 21523020

**PROGRAM STUDI INFORMATIKA – PROGRAM SARJANA
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
2025**

HALAMAN PENGESAHAN DOSEN PEMBIMBING

**ANALISIS PENGGUNAAN SMARTWATCH DALAM PEMANTAUAN
DATA FISIOLOGIS PENDAKI GUNUNG GENERASI Z**

TUGAS AKHIR



Yogyakarta, 3 Juli 2025

Pembimbing,



(Irving Vitra Paputungan, S.T, M.Sc., Ph.D.)

HALAMAN PENGESAHAN DOSEN PENGUJI**ANALISIS PENGGUNAAN SMARTWATCH DALAM PEMANTAUAN
DATA FISIOLOGIS PENDAKI GUNUNG GENERASI Z****TUGAS AKHIR**

Telah dipertahankan di depan sidang penguji sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Komputer dari Program Studi Informatika – Program Sarjana di Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Indonesia

Yogyakarta, 3 Juli 2025

Tim Penguji

Irving Vitra Paputungan, S.T, M.Sc., Ph.D.

Anggota 1

Feri Wijayanto, S.T., M.T.

Anggota 2

Elyza Gustri Wahyuni, S.T., M.Cs.

Mengetahui,

Ketua Program Studi Informatika – Program Sarjana

Fakultas Teknologi Industri

Universitas Islam Indonesia



(Dhomas Hatta Fudholi, S.T., M.Eng., Ph.D.)

HALAMAN PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Muhammad Rasyid Baihaki

NIM : 21523020

Tugas akhir dengan judul:

ANALISIS PENGGUNAAN SMARTWATCH DALAM PEMANTAUAN DATA FISIOLOGIS PENDAKI GUNUNG GENERASI Z

Menyatakan bahwa seluruh komponen dan isi dalam tugas akhir ini adalah hasil karya saya sendiri. Apabila di kemudian hari terbukti ada beberapa bagian dari karya ini adalah bukan hasil karya sendiri, tugas akhir yang diajukan sebagai hasil karya sendiri ini siap ditarik kembali dan siap menanggung risiko dan konsekuensi apapun.

Demikian surat pernyataan ini dibuat, semoga dapat dipergunakan sebagaimana mestinya.

Yogyakarta, 3 Juli 2025



(Muhammad Rasyid Baihaki)

HALAMAN PERSEMBAHAN

Segala puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah Subhanahu wa Ta'ala atas limpahan rahmat, hidayah, dan taufik-Nya, yang senantiasa menyertai hingga penulisan Tugas Akhir ini dapat diselesaikan dengan baik. Shalawat serta salam juga senantiasa tercurah kepada Nabi Muhammad Shallallahu 'alaihi wa sallam yang telah menjadi suri teladan dan pembimbing umat menuju jalan kebenaran dan ilmu pengetahuan.

Dengan penuh rasa syukur dan kerendahan hati, karya ini penulis persembahkan kepada:

1. Ayah dan Ibu tercinta, Bapak Defino Efka dan Ibu Nunung Warliani, serta saudara kandung saya, Muhammad Fadel Ghifari dan Defilinai Annisa Permata Sari. Terima kasih atas doa, kasih sayang, nasihat, dan semangat yang tiada henti. Kehadiran dan dukungan kalian adalah sumber kekuatan terbesar dalam setiap langkah hidup saya, termasuk dalam proses penulisan Tugas Akhir ini.
2. Bapak Irving Vitra Papatungan, S.T., M.Sc., Ph.D., selaku dosen pembimbing, atas bimbingan yang sabar, arahan yang penuh wawasan, serta semangat yang beliau tularkan kepada penulis. Kontribusi dan dedikasi beliau sangat berarti dalam keberhasilan penyusunan karya ilmiah ini.
3. Sahabat dan rekan-rekan terdekat, baik di lingkungan perkuliahan maupun di luar, terutama Fawwaz, Zacky, Farel, Farhan, Aji, Hanan, Irfan, Fajar, Javier, dan Bagas. Terima kasih atas kebersamaan, canda tawa, dan semangat yang kalian berikan di tengah kelelahan dan kejenuhan selama perjalanan akademik ini. Dukungan kalian sangat berarti.
4. Hanan Sururi, atas segala bantuan, baik teknis maupun non-teknis, serta atas diskusi yang bermakna dalam proses penulisan skripsi ini. Terima kasih pula atas motivasi, semangat, serta kebersamaan dalam aktivitas pendakian dan perjalanan yang turut membantu penulis melewati masa-masa sulit dengan lebih ringan.
5. Diri saya sendiri, atas kegigihan dan ketekunan dalam menghadapi berbagai tantangan, tekanan, dan kelelahan sepanjang proses ini. Terima kasih telah memilih untuk tetap bertahan dan menyelesaikan apa yang telah dimulai.
6. Seluruh pihak lainnya, yang telah memberikan bantuan, dorongan, maupun inspirasi selama penyusunan Tugas Akhir ini baik secara langsung maupun tidak langsung yang mungkin tidak dapat disebutkan satu per satu. Semoga segala kebaikan dibalas oleh Allah SWT dengan keberkahan.

HALAMAN MOTO

“Motivasi itu sementara, tapi disiplin dan fokus adalah kunci kemenangan” – Timothy Ronald

“Tidak ada yang tidak bisa didunia ini, Selain yang bersifat ketuhanan” – Defino Efka

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Segala puji hanya bagi Allah SWT, Tuhan semesta alam, atas segala limpahan karunia, berkah, dan petunjuk-Nya, yang telah memungkinkan penulis untuk merampungkan penyusunan skripsi ini dengan baik. Shalawat serta salam semoga senantiasa tercurah kepada Nabi Besar Muhammad SAW, suri tauladan bagi seluruh umat manusia.

Laporan Tugas Akhir ini, dengan judul "**ANALISIS PENGGUNAAN SMARTWATCH DALAM PEMANTAU DATA FISIOLOGIS PENDAKI GUNUNG GENERASI Z**", disusun sebagai bentuk kontribusi dalam memahami lebih lanjut pemanfaatan teknologi *wearable* untuk monitoring kesehatan dan performa. Penelitian ini mengaplikasikan pendekatan *quasi-eksperimental* serta memanfaatkan teknik analisis *Dynamic Time Warping (DTW)* sebagai kerangka metodologis untuk menginvestigasi dampak penggunaan *smartwatch* pada respons fisiologis dan perilaku pendaki, guna menghasilkan temuan yang relevan dan aplikatif.

Penyelesaian skripsi ini mustahil terwujud tanpa partisipasi, dukungan, dan arahan dari berbagai individu serta institusi. Untuk itu, penulis dengan tulus menyampaikan ucapan terima kasih dan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada seluruh pihak yang telah memberikan kontribusi, baik secara langsung maupun tidak langsung, dalam proses penulisan ini.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa skripsi ini masih memiliki kekurangan, karena terbatasnya pengetahuan dan pengalaman. Oleh karena itu, penulis sangat terbuka terhadap masukan, kritik, dan saran yang membangun demi penyempurnaan karya ini di kemudian hari. Besar harapan penulis, semoga hasil penelitian ini dapat memberikan sumbangsih dan kebermanfaatan, khususnya bagi pengembangan ilmu di bidang Informatika serta praktik keselamatan dalam aktivitas pendakian.

Yogyakarta, 3 Juli 2025



(Muhammad Rasyid Baihaki)

SARI

Penelitian ini mengevaluasi kontribusi penggunaan smartwatch dalam memantau parameter fisiologis pada pendaki gunung dari kalangan Generasi Z, dengan penekanan pada pengaruh tingkat kesadaran pengguna terhadap fitur-fitur pemantauan yang tersedia. Melalui pendekatan kuasi-eksperimental yang dipadukan dengan analisis komparatif dan teknik *Dynamic Time Warping* (DTW), hasil studi menunjukkan bahwa kesadaran tinggi terhadap data yang ditampilkan oleh smartwatch secara signifikan memengaruhi respons fisiologis, pola aktivitas, dan persepsi terhadap kelelahan. Subjek yang memiliki tingkat kesadaran tinggi terhadap data menunjukkan detak jantung dan pengeluaran kalori yang lebih stabil, kecepatan pendakian yang lebih teratur, serta tingkat kelelahan yang lebih rendah, mencerminkan kemampuan *self-regulation* yang lebih baik. Selain itu, ditemukannya korelasi positif antara suhu tubuh, beban fisiologis, dan kecepatan pendakian menegaskan pentingnya pemantauan fisiologis secara menyeluruh.

Temuan ini mengindikasikan bahwa smartwatch tidak hanya berfungsi sebagai alat pemantau pasif, tetapi juga sebagai perangkat proaktif yang dapat meningkatkan kesadaran kinestetik dan mendukung adaptasi fisiologis secara optimal. Studi ini merekomendasikan perluasan cakupan demografis dalam penelitian lanjutan, pelaksanaan studi longitudinal untuk mengevaluasi efek jangka panjang, serta adopsi pendekatan kualitatif guna menggali aspek psikologis dan motivasional pengguna. Dalam konteks Ilmu Informatika, hasil penelitian ini membuka peluang untuk pengembangan algoritma berbasis Ilmu Data dan Pembelajaran Mesin, termasuk deteksi dini kondisi berisiko seperti hipotermia, personalisasi umpan balik berdasarkan pola fisiologis individual, peningkatan akurasi dan interpretabilitas data sensorik, serta prediksi tingkat kelelahan, sehingga potensi smartwatch dalam mendukung manajemen kesehatan dan performa fisik di lingkungan ekstrem dapat dioptimalkan secara maksimal.

Kata Kunci: *Smartwatch*, Data Fisiologis, Generasi Z, Data Science, Pendakian

GLOSARIUM

Self-Regulation	Kemampuan individu untuk mengelola perilaku, pikiran, dan emosi mereka sendiri untuk mencapai tujuan tertentu; dalam penelitian ini, kemampuan pendaki menyesuaikan aktivitas berdasarkan data fisiologis.
Data Fisiologis	Data yang berkaitan dengan fungsi-fungsi normal tubuh makhluk hidup, seperti detak jantung, suhu tubuh, dan kalori yang terbakar.
Smartwatch	Perangkat digital berbentuk jam tangan dengan fitur tambahan, termasuk sensor untuk pemantauan kesehatan dan aktivitas.
Hipoksia	Keadaan kekurangan oksigen pada jaringan tubuh yang mengganggu fungsi fisiologis normal.
Generasi Z	Kelompok demografis lahir tahun 1997–2012.
Bodily Awareness	Kesadaran individu terhadap posisi, gerakan, dan respons fisiologis tubuh, yang membantu penyesuaian aktivitas berdasarkan sinyal tubuh dan informasi dari perangkat pemantauan.
Sedentari	Gaya hidup dengan aktivitas fisik rendah, ditandai banyak duduk atau berbaring, sehingga meningkatkan risiko penyakit metabolik dan kardiovaskular.
Bradikardia	Kondisi medis di mana detak jantung berada di bawah kisaran normal, yaitu kurang dari 60 denyut per menit pada orang dewasa.
Pacing	Strategi pengaturan kecepatan dan intensitas aktivitas fisik secara terukur untuk mempertahankan performa optimal dan mencegah kelelahan berlebih.
Wearable Device	Perangkat elektronik yang dikenakan untuk memantau aktivitas atau kondisi tubuh.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN DOSEN PEMBIMBING.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN DOSEN PENGUJI.....	iii
HALAMAN PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR.....	iv
HALAMAN PERSEMBAHAN	v
HALAMAN MOTO	vi
KATA PENGANTAR	vii
SARI	viii
GLOSARIUM.....	ix
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah dan Pertanyaan Penelitian.....	4
1.3 Lingkup Penelitian.....	5
1.4 Tujuan dan Manfaat Penelitian.....	6
1.5 Metodologi Penelitian Secara Umum.....	7
1.6 Sistematika Penulisan.....	8
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	10
2.1 Landasan Teoritis	10
2.2 Analisis Komparatif Metodologi dan Teknik Analisis.....	12
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	17
3.1 Struktur Eksperimen: Subjek, Variabel, dan Hipotesis Penelitian	18
3.2 Pengumpulan Data.....	22
3.3 Teknik Analisis Data	28
3.4 Intepretasi Hasil.....	33
BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN.....	35
4.1 Distribusi Indeks Massa Tubuh dan Pengujian Asumsi Statistik.....	35
4.2 Uji Perbedaan Antar Kelompok terhadap Variabel Fisiologis	50
4.3 Uji Korelasi Antar Kelompok Berbasis Spearman.....	60

4.4	Analisis Keselarasan Pola Denyut Jantung antar Subjek Menggunakan Dynamic Time Warping (DTW)	68
4.5	Analisis Kelompok Signifikan	77
4.6	Analisis Hasil Kelompok Signifikan vs Tidak Signifikan	78
BAB V KESIMPULAN.....		80
5.1	Kesimpulan.....	80
5.2	Limitasi Penelitian.....	85
5.3	Saran Penelitian	86
DAFTAR PUSTAKA		90
LAMPIRAN.....		96

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Metode yang digunakan pada penelitian yang relevan	13
Tabel 2. 2 Kategorisasi Desain Penelitian	14
Tabel 2. 3 Kategorisasi Teknik Analisis	15
Tabel 3. 1 Kriteria Subjek Penelitian	19
Tabel 3. 2 Pertanyaan kuesioner	27
Tabel 5. 1 Pemetaan Ketercapaian Tujuan Penelitian	80

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1	Persentase Pengguna Wearable Technology Berdasarkan Gender di Indonesia	2
Gambar 1. 2	Prediksi Pertumbuhan Pengguna <i>Smartwatch</i> di Indonesia, 2020–2029.....	3
Gambar 2. 1	Kerangka Pemikiran Penelitian.....	12
Gambar 3. 1	Diagram Alur Teknik Analisis.....	17
Gambar 3. 2	Between-Subjects-Design	23
Gambar 3. 3	Data denyut jantung, ketinggian, dan kecepatan dalam format deret waktu. 26	
Gambar 3. 4	Data hasil perhitungan rata-rata aktivitas fisik pendakian.	26
Gambar 3. 5	Kode program Uji Normalitas Shapiro-Wilk.....	29
Gambar 3. 6	Kode program Uji-t.....	31
Gambar 3. 7	kode program Uji Korelasi.....	32
Gambar 3. 8	Kode program Analisis <i>Dynamic Time Warping</i>	33
Gambar 3. 9	kode program Analisis <i>Dynamic Time Warping</i> dua subjek.	33
Gambar 4. 1	Visualisasi BMI Kelompok Sadar	35
Gambar 4. 2	Visualisasi BMI Kelompok Tidak Sadar	36
Gambar 4. 3	Hasil Uji Normalitas Distribusi Variabel (Shapiro-Wilk)	39
Gambar 4. 4	Histogram Kernel Density Estimation Distribusi Suhu Tubuh.....	40
Gambar 4. 5	Histogram Kernel Density Estimation Distribusi Langkah	41
Gambar 4. 6	Histogram Kernel Density Estimation Distribusi Durasi Zona <i>Warm Up</i>	42
Gambar 4. 7	Histogram Kernel Density Estimation Distribusi Durasi Zona <i>Fat Burn</i>	42
Gambar 4. 8	Histogram Kernel Density Estimation Distribusi Zona Aerobik.....	42
Gambar 4. 9	Histogram Kernel Density Estimation Distribusi Durasi Zona Anaerobik ...	43
Gambar 4. 10	Histogram Kernel Density Estimation Distribusi Durasi Zona Ekstrem	43
Gambar 4. 11	Histogram Kernel Density Estimation Distribusi Kecepatan	45
Gambar 4. 12	Histogram Kernel Density Estimation Distribusi <i>Recovery Heart Rate</i> Selisih	46
Gambar 4. 13	Histogram Kernel Density Estimation Distribusi Spo2	46
Gambar 4. 14	Histogram Kernel Density Estimation Distribusi RPE.....	47
Gambar 4. 15	Histogram Kernel Density Estimation Distribusi Kalori.....	48
Gambar 4. 16	Histogram Kernel Density Estimation Distribusi BPM.....	49

Gambar 4. 17	Boxplot Distribusi Kecepatan Pendakian pada Kelompok Sadar dan Tidak Sadar	50
Gambar 4. 18	Boxplot Distribusi Detak Jantung (BPM) pada Kelompok Sadar dan Tidak Sadar	52
Gambar 4. 19	Boxplot Distribusi <i>Recovery Heart Rate</i> Selisih pada Kelompok Sadar dan Tidak Sadar	52
Gambar 4. 20	Boxplot Distribusi Kalori Terbakar pada Kelompok Sadar dan Tidak Sadar	53
Gambar 4. 21	Boxplot Distribusi Jumlah Langkah pada Kelompok Sadar dan Tidak Sadar	54
Gambar 4. 22	Boxplot Distribusi Skor Persepsi Kelelahan (RPE) pada Kelompok Sadar dan Tidak Sadar	55
Gambar 4. 23	Boxplot Distribusi Durasi Aktivitas di Zona Detak Jantung Ekstrem.....	56
Gambar 4. 24	Boxplot Distribusi Durasi Aktivitas di Zona Detak Jantung Anaerobik	56
Gambar 4. 25	Boxplot Distribusi Durasi Aktivitas di Zona Detak Jantung Aerobik	57
Gambar 4. 26	Boxplot Distribusi Durasi Aktivitas di Zona Detak Jantung Fat Burn	57
Gambar 4. 27	Boxplot Distribusi Durasi Aktivitas di Zona Detak Jantung Warm-Up.....	58
Gambar 4. 28	Boxplot Distribusi Saturasi Oksigen (SpO ₂) pada Kelompok Sadar dan Tidak Sadar	59
Gambar 4. 29	Boxplot Distribusi Suhu Tubuh pada Kelompok Sadar dan Tidak Sadar	59
Gambar 4. 30	Grafik Scatter Plot Hubungan Persepsi Kelelahan (RPE) terhadap Detak Jantung (BPM).....	61
Gambar 4. 31	Grafik Scatter Plot Hubungan Persepsi Kelelahan (RPE) terhadap Kalori Terbakar	61
Gambar 4. 32	Grafik Scatter Plot Hubungan Indeks Massa Tubuh (BMI) terhadap Detak Jantung (BPM).....	63
Gambar 4. 33	Grafik Scatter Plot Hubungan Indeks Massa Tubuh (BMI) terhadap Kalori Terbakar	63
Gambar 4. 34	Grafik Scatter Plot Hubungan Kecepatan Pendakian terhadap Detak Jantung (BPM)	65
Gambar 4. 35	Grafik Scatter Plot Hubungan Suhu Tubuh terhadap Detak Jantung (BPM)	66
Gambar 4. 36	Grafik Scatter Plot Hubungan Suhu Tubuh terhadap Kalori Terbakar.....	66
Gambar 4. 37	Grafik Scatter Plot Hubungan Suhu Tubuh terhadap <i>Recovery Heart Rate</i> (Selisih).....	67

Gambar 4. 38	Grafik <i>Heatmap</i> Matriks Jarak <i>Dynamic Time Warping</i> (DTW) Data HR <i>Full Trek</i> Seluruh Subjek	69
Gambar 4. 39	Grafik <i>Overlay</i> Deret Waktu HR Seluruh Subjek pada <i>Full Trek</i>	69
Gambar 4. 40	Grafik <i>Overlay</i> Deret Waktu HR pada Subjek A dan Subjek C (<i>Full Trek</i>) .	70
Gambar 4. 41	Grafik <i>Overlay</i> Deret Waktu HR pada Subjek E dan Subjek H (<i>Full Trek</i>) .	70
Gambar 4. 42	Grafik <i>Heatmap</i> Matriks Jarak <i>Dynamic Time Warping</i> (DTW) Segmen <i>Start –Pos 1</i>	72
Gambar 4. 43	Grafik <i>Overlay</i> Deret Waktu HR per Subjek pada Segmen <i>Start –Pos 1</i>	72
Gambar 4. 44	Grafik <i>Heatmap</i> Matriks Jarak <i>Dynamic Time Warping</i> (DTW) Segmen <i>Pos 1–Pos 2</i>	74
Gambar 4. 45	Grafik <i>Overlay</i> Deret Waktu HR per Subjek pada Segmen <i>Pos 1–Pos 2</i>	74
Gambar 4. 46	Grafik <i>Heatmap</i> Matriks Jarak <i>Dynamic Time Warping</i> (DTW) Segmen <i>Pos 2–Puncak</i>	76
Gambar 4. 47	Grafik <i>Overlay</i> Deret Waktu HR per Subjek pada Segmen <i>Pos 2–Puncak</i> ...	76

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

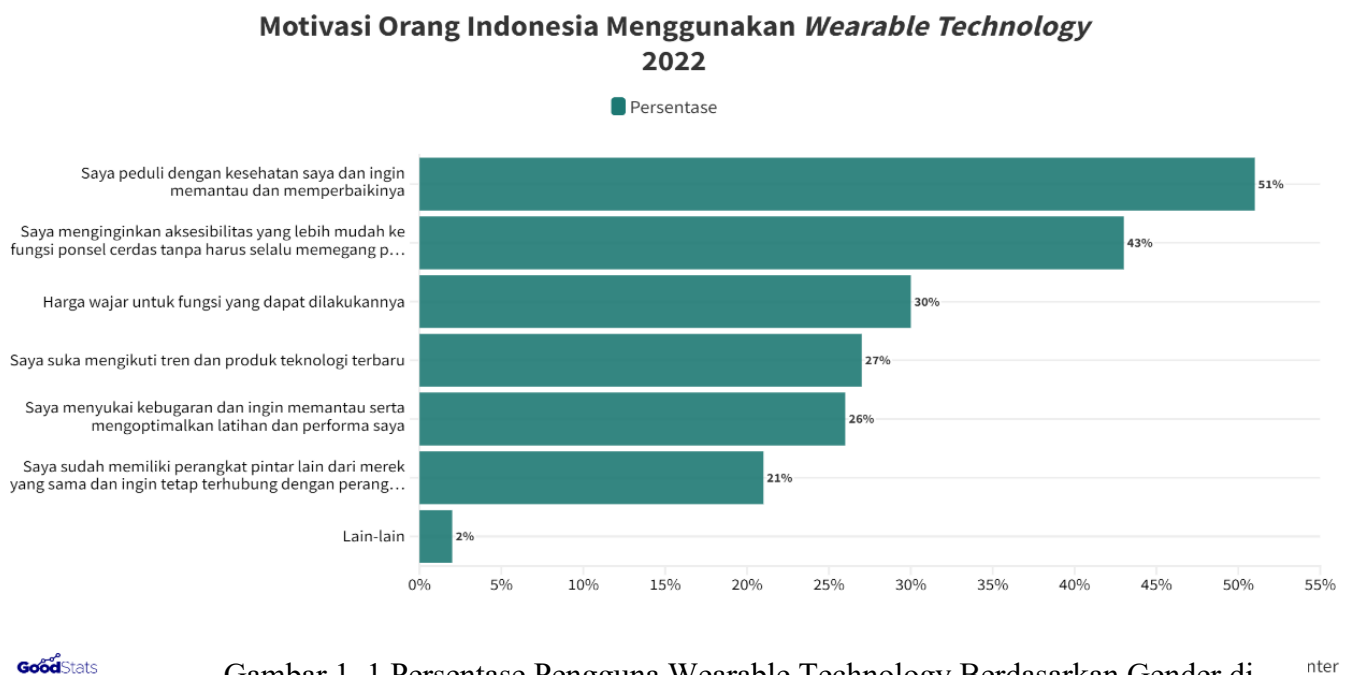
Generasi Z, yaitu kelompok usia yang lahir antara tahun 1997 hingga 2012, merupakan generasi digital yang tumbuh dalam lingkungan serba terhubung dan berteknologi tinggi. Di Indonesia, populasi generasi ini mencapai lebih dari 54 juta jiwa (Haryana et al., 2023). Meskipun memiliki akses luas terhadap informasi dan teknologi, Generasi Z menghadapi tantangan signifikan dalam aspek kesehatan. Pola hidup sedentari, stres akademik, kualitas tidur yang buruk, serta konsumsi makanan tinggi kalori telah berkontribusi pada meningkatnya risiko sindrom metabolik sejak usia muda. Berdasarkan laporan Rustika et al. (2019), prevalensi sindrom metabolik di Indonesia mencapai 23,34% dari total populasi, dengan tren peningkatan pada kelompok usia produktif. Hal ini diperkuat oleh NCD Risk Factor Collaboration (2023) yang mencatat bahwa angka kejadian penyakit metabolik seperti diabetes dan hipertensi terus meningkat sejak tahun 1990. Kondisi ini menunjukkan pentingnya strategi promotif yang mendorong aktivitas fisik terstruktur, khususnya pada kelompok usia muda.

Salah satu bentuk aktivitas fisik yang semakin populer di kalangan Generasi Z adalah pendakian gunung atau hiking. Kegiatan ini tidak hanya dipandang sebagai bentuk olahraga, tetapi juga sebagai sarana rekreasi dan ekspresi identitas. Berdasarkan survei Jakpat (2022), terdapat peningkatan partisipasi Generasi Z dalam aktivitas luar ruang seperti lari, bersepeda, dan mendaki gunung. Laporan Strava (2024) menempatkan hiking sebagai salah satu olahraga dengan pertumbuhan tercepat secara global. Di Indonesia, tren ini tercermin dalam peningkatan kunjungan ke berbagai destinasi pendakian, seperti tercatat pada Gunung Gede Pangrango yang menerima lebih dari 68 ribu pendaki pada tahun 2017 (Validnews, 2022) dan Desa Wisata Patakbanteng yang mencatat lebih dari 60 ribu kunjungan sepanjang tahun 2023 (Serayunews, 2023).

Pemilihan pendakian gunung dalam penelitian ini tidak hanya dilatarbelakangi oleh tren popularitasnya, tetapi juga oleh karakteristik fisiologis dan lingkungan yang membedakannya dari olahraga lain seperti lari atau bersepeda. Pendakian gunung memadukan beban kerja aerobik dan anaerobik yang dipengaruhi oleh variasi elevasi dan kemiringan medan, sehingga menuntut adaptasi kardiovaskular dan respirasi yang lebih besar. Miller et al. (2019) mencatat bahwa perubahan ketinggian dan medan menanjak meningkatkan konsumsi oksigen ($\dot{V}O_2 \max$) dan kerja jantung secara signifikan dibandingkan aktivitas di dataran rendah. Selain itu, faktor

lingkungan pegunungan seperti suhu rendah, kelembapan bervariasi, dan tekanan oksigen yang menurun memengaruhi detak jantung, suhu inti tubuh, dan saturasi oksigen. Schommer et al. (2018) menunjukkan bahwa paparan hipoksia sedang (1500–2500 mdpl) dapat mengubah metabolisme energi dan fungsi kardiopulmoner secara signifikan.

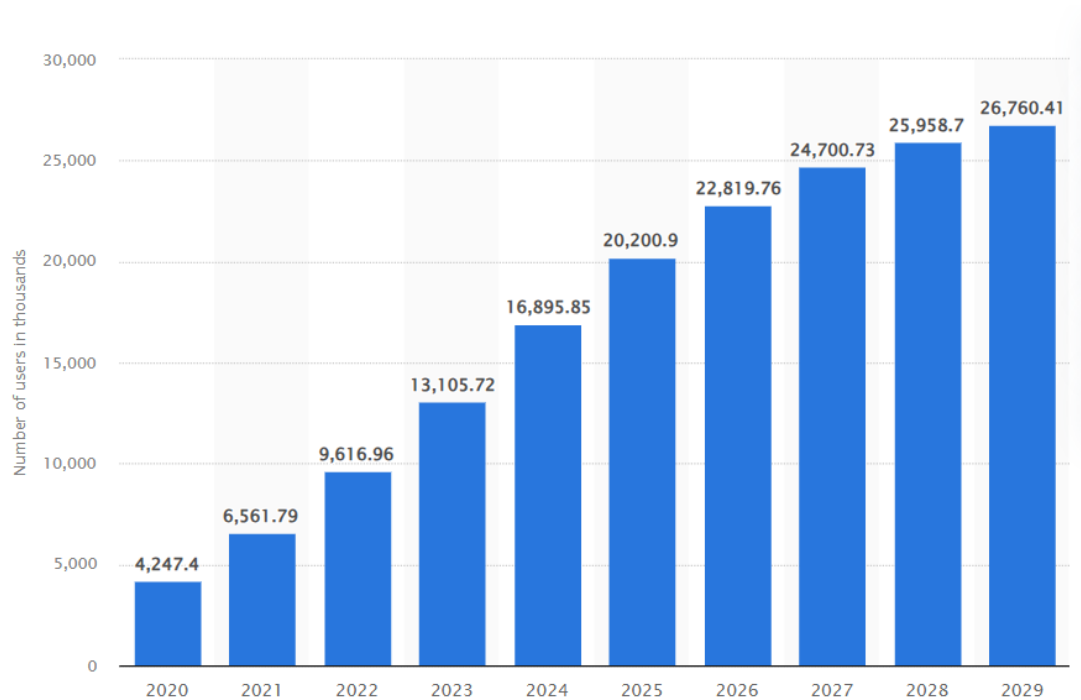
Durasi pendakian yang panjang (2–8 jam) dengan fase istirahat terbatas juga menuntut strategi *pacing* dan manajemen energi yang lebih kompleks. Roach et al. (2018) menyatakan bahwa aktivitas fisik berkepanjangan di medan menanjak meningkatkan risiko akumulasi kelelahan, sehingga diperlukan regulasi intensitas yang adaptif. Selain itu, pendakian menuntut kesadaran tubuh (*bodily awareness*) yang tinggi agar pendaki dapat menyesuaikan intensitas berdasarkan kondisi fisiologis aktual. Dalam konteks ini, smartwatch memiliki relevansi tinggi sebagai alat pemantauan real-time yang membantu pengambilan keputusan di lapangan. Hughes et al. (2023) menegaskan bahwa *wearable devices* mampu meningkatkan *self-monitoring* pada aktivitas di lingkungan ekstrem, mengurangi risiko latihan berlebih, dan mendukung keamanan pengguna.



Gambar 1. 1 Persentase Pengguna Wearable Technology Berdasarkan Gender di Indonesia 2022.

Di tengah tren tersebut, smartwatch hadir sebagai perangkat wearable yang dapat merekam data fisiologis secara real-time, seperti detak jantung, jumlah langkah, estimasi kalori terbakar, hingga zona intensitas latihan. Survei Rakuten Insight (2022) (Gambar 1.1)

menunjukkan bahwa 47% responden wanita dan 39% responden pria di Indonesia menggunakan perangkat *wearable*, dengan alasan utama memantau kesehatan dan kebugaran. Statista (2024)(Gambar 1.2) memproyeksikan jumlah pengguna *smartwatch* di Indonesia akan terus meningkat hingga 2029. Namun, dalam konteks aktivitas berat seperti hiking, pemanfaatannya belum maksimal. Sebagian besar pengguna hanya memanfaatkan fitur dasar untuk pelacakan pasif tanpa mengintegrasikan data tersebut ke dalam pengambilan keputusan aktivitas secara sadar.



Gambar 1. 2 Prediksi Pertumbuhan Pengguna *Smartwatch* di Indonesia, 2020–2029.

Henriksen et al. (2018) menemukan bahwa tingkat keterlibatan pengguna terhadap informasi dari *smartwatch* sangat bervariasi, dan lebih banyak difokuskan pada aktivitas ringan hingga sedang. Sementara pada aktivitas berintensitas tinggi, kontribusi perangkat ini masih memerlukan kajian mendalam. Navalta et al. (2018) menegaskan bahwa aktivitas seperti hiking dapat menurunkan akurasi pengukuran detak jantung dan estimasi kalori akibat gerakan tidak stabil, sedangkan Martín-Escudero et al. (2023) menunjukkan bahwa posisi perangkat,

keringat, dan getaran tubuh dapat menimbulkan artefak data yang mengganggu interpretasi fisiologis.

Kajian yang secara khusus mengaitkan tingkat kesadaran pengguna terhadap fitur pemantauan smartwatch dengan respons fisiologis dan persepsi kelelahan pada aktivitas hiking masih sangat terbatas. Padahal, teori *self-regulation* menjelaskan bahwa regulasi diri dalam aktivitas fisik terjadi melalui pemantauan umpan balik fisiologis, evaluasi kondisi tubuh, dan penyesuaian perilaku berdasarkan informasi yang diterima (Handbook of Self-Regulation, 2016). Studi Penn State (2018) dan Hughes et al. (2023) menunjukkan bahwa kesadaran terhadap data fisiologis dapat meningkatkan *bodily awareness*, yang berkontribusi pada pengaturan intensitas, pengambilan jeda, serta manajemen kelelahan. Oleh karena itu, penelitian ini tidak hanya relevan untuk mengkaji keberadaan smartwatch, tetapi juga kualitas kesadaran pengguna terhadap informasi yang disediakan perangkat tersebut sebagai faktor penentu perbedaan hasil fisiologis dan persepsional selama pendakian gunung.

1.2 Rumusan Masalah dan Pertanyaan Penelitian

Berdasarkan uraian pada latar belakang, terdapat tiga pokok persoalan yang melandasi penyusunan rumusan masalah penelitian ini. Pertama, latar belakang mengungkap bahwa meskipun smartwatch memiliki kemampuan untuk memantau data fisiologis secara real-time, tidak semua pengguna memanfaatkannya secara aktif untuk mengatur intensitas aktivitas, sehingga belum diketahui sejauh mana tingkat kesadaran pengguna terhadap fitur ini berpengaruh terhadap respons fisiologis dan persepsi kelelahan, khususnya pada aktivitas pendakian gunung. Kedua, meskipun Generasi Z menunjukkan tren partisipasi tinggi dalam aktivitas luar ruang termasuk hiking, kajian ilmiah yang membahas penggunaan smartwatch dalam konteks pendakian masih sangat terbatas, sehingga diperlukan penelitian yang mengisi celah tersebut. Ketiga, penelitian terdahulu lebih banyak fokus pada aspek teknis atau akurasi pengukuran smartwatch, tanpa mengaitkan secara terpadu pengaruh penggunaannya terhadap respons fisiologis, perilaku aktivitas, dan persepsi kelelahan pada pendaki, khususnya Generasi Z.

Berdasarkan uraian tersebut, rumusan masalah penelitian ini adalah sebagai berikut :

- a. Belum diketahui bagaimana perbedaan tingkat kesadaran pengguna terhadap fitur pemantauan fisiologis memengaruhi respons fisiologis dan persepsi kelelahan selama aktivitas hiking.

- b. Minimnya penelitian yang membahas penggunaan perangkat wearable seperti *smartwatch* dalam memonitor aktivitas hiking, terutama pada Generasi Z.
- c. Belum tergambar secara utuh bagaimana penggunaan *smartwatch* berpengaruh terhadap respons fisiologis, perilaku aktivitas, dan persepsi kelelahan pada pendaki Generasi Z.

Dari rumusan masalah tersebut, pertanyaan penelitian yang diangkat adalah:

- a. Bagaimana penggunaan *smartwatch* dalam aktivitas hiking berpengaruh terhadap respons fisiologis, perilaku aktivitas, dan persepsi kelelahan pada pendaki Generasi Z?
- b. Sejauh mana perbedaan tingkat kesadaran terhadap fitur pemantauan fisiologis pada *smartwatch* memengaruhi respons tubuh dan persepsi kelelahan selama aktivitas hiking?

1.3 Lingkup Penelitian

Penelitian ini berada dalam ruang lingkup kajian penggunaan perangkat *wearable*, khususnya *smartwatch*, dalam konteks pemantauan aktivitas fisik di lingkungan luar ruang. Fokus penelitian dibatasi pada aktivitas hiking sebagai representasi kegiatan fisik berintensitas sedang hingga tinggi yang memerlukan regulasi tubuh secara berkelanjutan. Penelitian ini tidak mencakup aktivitas olahraga lain maupun penggunaan perangkat di ruang tertutup atau laboratorium.

Batasan utama penelitian terletak pada pendekatan terhadap pengguna *smartwatch* yang dibedakan berdasarkan tingkat kesadaran mereka terhadap fitur pemantauan fisiologis. Dengan demikian, perhatian utama penelitian ini bukan hanya pada keberadaan perangkat, tetapi pada kualitas interaksi pengguna dengan data yang ditampilkan. Perbedaan ini menjadi dasar untuk menelaah bagaimana kesadaran terhadap informasi dapat memengaruhi hasil fisiologis maupun perseptual selama aktivitas berlangsung.

Smartwatch yang digunakan dalam penelitian ini adalah Huawei Watch GT 4, dengan spesifikasi minimal meliputi sensor detak jantung optik, sensor suhu kulit, akselerometer untuk mengukur percepatan gerak, serta konektivitas *Bluetooth* untuk sinkronisasi data dengan perangkat pendukung. Perangkat ini juga dilengkapi dengan sensor saturasi oksigen yang mampu melakukan perekaman data secara kontinu selama aktivitas berlangsung. Huawei Watch GT 4 dipilih karena memenuhi persyaratan teknis untuk pemantauan fisiologis di lingkungan luar ruang, termasuk ketahanan baterai hingga 14 hari pada penggunaan normal.

dan lebih dari 8 jam dalam mode perekaman penuh, sertifikasi ketahanan air 5 ATM, serta kompatibilitas dengan perangkat lunak pengolahan data yang digunakan dalam penelitian ini. Pemilihan model smartwatch dibatasi pada perangkat yang telah diuji kompatibel dengan aplikasi perekaman data penelitian, memiliki akurasi pengukuran yang memadai untuk aktivitas berintensitas sedang hingga tinggi, serta mampu menyimpan data mentah tanpa kehilangan informasi akibat gangguan konektivitas. Penelitian ini tidak mencakup evaluasi terhadap seluruh merek dan model *smartwatch* yang beredar di pasaran, melainkan hanya fokus pada Huawei Watch GT 4 yang telah terverifikasi dalam uji pendahuluan untuk aktivitas hiking.

Selanjutnya, kajian dibatasi pada sejumlah indikator terukur, yakni parameter fisiologis (detak jantung, kalori, suhu tubuh, saturasi oksigen, dan pemulihan denyut jantung), perilaku aktivitas (kecepatan, jumlah langkah, serta durasi zona detak jantung), dan persepsi kelelahan. Penelitian tidak mencakup respons psikologis, emosional, atau sosial secara mendalam, serta tidak bertujuan mengevaluasi akurasi teknis perangkat smartwatch secara absolut.

Dengan batasan tersebut, penelitian ini diarahkan untuk memberikan pemahaman tentang bagaimana penggunaan smartwatch dan tingkat kesadaran pengguna terhadap fitur pemantauan fisiologis dapat berperan dalam membentuk dinamika aktivitas dan respons tubuh selama pendakian, serta membuka peluang bagi kajian lanjut yang lebih spesifik dalam ranah pemantauan fisiologis berbasis data.

1.4 Tujuan dan Manfaat Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi pengaruh penggunaan smartwatch terhadap indikator fisiologis, perilaku aktivitas, dan persepsi kelelahan pada individu dari Generasi Z dalam konteks pendakian gunung. Di samping itu, penelitian ini juga ditujukan untuk mengeksplorasi bagaimana perbedaan tingkat kesadaran terhadap fitur pemantauan fisiologis pada smartwatch dapat memengaruhi kemampuan adaptasi tubuh selama aktivitas fisik berlangsung. Pendekatan ini diharapkan mampu memberikan pemahaman komprehensif mengenai peran smartwatch, tidak hanya sebagai perangkat pelacak data, tetapi juga sebagai media pendukung regulasi aktivitas fisik berbasis umpan balik waktu nyata yang disadari oleh penggunanya.

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat bagi dua kelompok utama. Bagi pengembang teknologi wearable, temuan ini dapat menjadi dasar pengembangan fitur dan antarmuka yang lebih responsif terhadap perilaku pengguna dalam konteks aktivitas luar ruang.

Data yang dihasilkan dari penelitian ini juga membuka peluang pemanfaatan lebih lanjut dalam pengembangan sistem berbasis data fisiologis, seperti pemodelan perilaku aktivitas atau deteksi pola kelelahan yang dapat mendukung inisiatif berbasis data sains ke depan. Sementara itu, bagi pendaki gunung, khususnya Generasi Z, penelitian ini dapat menjadi rujukan dalam menggunakan smartwatch secara lebih strategis, tidak hanya untuk pencatatan aktivitas, tetapi juga sebagai alat bantu dalam mengatur intensitas pendakian, menghindari kelelahan berlebih, dan meningkatkan kesadaran tubuh selama beraktivitas di alam terbuka.

1.5 Metodologi Penelitian Secara Umum

Penelitian ini difokuskan untuk menganalisis penggunaan *smartwatch* dalam mendukung pengelolaan aktivitas pendakian gunung pada individu dari Generasi Z. Tujuan utamanya adalah mengevaluasi sejauh mana perangkat *smartwatch* berkontribusi dalam membantu proses regulasi diri pengguna melalui tiga dimensi, yaitu fisiologis, adaptasi aktivitas, dan kesadaran persepsional. Dimensi fisiologis diukur melalui parameter objektif seperti detak jantung (*beats per minute/BPM*), kalori terbakar, suhu tubuh, saturasi oksigen (SpO_2), dan pemulihan denyut jantung (*recovery heart rate/Recovery HR*). Dimensi adaptasi aktivitas dilihat dari variabel kecepatan pendakian, jumlah langkah, serta distribusi waktu dalam zona detak jantung. Sementara itu, dimensi persepsional direpresentasikan oleh skor *Rating of Perceived Exertion* (RPE) yang menggambarkan tingkat persepsi kelelahan partisipan selama pendakian.

Instrumen utama dalam penelitian ini adalah *smartwatch* Huawei Watch GT 4, yang mampu memantau aktivitas dan data fisiologis secara *real-time*. Perangkat ini digunakan untuk merekam data fisiologis seperti BPM, kalori, suhu tubuh, SpO_2 , dan Recovery HR, sementara instrumen perseptual berupa kuesioner RPE digunakan untuk mengukur persepsi kelelahan. Validitas penggunaan *smartwatch* dalam penelitian ini didukung oleh temuan Martín-Escudero et al. (2023) yang menyatakan bahwa akurasi pengukuran detak jantung oleh *smartwatch* berada dalam rentang reliabilitas tinggi jika dibandingkan dengan standar medis seperti elektrokardiogram (ECG).

Pengumpulan data dilaksanakan di Gunung Andong, Jawa Tengah, melalui jalur pendakian Gogik, dengan melibatkan subjek penelitian yang merupakan individu Generasi Z yang memiliki ketertarikan pada aktivitas *hiking*. Penelitian menggunakan desain kuasi-eksperimen dengan pengelompokan partisipan ke dalam dua kategori berdasarkan tingkat kesadaran terhadap penggunaan fitur pemantauan fisiologis pada *smartwatch*. Kelompok Sadar

adalah kelompok yang memiliki kesadaran penggunaan fitur, yaitu partisipan yang mengetahui, memahami, dan secara aktif memantau data fisiologis yang ditampilkan *smartwatch* selama pendakian serta menggunakan informasi tersebut untuk mengatur intensitas aktivitas, strategi pacing, dan waktu istirahat. Kelompok tidak sadar adalah kelompok yang tidak memiliki kesadaran penggunaan fitur, yaitu partisipan yang tidak mengetahui, tidak memahami secara mendalam, atau tidak memantau secara aktif data fisiologis yang ditampilkan *smartwatch*, sehingga tidak menjadikannya sebagai acuan utama dalam pengambilan keputusan terkait intensitas aktivitas dan strategi pendakian. Pendefinisian kelompok ini penting untuk menguji hipotesis bahwa tingkat kesadaran terhadap data fisiologis berpengaruh terhadap perbedaan respons fisiologis, perilaku aktivitas, dan persepsi kelelahan selama pendakian.

Data direkam dalam tiga segmen jalur pendakian yang berbeda karakteristik medan dan elevasinya, yakni segmen pertama dari titik start menuju Pos 1 dengan medan curam dan kenaikan elevasi 100,6 meter, segmen kedua dari Pos 1 menuju Pos 2 dengan medan landai dan kenaikan elevasi 149,0 meter, serta segmen ketiga dari Pos 2 menuju puncak dengan medan berbatu dan kenaikan elevasi 200,7 meter. Seluruh parameter dikumpulkan secara sistematis menggunakan aplikasi Huawei Health yang terintegrasi langsung dengan *smartwatch*.

Analisis data dilakukan dengan pendekatan statistik inferensial, meliputi uji normalitas Shapiro–Wilk untuk menilai distribusi data, uji *t* independen atau Mann–Whitney *U Test* untuk membandingkan perbedaan antar kelompok, serta uji korelasi Pearson atau Spearman untuk menguji hubungan antara variabel seperti BMI dan detak jantung. Selain itu, metode *Dynamic Time Warping* (DTW) digunakan untuk menilai kesamaan pola perubahan fisiologis antar kelompok selama pendakian. Hasil penelitian kemudian disajikan secara sistematis dalam laporan ilmiah yang mencakup pendahuluan, metodologi, hasil, pembahasan, kesimpulan, serta saran untuk penelitian selanjutnya.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan adalah sebagai berikut:

BAB I. PENDAHULUAN

Bab ini menguraikan latar belakang yang mendasari penelitian, perumusan permasalahan yang akan dijawab, batasan ruang lingkup penelitian, tujuan yang ingin dicapai, manfaat yang diharapkan dari penelitian ini, serta sistematika penulisan dari laporan akhir.

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini menyajikan hasil studi literatur yang relevan dengan fondasi teoritis penelitian. Pembahasan meliputi teori-teori inti seperti Teori *Self-Regulation*, Teori Persepsi Kelelahan, dan Teori Perangkat *Wearable* dan Pemantauan Tubuh. Selain itu, bab ini juga membahas konsep Fisiologi Aktivitas serta tinjauan terhadap penelitian-penelitian sebelumnya yang berkaitan dengan penggunaan *smartwatch* dalam pemantauan fisiologis dan analisis data *wearable*.

BAB III. METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini menjelaskan secara rinci metode atau tahapan-tahapan yang digunakan dalam penelitian. Dimulai dengan desain penelitian *quasi-eksperimental* dengan pendekatan *between-subjects*, dilanjutkan dengan prosedur pengumpulan data pada partisipan pendaki gunung Generasi Z, variabel-variabel yang diukur (respons fisiologis, perilaku aktivitas, dan persepsi kelelahan), serta instrumen yang digunakan. Bab ini juga memaparkan teknik analisis data yang diterapkan, termasuk pengujian normalitas dan metode *Dynamic Time Warping (DTW)* untuk analisis deret waktu, serta informasi mengenai lokasi penelitian dan pertimbangan etis.

BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan temuan-temuan kunci dari penelitian, dilengkapi dengan analisis dan interpretasi mendalam. Pembahasan mencakup pengaruh penggunaan *smartwatch* terhadap respons fisiologis, perilaku aktivitas, dan persepsi kelelahan pada pendaki Generasi Z, serta dampak tingkat kesadaran pengguna terhadap adaptasi tubuh dan persepsi kelelahan. Bab ini juga menganalisis korelasi antar variabel penting dan menyajikan konfirmasi terhadap metodologi penelitian yang telah diterapkan.

BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisi kesimpulan esensial yang ditarik dari hasil penelitian secara keseluruhan, menjawab pertanyaan-pertanyaan penelitian yang telah dirumuskan. Selain itu, bab ini juga memuat saran-saran yang relevan untuk pengguna *smartwatch*, pengembang/produsen *smartwatch* (termasuk saran untuk fitur deteksi hipotermia), dan arah penelitian selanjutnya, serta mengidentifikasi limitasi-limitasi yang dihadapi selama pelaksanaan penelitian ini.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teoritis

Landasan teoretis dalam penelitian ini disusun untuk menjelaskan mekanisme konseptual antara penggunaan *smartwatch* dan respons fisiologis maupun perilaku adaptif pengguna selama aktivitas pendakian. Sebagai studi kuasi-eksperimen, kerangka teori berperan tidak hanya dalam pemilihan variabel dan rancangan metode, tetapi juga dalam menafsirkan hubungan kausalitas maupun kontribusi non-kausal antarvariabel yang diamati.

Sebagai kerangka umum, penelitian ini mengadopsi teori self-regulation dari *Handbook of Self-Regulation Third Edition: Research, Theory, and Applications (2016)*. Teori ini menekankan bahwa manusia secara aktif mengatur perilaku melalui proses pemantauan, evaluasi, dan respon terhadap umpan balik internal dan eksternal. Dalam konteks penggunaan *smartwatch*, perangkat ini diposisikan sebagai penyedia umpan balik fisiologis eksternal, yang kemudian mendorong peningkatan kesadaran tubuh (*bodily awareness*) serta memfasilitasi penyesuaian perilaku secara real-time. Dengan demikian, *smartwatch* berfungsi bukan hanya sebagai alat pengukur pasif, melainkan sebagai agen yang memediasi proses adaptasi diri terhadap tuntutan aktivitas fisik.

Berangkat dari pemahaman tersebut, teori fisiologi aktivitas digunakan sebagai dasar dalam menjelaskan variabel-variabel fisiologis utama dalam penelitian ini. Detak jantung (BPM) mencerminkan tingkat kerja jantung sebagai respons terhadap kebutuhan metabolik; kalori terbakar menunjukkan total energi yang dikeluarkan tubuh; suhu tubuh berkaitan dengan mekanisme termoregulasi; sementara saturasi oksigen (SpO₂) mengindikasikan efisiensi suplai oksigen dalam jaringan. Latihan fisik yang dilakukan secara intensif dan terstruktur dapat meningkatkan efisiensi fungsi kardiovaskular dan metabolik, sebagaimana dijelaskan dalam studi oleh Santoso (2019), Mahmud (2018), dan Sipayung (2020). Oleh karena itu, pemilihan variabel-variabel ini tidak hanya mencerminkan kondisi fisiologis, tetapi juga dimaksudkan untuk mengukur sejauh mana aktivitas adaptif terjadi selama pendakian.

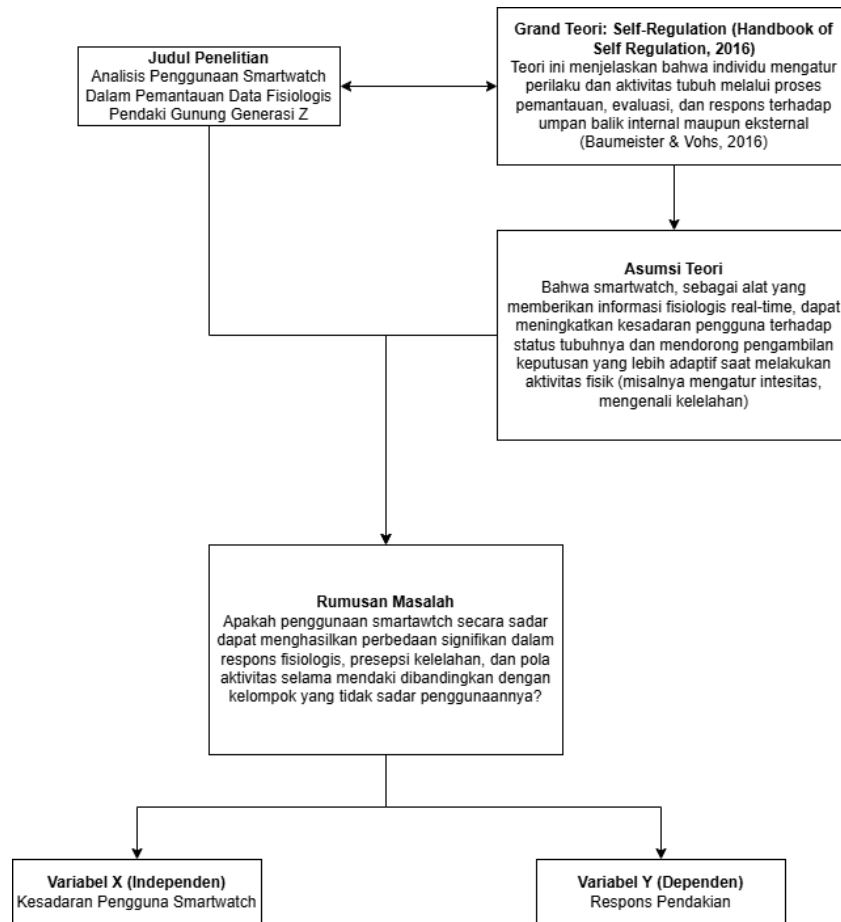
Selain parameter objektif, aspek subjektif seperti persepsi kelelahan (RPE) juga menjadi bagian penting dalam penelitian ini. Teori persepsi kelelahan menyatakan bahwa kelelahan tidak semata ditentukan oleh kondisi fisiologis, melainkan merupakan hasil dari integrasi antara sinyal tubuh dan penilaian kognitif individu. Model multidimensional fatigue menjelaskan bahwa faktor psikologis seperti motivasi, ekspektasi, dan fokus perhatian turut

memengaruhi pengalaman kelelahan. Van Cutsem et al. (2018) menegaskan bahwa kelelahan mental dapat memperbesar persepsi usaha meskipun indikator fisiologis tetap stabil, sehingga penggunaan *smartwatch* berpotensi memodulasi persepsi kelelahan melalui peningkatan kesadaran terhadap sinyal tubuh.

Selanjutnya, keberadaan *smartwatch* sebagai wearable device perlu dijelaskan melalui kerangka teori pemantauan tubuh. *Smartwatch* modern tidak hanya mengumpulkan data, tetapi juga memberikan notifikasi dan visualisasi data secara real-time, yang mendorong terjadinya refleksi mandiri terhadap kondisi tubuh. Studi oleh Penn State (2018) menyatakan bahwa efek regulatif *smartwatch* lebih tinggi ketika data fisiologis diolah secara aktif oleh pengguna, bukan sekadar diterima secara pasif. Hughes et al. (2023) juga mencatat bahwa individu yang aktif merespon informasi dari *smartwatch* menunjukkan kesadaran kardiovaskular lebih tinggi dan perubahan gaya hidup yang lebih adaptif. Ini memperkuat bahwa *smartwatch* dapat berfungsi sebagai stimulus perilaku sehat melalui peningkatan respons adaptif terhadap informasi tubuh.

Sebagai tambahan, variabel komposisi tubuh dalam penelitian ini dijelaskan melalui teori mengenai pengaruh Body Mass Index (BMI) terhadap performa fisik. BMI sering dikaitkan dengan kapasitas kerja kardiovaskular dan efisiensi metabolik. Studi oleh Health (2018) menyebutkan bahwa individu dengan BMI tinggi memiliki risiko hipertensi dan gangguan vaskular, yang berdampak pada kemampuan aktivitas berat. Prasetya et al. (2022) juga mencatat bahwa kelompok dengan BMI tinggi cenderung mengalami peningkatan detak jantung istirahat dan toleransi aktivitas yang lebih rendah. Maka, pembagian subjek berdasarkan kategori BMI dalam penelitian ini berfungsi untuk mengidentifikasi bagaimana komposisi tubuh memengaruhi respons fisiologis terhadap aktivitas, serta menguji penggunaan *smartwatch* pada kelompok dengan karakteristik metabolik yang berbeda.

Hubungan antara teori-teori yang dijadikan dasar penelitian serta arah logika berpikir penelitian ini divisualisasikan dalam Gambar 2.1 sebagai kerangka berpikir.



Gambar 2. 1 Kerangka Pemikiran Penelitian

2.2 Analisis Komparatif Metodologi dan Teknik Analisis

Berdasarkan temuan dari penelitian yang telah dilakukan, peneliti terdorong untuk melanjutkan kajian ini dengan menguji metodologi dan desain penelitian yang diterapkan dalam berbagai studi terkait. Peneliti mengidentifikasi kesamaan dalam alat yang diuji, yaitu perangkat *wearable*, sebagai dasar untuk mengkategorikan metode dan desain penelitian. *Smartwatch*, sebagai salah satu jenis perangkat *wearable*, termasuk dalam kategori ini, sehingga metodologi dan desain yang digunakan dalam riset sebelumnya dapat dibandingkan dan dijadikan referensi. Beberapa kajian yang telah dilakukan akan dikategorikan berdasarkan performa metodologi yang diterapkan, sebagaimana diuraikan pada Tabel 2.1.

Tabel 2. 1 Metode yang digunakan pada penelitian yang relevan

Metodologi	Kelebihan	Kekurangan
Eksperimen dengan satu kelompok. [15], [1]	Menghemat sumber daya dan waktu karena hanya melibatkan satu kelompok, cocok untuk studi eksplorasi.	Tidak memungkinkan perbandingan antar kelompok, sehingga sulit untuk membuat kesimpulan kausal yang kuat.
Eksperimen dengan dua Kelompok. [12] [9] [4]	Memungkinkan perbandingan langsung antara dua kelompok, sehingga memberikan hasil yang lebih jelas.	Membutuhkan lebih banyak peserta dan kontrol ketat terhadap variabel luar untuk menghindari bias.
Eksperimen dengan beberapa Kelompok[5] [26] [29]	Memberikan gambaran yang lebih komprehensif dengan melibatkan berbagai kondisi atau perlakuan.	Desain eksperimen lebih kompleks, membutuhkan lebih banyak sumber daya dan analisis data yang lebih rumit.

Berdasarkan kajian literatur dan temuan dari penelitian yang telah ada, pendekatan metodologi yang paling relevan untuk penelitian ini adalah eksperimen dengan dua kelompok, yang memungkinkan pengujian hubungan kausal antara penggunaan teknologi wearable dan respons fisiologis manusia. Dalam penelitian ini, desain eksperimen dengan dua kelompok dipilih untuk memastikan validitas hasil dengan membandingkan kelompok yang menggunakan fitur *smartwatch* secara optimal dengan kelompok yang tidak menggunakan fitur tersebut. Selain itu, peneliti melakukan klasifikasi terhadap desain penelitian yang telah dilakukan, yang menghasilkan empat jenis desain sebagaimana disajikan dalam Tabel 2.2.

Berdasarkan hasil analisis tabel kategorisasi performa desain, metode *between-subjects design* dipilih sebagai pendekatan utama dalam penelitian ini karena kemampuannya dalam membandingkan efek perlakuan antar kelompok secara objektif. Pendekatan ini relevan untuk mengevaluasi penggunaan *smartwatch* dalam memantau aktivitas fisik pendakian gunung Generasi Z, dengan meminimalkan efek pembelajaran antar kondisi sehingga hasil penelitian mencerminkan respons nyata terhadap perlakuan. Selain itu, metode ini telah terbukti efektif dalam kajian serupa, seperti validasi perangkat wearable dalam konteks aktivitas outdoor, serta mendukung generalisasi temuan kepada populasi yang lebih luas. Pemilihan teknik analisis yang tepat juga menjadi aspek penting dalam menilai penggunaan *smartwatch* sebagai instrumen pemantauan fisiologis selama pendakian. Teknik analisis dikategorikan berdasarkan pendekatan yang digunakan dalam penelitian lain yang melibatkan perangkat wearable, dengan mempertimbangkan kompleksitas metode, ketepatan dalam interpretasi data fisiologis, serta relevansinya terhadap tujuan penelitian. Perbandingan teknik analisis dari berbagai kajian yang telah dilakukan disajikan dalam Tabel 2.3 sebagai dasar dalam menentukan pendekatan yang paling sesuai untuk penelitian ini.

Tabel 2. 2 Kategorisasi Desain Penelitian

Desain Penelitian	Deskripsi	Kelebihan	Kekurangan
Between-Subject Design	Analisis efektivitas <i>smartwatch</i> latihan aerobik dan anaerboik. [9] [12]	Cocok untuk eksperimen dengan hasil yang mudah diamati antar kelompok.	Membutuhkan jumlah peserta yang besar untuk validitas statistik.
	Validasi wearable untuk bersepeda dan latihan resistensi. [4]	Menghindari carry-over effect antar kondisi.	Rentan terhadap perbedaan karakteristik antar kelompok jika tidak dikontrol.
		Dapat digunakan untuk populasi besar untuk validitas eksternal yang lebih tinggi.	
Within-Subject Design	Validasi akurasi data wearable untuk hiking dan trail running. [15]	Mengurangi variabilitas individu, meningkatkan sensitivitas hasil.	Risiko learning effect dan kelelahan dapat memengaruhi hasil.
	Validasi akurasi Stryd Power Meter dalam mengukur daya dan kekakuan kaki. [11]	Membutuhkan lebih sedikit peserta.	Waktu dan upaya tambahan diperlukan untuk menyeimbangkan kondisi antar sesi.
		Efektif untuk eksperimen dengan hasil yang bergantung pada perubahan individu.	Membutuhkan desain penjadwalan yang ketat untuk menghindari bias.
Single-Subject Research	Analisis efektivitas <i>smartwatch</i> aktivitas individu obesitas. [23]	Data yang sangat mendalam dan fokus pada individu tertentu.	Tidak dapat digeneralisasi ke populasi yang lebih besar.
	Optimasi pengenalan aktivitas fisik dengan <i>smartwatch</i> menggunakan validasi subjek tunggal. [1]	Cocok untuk studi awal sebelum diterapkan pada populasi luas.	Rentan terhadap bias individu.
		Mengungkap dinamika perubahan pada tingkat individu yang sering tidak terlihat dalam studi kelompok.	Tidak cocok untuk studi yang membutuhkan hasil populasi.
Mixed Design	Validasi akurasi wearable pada perenang. [5]	Memanfaatkan keunggulan dari kedua desain untuk hasil yang lebih lengkap.	Kompleksitas tinggi dalam pengaturan eksperimen dan analisis data.
	Analisis pengaruh <i>smartwatch</i> berbasis IoT dalam memantau aktivitas fisik, tingkat kebugaran, dan kesehatan pengguna. [26]	Cocok untuk studi kompleks dengan banyak variabel.	Membutuhkan lebih banyak sumber daya, waktu, dan tenaga ahli.
		Memberikan wawasan holistik dari respons individu dan kelompok.	Interpretasi data lebih menantang karena kombinasi metode.

Tabel 2. 3 Kategorisasi Teknik Analisis

Desain Penelitian	Deskripsi	Kelebihan	Kekurangan
Dynamic Time Warping (DTW)	Analisis deteksi aktivitas fisik, termasuk olahraga ringan dan gerakan tangan di ruang bebas, dilakukan berdasarkan data fisiologis yang diperoleh dari <i>smartwatch</i> . [17] [7]	Mampu menangani perbedaan kecepatan dan durasi dalam data time-series.	Memiliki kompleksitas komputasi yang tinggi, sehingga memerlukan sumber daya besar.
	Analisis deteksi dini Alzheimer dengan analisis pola berjalan dari wearable. [29]	Akurat dalam menyelaraskan dua data time-series yang tidak sinkron secara waktu.	Sensitif terhadap gangguan atau fluktuasi sinyal (noise), yang dapat mempengaruhi akurasi analisis.
		Dapat diterapkan pada berbagai jenis data, termasuk pengenalan pola, biometrik, dan analisis sinyal fisiologis	Memerlukan tahap pra-pemrosesan data untuk meningkatkan kualitas sinyal sebelum analisis.
Euclidean Distance (ED)	Verifikasi biometrik berbasis ECG pada perangkat wearable dilakukan melalui analisis jarak sinyal PPG yang telah diselaraskan untuk meningkatkan akurasi identifikasi. [3] [14]	Metode yang cepat dan efisien dalam perhitungan.	Kurang fleksibel dalam membandingkan data dengan durasi yang bervariasi.
		Memiliki konsep yang sederhana serta mudah diimplementasikan.	Tidak dapat menyesuaikan perbedaan temporal dalam dua data yang tidak sejajar.
		Cocok untuk data dengan panjang dan kecepatan yang seragam	Rentan terhadap gangguan (noise), yang dapat menyebabkan perubahan signifikan dalam hasil perhitungan.
Cross-Correlation (CC)	Validasi keterkaitan temporal antar parameter fisiologis perangkat wearable melalui analisis cross-correlation guna meningkatkan keakuratan dan reliabilitas pemantauan data fisiologis. [21] [28]	Efektif dalam mengidentifikasi hubungan temporal antara dua sinyal.	Tidak optimal untuk membandingkan data dengan perbedaan durasi yang signifikan.
	Evaluasi data wearable untuk pemantauan penyakit Parkinson. [19]	Ideal untuk analisis data yang memiliki pola dan durasi yang sejajar.	Sangat dipengaruhi oleh gangguan sinyal (noise), yang dapat mengurangi keakuratan korelasi.
		Berguna dalam penyelarasan sinyal sebelum analisis lebih lanjut.	Terbatas dalam mendeteksi pola kompleks dalam data time-series.

Pemilihan metode *Dynamic Time Warping* (DTW) dalam penelitian ini didasarkan pada karakteristik data fisiologis yang dihasilkan oleh *smartwatch* selama aktivitas pendakian, yang berbentuk *time-series* dengan potensi perbedaan durasi, kecepatan, dan sinkronisasi antar subjek. Berbeda dengan metode jarak sederhana seperti Euclidean Distance (ED) yang mengasumsikan keselarasan temporal penuh antar titik data, DTW memiliki kemampuan untuk melakukan *elastic shifting* pada sumbu waktu sehingga dua pola yang secara temporal tidak sejajar tetap dapat dibandingkan secara akurat. Kemampuan ini penting dalam konteks pendakian gunung, di mana variasi kecepatan langkah, intensitas aktivitas, dan respons fisiologis dapat berbeda signifikan antar individu, meskipun mereka menempuh rute yang sama.

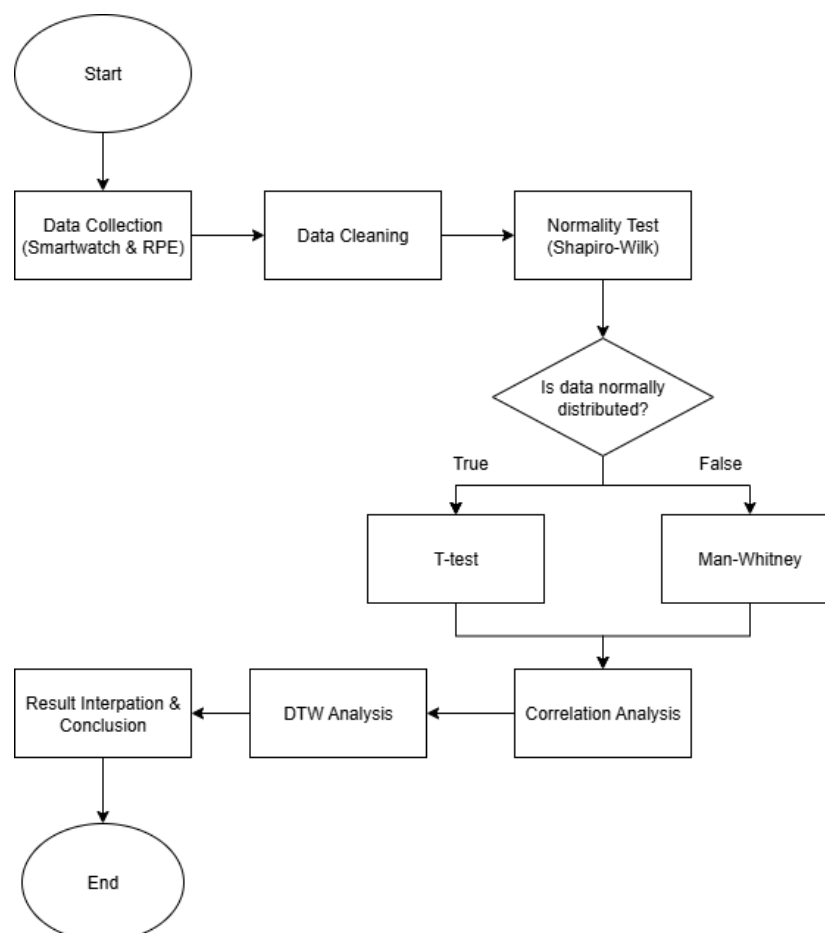
Jika dibandingkan dengan Cross-Correlation (CC), DTW menawarkan keunggulan dalam mendeteksi kesamaan pola meskipun terdapat perbedaan panjang data atau variasi ritme aktivitas. CC efektif dalam mengidentifikasi keterkaitan temporal ketika kedua sinyal memiliki durasi yang setara dan perubahan fase yang konsisten, namun kurang optimal ketika pola aktivitas berlangsung dalam tempo yang berbeda atau mengandung segmen aktivitas yang tidak seragam. Sementara itu, DTW mampu “meregangkan” atau “memampatkan” segmen waktu tertentu untuk menemukan *alignment* optimal antar sinyal, sehingga lebih representatif dalam memodelkan variasi alami pada data fisiologis manusia.

Selain itu, DTW memiliki rekam jejak yang kuat dalam berbagai penelitian analisis sinyal fisiologis berbasis *wearable*, seperti deteksi pola berjalan, analisis olahraga, dan pengenalan biometrik berbasis sinyal kardiovaskular. Fleksibilitas ini menjadikan DTW relevan untuk memetakan kesamaan pola denyut jantung antar individu selama pendakian, meskipun terjadi variasi intensitas, jeda istirahat, atau perubahan strategi *pacing*. Meskipun memiliki kompleksitas komputasi lebih tinggi dibandingkan ED dan CC, keunggulan DTW dalam menangani data *time-series* yang bervariasi secara temporal memberikan justifikasi akademis yang kuat atas pemilihannya. Dengan demikian, DTW dinilai sebagai metode yang paling sesuai untuk tujuan penelitian ini, yaitu mengidentifikasi kesamaan dan perbedaan pola fisiologis antar subjek secara komprehensif, tanpa kehilangan detail penting akibat perbedaan durasi atau kecepatan aktivitas.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini menjelaskan metodologi penelitian yang bertujuan menganalisis penggunaan *smartwatch* dalam aktivitas pendakian oleh Generasi Z berdasarkan tiga dimensi utama: fisiologis, adaptasi aktivitas, dan kesadaran persepsional. Metode yang digunakan adalah kuasi-eksperimen dengan desain between-subjects, di mana subjek dibagi ke dalam kelompok sadar dan tidak sadar penggunaan *smartwatch*. Purposive sampling dalam pemilihan subjek bertujuan mencegah efek residual dan menjaga validitas internal penelitian. Variabel Indeks Massa Tubuh (BMI) digunakan sebagai variabel kontrol untuk memetakan perbedaan kapasitas fisiologis antarindividu. Penelitian ini mengintegrasikan pendekatan pengukuran fisiologis dan persepsional melalui pemanfaatan teknologi wearable serta instrumen survei. Gambar 3.1 menyajikan alur logis tahapan penelitian mulai dari pengumpulan hingga interpretasi data.



Gambar 3. 1 Diagram Alur Teknik Analisis

3.1 Struktur Eksperimen: Subjek, Variabel, dan Hipotesis Penelitian

Perumusan desain eksperimental dalam penelitian ini mempertimbangkan aspek populasi target, karakteristik variabel yang dianalisis, serta hipotesis yang diturunkan dari kerangka teoretis dan pemikiran konseptual. Seluruh unsur tersebut disusun untuk memastikan bahwa hubungan antara penggunaan smartwatch dan respons fisiologis maupun persepsional dapat diuji secara objektif dan relevan dalam konteks aktivitas pendakian gunung. Dalam perancangannya, struktur eksperimen ini juga memperhitungkan keterbatasan kontrol lingkungan alami di lapangan, sehingga pemilihan indikator dan variabel diuji atas dasar validitas teoritis dan kesesuaiannya dengan dinamika adaptasi tubuh dalam aktivitas ketahanan.

3.1.1 Populasi Penelitian

Populasi dalam penelitian ini mencakup individu dari Generasi Z, yaitu kelompok usia yang lahir antara tahun 1997 hingga 2012 sebagaimana diklasifikasikan oleh Badan Pusat Statistik (BPS). Dengan demikian, pada tahun pelaksanaan penelitian (2025), rentang usia partisipan berada antara 18 hingga 26 tahun sesuai kriteria inklusi yang ditetapkan. Teknik *purposive sampling* digunakan untuk pemilihan partisipan, yaitu metode penarikan sampel berdasarkan pertimbangan tertentu agar individu yang terlibat memenuhi karakteristik yang relevan dengan tujuan penelitian (Sugiyono, 2022). Salah satu pertimbangan utama adalah memilih subjek dengan pengalaman pendakian terbatas untuk meminimalkan potensi bias akibat adaptasi fisiologis yang terbentuk dari latihan intensif jangka panjang. Hal ini didukung oleh temuan Santoso (2019) yang menunjukkan bahwa individu dengan riwayat latihan intensif cenderung mengalami bradikardia fisiologis dan respons tekanan darah yang lebih adaptif terhadap beban fisik, sehingga kurang representatif untuk menggambarkan respons alami kelompok awam.

Penelitian ini melibatkan delapan (8) partisipan yang dibagi secara seimbang ke dalam dua kondisi perlakuan *between-subject*, yaitu kelompok sadar terhadap fitur pemantauan fisiologis smartwatch ($n=4$) dan kelompok tidak sadar ($n=4$). Pengelompokan ini merepresentasikan perlakuan terhadap variabel independen dan mengacu pada teori *self-regulation*, di mana individu yang secara sadar menerima umpan balik fisiologis dari perangkat lebih mungkin menunjukkan adaptasi perilaku dibandingkan individu yang tidak memperoleh informasi tersebut secara aktif. Ukuran sampel ini dipilih secara sengaja untuk tujuan studi lapangan eksploratori dengan kontrol variabel ketat, sebagaimana direkomendasikan dalam

literatur bahwa studi *pilot* dan *feasibility* di bidang fisiologi olahraga dapat melibatkan 6–12 partisipan, khususnya ketika setiap subjek memberikan data berulang dalam jumlah besar (Hecksteden et al., 2018; Lancaster et al., 2019; Tosi et al., 2019; Townsend et al., 2018).

Sebagai bentuk kontrol terhadap variasi biologis antarindividu, Body Mass Index (BMI) dijadikan variabel latar dan pengontrol. Klasifikasi BMI yang digunakan mengacu pada standar WHO Asia, yaitu <18,5 (berat kurang), 18,5–22,9 (ideal), 23,0–24,9 (berat berlebih), dan $\geq 25,0$ (obes). Setiap kelompok (sadar dan tidak sadar) diupayakan berisi satu subjek dari masing-masing strata BMI, sehingga total terdapat delapan subjek dengan distribusi yang seimbang. Pemilihan BMI sebagai dasar stratifikasi didasarkan pada implikasinya terhadap kapasitas metabolik, efisiensi kardiovaskular, dan toleransi beban fisik. Selain itu, bila memungkinkan, rentang usia dibuat serupa untuk meminimalkan pengaruh kovariat yang tidak diinginkan.

Kriteria inklusi meliputi: (1) usia termasuk kategori Generasi Z (18–26 tahun pada saat penelitian); (2) laki-laki atau perempuan; (3) tidak memiliki riwayat penyakit jantung, pernapasan, atau gangguan metabolik yang membahayakan aktivitas fisik berintensitas sedang–tinggi; (4) tidak mengonsumsi nikotin minimal 12 jam sebelum pengambilan data dan tidur minimal 6 jam pada malam sebelumnya; (5) memiliki pengalaman mendaki minimal satu kali; dan (6) memiliki BMI yang terukur untuk keperluan stratifikasi antar-kelompok.

Kriteria eksklusi meliputi: keluhan atau cedera muskuloskeletal yang mengganggu mobilitas; kondisi akut seperti demam atau infeksi saluran pernapasan pada hari pengambilan data; pusing berat saat pemanasan; serta ketidaksediaan menandatangani formulir *informed consent*. Detil dijelaskan pada Tabel 3.1.

Tabel 3. 1 Kriteria Subjek Penelitian

No	Kriteria Inklusi	Kriteria Eksklusi
1	Laki laki usia 18–26 tahun (Generasi Z)	Cedera muskuloskeletal yang mengganggu mobilitas
2	Tidak memiliki riwayat penyakit jantung/pernapasan/metabolik	Kondisi akut pada hari pengambilan data
3	Tidak mengonsumsi nikotin ≥ 12 jam sebelum tes	Tidak bersedia menandatangani <i>informed consent</i>
4	Tidur minimal 6 jam sebelum tes	
5	Pengalaman mendaki ≤ 1 kali	
6	BMI terukur (stratifikasi WHO Asia)	

3.1.2 Variabel Penelitian

Kerangka konseptual penelitian ini dibangun untuk menjelaskan hubungan antara penggunaan smartwatch dan respons fisiologis serta persepsional selama aktivitas pendakian. Variabel penelitian diklasifikasikan menjadi tiga kelompok berdasarkan fungsinya dalam struktur eksperimen, yaitu variabel independen, dependen, dan kontrol.

Variabel independen (X), mengacu pada definisi Wiratna Sujarweni (2022), merupakan variabel yang mempengaruhi atau menjadi penyebab perubahan variabel dependen. Dalam penelitian ini, variabel independen adalah keberadaan smartwatch dalam dua kondisi perlakuan, yaitu kelompok sadar dan tidak sadar terhadap fitur pemantauan fisiologis. Perbedaan tingkat kesadaran ini diasumsikan memengaruhi cara subjek mengelola intensitas aktivitas dan respons tubuh selama pendakian. Selain itu, faktor perjalanan seperti ketinggian, durasi, kecepatan, dan jumlah langkah turut dipertimbangkan sebagai aspek lingkungan yang berpotensi memengaruhi beban fisiologis secara alami.

Variabel dependen (Y), yang menurut Wiratna Sujarweni (2022) merupakan variabel yang dipengaruhi oleh variabel bebas, dalam penelitian ini merepresentasikan perubahan fisiologis dan persepsional sebagai dampak dari penggunaan smartwatch selama pendakian. Penentuan variabel dependen didasarkan pada studi literatur dan pedoman *American College of Sports Medicine* (ACSM, 2021), yang merekomendasikan pengukuran parameter fisiologis utama dalam aktivitas fisik berintensitas sedang hingga tinggi. Variabel fisiologis yang diamati mencakup detak jantung (*heart rate*, BPM) sebagai indikator primer respon kardiovaskular (Thompson et al., 2020), suhu kulit sebagai proksi suhu tubuh untuk menilai termoregulasi (Bongers et al., 2020), *saturasi oksigen* (SpO_2) untuk mengukur kapasitas transport oksigen terutama pada perubahan ketinggian (Burtscher et al., 2018), serta *recovery heart rate* 60 detik sebagai indikator kapasitas pemulihan kardiovaskular (Peçanha et al., 2017). Selain itu, kalori terbakar digunakan sebagai estimasi pengeluaran energi, dan durasi aktivitas pada berbagai zona detak jantung (ekstrem, anaerobik, aerobik, *fat burn*, dan *warm-up*) digunakan untuk menilai distribusi intensitas beban kerja. Variabel persepsional berupa *Rating of Perceived Exertion* (RPE) dimasukkan untuk menangkap persepsi subjektif kelelahan secara real-time, yang terbukti memiliki korelasi kuat dengan variabel fisiologis pada aktivitas intensitas tinggi (Haddad et al., 2017).

Variabel kontrol digunakan untuk menjaga validitas hubungan antara variabel independen dan dependen, serta meminimalkan bias dari faktor eksternal. Variabel yang dikendalikan meliputi karakteristik subjek (pengalaman mendaki, BMI, jenis kelamin),

penggunaan jalur pendakian yang sama, waktu pengambilan data yang konsisten, serta penggunaan jenis smartwatch yang sama (Huawei Watch GT 4) dengan konfigurasi sensor dan mode perekaman identik. Pengendalian variabel-variabel ini bertujuan memastikan bahwa variasi data yang diamati benar-benar disebabkan oleh perbedaan perlakuan (kesadaran terhadap penggunaan smartwatch) dan kondisi fisiologis yang alami selama pendakian.

Dengan pemilihan variabel yang berbasis pada pedoman ilmiah (*ACSM Guidelines*) dan penelitian terdahulu, penelitian ini diharapkan mampu memberikan gambaran komprehensif tentang pengaruh tingkat kesadaran penggunaan smartwatch terhadap respon fisiologis, perilaku aktivitas, dan persepsi kelelahan selama pendakian gunung.

3.1.3 Hipotesis Penelitian

Hipotesis dalam penelitian ini dirumuskan berdasarkan integrasi dari teori regulasi diri, teori fisiologi aktivitas, serta kerangka pemikiran konseptual yang telah dijabarkan sebelumnya pada Bab 2. Asumsi dasarnya adalah bahwa keberadaan informasi fisiologis secara real-time melalui *smartwatch* dapat memediasi respons pengguna terhadap aktivitas fisik, baik secara objektif (fisiologis dan performatif) maupun subjektif (persepsional). Berdasarkan kerangka tersebut, hipotesis penelitian disusun dalam bentuk hipotesis mayor dan minor, dengan masing-masing pasangan hipotesis nol (H_0) dan alternatif (H_1) sebagai berikut:

Hipotesis Mayor :

- H_0 : Tidak terdapat perbedaan yang signifikan antara kelompok sadar dan tidak sadar penggunaan *smartwatch* terhadap fisiologis, adaptasi aktivitas, dan kesadaran persepsional selama aktivitas hiking.
- H_1 : Terdapat perbedaan yang signifikan antara kelompok sadar dan tidak sadar penggunaan *smartwatch* terhadap fisiologis, adaptasi aktivitas, dan kesadaran persepsional selama aktivitas hiking.

Hipotesis Minor :

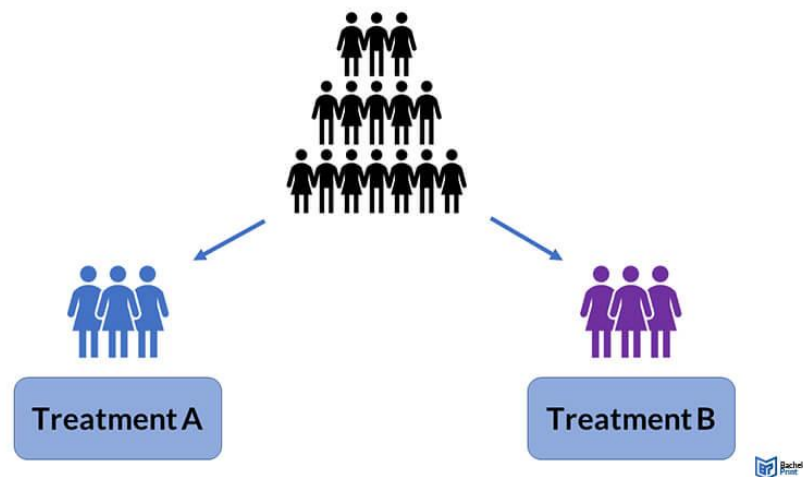
- H_{0a} : Penggunaan *smartwatch* tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap parameter fisiologis (BPM, kalori terbakar, suhu tubuh, SpO_2 , Recovery HR).
- H_{1a} : Penggunaan *smartwatch* memberikan pengaruh signifikan terhadap parameter fisiologis (BPM, kalori terbakar, suhu tubuh, SpO_2 , Recovery HR).
- H_{0b} : Penggunaan *smartwatch* tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap parameter aktivitas (kecepatan, jumlah langkah, dan durasi zona HR).

- H_{1b}: Penggunaan *smartwatch* memberikan pengaruh signifikan terhadap parameter aktivitas (kecepatan, jumlah langkah, dan durasi zona HR).
- H_{0c}: Penggunaan *smartwatch* tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap persepsi kelelahan (RPE).
- H_{1c}: Penggunaan *smartwatch* memberikan pengaruh signifikan terhadap persepsi kelelahan (RPE).

3.2 Pengumpulan Data

Pengumpulan data dalam penelitian ini dilakukan melalui pendekatan kuasi-eksperimen. Menurut Sugiyono (2019), kuasi-eksperimen merupakan pengembangan dari *true experimental design* yang tetap melibatkan kelompok eksperimen dan kelompok kontrol, namun tidak menempatkan subjek secara acak. Pendekatan ini diimplementasikan pada lingkungan alam terbuka untuk menangkap variasi respons fisiologis, persepsional, dan perilaku aktivitas pendaki Generasi Z secara naturalistik. Lokasi penelitian berada di Gunung Andong, jalur pendakian via Gogik, dengan elevasi puncak mencapai 1.726 meter di atas permukaan laut (mdpl). Metode ini memungkinkan akuisisi data kuantitatif yang dapat mendukung pengujian *smartwatch* sebagai alat pemantauan aktivitas fisik dalam konteks pendakian.

Desain penelitian menggunakan *between-subjects design* (Bridge & Toms, 2013) (Gambar 3.2), di mana setiap subjek hanya menerima satu kondisi perlakuan sehingga respons yang diamati mencerminkan efek murni dari perlakuan tersebut tanpa terpengaruh kondisi lainnya. Sebanyak delapan partisipan dilibatkan dan dibagi seimbang ke dalam dua kelompok, yaitu kelompok sadar dan kelompok tidak sadar terhadap fitur pemantauan fisiologis pada *smartwatch*. Pembagian kelompok mempertimbangkan representasi kategori indeks massa tubuh berbeda, dengan kriteria inklusi: tidak memiliki riwayat penyakit jantung atau pernapasan, tidak mengonsumsi nikotin, dan tidak mengalami kurang tidur pada malam sebelum pendakian.



Gambar 3. 2 Between-Subjects-Design

Kelompok sadar diberikan penjelasan menyeluruh mengenai fitur smartwatch yang digunakan, meliputi pemberitahuan detak jantung, zona intensitas latihan, saturasi oksigen (SpO_2), notifikasi suara dan getaran, serta instruksi cara merespons sinyal yang diberikan perangkat. Sebaliknya, pada kelompok tidak sadar, semua fitur notifikasi dimatikan, layar perangkat ditutupi pita hitam, dan tidak ada penjelasan mengenai fungsi pemantauan, sehingga subjek tidak menerima umpan balik visual, suara, maupun getaran selama aktivitas berlangsung.

Instrumen utama yang digunakan adalah *smartwatch* Huawei Watch GT 4 yang dipasang pada pergelangan tangan non-dominan sesuai panduan pabrik agar sensor optik memiliki kontak optimal dengan kulit. Perangkat ini dilengkapi sensor detak jantung optik, sensor suhu kulit, akselerometer, dan sensor SpO_2 , serta memiliki ketahanan baterai hingga 14 hari pada penggunaan normal atau lebih dari 8 jam dalam mode perekaman penuh. Mode perekaman olahraga “Hiking” diaktifkan dengan pengaturan bawaan pabrik, dan baterai perangkat dipastikan 100% sebelum digunakan. Data direkam otomatis melalui aplikasi Huawei Health dengan interval pencatatan lima detik untuk variabel detak jantung, kalori, suhu kulit, saturasi oksigen, *recovery heart rate*, serta zona detak jantung.

Pengambilan data dilakukan satu hari untuk satu subjek, dimulai sekitar pukul 09.00 dan berakhir di puncak pada pukul 11.00–12.00 siang. Seluruh rute pendakian sama, dengan checkpoint alami yaitu Start – Pos 1 – Pos 2 – Puncak. Kondisi lingkungan selama penelitian berada pada musim penghujan dengan suhu relatif sejuk, tanah lembab namun tidak berlumpur, dan kelembapan tinggi akibat embun pagi. Subjek tidak membawa beban tambahan; seluruh perlengkapan dibawa oleh peneliti, dan alas kaki yang digunakan adalah sepatu harian.

Sebelum pendakian, dilakukan pengukuran titik acuan selama tiga hingga lima menit dalam posisi duduk rileks untuk merekam detak jantung dan SpO_2 awal, dilanjutkan pemanasan dinamis ringan selama lima hingga tujuh menit yang meliputi peregangan otot kaki, punggung, dan bahu. Pendakian dilakukan mengikuti ritme alami masing-masing subjek, dengan istirahat singkat di setiap checkpoint. Asupan cairan berupa air mineral dan minuman elektrolit diperbolehkan sesuai kebutuhan, dengan durasi istirahat dijaga seminimal mungkin. Prosedur keselamatan diterapkan, di antaranya penghentian aktivitas apabila subjek mengalami pusing berat, kehilangan kesadaran, atau jika hujan lebat turun; tim peneliti membawa P3K untuk pertolongan pertama.

Setiap checkpoint digunakan untuk melakukan pengukuran suhu kulit, saturasi oksigen hingga terbaca stabil, *recovery heart rate* 60 detik (selisih detak jantung maksimum saat tiba di checkpoint dengan detak jantung setelah 60 detik istirahat), serta *Rating of Perceived Exertion* (RPE) menggunakan skala Borg, yang diambil segera setelah subjek tiba untuk menangkap persepsi kelelahan yang masih segar. Pengambilan data dibagi dalam tiga segmen pendakian dengan karakteristik topografi berbeda: segmen pertama (Start–Pos 1) dengan elevasi 100,6 meter dan kemiringan 26,62% ber medan tanah curam; segmen kedua (Pos 1–Pos 2) dengan elevasi 149,0 meter dan kemiringan 19,08% ber jalur landai dan berkelok; dan segmen ketiga (Pos 2–Puncak) dengan elevasi 200,7 meter dan kemiringan 18,92% ber medan berbatu serta paparan sinar matahari lebih tinggi.

3.2.1 Data Smartwatch

Data yang diperoleh di lapangan diolah secara bertahap untuk memastikan kelengkapan, konsistensi, dan validitasnya sebelum dilakukan analisis. Seluruh variabel fisiologis direkam secara otomatis oleh Huawei Watch GT 4 melalui aplikasi Huawei Health, kemudian diekspor dalam format CSV untuk setiap subjek dan segmen pendakian. Berkas tersebut memuat *timestamp* perekaman, detak jantung (*heart rate*), kecepatan, suhu kulit, saturasi oksigen (SpO_2), *recovery heart rate*, jumlah langkah, dan zona detak jantung. Penamaan berkas mengikuti konvensi yang memuat kode subjek, kelompok perlakuan, tanggal pengambilan data, dan segmen pendakian, sehingga memudahkan identifikasi serta pengelompokan data.

Tahap pertama pengolahan adalah pemeriksaan kelengkapan data untuk memastikan semua variabel yang diperlukan tercatat pada seluruh segmen (Start–Pos 1, Pos 1–Pos 2, dan Pos 2–Puncak). Tahap berikutnya adalah pembersihan data yang dilakukan menggunakan bahasa pemrograman Python pada platform Google Colab dengan pustaka *pandas*. Pada tahap

ini, nilai hilang dihapus dengan fungsi *dropna()* pada kolom kunci seperti detak jantung dan kecepatan, sehingga hanya baris dengan data lengkap yang dipertahankan. Apabila terdapat celah data berdurasi singkat yang penting untuk kontinuitas deret waktu, interpolasi linier dapat diterapkan secara terbatas setelah proses penghapusan nilai hilang. Selain itu, nilai anomali yang tidak wajar pada kurva detak jantung dapat diperhalus dengan metode *rolling median filter* untuk meredam fluktuasi sesaat yang tidak merepresentasikan kondisi fisiologis sebenarnya.

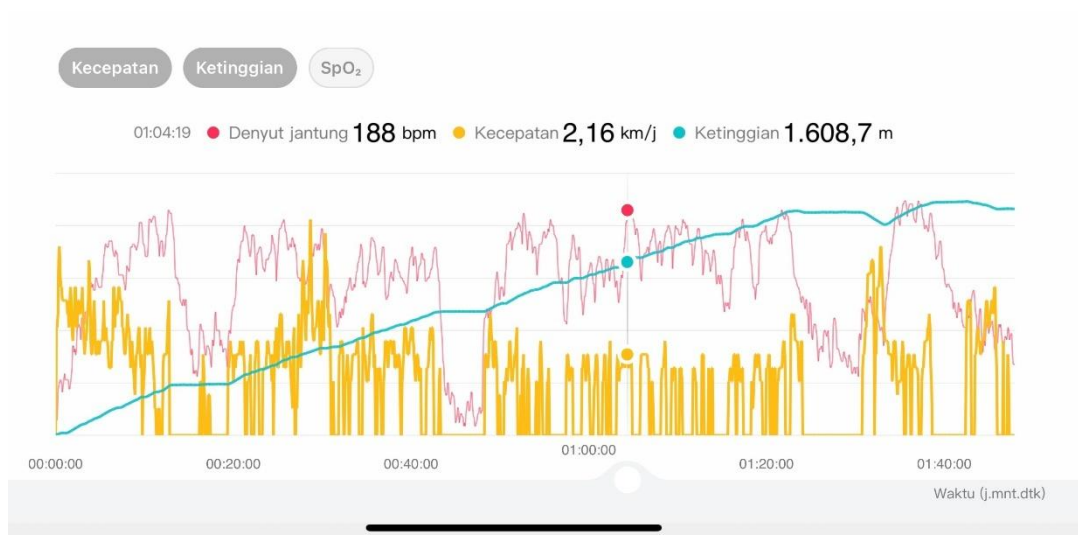
Selanjutnya, seluruh data deret waktu distandarisasi menjadi interval 5 detik, sesuai dengan format pencatatan default Huawei Health. Proses ini dilakukan dengan menyelaraskan *timestamp* pada *time grid* 5 detik menggunakan metode *resampling* sehingga interval pengukuran antar-subjek dan antar-segmen menjadi seragam. Satuan kecepatan diseragamkan dalam kilometer per jam (km/jam) dengan mengonversi nilai dalam meter per detik (m/s) bila diperlukan. Proses standarisasi ini memastikan bahwa data memiliki resolusi temporal yang konsisten, sehingga memudahkan komparasi lintas subjek.

Tahap berikutnya adalah penandaan segmen, yaitu pencocokan data dengan waktu kedatangan di setiap *checkpoint* berdasarkan catatan lapangan. Hal ini memungkinkan perhitungan variabel fisiologis per segmen pendakian. Data suhu kulit, saturasi oksigen, dan *recovery heart rate* diambil dari nilai median periode pengukuran di *checkpoint* untuk mengurangi variabilitas akibat perubahan sesaat, sedangkan data detak jantung dan kecepatan dianalisis dalam bentuk deret waktu pada interval 5 detik di sepanjang segmen.

Setelah penandaan segmen, data persepsi kelelahan berupa *Rating of Perceived Exertion* (RPE) yang diambil di setiap *checkpoint* diintegrasikan ke dalam basis data dan disejajarkan dengan segmen pendakian yang sesuai. Data observasi lapangan seperti pusing, mual, atau keluhan lain dimasukkan sebagai informasi kualitatif pelengkap yang membantu interpretasi.

Tahap terakhir adalah penyusunan *dataset* akhir yang memuat seluruh variabel fisiologis, perilaku aktivitas, dan persepsional untuk setiap subjek pada tiap segmen pendakian. Dataset ini menjadi dasar analisis statistik yang mencakup perbandingan antar-kelompok (sadar vs tidak sadar), analisis hubungan antara tingkat kesadaran penggunaan fitur smartwatch dengan respons fisiologis dan persepsi kelelahan, serta identifikasi pola respon selama aktivitas pendakian. Dengan proses pengolahan yang sistematis, mulai dari pembersihan menggunakan *dropna()* hingga standarisasi interval 5 detik, penelitian ini memastikan integritas data yang tinggi serta meningkatkan kekuatan inferensi hasil analisis.

Data lingkungan eksternal seperti suhu udara juga dicatat secara manual pada setiap pos pemberhentian sebagai variabel pendukung yang relevan terhadap variasi fisiologis. Seluruh data dikompilasi dan disiapkan dalam bentuk numerik serta visual, yang masing-masing divisualisasikan dalam Gambar 3.3 untuk deret waktu (HR, Ketinggian dan kecepatan) dan Gambar 3.4 untuk ringkasan hasil pendakian.



Gambar 3. 3 Data denyut jantung, ketinggian, dan kecepatan dalam format deret waktu.



Gambar 3. 4 Data hasil perhitungan rata-rata aktivitas fisik pendakian.

3.2.2 Instrumen Persepsi Kelelahan

Pengukuran persepsi kelelahan dalam penelitian ini dilakukan menggunakan kuesioner berbasis *Rating of Perceived Exertion* (RPE) skala 6–20 yang dikembangkan oleh Gunnar Borg. Skala ini merupakan alat ukur subjektif yang telah banyak digunakan dalam penelitian aktivitas ketahanan untuk menilai intensitas kelelahan fisik berdasarkan persepsi individu. Rentang nilai RPE merepresentasikan tingkat kelelahan dari sangat ringan hingga sangat maksimal, dengan scoring yang dapat mencerminkan respons gabungan dari aspek fisiologis dan psikologis terhadap beban aktivitas fisik.

Setelah menyelesaikan setiap segmen pendakian (Start–Pos 1, Pos 1–Pos 2, Pos 2–Puncak), subjek diminta untuk mengisi kuesioner RPE dengan memilih skor yang paling sesuai menggambarkan kondisi kelelahan yang mereka rasakan saat itu. Penilaian ini dilakukan secara mandiri dan anonim untuk menjaga objektivitas persepsi, serta untuk menangkap dinamika perubahan persepsi kelelahan yang terjadi seiring meningkatnya intensitas dan durasi aktivitas mendaki.

Deskripsi lengkap dari skala RPE yang digunakan dalam penelitian ini disajikan pada Tabel 3.2 dan Tabel 3.3 sebagai panduan bagi peserta dalam memahami setiap kategori nilai yang tersedia.

Tabel 3. 2 Pertanyaan kuesioner

Segmen	Pertanyaan	Skala RPE
Start ke Pos 1	Bagaimana tingkat kelelahan yang Anda rasakan selama pendakian dari Start ke Pos 1?	6-20
Pos 1 ke Pos 2	Bagaimana tingkat kelelahan yang Anda rasakan selama pendakian dari Pos 1 ke Pos 2?	6-20
Pos 2 ke Puncak	Bagaimana tingkat kelelahan yang Anda rasakan selama pendakian dari Pos 2 ke Puncak?	6-20

Tabel 3. 3 Skala RPE

Skor	Deskripsi
6	Sangat Sangat Ringan
7	Sangat Ringan
8	Ringan
9	Agak Ringan
10	Cukup Ringan
11	Cukup
12	Agak Berat
13	Berat
14	Agak Sangat Berat
15	Sangat Berat
16	Sangat Sangat Berat
17	Sangat Sangat Berat Sekalli
18	Hampir Maksimal
19	Maksimal
20	Sangat Maksimal

3.3 Teknik Analisis Data

Dalam penelitian ini, analisis data dilakukan secara sistematis untuk memastikan keakuratan hasil dan validitas temuan. Data dari *smartwatch* dan kuesioner RPE akan melalui proses pembersihan dan normalisasi sebelum dianalisis. Uji normalitas diterapkan untuk menentukan distribusi data, yang menjadi dasar pemilihan metode statistik yang sesuai. Uji hipotesis digunakan untuk membandingkan kelompok pendaki berdasarkan penggunaan *smartwatch*, sementara uji korelasi menilai hubungan antara BMI dan detak jantung. Selain itu, analisis pola dengan *Dynamic Time Warping* (DTW) diterapkan untuk membandingkan pola perubahan detak jantung antar kelompok. Proses analisis ini dirancang untuk mengungkap penggunaan *smartwatch* dalam aktivitas hiking, dengan rincian metode dijelaskan pada subbab berikut.

3.3.1 Uji Normalitas dengan Shapiro-Wilk

Uji normalitas dilakukan untuk menentukan apakah distribusi data kuantitatif dalam penelitian ini memenuhi asumsi statistik parametrik. Mengingat jumlah sampel yang relatif kecil, yaitu di bawah 50, pendekatan yang digunakan adalah *Shapiro-Wilk Test*, yang secara

luas direkomendasikan untuk ukuran sampel kecil karena sensitivitasnya dalam mendeteksi deviasi dari distribusi normal. Uji ini merupakan langkah awal penting dalam analisis inferensial, guna memastikan bahwa metode statistik yang digunakan baik parametrik maupun non-parametrik sesuai dengan karakteristik data.

Uji ini diterapkan terhadap variabel-variabel fisiologis (seperti BPM, kalori terbakar, suhu tubuh, SpO₂, dan Recovery HR), variabel aktivitas (kecepatan, langkah, durasi zona HR), serta persepsi kelelahan (RPE), yang seluruhnya direkam melalui smartwatch dan kuesioner selama pendakian. Pelaksanaan uji dilakukan menggunakan platform Google Colab berbasis Python, dengan pustaka SciPy untuk analisis statistik dan Seaborn serta Matplotlib untuk visualisasi distribusi data. Distribusi setiap variabel dianalisis menggunakan fungsi `shapiro()` dari pustaka `scipy.stats` untuk menguji apakah data berdistribusi normal. Struktur kode terdiri dari proses iteratif terhadap daftar variabel numerik, di mana setiap variabel diuji dengan fungsi `shapiro()` dan hasilnya dicetak dalam format ringkasan. Selain itu, histogram dan kurva KDE dibuat untuk memberikan gambaran visual distribusi masing-masing variabel. Penggunaan pustaka Pandas memfasilitasi manipulasi data tabular.

Hipotesis pengujian adalah sebagai berikut:

- H_0 : Sampel berasal dari populasi dengan distribusi normal.
- H_1 : Sampel berasal dari populasi dengan distribusi tidak normal.

Kriteria pengambilan keputusan:

- Jika $p\text{-value} > 0,05$, maka H_0 diterima: data dianggap berdistribusi normal.
- Jika $p\text{-value} \leq 0,05$, maka H_0 ditolak: data tidak berdistribusi normal.

Visualisasi distribusi histogram digunakan sebagai pendukung interpretasi, khususnya untuk mengidentifikasi outlier atau pola skewness yang mungkin tidak tertangkap oleh nilai p saja. Pendekatan ini penting dalam pemilihan teknik statistik (uji-t vs Mann-Whitney, Pearson vs Spearman) bergantung pada hasil uji distribusi data, sehingga interpretasi akhir benar-benar mencerminkan dinamika fisiologis yang objektif dan valid.

Implementasi teknis dilakukan dengan kode Python berikut:

```
#libraries
from scipy.stats import shapiro

# contoh variabel numerik
variabel_uji = ['BPM', 'Kalori', 'RPE', 'Spo2']
```

Gambar 3. 5 Kode program Uji Normalitas Shapiro-Wilk.

```

# Uji normalitas untuk tiap variabel
for var in variabel_uji:
    stat, p = shapiro(df[var].dropna())
    print(f"{var}: p = {p:.4f} -> {'Normal' if p > 0.05 else 'Tidak Normal'}")

# Visualisasi Histogram
plt.figure(figsize=(5, 3))
sns.histplot(data, kde=True, color='skyblue')
plt.title(f"{var} (p = {p:.4f})")
plt.tight_layout()
plt.show()

```

Gambar 3. 5 Kode program Uji Normalitas Shapiro-Wilk (Lanjutan)

3.3.2 Uji Hipotesis dengan Uji-t

Uji perbedaan antar kelompok digunakan untuk mengevaluasi apakah terdapat perbedaan signifikan dalam berbagai parameter fisiologis dan performatif antara kelompok sadar dan tidak sadar penggunaan *smartwatch*. Pengujian ini berfungsi untuk menguji penggunaan *smartwatch* sebagai alat bantu dalam mengelola aktivitas pendakian berdasarkan perbedaan rerata antar kelompok.

Proses pengujian diawali dengan uji normalitas menggunakan metode Shapiro-Wilk untuk menentukan distribusi data masing-masing kelompok. Apabila data berdistribusi normal, maka digunakan uji parametrik berupa *independent t-test* (ttest_ind); sebaliknya, jika tidak memenuhi asumsi normalitas, diterapkan uji non-parametrik Mann-Whitney U Test (mannwhitneyu). Implementasi dilakukan di Google Colab dengan Python, memanfaatkan pustaka pandas untuk manipulasi data, scipy.stats untuk uji statistik, serta seaborn untuk visualisasi. Struktur kode disusun iteratif terhadap variabel-variabel penelitian, dengan pemilihan metode uji yang bersifat adaptif berdasarkan hasil uji normalitas. Hasil analisis ditampilkan dalam bentuk *p-value* beserta jenis uji yang digunakan, dan diperkuat dengan visualisasi boxplot guna mendukung interpretasi perbedaan distribusi antar kelompok.

Hipotesis yang diuji adalah sebagai berikut:

- H_0 (Hipotesis Nol): Tidak terdapat perbedaan signifikan antara kelompok sadar dan tidak sadar dalam parameter yang diuji.
- H_1 (Hipotesis Alternatif): Terdapat perbedaan signifikan antara kelompok sadar dan tidak sadar dalam parameter yang diuji.

Implementasi teknis dilakukan dengan kode Python berikut:

```

#Libraries
from scipy.stats import ttest_ind, mannwhitneyu, shapiro

# Contoh variabel
variabel = 'BPM'

# Bagi data berdasarkan kelompok
sadar = df[df['Kelompok'] == 'sadar'][variabel].dropna()
tidak_sadar = df[df['Kelompok'] == 'tidak_sadar'][variabel].dropna()

# Uji normalitas
normal = shapiro(sadar).pvalue > 0.05 and shapiro(tidak_sadar).pvalue > 0.05

# Pilih metode uji berdasarkan normalitas
if normal:
    stat, p = ttest_ind(sadar, tidak_sadar)
else:
    stat, p = mannwhitneyu(sadar, tidak_sadar)
print(f"{variabel}: p = {p:.4f} ({'t-test' if normal else 'Mann-Whitney'})")

# Visualisasi Boxplot
sns.boxplot(x='Kelompok', y=variabel, data=df)
plt.title(f"{variabel} per Kelompok (p = {p:.4f}, {metode})")
plt.tight_layout()
plt.show()

```

Gambar 3. 6 Kode program Uji-t.

3.3.3 Uji korelasi dengan Pearson/Spearman

Uji korelasi digunakan untuk mengidentifikasi kekuatan dan arah hubungan antara dua variabel numerik dalam penelitian ini. Pendekatan ini bertujuan untuk memahami sejauh mana variabel seperti Indeks Massa Tubuh (BMI), detak jantung (BPM), kalori terbakar, suhu tubuh, SpO₂, dan persepsi kelelahan (RPE) saling berhubungan selama aktivitas pendakian gunung. Pemahaman atas pola korelasi ini penting dalam menjelaskan penggunaan *smartwatch* pada dimensi fisiologis maupun persepsional.

Sebelum analisis korelasi dilakukan, uji normalitas Shapiro-Wilk digunakan untuk menentukan jenis pendekatan statistik yang sesuai. Jika data berdistribusi normal, digunakan Pearson Correlation; jika tidak, digunakan Spearman Rank Correlation sebagai alternatif non-parametrik. Analisis dilakukan di platform Google Colab dengan Python menggunakan pustaka SciPy. Struktur kode meliputi pemrosesan data menggunakan Pandas, perhitungan korelasi dengan `spearmanr()`, serta visualisasi scatterplot dan garis tren melalui Seaborn. Hasil analisis ditampilkan dalam bentuk koefisien korelasi (r) dan p -value, serta divisualisasikan untuk memudahkan interpretasi hubungan antarvariabel.

Hipotesis yang diuji untuk masing-masing pasangan variabel adalah sebagai berikut:

- H_0 (Hipotesis Nol): Tidak terdapat hubungan signifikan antara kedua variabel.

- H_1 (Hipotesis Alternatif): Terdapat hubungan signifikan antara kedua variabel.

Implementasi teknis dilakukan dengan kode Python berikut:

```
#Libraries
from scipy.stats import spearmanr, seaborn as sns, matplotlib.pyplot as plt

# Contoh pasangan variabel
x, y = 'RPE', 'BPM'

# Ambil data dan hapus nilai kosong
data = df[[x, y]].dropna()

# Hitung korelasi Spearman
rho, pval = spearmanr(data[x], data[y])
print(f"{x} vs {y} | r = {rho:.3f}, p = {pval:.4f}")

# Visualisasi scatterplot dengan garis tren
sns.scatterplot(data=data, x=x, y=y)
sns.regplot(data=data, x=x, y=y, scatter=False, color='red')
plt.title(f"Spearman Correlation: {x} vs {y}\n(r = {rho:.2f}, p = {pval:.4f})")
plt.tight_layout()
plt.show()
```

Gambar 3. 7 kode program Uji Korelasi.

3.3.4 Analisis Pola dengan Dynamic Time Warping (DTW)

Dalam penelitian ini, metode Dynamic Time Warping (DTW) digunakan untuk menganalisis kesamaan pola detak jantung antar partisipan selama kegiatan pendakian, dengan tujuan mengidentifikasi perbedaan respons fisiologis antara kelompok yang sadar dan tidak sadar terhadap penggunaan smartwatch. DTW merupakan algoritma yang memungkinkan perbandingan dua deret waktu dengan panjang dan tempo yang tidak seragam, sehingga relevan untuk menganalisis aktivitas fisik yang berlangsung secara dinamis. Implementasi dilakukan menggunakan pustaka `dtwdistance` pada Python, dengan data BPM tiap subjek diolah dalam format time-series dan dihitung tingkat kemiripannya melalui fungsi `dtw.distance()`, yang menghasilkan matriks jarak simetris. Hasil perhitungan divisualisasikan melalui dua bentuk utama: (1) heatmap matriks DTW, yang menggambarkan kedekatan pola antar subjek, dan (2) overlay time-series plot, yang memperlihatkan kurva detak jantung secara simultan untuk mengamati variasi fisiologis antar individu. Analisis dilakukan melalui dua pendekatan: pertama, perbandingan antar seluruh subjek baik secara keseluruhan (full trek) maupun berdasarkan segmen lintasan (Gambar 3.7); kedua, perbandingan spesifik antar dua subjek untuk melihat keselarasan pola individu secara lebih mendalam (Gambar 3.8).

Implementasi teknis dilakukan dengan kode Python berikut:

```

#Libraries
from dtaidistance import dtw, matplotlib.pyplot as plt, seaborn as sns, numpy
as np

# Siapkan data BPM per subjek
series = df.groupby('Kode_Subjek')['BPM'].apply(list).tolist()

# Hitung jarak DTW antar subjek
n = len(series)
matrix = np.zeros((n, n))
for i in range(n):
    for j in range(i, n):
        matrix[i, j] = matrix[j, i] = dtw.distance(series[i], series[j])

# Visualisasi heatmap DTW
sns.heatmap(matrix, cmap="coolwarm", annot=True)
plt.title("Jarak DTW antar Subjek")
plt.show()

#Visualiasi Overlay
for bpm, kode in zip(series, subjects):
    plt.plot(bpm, label=kode, alpha=0.8)
plt.legend()

```

Gambar 3. 8 Kode program Analisis *Dynamic Time Warping*.

```

# Tentukan dua subjek yang akan dibandingkan
subjek1 = 'A'
subjek2 = 'C'

# Ambil time-series BPM masing-masing subjek
ts1 = df[df['Kode_Subjek'] == subjek1]['BPM'].tolist()
ts2 = df[df['Kode_Subjek'] == subjek2]['BPM'].tolist()

# Overlay HR kedua subjek
plt.plot(ts1, label=f'Subjek {subjek1}')
plt.plot(ts2, label=f'Subjek {subjek2}')
plt.title(f"Overlay Detak Jantung Subjek {subjek1} vs {subjek2}")
plt.xlabel("Waktu")
plt.ylabel("BPM")
plt.legend()
plt.show()

# Warping path
path = dtw.warping_path(ts1[:500], ts2[:500])
dtwvis.plot_warping(ts1[:500], ts2[:500], path)

```

Gambar 3. 9 kode program Analisis *Dynamic Time Warping* dua subjek.

3.4 Intepretasi Hasil

Sebagai bagian dari rancangan analisis, penelitian ini merumuskan sejumlah skenario awal yang bertujuan untuk mengarahkan pengujian terhadap potensi hubungan dan perbedaan antar variabel yang telah didefinisikan sebelumnya. Skenario ini disusun guna membangun kerangka konseptual dalam memahami pola-pola yang mungkin muncul dari data, sekaligus

menjadi acuan dalam pemilihan metode analisis statistik yang tepat dan relevan. Pendekatan yang dirancang meliputi analisis perbedaan antar kelompok, pengujian korelasi antar variabel, serta eksplorasi pola deret waktu dari respons fisiologis antar partisipan.

Dalam ranah perbandingan antar kelompok, fokus analisis diarahkan pada kemungkinan perbedaan antara individu yang memiliki kesadaran terhadap penggunaan smartwatch dan yang tidak. Variabel-variabel yang dipertimbangkan mencakup aspek aktivitas seperti kecepatan pendakian, serta parameter fisiologis seperti detak jantung (BPM), laju pemulihan (recovery HR), jumlah langkah, dan kalori terbakar. Selain itu, persepsi kelelahan yang diukur melalui skala RPE, distribusi durasi pada berbagai zona detak jantung, serta nilai saturasi oksigen (SpO_2) juga menjadi bagian dari skenario analisis komparatif ini. Pengujian dirancang menggunakan teknik parametrik maupun non-parametrik, bergantung pada karakteristik distribusi masing-masing variabel.

Di samping uji perbedaan, skenario analisis juga mencakup pengujian hubungan antar variabel untuk menelusuri keterkaitan antara kondisi fisiologis dan karakteristik aktivitas. Hubungan yang dirancang untuk dianalisis meliputi, antara lain, keterkaitan antara kecepatan pendakian dengan beban fisiologis, pengaruh indeks massa tubuh (BMI) terhadap detak jantung dan kalori, serta hubungan suhu tubuh dengan variabel respons lainnya. Teknik analisis korelasi yang digunakan direncanakan berbasis pendekatan non-parametrik, mengingat potensi ketidakterpenuhan asumsi normalitas pada data.

Lebih lanjut, interpretasi juga diarahkan pada evaluasi keselarasan pola fisiologis melalui analisis deret waktu, khususnya pada data detak jantung antar partisipan. Dengan memanfaatkan algoritma Dynamic Time Warping (DTW), skenario ini bertujuan untuk mengeksplorasi derajat kemiripan pola BPM antar individu, baik secara menyeluruh sepanjang lintasan pendakian, maupun secara bertahap berdasarkan segmen-segmen tertentu. Analisis ini dimaksudkan untuk mengidentifikasi potensi konsistensi, variasi, atau adaptasi pola respons fisiologis yang dapat mencerminkan perbedaan strategi tubuh dalam merespons aktivitas fisik.

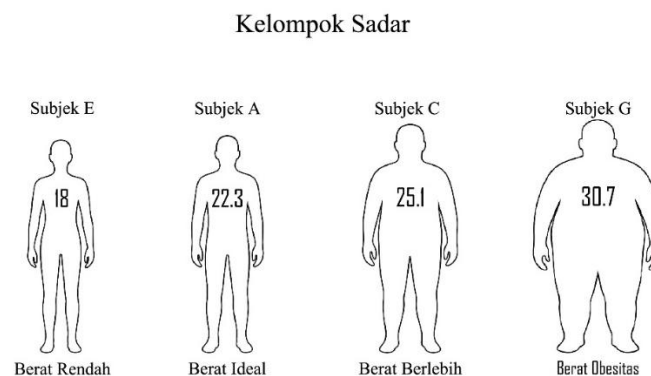
Keseluruhan skenario yang telah dirumuskan dalam tahap ini berfungsi sebagai dasar konseptual yang akan diujikan lebih lanjut melalui analisis data empiris pada bab 4, guna memperoleh temuan yang dapat menjawab rumusan masalah dan mendukung pencapaian tujuan penelitian.

BAB IV

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1 Distribusi Indeks Massa Tubuh dan Pengujian Asumsi Statistik

Distribusi nilai BMI pada kelompok eksperimen yang sadar penggunaan fitur *smartwatch* menunjukkan penyebaran yang representatif dan sistematis, yakni 18,0 untuk kategori berat rendah, 22,3 untuk kategori berat ideal, 25,1 untuk kategori berat berlebih, dan 30,7 untuk kategori obesitas kelas 1. Penetapan nilai-nilai ini mempertimbangkan validitas fisiologis dalam representasi Generasi Z serta konsistensi dengan standar klasifikasi WHO. Visualisasi sebaran nilai BMI pada kelompok sadar disajikan dalam Gambar 4.1, sementara rincian data kuantitatif masing-masing subjek dapat ditinjau pada Tabel 4.1.



Gambar 4. 1 Visualisasi BMI Kelompok Sadar

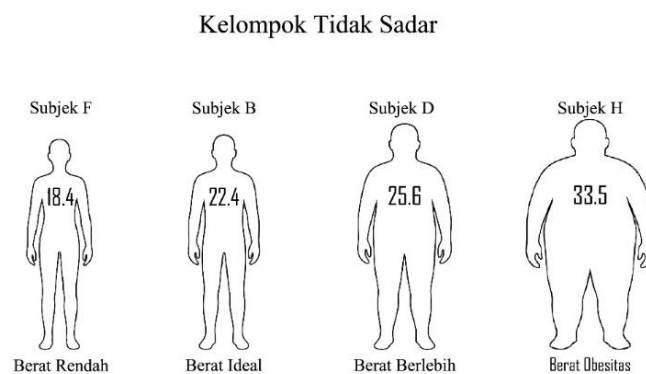
Tabel 4.1 Tabel Rincian data subjek sadar

Subjek	Tinggi Badan	Berat Badan	BMI Skor	BMI Kategori
Subjek A	177 cm	70 Kg	22.3	Berat Ideal
Subjek C	174 cm	76 Kg	25.1	Berat Berlebih
Subjek E	170 cm	52 Kg	18	Berat Rendah
Subjek G	173 cm	92 Kg	30.7	Berat Obesitas Kelas 1

Distribusi subjek dalam kelompok sadar memperlihatkan pola penyebaran yang linier dan proporsional antar kategori BMI tanpa adanya nilai ekstrem, sehingga dinilai representatif

sebagai dasar perbandingan dalam analisis statistik. Proporsi tinggi dan berat badan pada setiap subjek juga memperlihatkan keselarasan struktural dengan klasifikasi indeks massa tubuh yang digunakan, sehingga dapat diasumsikan bahwa kelompok ini memiliki kesetaraan fisiologis internal yang layak secara metodologis untuk dijadikan tolok ukur dalam perbandingan lintas kondisi eksperimental.

Sementara itu, kelompok tidak sadar menunjukkan konfigurasi nilai BMI sebesar 18,4 untuk kategori berat rendah, 22,4 untuk berat ideal, 25,6 untuk berat berlebih, dan 33,5 untuk obesitas kelas 1. Rentang nilai ini secara sengaja disusun sedemikian rupa untuk mencerminkan kesetaraan proporsional dengan kelompok sadar, sehingga efek perbedaan yang diamati dalam penelitian ini dapat lebih kredibel dikaitkan dengan perlakuan eksperimental, bukan semata-mata perbedaan fisiologis dasar antar subjek. Visualisasi kelompok tidak sadar ditampilkan pada Gambar 4.2, dan komposisi rinci data disusun pada Tabel 4.2.



Gambar 4. 2 Visualisasi BMI Kelompok Tidak Sadar

Tabel 4.2 Tabel Rincian data subjek tidak sadar

Subjek	Tinggi Badan	Berat Badan	BMI Skor	BMI Kategori
Subjek B	173 cm	67 Kg	22.4	Berat Ideal
Subjek D	169 cm	73 Kg	25.6	Berat Berlebih
Subjek F	173 cm	55 Kg	18	Berat Rendah
Subjek H	177 cm	105 Kg	33.5	Berat Obesitas Kelas 1

Kesetaraan nilai dan pola penyebaran BMI antara kelompok sadar dan tidak sadar menunjukkan bahwa kedua kelompok memiliki kondisi fisiologis awal yang relatif seimbang. Tingkat homogenitas ini penting untuk memastikan bahwa perbandingan statistik yang dilakukan di tahap selanjutnya tidak dipengaruhi oleh perbedaan karakteristik tubuh bawaan, melainkan benar-benar merefleksikan efek dari perlakuan eksperimental. Setelah memastikan distribusi subjek yang seimbang, langkah selanjutnya adalah melakukan pengujian terhadap karakteristik distribusi seluruh variabel kuantitatif dalam dataset. Oleh karena itu, pada subsubbab berikut akan dibahas uji normalitas sebagai prasyarat utama untuk menentukan pendekatan statistik yang akan digunakan dalam analisis inferensial.

4.1.1 Deskripsi Data

Data penelitian ini terdiri dari dua set utama: (1) data ringkasan (*summary dataset*) berisi 24 entri hasil pengukuran dari delapan subjek pada tiga segmen pendakian, dan (2) data *timeseries* detak jantung (*heart rate*) dan kecepatan yang direkam setiap 5 detik sepanjang aktivitas pendakian.

Dataset ringkasan memuat variabel fisiologis, perilaku aktivitas, dan persepsi kelelahan, termasuk: Body Mass Index (BMI), *Rating of Perceived Exertion* (RPE), estimasi kalori terbakar (kcal), kecepatan rata-rata (m/s), saturasi oksigen (SpO₂), durasi aktivitas pada lima zona detak jantung (ekstrem, anaerobik, aerobik, *fat burn*, dan *warm up*), jumlah langkah, suhu tubuh (°C), detak jantung rata-rata (BPM), serta parameter *recovery heart rate* (awal, akhir, dan selisih). Setiap variabel diukur langsung dari responden menggunakan smartwatch Huawei Watch GT 4, dengan pembagian kelompok *between-subject* (4 sadar, 4 tidak sadar terhadap fitur pemantauan fisiologis).

Secara umum, delapan partisipan menghasilkan 24 baris data ringkasan (8 subjek $\times$ 3 segmen pendakian). Karakteristik data menunjukkan bahwa BMI partisipan berada pada rentang 18,0–33,5 kg/m² (rata-rata $24,5 \pm 5,23$). Nilai RPE berada pada kisaran 9–16 (rata-rata $12,5 \pm 2,19$), sedangkan estimasi kalori terbakar per segmen berkisar antara 104–582 kcal (rata-rata $291,96 \pm 121,33$). Kecepatan rata-rata per segmen berkisar 1,41–1,86 m/s, dengan rata-rata SpO₂ sebesar $96,75 \pm 1,42\%$. Suhu tubuh partisipan tercatat pada rentang 34,5–37,0°C dengan rata-rata $35,52 \pm 0,59^\circ\text{C}$. Detak jantung rata-rata (BPM) per segmen adalah $147,28 \pm 9,44$ BPM, sedangkan perbedaan *recovery heart rate* antara awal dan akhir pemulihan bervariasi dari -25 hingga 35 BPM.

Dataset *timeseries* memuat 8.894 entri hasil perekaman detak jantung (BPM) dan kecepatan (m/s) pada interval waktu 5 detik dari seluruh subjek selama tiga segmen pendakian. Data ini mencakup variabel penunjang seperti kode subjek, segmen pendakian, ketinggian (mdpl), dan *timestamp* perekaman. Sebelum analisis, data *timeseries* dibersihkan menggunakan fungsi `dropna()` di Google Colab untuk menghapus nilai hilang (*missing values*), memastikan integritas data, dan meminimalkan bias pada hasil analisis.

Kombinasi data ringkasan dan *timeseries* ini memberikan gambaran menyeluruh mengenai dinamika fisiologis dan perilaku aktivitas selama pendakian, serta memungkinkan analisis perbedaan respons antar kelompok secara kuantitatif dan temporal.

4.1.2 Uji Normalitas Distribusi Variabel

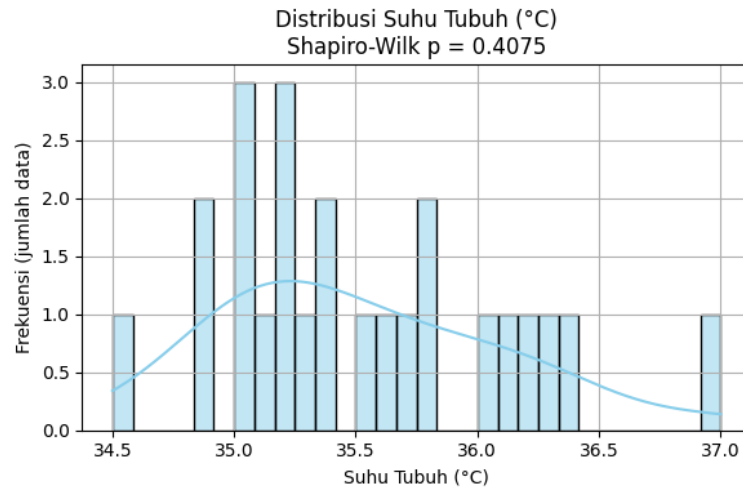
Dalam konteks penelitian ini, digunakan Uji Shapiro-Wilk, yang dikenal efektif untuk mendeteksi deviasi dari distribusi normal, terutama pada ukuran sampel kecil. Sebanyak 13 variabel diuji dalam tahap ini, terdiri atas parameter fisiologis (seperti BPM, SpO₂, suhu tubuh, *recovery* HR), persepsi kelelahan (RPE), estimasi pengeluaran energi (kalori), performa aktivitas (kecepatan, jumlah langkah), serta lima zona intensitas detak jantung (*warm-up*, *fat burn*, aerobik, anaerobik, dan *ekstrem*). Data yang diuji merupakan nilai rerata hasil rekapitulasi dari tiga segmen pendakian setiap subjek.

Hasil uji menunjukkan bahwa seluruh variabel memiliki nilai $p > 0,05$, yang berarti tidak terdapat pelanggaran terhadap asumsi normalitas. Nilai-nilai p tersebut antara lain: BPM (0.9582), Kalori (0.7459), RPE (0.0915), SpO₂ (0.1544), *Recovery* HR Selisih (0.2385), Kecepatan (0.5253), Langkah (0.8932), dan Suhu Tubuh (0.4075). Distribusi durasi zona detak jantung juga menunjukkan nilai yang mendukung normalitas: *Warm-Up* (0.3201), *Fat Burn* (0.2838), Aerobik (0.4306), Anaerobik (0.7621), dan *Ekstrem* (0.3196). Seluruh nilai tersebut diperoleh dari pengujian menggunakan metode Shapiro-Wilk, sebagaimana dijalankan melalui kode program yang ditampilkan pada Gambar 3.5. Ringkasan statistik hasil uji normalitas ini disajikan dalam Gambar 4.3.

	Variabel	Statistic	p-value	Distribusi
0	BPM	0.984100	0.958200	Normal
1	Kalori	0.973200	0.745900	Normal
2	RPE	0.928800	0.091500	Normal
3	Spo2	0.938900	0.154400	Normal
4	Recovery_HR_Selisih	0.947500	0.238500	Normal
5	Kecepatan	0.964100	0.525300	Normal
6	Durasi_Zona_Ekstrem	0.953300	0.319600	Normal
7	Durasi_Zona_Anaerobik	0.973900	0.762100	Normal
8	Durasi_Zona_Aerobik	0.959600	0.430600	Normal
9	Durasi_Zona_Fat_Burn	0.950900	0.283800	Normal
10	Durasi_Zona_Warm_Up	0.953400	0.320100	Normal
11	Langkah	0.979900	0.893200	Normal
12	Suhu_Tubuh	0.958400	0.407500	Normal

Gambar 4. 3 Hasil Uji Normalitas Distribusi Variabel (Shapiro-Wilk)

Untuk memperkuat interpretasi statistik tersebut, dilakukan pula visualisasi distribusi dalam bentuk histogram yang disertai kurva estimasi kepadatan kernel (*kernel density estimation*) untuk masing-masing variabel. Visualisasi ini dihasilkan dari pemrosesan kode program yang sama (Gambar 3.5), dengan implementasi pustaka Seaborn untuk menampilkan histogram dan kurva KDE. Secara umum, seluruh grafik distribusi menunjukkan bentuk sebaran yang mendekati simetris, tanpa indikasi *skewness* ekstrem maupun keberadaan pencilan (*outliers*) yang mengganggu. Pola distribusi cenderung *unimodal*, tanpa tanda-tanda distribusi bimodal atau penyimpangan lainnya. Rangkaian visualisasi histogram distribusi tersebut dapat ditinjau pada Gambar 4.4 hingga Gambar 4.16, yang merupakan representasi hasil dari prosedur analisis yang telah dirancang pada Bab 3.



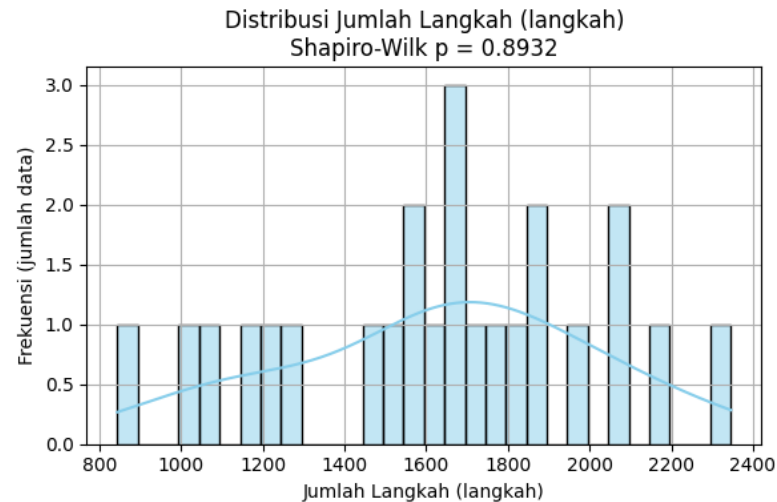
Gambar 4. 4 Histogram Kernel Density Estimation Distribusi Suhu Tubuh

Gambar 4.4 menyajikan distribusi suhu tubuh responden yang diperoleh langsung dari pengukuran lapangan menggunakan sensor suhu kulit pada smartwatch Huawei Watch GT 4. Data yang ditampilkan bersumber dari 24 baris data ringkasan ($8 \text{ subjek} \times 3 \text{ segmen pendakian}$), di mana setiap nilai merepresentasikan rata-rata suhu tubuh per segmen pendakian.

Sumbu-X pada grafik menunjukkan rentang suhu tubuh dalam satuan derajat Celsius ($^{\circ}\text{C}$), mulai dari sekitar $34,5^{\circ}\text{C}$ hingga $37,0^{\circ}\text{C}$. Sumbu-Y menunjukkan frekuensi kemunculan nilai suhu tubuh pada rentang tertentu (*bin*). Balok biru vertikal merepresentasikan jumlah kemunculan nilai suhu tubuh dalam interval tersebut; terdapat 24 balok yang sesuai dengan jumlah total pengukuran pada dataset ringkasan. Tinggi balok menunjukkan banyaknya pengukuran pada rentang nilai tertentu, misalnya balok tertinggi pada kisaran $35,0\text{--}35,1^{\circ}\text{C}$ memiliki frekuensi tiga, artinya terdapat tiga pengukuran suhu tubuh pada kisaran tersebut.

Garis lengkung biru pada grafik adalah *kernel density estimation* (KDE) yang memberikan gambaran bentuk distribusi data secara kontinu. Puncak kurva KDE menandakan rentang nilai yang paling sering muncul, yang dalam hal ini berada pada kisaran $35,0\text{--}35,5^{\circ}\text{C}$. Grafik ini juga dilengkapi dengan hasil uji normalitas Shapiro–Wilk yang menghasilkan nilai $p = 0,4075$. Karena nilai p lebih besar dari $0,05$, maka dapat disimpulkan bahwa distribusi suhu tubuh responden tidak berbeda signifikan dari distribusi normal pada taraf signifikansi 5%.

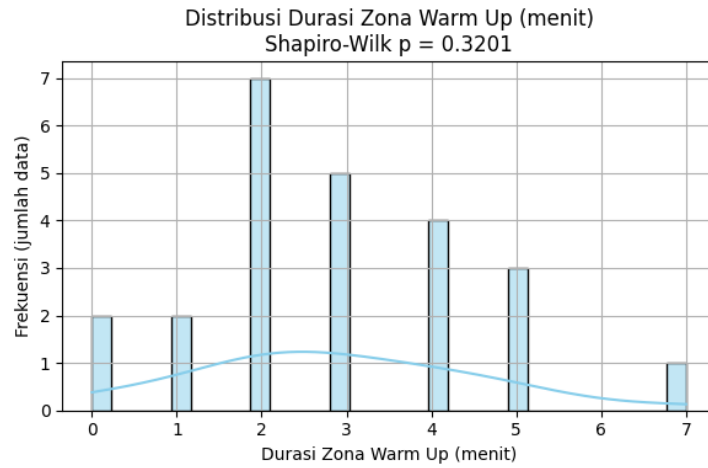
Interpretasi dari grafik ini menunjukkan bahwa suhu tubuh responden cenderung terpusat pada kisaran $35,0\text{--}35,5^{\circ}\text{C}$ dengan variasi yang relatif kecil, mengindikasikan kestabilan termoregulasi pada sebagian besar partisipan selama aktivitas pendakian.



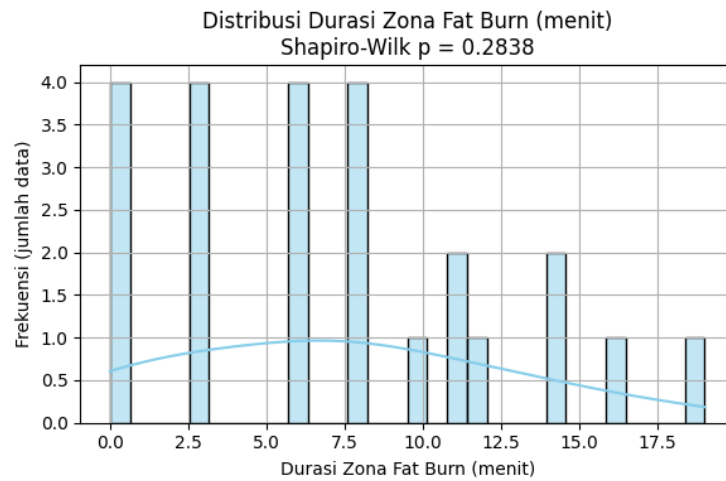
Gambar 4. 5 Histogram Kernel Density Estimation Distribusi Langkah

Gambar 4.5 menunjukkan distribusi jumlah langkah partisipan selama aktivitas pendakian, yang diperoleh langsung dari pengukuran lapangan menggunakan smartwatch Huawei Watch GT 4. Data bersumber dari 24 baris data ringkasan ($8 \text{ subjek} \times 3 \text{ segmen pendakian}$). Sumbu-X menunjukkan jumlah langkah per segmen, sedangkan sumbu-Y menunjukkan frekuensi kemunculan nilai tersebut. Balok biru vertikal merepresentasikan jumlah kemunculan nilai pada interval tertentu, dengan total 24 data, sedangkan garis lengkung biru merupakan *kernel density estimation* (KDE) yang memvisualisasikan bentuk distribusi secara kontinu.

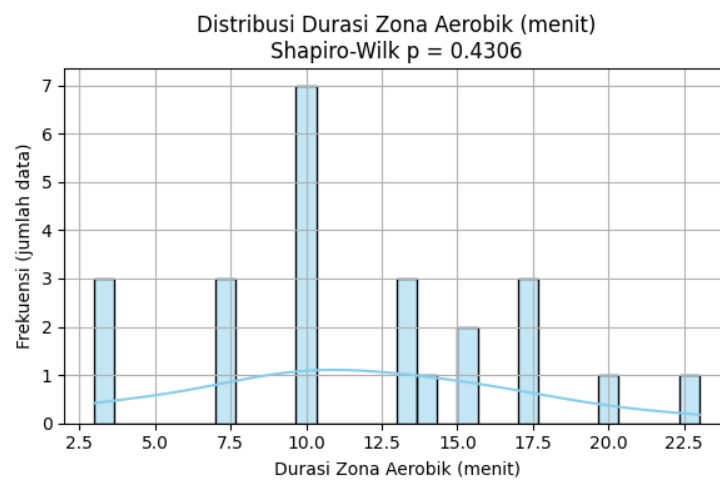
Nilai p hasil uji normalitas Shapiro–Wilk sebesar 0,8932 menunjukkan bahwa data berdistribusi normal secara statistik ($p > 0,05$), dengan sebaran yang relatif simetris. Puncak distribusi berada pada rentang 1.600–1.700 langkah, dengan frekuensi tertinggi mencapai tiga partisipan. Hal ini mengindikasikan bahwa mayoritas peserta menunjukkan jumlah langkah yang terkonsentrasi pada kisaran tersebut, mencerminkan tingkat aktivitas fisik yang relatif homogen. Konsistensi ini kemungkinan besar dipengaruhi oleh medan lintasan yang seragam antar segmen, sehingga variasi jumlah langkah antar partisipan relatif kecil.



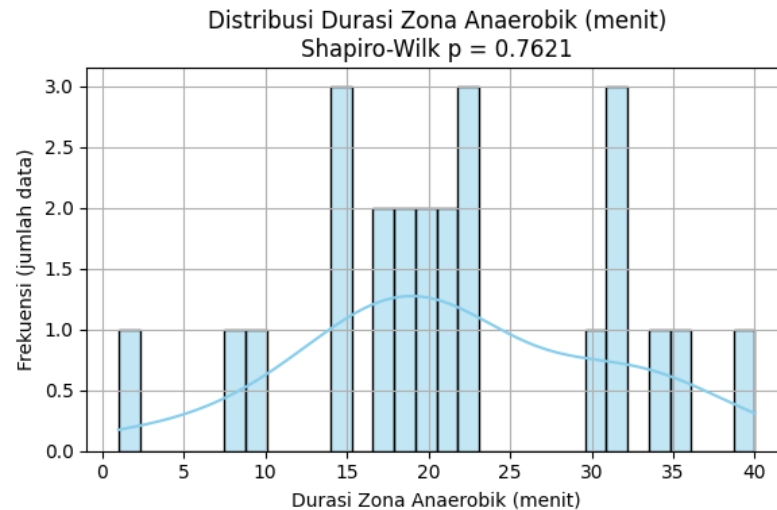
Gambar 4. 6 Histogram Kernel Density Estimation Distribusi Durasi Zona *Warm Up*



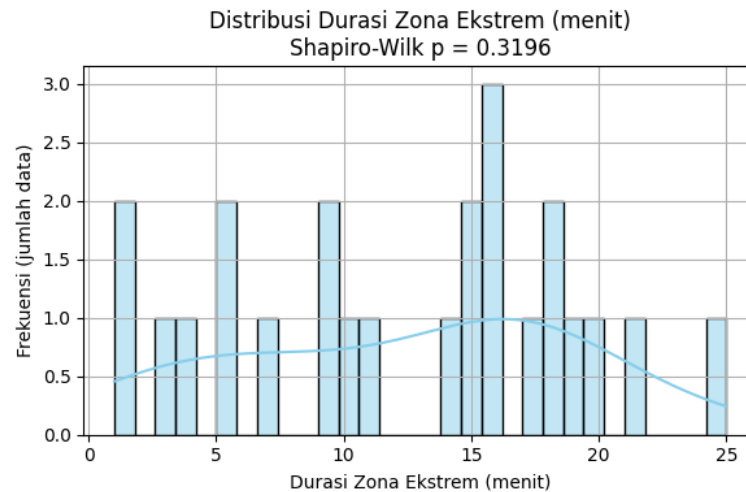
Gambar 4. 7 Histogram Kernel Density Estimation Distribusi Durasi Zona *Fat Burn*



Gambar 4. 8 Histogram Kernel Density Estimation Distribusi Zona Aerobik



Gambar 4. 9 Histogram Kernel Density Estimation Distribusi Durasi Zona Anaerobik



Gambar 4. 10 Histogram Kernel Density Estimation Distribusi Durasi Zona Ekstrem

Analisis distribusi durasi pada masing-masing zona detak jantung dilakukan untuk memperoleh gambaran pola intensitas aktivitas fisik partisipan selama pendakian. Data diperoleh melalui pengukuran lapangan menggunakan sensor detak jantung pada smartwatch Huawei Watch GT 4, yang telah dikalibrasi dan disinkronisasi dengan aplikasi Huawei Health. Dataset yang dianalisis terdiri atas 24 entri data ringkasan ($8 \text{ subjek} \times 3 \text{ segmen pendakian}$).

Pada setiap grafik distribusi, sumbu-X merepresentasikan durasi aktivitas pada zona detak jantung tertentu (dalam menit), sedangkan sumbu-Y menunjukkan frekuensi kemunculan nilai tersebut. Balok berwarna biru vertikal (*histogram bin*) merepresentasikan jumlah pengukuran pada interval tertentu, sedangkan garis lengkung biru menggambarkan *kernel density estimation* (KDE) yang digunakan untuk memvisualisasikan bentuk distribusi secara kontinu.

Uji normalitas Shapiro–Wilk dilakukan pada setiap variabel untuk menilai kesesuaian distribusi data terhadap distribusi normal.

Pada zona Warm Up, durasi aktivitas mayoritas responden terkonsentrasi pada kisaran 2–4 menit, dengan nilai p Shapiro–Wilk sebesar 0,3201 ($p > 0,05$), yang menunjukkan distribusi normal secara statistik. Temuan ini mengindikasikan bahwa fase pemanasan pada pendakian relatif singkat sebelum partisipan memasuki zona intensitas yang lebih tinggi.

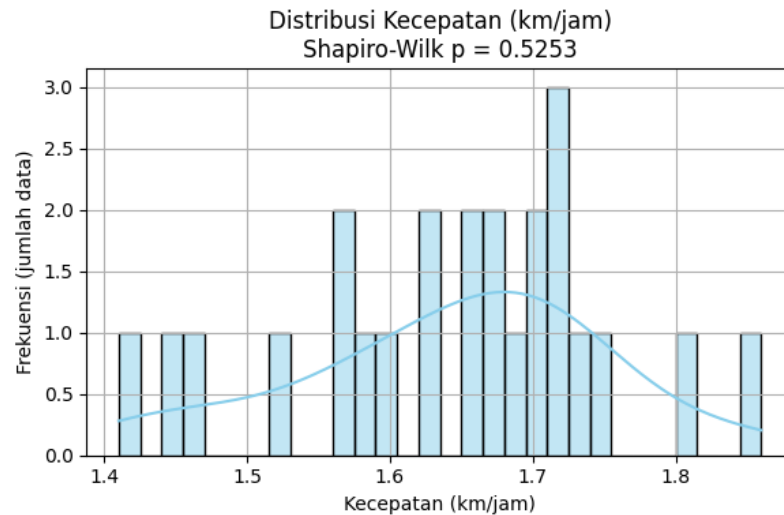
Distribusi zona Fat Burn memperlihatkan bahwa sebagian besar responden menghabiskan waktu 0–8 menit pada zona ini, dengan mayoritas durasi berada di bawah 10 menit per segmen. Nilai p Shapiro–Wilk sebesar 0,2838 ($p > 0,05$) menunjukkan distribusi normal. Durasi yang relatif singkat ini menunjukkan bahwa zona pembakaran lemak bukan merupakan fase dominan dalam aktivitas pendakian yang diteliti.

Pada zona Aerobik, distribusi durasi memusat pada kisaran 9–13 menit, dengan nilai $p = 0,4306$ ($p > 0,05$), yang menandakan distribusi normal. Zona aerobik menjadi porsi terbesar aktivitas bagi sebagian besar responden, mencerminkan karakteristik pendakian yang memerlukan intensitas sedang hingga tinggi secara stabil.

Distribusi zona Anaerobik menunjukkan sebaran yang relatif merata, dengan puncak pada kisaran 15–25 menit. Nilai p Shapiro–Wilk sebesar 0,7621 ($p > 0,05$) menunjukkan distribusi normal. Durasi yang cukup panjang pada zona ini mengindikasikan keterlibatan sistem energi anaerob yang signifikan, menuntut kapasitas kardiovaskular yang optimal.

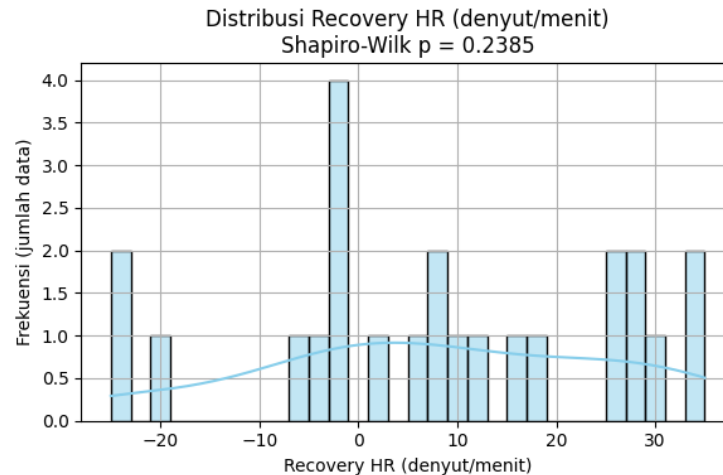
Pada zona Ekstrem, distribusi durasi menunjukkan puncak pada kisaran 15–18 menit, dengan $p = 0,3196$ ($p > 0,05$) yang memenuhi asumsi normalitas. Fase ini merepresentasikan beban fisiologis puncak, di mana kapasitas ketahanan fisik partisipan diuji secara maksimal.

Secara keseluruhan, kelima variabel durasi zona latihan menunjukkan distribusi yang memenuhi asumsi normalitas. Pola ini menggambarkan progresi intensitas yang konsisten di antara partisipan, dimulai dari fase pemanasan hingga mencapai beban fisiologis puncak, yang relevan untuk menganalisis adaptasi kardiovaskular dan manajemen energi selama pendakian.



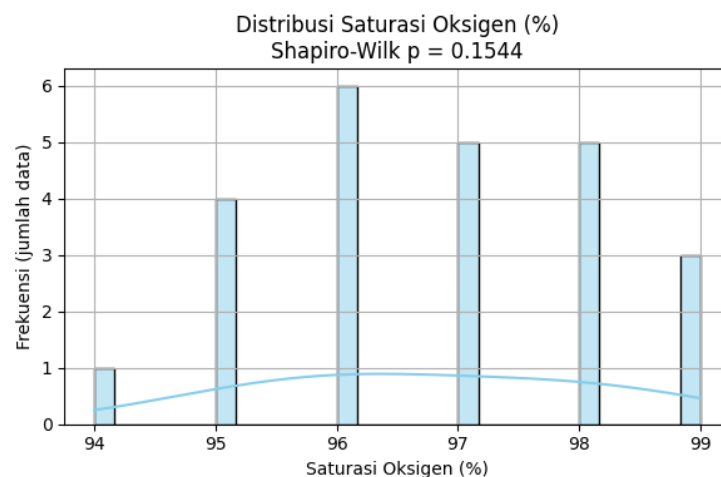
Gambar 4. 11 Histogram Kernel Density Estimation Distribusi Kecepatan

Variabel performa kecepatan pada gambar 4.11 menunjukkan distribusi yang proporsional dan mendekati normal, distribusi kecepatan pendakian yang diukur dalam satuan meter per detik (m/s) menggunakan smartwatch Huawei Watch GT 4. Data bersumber dari 24 pengukuran ($8 \text{ subjek} \times 3 \text{ segmen}$). Sumbu-X menunjukkan kecepatan, sedangkan sumbu-Y menunjukkan frekuensi kemunculan nilai. Balok biru vertikal merepresentasikan jumlah pengukuran pada interval tertentu, dan garis lengkung biru (*kernel density estimation*) menggambarkan pola distribusi, sebagaimana ditunjukkan oleh nilai *p-value* Shapiro-Wilk sebesar 0,5253 ($p > 0,05$), yang menandakan tidak adanya penyimpangan signifikan dari distribusi normal. Sebaran data relatif simetris, dengan konsentrasi frekuensi tertinggi berada pada rentang kecepatan sekitar 1,65 hingga 1,75 km/jam. Hal ini mengindikasikan bahwa sebagian besar partisipan bergerak dengan kecepatan yang cukup seragam selama pendakian. Puncak kurva distribusi yang jelas juga menunjukkan bahwa tidak terdapat outlier ekstrem dalam pola kecepatan, yang memperkuat asumsi homogenitas performa dasar antar individu dalam studi ini.



Gambar 4. 12 Histogram Kernel Density Estimation Distribusi *Recovery Heart Rate* Selisih

Gambar 4.12 menunjukkan *variabel recovery HR* Selisih menunjukkan distribusi yang simetris dengan rentang yang cukup luas, yakni dari sekitar -20 hingga $+30$ bpm, data diperoleh dari 24 pengukuran smartwatch. Sumbu-X menunjukkan selisih HR, sedangkan sumbu-Y menunjukkan frekuensi kemunculan nilai.. Nilai p-value sebesar 0,2385 dari uji Shapiro-Wilk mengindikasikan bahwa distribusi ini masih dapat dikategorikan normal secara statistik. Sebaran yang lebar namun seimbang ini mencerminkan adanya variasi individu dalam kapasitas pemulihan kardiovaskular, yang kemungkinan dipengaruhi oleh perbedaan tingkat kebugaran, adaptasi fisiologis, serta faktor teknis saat pengukuran dilakukan di lapangan.



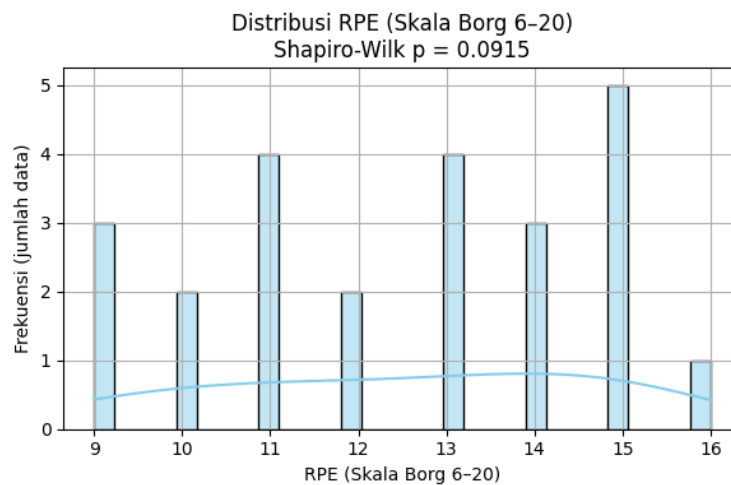
Gambar 4. 13 Histogram Kernel Density Estimation Distribusi *Spo2*

Distribusi nilai saturasi oksigen (SpO_2) (Gambar 4.13) diperoleh dari 24 hasil pengukuran lapangan menggunakan sensor optik smartwatch Huawei Watch GT 4, yang dilakukan pada

delapan responden penelitian di tiga segmen pendakian. Sumbu-X pada histogram merepresentasikan persentase SpO₂, sedangkan sumbu-Y menunjukkan frekuensi kemunculan nilai tersebut dalam dataset. Balok biru vertikal (histogram) menggambarkan jumlah data yang berada dalam interval nilai tertentu, sedangkan garis lengkung biru *Kernel Density Estimation* menunjukkan estimasi bentuk distribusi secara kontinu, yang memudahkan identifikasi pola sebaran data.

Pola distribusi terlihat relatif merata pada rentang sempit antara 94% hingga 99%, dengan konsentrasi tertinggi berada pada kisaran 96% hingga 98%. Hasil uji normalitas Shapiro–Wilk menghasilkan nilai $p = 0,1544 (> 0,05)$, yang mengindikasikan bahwa distribusi data tidak menyimpang secara signifikan dari distribusi normal.

Sebaran ini menunjukkan bahwa sebagian besar partisipan berada dalam kondisi oksigenasi darah yang optimal selama pendakian, dengan variabilitas rendah. Kondisi tersebut kemungkinan dipengaruhi oleh kestabilan intensitas aktivitas fisik, penggunaan rute pendakian yang konsisten, serta adaptasi fisiologis yang baik terhadap lingkungan, termasuk elevasi dan suhu pada jalur pendakian yang digunakan dalam penelitian ini.



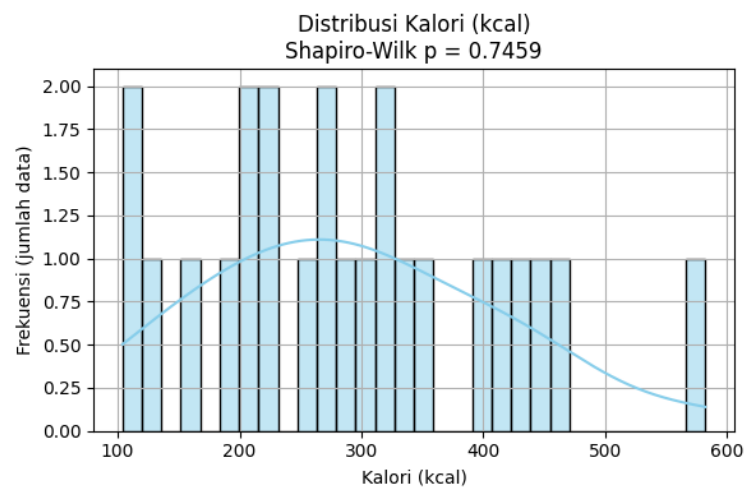
Gambar 4. 14 Histogram Kernel Density Estimation Distribusi RPE

Distribusi *Rating of Perceived Exertion* (RPE) pada Gambar 4.14 diperoleh dari 24 data hasil pengukuran menggunakan skala Borg 6–20, yang dikumpulkan pada tiga segmen pendakian dari delapan responden penelitian. Sumbu-X pada grafik merepresentasikan skor RPE, sedangkan sumbu-Y menunjukkan frekuensi kemunculan skor tersebut. Balok biru vertikal pada histogram menggambarkan jumlah data yang masuk dalam interval skor tertentu,

sementara garis lengkung biru *Kernel Density Estimation* memperlihatkan bentuk distribusi secara kontinu, sehingga memudahkan identifikasi pola kecenderungan data.

Pola distribusi memperlihatkan sebaran nilai yang cukup lebar, mulai dari 9 hingga 16, dengan puncak frekuensi pada kisaran skor 13 hingga 15. Hal ini menunjukkan adanya keberagaman persepsi kelelahan antar individu, yang wajar dalam konteks aktivitas fisik di alam terbuka dengan intensitas menengah hingga tinggi. Hasil uji normalitas Shapiro–Wilk menghasilkan nilai $p = 0,0915 (> 0,05)$, yang menandakan distribusi data tidak menyimpang secara signifikan dari distribusi normal.

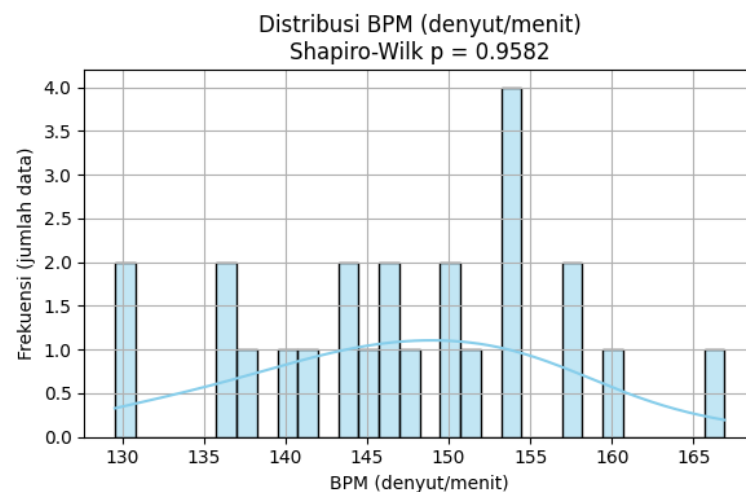
Secara akademik, temuan ini mengindikasikan bahwa meskipun terdapat variasi tingkat persepsi kelelahan antar responden, pola keseluruhannya tetap berada dalam batas distribusi wajar. Kondisi ini kemungkinan dipengaruhi oleh faktor fisiologis individu, strategi pacing selama pendakian, dan adaptasi terhadap beban kerja fisik. Dengan hasil ini, RPE dapat dipertahankan sebagai variabel yang valid dalam analisis, dan selaras dengan variabel fisiologis lainnya yang juga memenuhi asumsi distribusi normal.



Gambar 4. 15 Histogram Kernel Density Estimation Distribusi Kalori

Distribusi estimasi kalori terbakar (Gambar 4.15) diperoleh dari 24 pengukuran menggunakan algoritma Huawei Health pada smartwatch Huawei Watch GT 4. Sumbu-X merepresentasikan estimasi kalori terbakar per segmen pendakian (dalam kilokalori), sedangkan sumbu-Y menunjukkan frekuensi kemunculan nilai. Balok biru vertikal pada histogram memperlihatkan jumlah data yang jatuh pada interval nilai tertentu, sementara garis lengkung biru (*Kernel Density Estimation* / KDE) menampilkan bentuk distribusi data secara kontinu.

Pola distribusi memperlihatkan bentuk yang relatif normal, meskipun sedikit condong ke kanan (*right-skewed*), dengan konsentrasi nilai pada kisaran 250–300 kkal. Nilai p hasil uji Shapiro–Wilk sebesar 0,7459 ($> 0,05$) mengindikasikan bahwa distribusi data tidak menyimpang secara signifikan dari distribusi normal, sehingga layak digunakan dalam uji parametrik. Secara akademik, sebaran ini menunjukkan bahwa kebutuhan energi antar partisipan relatif homogen, dipengaruhi oleh kesamaan rute, medan, dan durasi pendakian.



Gambar 4. 16 Histogram Kernel Density Estimation Distribusi BPM

Distribusi rata-rata detak jantung (BPM) (Gambar 4.16) diperoleh dari 24 pengukuran per segmen menggunakan sensor optik smartwatch Huawei Watch GT 4. Sumbu-X pada histogram menunjukkan nilai rata-rata BPM, sedangkan sumbu-Y menggambarkan frekuensi kemunculan nilai tersebut. Balok biru vertikal merepresentasikan jumlah data yang masuk ke dalam rentang nilai tertentu, dan garis lengkung biru (*Kernel Density Estimation* / KDE) memberikan visualisasi pola distribusi yang lebih halus.

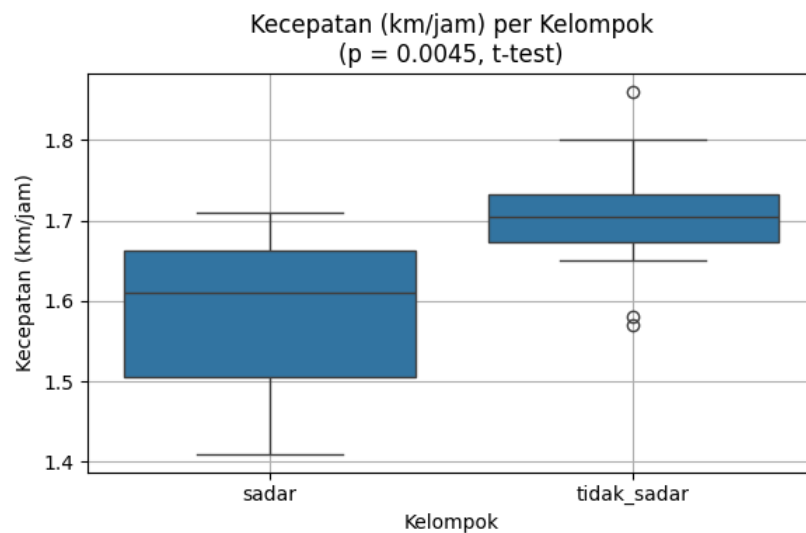
Pola distribusi menunjukkan puncak pada kisaran 145–155 bpm, dengan bentuk sebaran yang simetris. Nilai p dari uji Shapiro–Wilk sebesar 0,9582 ($> 0,05$) menandakan bahwa data sangat mendekati distribusi normal. Secara akademik, hal ini mencerminkan tingkat stabilitas fisiologis yang tinggi antar partisipan dalam merespons beban aktivitas fisik selama pendakian, yang kemungkinan besar dipengaruhi oleh kesamaan intensitas, durasi, dan kondisi lingkungan pada saat pengambilan data.

4.2 Uji Perbedaan Antar Kelompok terhadap Variabel Fisiologis

Setelah seluruh variabel dinyatakan memenuhi asumsi normalitas, analisis dilanjutkan dengan pengujian perbedaan antar kelompok sadar dan tidak sadar penggunaan *smartwatch* terhadap tiga belas variabel fisiologis, meliputi detak jantung (BPM), saturasi oksigen (SpO_2), suhu tubuh, persepsi kelelahan (RPE), *recovery heart rate* (HR selisih), estimasi kalori terbakar, kecepatan pendakian, jumlah langkah, serta durasi aktivitas pada lima zona intensitas detak jantung (*warm-up*, *fat burn*, aerobik, anaerobik, dan *ekstrem*). Pengujian dilakukan menggunakan metode uji-t independen untuk mengevaluasi pengaruh kesadaran pemantauan fisiologis terhadap respons tubuh selama pendakian.

4.2.1 Perbandingan Kecepatan Antar Kelompok

Uji-t independen terhadap variabel kecepatan pendakian menunjukkan adanya perbedaan yang signifikan antara kelompok sadar dan kelompok tidak sadar penggunaan *smartwatch*. Berdasarkan hasil pengujian, diperoleh nilai p sebesar 0,0045. Karena nilai $p < \alpha$ ($\alpha = 0,05$), maka hipotesis nol (H_0), yang menyatakan tidak terdapat perbedaan kecepatan antara kedua kelompok, ditolak. Dalam konteks analisis uji-t, signifikansi ini menunjukkan adanya pengaruh nyata dari faktor kesadaran penggunaan *smartwatch* terhadap kecepatan pendakian subjek.



Gambar 4. 17 Boxplot Distribusi Kecepatan Pendakian pada Kelompok Sadar dan Tidak Sadar

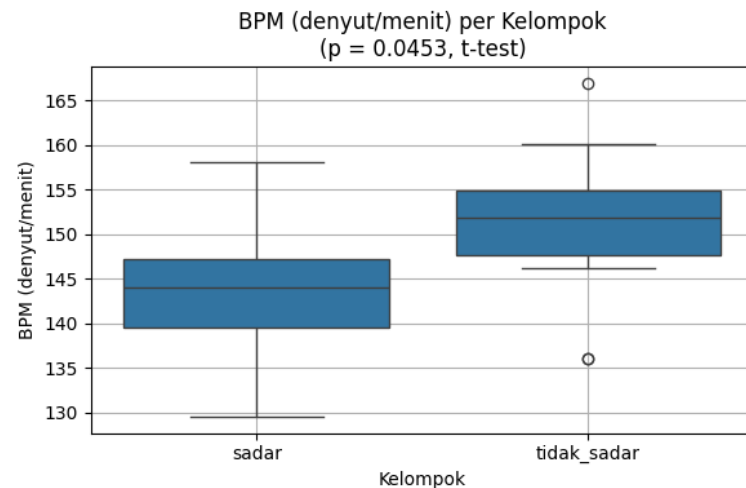
Visualisasi distribusi kecepatan pendakian pada Gambar 4.17 memperlihatkan pola perbedaan yang mendukung hasil statistik tersebut. Pada Gambar 4.17, sumbu horizontal

merepresentasikan kategori kelompok sadar dan tidak sadar, sedangkan sumbu vertikal menunjukkan nilai kecepatan pendakian. Boxplot memperlihatkan bahwa median kecepatan kelompok tidak sadar lebih tinggi, dengan rentang interkuartil yang sempit, menandakan konsistensi kecepatan antar subjek dalam kelompok ini. Sebaliknya, kelompok sadar menunjukkan sebaran kecepatan yang lebih luas dengan median yang lebih rendah, mengindikasikan adanya variasi pengaturan intensitas antar individu. Visualisasi ini merupakan hasil dari kode program uji perbedaan yang ditampilkan pada Gambar 3.6.

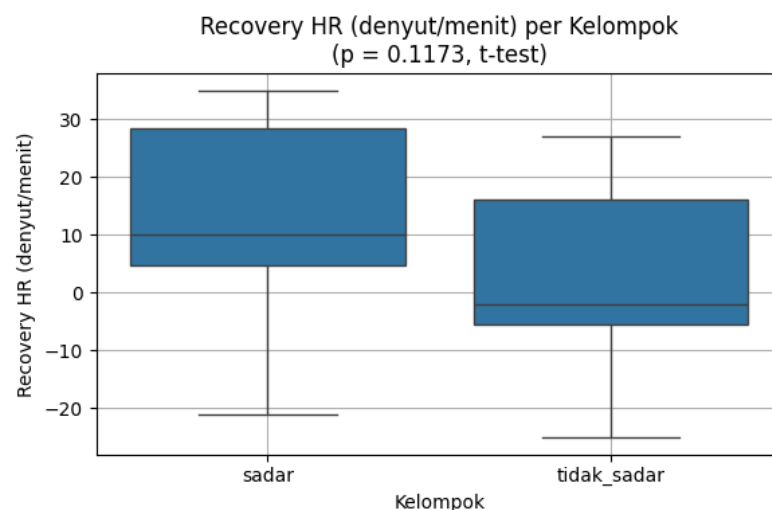
Distribusi kecepatan yang lebih sempit pada kelompok tidak sadar dapat diinterpretasikan sebagai kecenderungan mempertahankan intensitas aktivitas secara konstan tanpa melakukan penyesuaian berdasarkan sinyal fisiologis internal. Sebaliknya, variasi kecepatan yang lebih besar pada kelompok sadar menunjukkan adanya adaptasi dinamis terhadap kondisi tubuh selama aktivitas. Perbedaan ini mencerminkan bahwa subjek yang menyadari keberadaan informasi fisiologis *real-time*, seperti indikator zona detak jantung dan notifikasi pada *smartwatch*, lebih responsif dalam mengatur intensitas aktivitasnya sesuai dengan kondisi fisiologis aktual. variabel kecepatan pendakian menunjukkan bahwa penggunaan *smartwatch* berkontribusi dalam membentuk perilaku pengaturan intensitas yang lebih fleksibel dan adaptif.

4.2.2 Perbandingan Respons Kardiovaskular: BPM dan Recovery HR

Uji-t independen terhadap variabel detak jantung (BPM) menunjukkan adanya perbedaan yang signifikan antara kelompok sadar dan kelompok tidak sadar penggunaan *smartwatch*. Berdasarkan hasil pengujian, diperoleh nilai p sebesar 0,0453. Karena nilai $p < \alpha$ ($\alpha = 0,05$), maka hipotesis nol (H_0), yang menyatakan tidak terdapat perbedaan BPM antara kedua kelompok, ditolak. Sementara itu, pada variabel *Recovery HR* Selisih, nilai p sebesar 0,1173 $> \alpha$, sehingga hipotesis nol tidak dapat ditolak, menunjukkan bahwa tidak terdapat perbedaan signifikan secara statistik antara kelompok sadar dan tidak sadar dalam hal pemulihan denyut jantung.



Gambar 4. 18 Boxplot Distribusi Detak Jantung (BPM) pada Kelompok Sadar dan Tidak Sadar



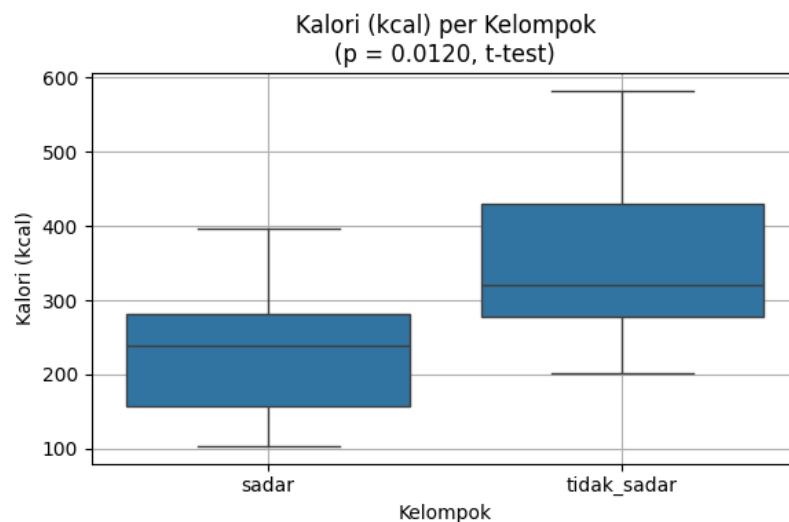
Gambar 4. 19 Boxplot Distribusi *Recovery Heart Rate* Selisih pada Kelompok Sadar dan Tidak Sadar

Visualisasi pada Gambar 4.18, yang menggambarkan distribusi BPM, memperlihatkan bahwa kelompok tidak sadar memiliki median BPM yang lebih tinggi dibandingkan kelompok sadar. Rentang distribusi nilai pada kelompok tidak sadar juga tampak lebih lebar dengan kehadiran beberapa nilai ekstrem di atas kisaran normal, mengindikasikan adanya fluktuasi denyut jantung yang lebih besar di antara subjek. Sebaliknya, kelompok sadar menunjukkan sebaran BPM yang lebih terkonsentrasi di sekitar median yang lebih rendah, mencerminkan kontrol intensitas aktivitas yang lebih konsisten. Sementara itu, Gambar 4.19 yang memperlihatkan distribusi *Recovery HR* Selisih menunjukkan bahwa meskipun tidak

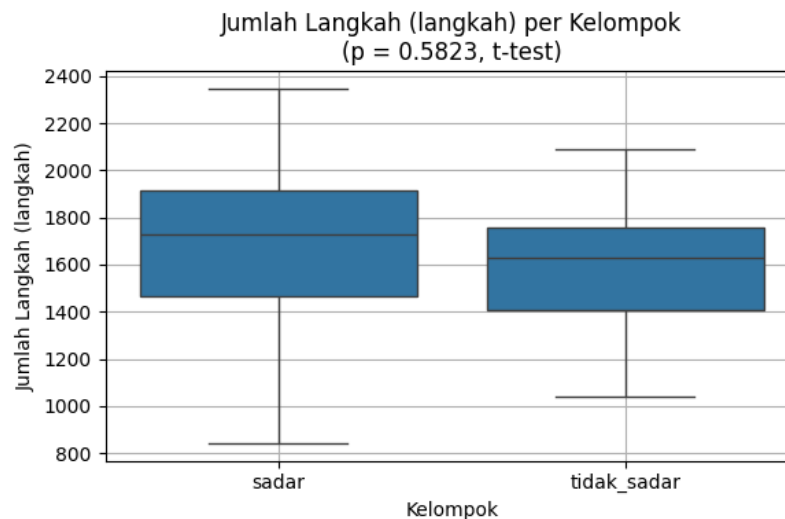
signifikan secara statistik, terdapat kecenderungan median pemulihan denyut jantung yang lebih baik pada kelompok sadar, dengan variasi antar individu yang lebih besar dibandingkan kelompok tidak sadar. Rentang data yang lebih lebar pada kelompok sadar ini mengisyaratkan adanya respons pemulihan yang beragam, mencerminkan adaptasi fisiologis yang lebih dinamis terhadap fase istirahat pasca-aktivitas. Visualisasi pada kedua gambar ini merupakan hasil dari analisis perbedaan dua kelompok yang diimplementasikan melalui kode program pada Gambar 3.6.

4.2.3 Perbandingan Respons fisiologis : Langkah dan Kalori terbakar

Analisis uji-t independen terhadap variabel kalori terbakar menghasilkan nilai p sebesar 0,0120. Karena nilai $p < \alpha$ ($\alpha = 0,05$), maka hipotesis nol (H_0), yang menyatakan tidak terdapat perbedaan pengeluaran energi antara kelompok sadar dan tidak sadar, ditolak. Sementara itu, pada variabel jumlah langkah, diperoleh nilai p sebesar 0,5823, di mana $p > \alpha$, sehingga hipotesis nol tidak dapat ditolak dan disimpulkan bahwa tidak terdapat perbedaan jumlah langkah yang signifikan antar kelompok. Visualisasi distribusi kedua variabel ini disajikan pada Gambar 4.20 dan Gambar 4.21.



Gambar 4. 20 Boxplot Distribusi Kalori Terbakar pada Kelompok Sadar dan Tidak Sadar



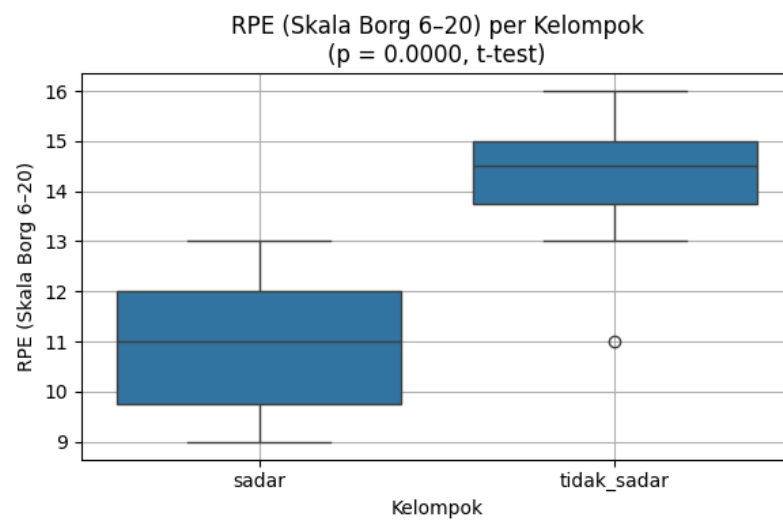
Gambar 4. 21 Boxplot Distribusi Jumlah Langkah pada Kelompok Sadar dan Tidak Sadar

Visualisasi pada Gambar 4.20, menunjukkan bahwa kelompok tidak sadar memiliki median kalori terbakar yang lebih tinggi dibandingkan kelompok sadar. Rentang distribusi pada kelompok tidak sadar juga tampak lebih lebar, dengan nilai-nilai outlier yang lebih ekstrem, mengindikasikan variasi besar dalam total pengeluaran energi antar subjek. Sebaliknya, kelompok sadar memperlihatkan distribusi kalori yang lebih terkonsentrasi di sekitar median yang lebih rendah, menunjukkan pengelolaan pengeluaran energi yang lebih konsisten. Pada Gambar 4.21, distribusi jumlah langkah antara kedua kelompok tampak serupa, dengan median dan rentang interkuartil yang saling tumpang tindih, menguatkan hasil statistik bahwa tidak ada perbedaan signifikan dalam volume aktivitas mekanik yang dilakukan. Visualisasi keduanya merupakan output dari prosedur analisis statistik dua kelompok yang telah disusun dalam kode program pada Gambar 3.6.

Integrasi hasil analisis ini memperlihatkan bahwa perbedaan kalori terbakar tidak disebabkan oleh perbedaan jumlah langkah, melainkan berkaitan dengan faktor intensitas aktivitas per langkah yang dilakukan. Meskipun volume gerakan setara, kelompok tidak sadar membakar lebih banyak energi, mengindikasikan bahwa mereka mempertahankan ritme atau intensitas aktivitas yang lebih tinggi dan kurang terkontrol dibandingkan kelompok sadar. Temuan ini mencerminkan bahwa keberadaan pemantauan fisiologis *real-time* berasosiasi dengan pengelolaan energi yang lebih terstruktur, di mana subjek kelompok sadar mampu mengoptimalkan intensitas internal mereka tanpa mengurangi total volume langkah yang diambil.

4.2.4 Perbandingan Persepsi Kelelahan (RPE) Antar Kelompok

Analisis uji-t independen terhadap variabel persepsi kelelahan (RPE) menunjukkan perbedaan yang sangat signifikan antara kelompok sadar dan kelompok tidak sadar penggunaan *smartwatch*. Berdasarkan hasil pengujian, diperoleh nilai p sebesar 0,0000. Karena nilai $p < \alpha$ ($\alpha = 0,05$), maka hipotesis nol (H_0), yang menyatakan tidak terdapat perbedaan persepsi kelelahan antara kedua kelompok, ditolak. Ini mengindikasikan bahwa terdapat perbedaan dalam persepsi subjektif terhadap kelelahan antara kelompok sadar dan tidak sadar penggunaan *smartwatch*.

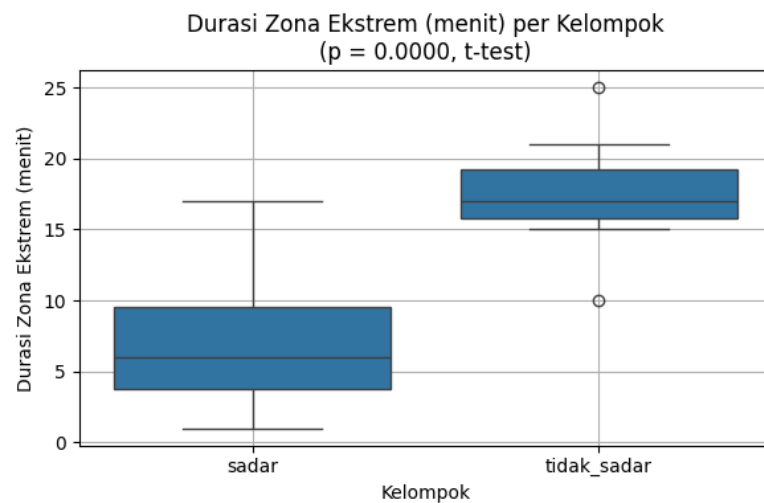


Gambar 4. 22 Boxplot Distribusi Skor Persepsi Kelelahan (RPE) pada Kelompok Sadar dan Tidak Sadar

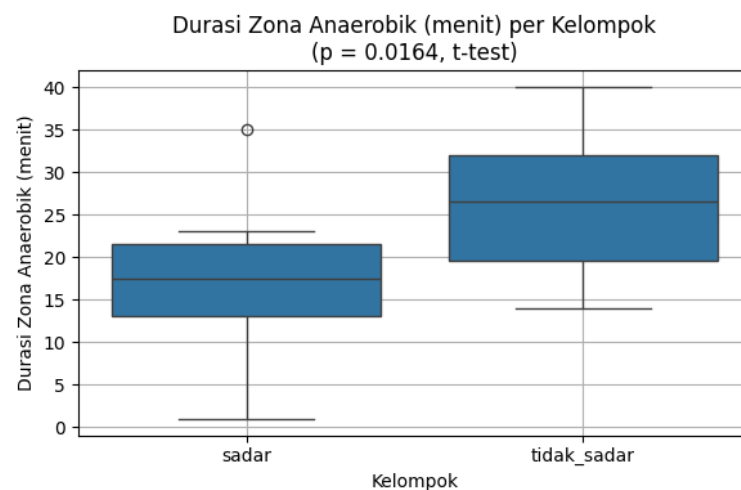
Visualisasi pada Gambar 4.22 menunjukkan bahwa median skor RPE kelompok tidak sadar lebih tinggi dibandingkan kelompok sadar. Boxplot memperlihatkan bahwa sebaran data pada kelompok tidak sadar lebih sempit dan terkonsentrasi pada tingkat kelelahan yang lebih berat, sementara kelompok sadar menunjukkan median RPE lebih rendah dengan variasi sebaran yang lebih luas. Pola ini menunjukkan bahwa subjek kelompok sadar memiliki pengalaman kelelahan yang lebih beragam, dengan kecenderungan tingkat kelelahan subjektif yang lebih rendah secara keseluruhan. Dengan demikian, data ini menunjukkan bahwa pengelolaan persepsi kelelahan selama pendakian tidak hanya dipengaruhi oleh beban mekanik semata, melainkan juga oleh kemampuan pengguna dalam memanfaatkan informasi fisiologis untuk mengatur intensitas subjektif secara lebih adaptif. Grafik ini dihasilkan dari proses analisis menggunakan kode program yang telah dijelaskan pada Gambar 3.6.

4.2.5 Perbandingan Distribusi Durasi Zona Detak Jantung

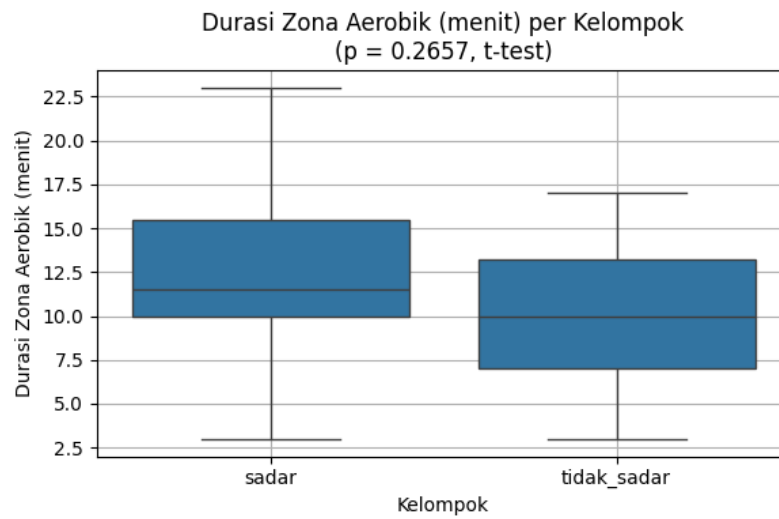
Analisis uji-t independen terhadap distribusi durasi zona detak jantung menunjukkan variasi karakteristik intensitas aktivitas antara kelompok sadar dan tidak sadar penggunaan *smartwatch*. Pada zona ekstrem dan anaerobik, diperoleh nilai p sebesar 0,0000 dan 0,0164, yang keduanya lebih kecil dari α ($\alpha = 0,05$), sehingga hipotesis nol (H_0) ditolak. Ini mengindikasikan bahwa terdapat perbedaan yang signifikan dalam durasi aktivitas pada kedua zona tersebut antara kelompok sadar dan tidak sadar. Sebaliknya, pada zona aerobik, fat burn, dan warm-up, diperoleh nilai $p > 0,05$, sehingga hipotesis nol tidak dapat ditolak dan disimpulkan bahwa tidak terdapat perbedaan bermakna pada ketiga zona ini.



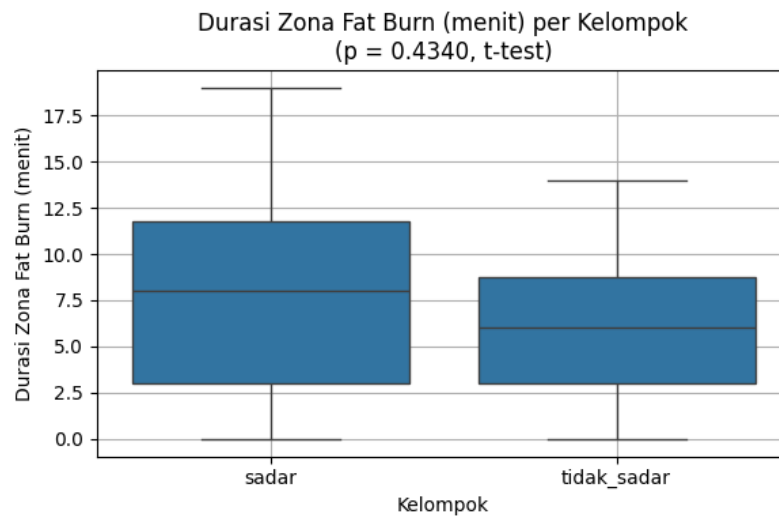
Gambar 4. 23 Boxplot Distribusi Durasi Aktivitas di Zona Detak Jantung Ekstrem



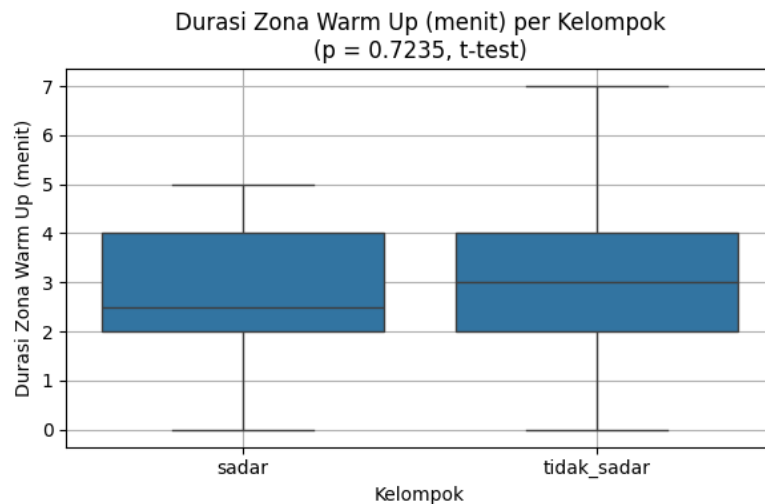
Gambar 4. 24 Boxplot Distribusi Durasi Aktivitas di Zona Detak Jantung Anaerobik



Gambar 4. 25 Boxplot Distribusi Durasi Aktivitas di Zona Detak Jantung Aerobik



Gambar 4. 26 Boxplot Distribusi Durasi Aktivitas di Zona Detak Jantung Fat Burn



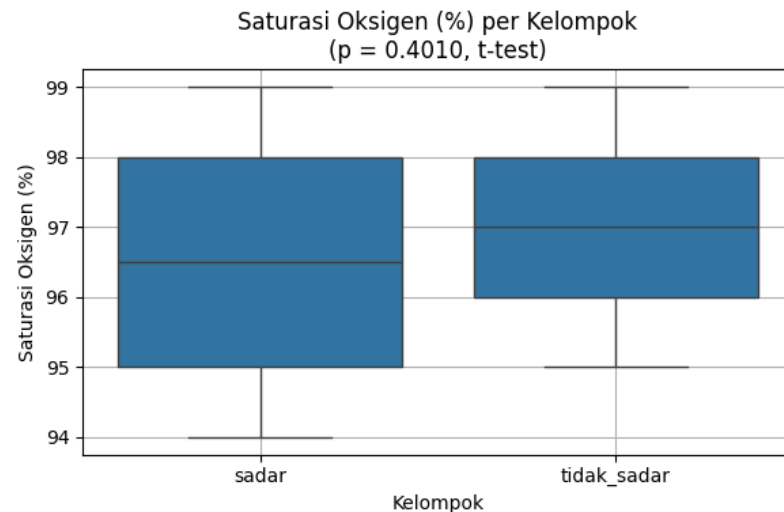
Gambar 4. 27 Boxplot Distribusi Durasi Aktivitas di Zona Detak Jantung Warm-Up

Visualisasi pada Gambar 4.23 dan Gambar 4.24 memperlihatkan bahwa kelompok tidak sadar menghabiskan durasi yang lebih panjang dalam zona ekstrem dan anaerobik, ditunjukkan dengan median yang lebih tinggi serta rentang distribusi yang lebih lebar dibandingkan kelompok sadar. Pada zona aerobik dan fat burn (Gambar 4.25 dan Gambar 4.26), kelompok sadar menunjukkan kecenderungan memiliki median durasi yang lebih tinggi, meskipun perbedaan ini tidak signifikan secara statistik. Visualisasi pada Gambar 4.27 untuk zona warm-up memperlihatkan distribusi yang relatif serupa antara kedua kelompok, dengan sebaran median yang tumpang tindih. Pola distribusi ini memperlihatkan bahwa kelompok tidak sadar cenderung mempertahankan aktivitas dalam intensitas fisiologis yang lebih tinggi dan berisiko terhadap stres kardiovaskular, sedangkan kelompok sadar lebih konsisten mempertahankan aktivitas di zona yang lebih moderat dan fisiologis aman. Seluruh visualisasi ini dihasilkan dari analisis perbandingan dua kelompok yang dijalankan melalui kode program pada Gambar 3.6.

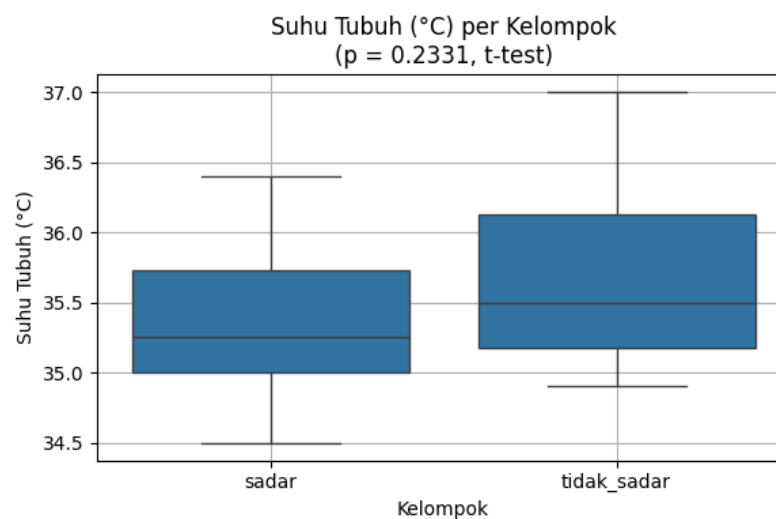
4.2.6 Perbandingan Saturasi Oksigen (SpO₂) Antar Kelompok

Analisis uji-t independen terhadap variabel saturasi oksigen (SpO₂) dan suhu tubuh menunjukkan tidak adanya perbedaan signifikan antara kelompok sadar dan tidak sadar penggunaan *smartwatch*. Pada variabel SpO₂, diperoleh nilai p sebesar 0,4010, dan pada variabel suhu tubuh, diperoleh nilai p sebesar 0,2331. Karena kedua nilai $p > \alpha$ ($\alpha = 0,05$), maka hipotesis nol (H_0) tidak dapat ditolak. Hal ini mengindikasikan bahwa tidak terdapat perbedaan yang bermakna secara statistik untuk kedua variabel tersebut antara kelompok sadar dan tidak

sadar. Visualisasi distribusi kedua variabel ini dapat dilihat pada Gambar 4.28 dan Gambar 4.29.



Gambar 4. 28 Boxplot Distribusi Saturasi Oksigen (SpO_2) pada Kelompok Sadar dan Tidak Sadar



Gambar 4. 29 Boxplot Distribusi Suhu Tubuh pada Kelompok Sadar dan Tidak Sadar

Visualisasi pada Gambar 4.28 memperlihatkan bahwa median SpO_2 antara kedua kelompok tampak serupa, dengan distribusi yang sempit dan konsisten berada dalam rentang nilai normatif saturasi oksigen. Begitu pula pada Gambar 4.29, median suhu tubuh kelompok sadar dan tidak sadar menunjukkan kesamaan yang kuat, dengan sebaran data yang relatif stabil dan tanpa anomali mencolok. Kedua visualisasi ini mengindikasikan bahwa kestabilan

homeostasis vital seperti saturasi oksigen dan suhu tubuh relatif terjaga selama aktivitas pendakian ringan hingga sedang yang dilakukan dalam penelitian ini. Grafik-grafik ini merupakan hasil dari uji perbedaan antar kelompok yang dianalisis menggunakan kode program pada Gambar 3.6.

Berdasarkan hasil ini, dapat disimpulkan bahwa penggunaan *smartwatch* tidak menghasilkan perbedaan signifikan dalam parameter homeostasis vital yang diukur, yaitu saturasi oksigen dan suhu tubuh. Stabilitas yang teramati ini juga perlu dikaitkan dengan karakteristik lingkungan penelitian, di mana elevasi Gunung Andong via Gogik yang relatif moderat tidak menciptakan stres hipoksia yang cukup besar untuk mempengaruhi saturasi oksigen secara substansial. Selain itu, faktor teknis dalam pengukuran saturasi oksigen dan suhu tubuh menggunakan *smartwatch*, seperti kebutuhan pengencangan strap, stabilitas posisi pergelangan tangan, dan gangguan akibat keringat, dapat mempengaruhi ketepatan pembacaan suhu tubuh secara *real-time*. Dengan demikian, dalam konteks aktivitas ringan hingga sedang ini, data menunjukkan bahwa pengelolaan intensitas aktivitas melalui monitoring *smartwatch* lebih nyata dibandingkan dengan pengaruhnya terhadap fluktuasi parameter homeostasis dasar.

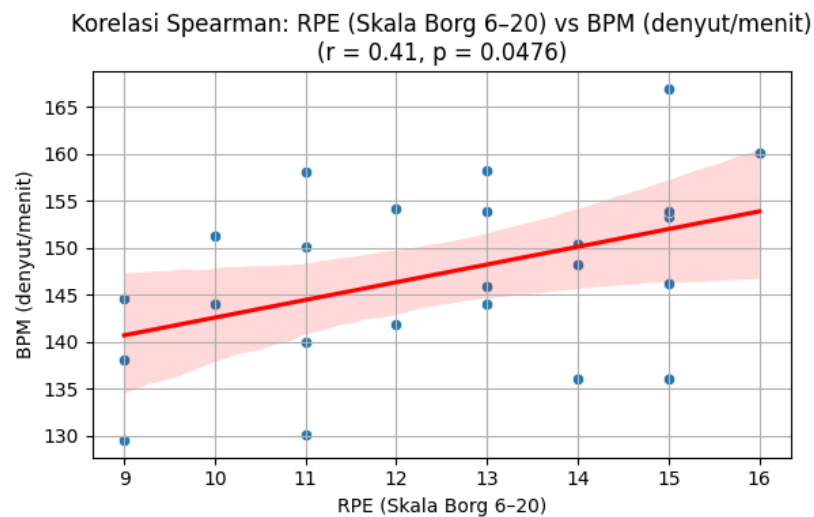
4.3 Uji Korelasi Antar Kelompok Berbasis Spearman

Setelah melakukan analisis perbandingan antar kelompok, langkah selanjutnya adalah mengeksplorasi hubungan antarvariabel untuk mengungkap dinamika fisiologis dan persepsi aktivitas pendakian secara lebih mendalam. Pembahasan dalam subbab ini dikelompokkan berdasarkan hubungan variabel yang relevan secara statistik maupun fisiologis, mencakup baik temuan signifikan maupun tidak signifikan, dengan pendekatan reflektif dan kritis. Pendekatan ini bertujuan memperkaya pemahaman tentang penggunaan *smartwatch*, tidak hanya sebagai alat monitoring objektif, tetapi juga dalam konteks adaptasi fisiologis dan psikologis pengguna selama aktivitas ketahanan.

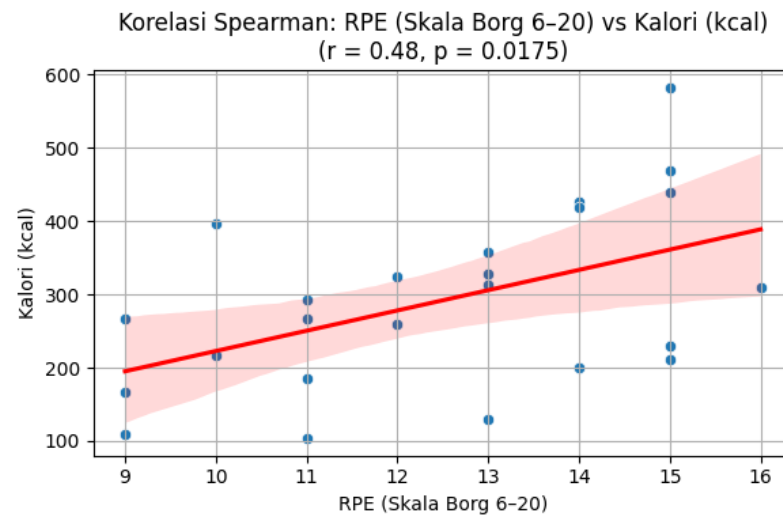
4.3.1 Hubungan Kecepatan terhadap Beban Fisiologis (BPM)

Analisis korelasi Spearman menunjukkan adanya hubungan positif yang signifikan antara persepsi kelelahan (RPE) dengan detak jantung (BPM) dan estimasi kalori terbakar. Pada hubungan RPE dengan BPM, diperoleh koefisien korelasi (r) sebesar 0,41 dengan nilai signifikansi p sebesar 0,0476, sementara pada hubungan RPE dengan Kalori tercatat koefisien korelasi (r) sebesar 0,48 dengan p sebesar 0,0175. Karena kedua nilai p lebih kecil dari ambang batas $\alpha = 0,05$, maka secara statistik dapat dinyatakan bahwa terdapat korelasi yang signifikan

antara RPE dengan kedua indikator fisiologis tersebut. Temuan ini mengindikasikan bahwa peningkatan intensitas fisiologis aktivitas secara objektif berkaitan erat dengan persepsi kelelahan subjektif yang dirasakan oleh subjek.



Gambar 4. 30 Grafik Scatter Plot Hubungan Persepsi Kelelahan (RPE) terhadap Detak Jantung (BPM)



Gambar 4. 31 Grafik Scatter Plot Hubungan Persepsi Kelelahan (RPE) terhadap Kalori Terbakar

Pada Gambar 4.30, grafik scatterplot memperlihatkan pola hubungan positif antara RPE dan BPM, di mana titik-titik data menunjukkan kecenderungan membentuk garis diagonal menaik dari kiri bawah ke kanan atas. Artinya, semakin tinggi RPE yang dilaporkan subjek,

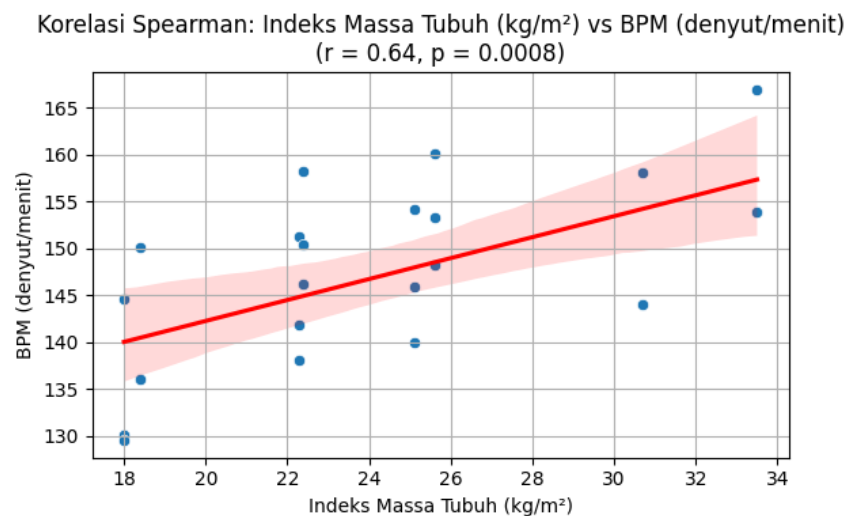
semakin tinggi pula BPM yang tercatat, meskipun terdapat sebaran titik yang cukup luas di sekitar garis imajiner tersebut, mencerminkan korelasi yang moderat. Pada Gambar 4.31, pola serupa tampak pada hubungan antara RPE dan Kalori, di mana peningkatan RPE diikuti dengan peningkatan estimasi kalori yang terbakar. Kerapatan titik yang tidak terlalu rapat tetapi tetap mengikuti pola arah naik ini memperkuat interpretasi bahwa hubungan antarvariabel tidak bersifat absolut, namun cukup konsisten untuk menunjukkan keterkaitan fungsional. Tidak ditemukan outlier ekstrim yang mendistorsi pola umum, memperkuat validitas hubungan moderat yang diamati. Kedua scatterplot ini dihasilkan dari proses analisis korelasi Spearman, yang dijalankan menggunakan kode program pada Gambar 3.7.

Pola hubungan yang teridentifikasi dalam hasil korelasi menimbulkan pertanyaan reflektif terkait sumber utama peningkatan persepsi kelelahan: apakah peningkatan ini sepenuhnya merupakan refleksi dari peningkatan beban fisiologis objektif, atau adakah kontribusi faktor psikologis seperti motivasi, ekspektasi pribadi, dan tingkat toleransi individu terhadap ketidaknyamanan yang turut membentuk persepsi tersebut. Fakta bahwa nilai koefisien korelasi yang diperoleh bersifat moderat dan tidak mendekati absolut mengisyaratkan bahwa kelelahan bukanlah respons linear sederhana terhadap beban fisiologis, melainkan merupakan konstruk multidimensional yang melibatkan interaksi kompleks antara faktor fisiologis dan kognitif. Sebaran data yang tidak sepenuhnya rapat terhadap garis regresi memperkuat interpretasi ini, menunjukkan adanya variabilitas subjektif yang tidak sepenuhnya dapat dijelaskan oleh indikator fisiologis. Dengan demikian, meskipun *smartwatch* mampu merekam perubahan fisiologis secara *real-time*, dalam memoderasi persepsi kelelahan tetap bergantung pada kapasitas pengguna untuk menginterpretasikan informasi tersebut dan mengintegrasikannya ke dalam persepsi subjektif mereka terhadap kondisi tubuh saat beraktivitas.

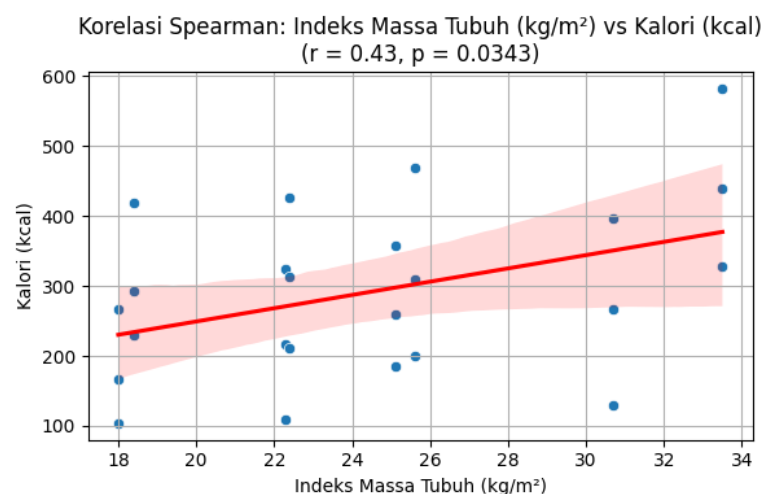
4.3.2 Hubungan Indeks Massa Tubuh (BMI) terhadap Beban Fisiologis (BPM dan Kalori)

Analisis korelasi Spearman menunjukkan adanya hubungan positif yang signifikan antara indeks massa tubuh (BMI) dengan detak jantung (BPM) serta estimasi kalori terbakar selama aktivitas pendakian. Untuk pasangan variabel BMI dan BPM, diperoleh koefisien korelasi (r) sebesar 0,636 dengan nilai signifikansi $p = 0,0008$, sedangkan untuk BMI dan Kalori, diperoleh koefisien korelasi (r) sebesar 0,433 dengan nilai $p = 0,0343$. Karena kedua nilai p berada di bawah ambang batas signifikansi $\alpha = 0,05$, maka secara statistik dapat

disimpulkan bahwa hubungan antarvariabel tersebut signifikan. Nilai r yang moderat hingga kuat pada hubungan BMI dan BPM mengindikasikan bahwa semakin tinggi indeks massa tubuh individu, semakin besar pula respons denyut jantung yang dihasilkan selama aktivitas pendakian. Visualisasi distribusi hubungan ini ditunjukkan pada Gambar 4.32 dan Gambar 4.33, di mana pola sebaran data secara umum mengikuti arah garis regresi linear positif dengan interval kepercayaan yang rapat, memperlihatkan konsistensi peningkatan BPM dan pengeluaran kalori seiring bertambahnya BMI subjek.



Gambar 4. 32 Grafik Scatter Plot Hubungan Indeks Massa Tubuh (BMI) terhadap Detak Jantung (BPM)



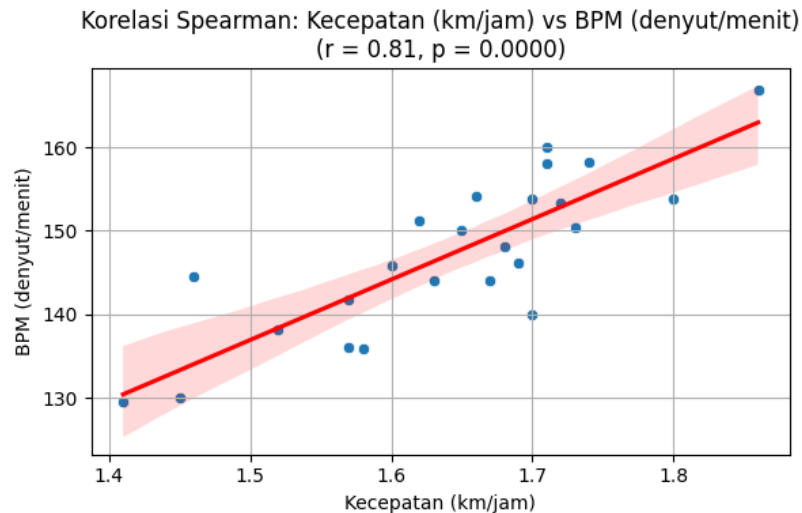
Gambar 4. 33 Grafik Scatter Plot Hubungan Indeks Massa Tubuh (BMI) terhadap Kalori Terbakar

Gambar 4.32 memperlihatkan scatterplot antara BMI dan BPM, di mana titik-titik data membentuk pola naik yang cukup jelas dari kiri bawah ke kanan atas, menunjukkan korelasi positif moderat-kuat. Sebagian besar titik-titik cenderung mengumpul sepanjang arah peningkatan, mengindikasikan bahwa subjek dengan BMI lebih tinggi cenderung memiliki BPM yang lebih tinggi pula saat mendaki. Gambar 4.33 menggambarkan hubungan antara BMI dan kalori terbakar, memperlihatkan pola serupa namun dengan sebaran data yang sedikit lebih lebar, menunjukkan bahwa peningkatan BMI juga berkaitan dengan peningkatan kebutuhan energi, meskipun tidak seteratur hubungan dengan BPM. Tidak terdapat penyimpangan ekstrem atau outlier yang mendistorsi pola umum, memperkuat interpretasi hubungan fungsional antara komposisi tubuh dan beban fisiologis. Kedua visualisasi ini berasal dari analisis korelasi yang dijalankan menggunakan kode program pada Gambar 3.7.

Pertanyaan reflektif yang muncul adalah apakah peningkatan denyut jantung dan kalori terbakar sepenuhnya disebabkan oleh massa tubuh yang lebih besar, atau juga melibatkan faktor lain seperti kapasitas aerobik dan strategi pacing individu. Sebaran data yang lebih lebar pada hubungan BMI dan Kalori menunjukkan bahwa faktor-faktor tersebut berkontribusi terhadap variabilitas respons metabolik. Dengan demikian, meskipun *smartwatch* memberikan kontribusi positif dalam mendeteksi peningkatan beban kerja kardiovaskular, interpretasi data tetap harus mempertimbangkan kondisi fisiologis individu secara lebih menyeluruh.

4.3.3 Hubungan Kecepatan terhadap Respons Kardiovaskular: Kecepatan dan BPM

Analisis korelasi Spearman menunjukkan bahwa terdapat hubungan positif yang sangat kuat antara kecepatan pendakian dan respons denyut jantung (BPM), dengan koefisien korelasi (r) sebesar 0,812 dan nilai signifikansi p sebesar 0,0000. Nilai p yang jauh lebih kecil dari tingkat signifikansi $\alpha = 0,05$ mengindikasikan bahwa hubungan ini sangat signifikan secara statistik. Selain itu, nilai r yang mendekati 1 menandakan bahwa peningkatan kecepatan hampir secara linear berkaitan dengan peningkatan BPM, mencerminkan keterkaitan fisiologis yang erat antara intensitas aktivitas mekanik dan respons kardiovaskular. Visualisasi distribusi hubungan ini disajikan pada Gambar 4.34, memperlihatkan pola hubungan positif yang kuat dengan sedikit deviasi dari garis regresi, serta interval kepercayaan yang sangat sempit sepanjang rentang observasi.



Gambar 4. 34 Grafik Scatter Plot Hubungan Kecepatan Pendakian terhadap Detak Jantung (BPM)

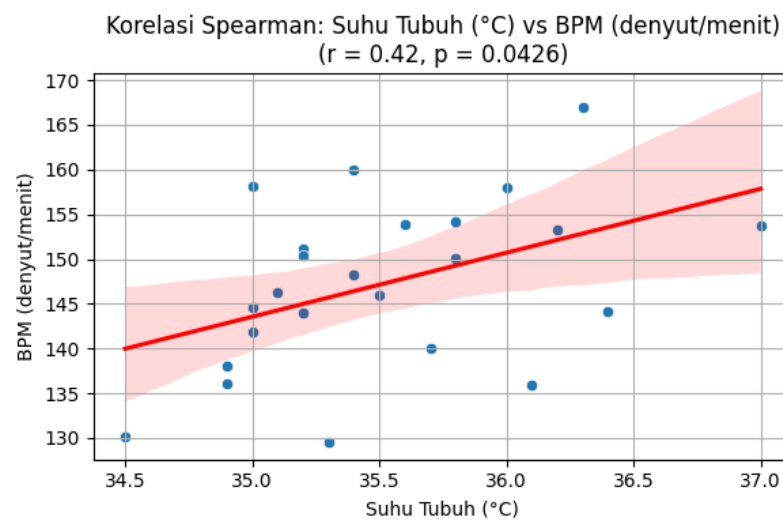
Pada Gambar 4.34, scatterplot memperlihatkan pola hubungan positif yang sangat jelas, dengan mayoritas titik-titik data terkonsentrasi mengikuti garis diagonal menaik. Semakin tinggi kecepatan pendakian, semakin tinggi pula BPM yang tercatat, dengan sedikit variabilitas di sekitar pola umum tersebut. Kerapatan titik yang tinggi di sepanjang arah korelasi menunjukkan konsistensi respons kardiovaskular terhadap perubahan kecepatan, serta memperkuat validitas kekuatan hubungan yang ditemukan secara statistik. Tidak ditemukan outlier ekstrem, memperjelas stabilitas pola hubungan ini. Grafik ini dihasilkan melalui analisis korelasi yang dilakukan menggunakan kode program pada Gambar 3.7.

Pertanyaan reflektif yang dapat diajukan ialah apakah kekuatan hubungan tersebut sepenuhnya merepresentasikan respons fisiologis murni terhadap peningkatan intensitas aktivitas, atau justru terdapat pengaruh kesadaran pengguna dalam mengatur kecepatan berdasarkan informasi yang disediakan oleh *smartwatch*. Pola distribusi data yang menunjukkan tren kontinu tanpa adanya lonjakan ekstrem atau penyimpangan besar memperkuat interpretasi bahwa perubahan denyut jantung sejalan dengan kecepatan lebih banyak didorong oleh adaptasi fisiologis alami daripada modifikasi perilaku yang disengaja.

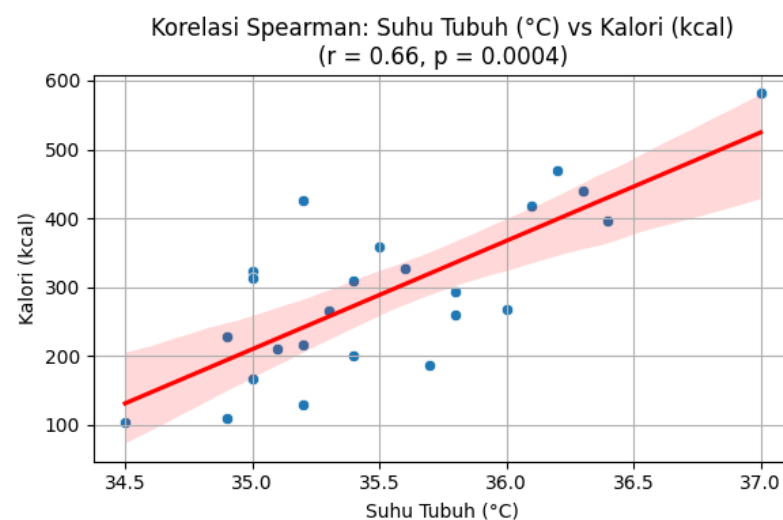
4.3.4 Hubungan Suhu Tubuh terhadap Respons Fisiologis (BPM, Kalori, dan Kecepatan)

Analisis korelasi Spearman menunjukkan bahwa terdapat hubungan positif yang signifikan antara suhu tubuh dengan detak jantung (BPM) dan estimasi kalori terbakar. Pada

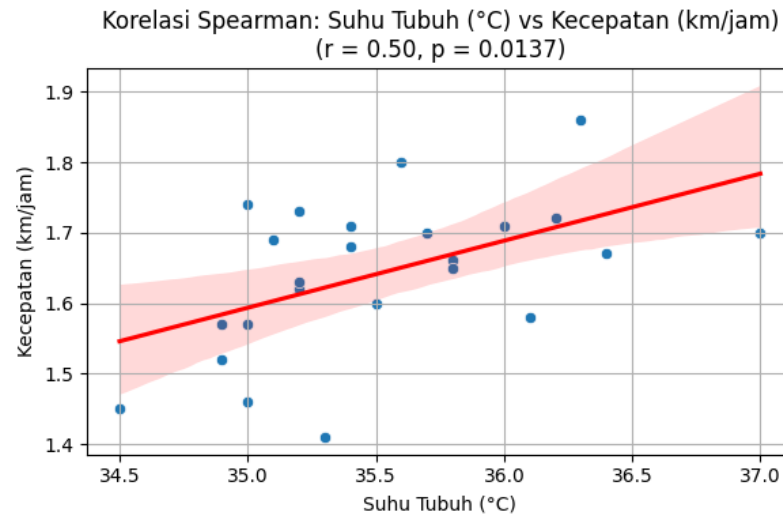
hubungan suhu tubuh dan BPM, diperoleh koefisien korelasi (r) sebesar 0,417 dengan nilai signifikansi p sebesar 0,0426. Hubungan antara suhu tubuh dan kalori terbakar menghasilkan koefisien korelasi (r) sebesar 0,662 dengan nilai p sebesar 0,0004. Sementara itu, hubungan suhu tubuh dengan kecepatan menunjukkan koefisien korelasi (r) sebesar 0,496 dengan nilai p sebesar 0,0137. Seluruh hubungan ini memiliki p -value lebih kecil dari $\alpha = 0,05$, sehingga dapat disimpulkan signifikan secara statistik. Visualisasi hubungan ditampilkan pada Gambar 4.35, Gambar 4.36, dan Gambar 4.37, yang memperlihatkan tren positif pada seluruh pasangan variabel dengan interval kepercayaan yang stabil.



Gambar 4. 35 Grafik Scatter Plot Hubungan Suhu Tubuh terhadap Detak Jantung (BPM)



Gambar 4. 36 Grafik Scatter Plot Hubungan Suhu Tubuh terhadap Kalori Terbakar



Gambar 4. 37 Grafik Scatter Plot Hubungan Suhu Tubuh terhadap Kecepatan

Pada Gambar 4.35, hubungan antara suhu tubuh dan BPM menunjukkan pola peningkatan linear yang stabil, dengan titik-titik data mengikuti garis regresi secara konsisten. Pada Gambar 4.36, hubungan antara suhu tubuh dan kalori terbakar memperlihatkan pola yang lebih kuat dan gradien regresi yang lebih curam, mencerminkan hubungan fungsional yang lebih kuat dibandingkan dengan suhu tubuh terhadap BPM. Sementara itu, Gambar 4.37 menunjukkan bahwa suhu tubuh juga berkorelasi positif dengan kecepatan, meskipun penyebaran data sedikit lebih lebar dibandingkan dua hubungan sebelumnya. Secara keseluruhan, tren visualisasi ini mendukung hasil statistik yang menunjukkan hubungan nyata antara peningkatan suhu tubuh dan peningkatan beban fisiologis maupun intensitas aktivitas. Ketiga scatterplot ini merupakan output dari kode program korelasi yang dijalankan pada Gambar 3.7.

Pertanyaan reflektif yang dapat diajukan adalah apakah peningkatan suhu tubuh yang teramati sepenuhnya mencerminkan peningkatan beban fisiologis, atau terdapat faktor lain seperti kondisi lingkungan sekitar, akurasi pengukuran perangkat, serta perbedaan mekanisme termoregulasi individu yang turut mempengaruhi hasil tersebut. Pola visualisasi yang memperlihatkan tren linier stabil dengan minimnya deviasi besar pada ketiga hubungan mendukung interpretasi bahwa perubahan suhu tubuh lebih banyak ditentukan oleh respons fisiologis tubuh terhadap peningkatan aktivitas, dibandingkan oleh pengaruh eksternal. Oleh karena itu, suhu tubuh dapat dipertimbangkan sebagai indikator fisiologis yang kredibel dalam mendeteksi beban aktivitas secara *real-time* dalam konteks pendakian. Berdasarkan temuan ini,

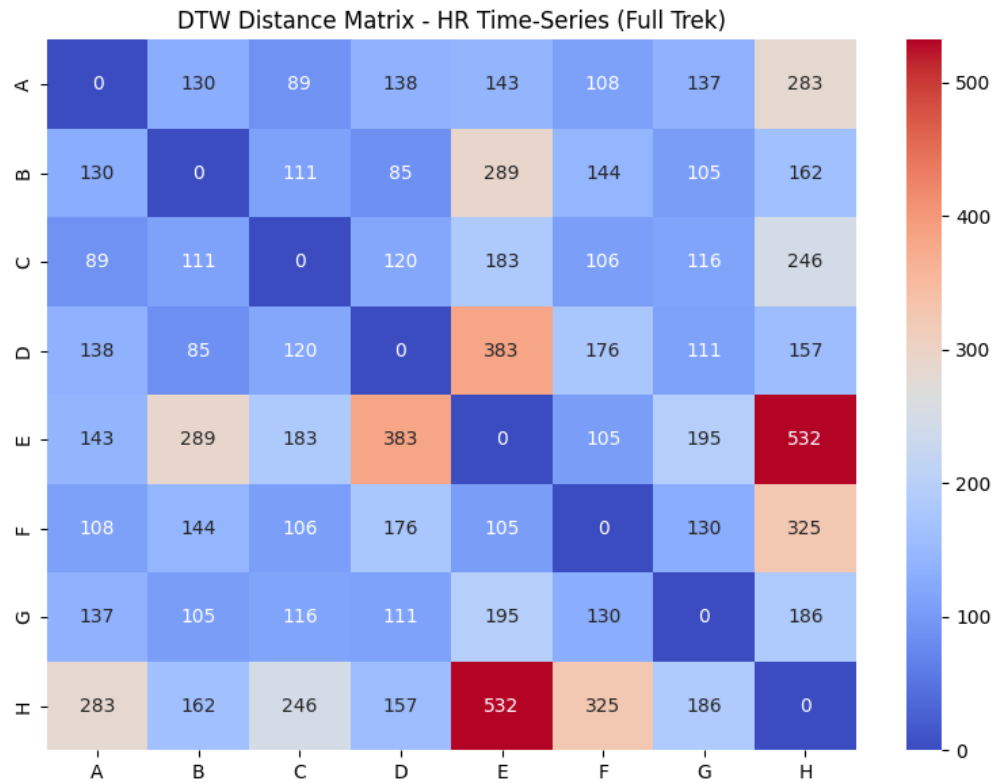
dapat disimpulkan bahwa suhu tubuh memiliki hubungan yang erat dengan peningkatan beban fisiologis, baik dalam aspek kardiovaskular, metabolik, maupun intensitas aktivitas.

4.4 Analisis Keselarasan Pola Denyut Jantung antar Subjek Menggunakan Dynamic Time Warping (DTW)

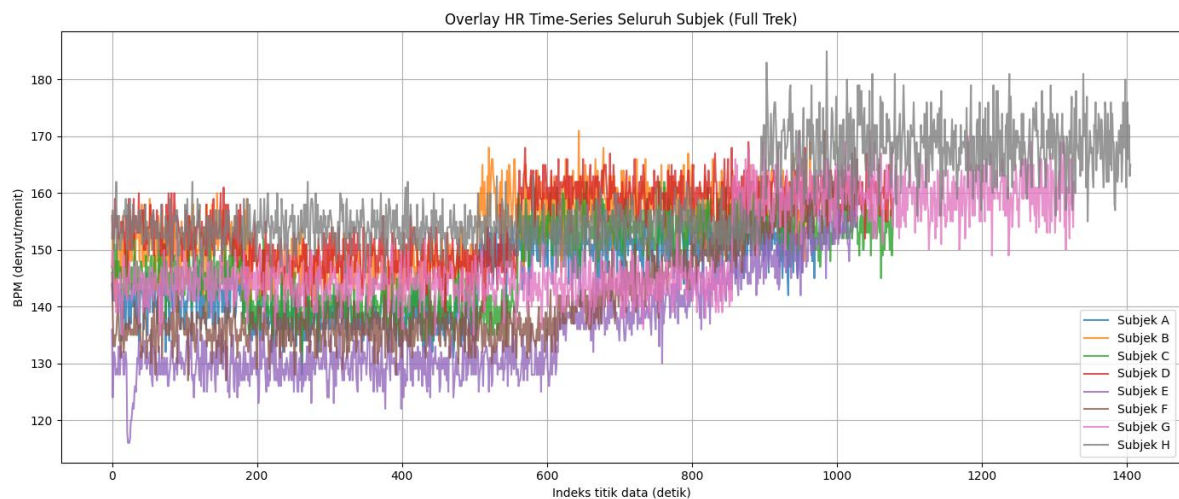
Dalam penelitian ini, salah satu pendekatan komputasional yang digunakan untuk mengkaji dinamika fisiologis antar subjek adalah *Dynamic Time Warping* (DTW). DTW merupakan metode yang memungkinkan pengukuran tingkat kesamaan antar deret waktu, bahkan ketika terdapat variasi dalam kecepatan atau panjang sekuens data. Melalui analisis ini, diharapkan diperoleh gambaran mengenai homogenitas atau heterogenitas pola perubahan denyut jantung (BPM) antar subjek, serta potensi kontribusi *smartwatch* dalam mempengaruhi keselarasan fisiologis selama aktivitas pendakian.

4.4.1 Analisis Dinamika Detak Jantung Antar Subjek (DTW Full Trek)

Analisis *Dynamic Time Warping* (DTW) terhadap seluruh jalur pendakian menunjukkan adanya variasi jarak antar pola denyut jantung (BPM) antar subjek. Berdasarkan hasil yang ditampilkan pada Gambar 4.38, pasangan Subjek A dan Subjek C memiliki jarak DTW terkecil, yaitu sebesar 89, diikuti oleh pasangan Subjek F dan Subjek E dengan jarak sebesar 105. Sementara itu, jarak DTW terbesar tercatat antara Subjek E dan Subjek H sebesar 532. Temuan ini menunjukkan bahwa pola respons denyut jantung Subjek A dan Subjek C relatif serupa sepanjang trek, sedangkan Subjek E dan Subjek H menunjukkan perbedaan pola yang paling signifikan. Visualisasi *overlay* seluruh kurva denyut jantung subjek (Gambar 4.39) menunjukkan kecenderungan umum berupa peningkatan nilai BPM seiring bertambahnya indeks waktu, meskipun terdapat variasi individual dalam amplitudo serta kestabilan fluktuasi. Kedua grafik ini merupakan hasil analisis DTW yang dijalankan menggunakan kode program pada Gambar 3.8.



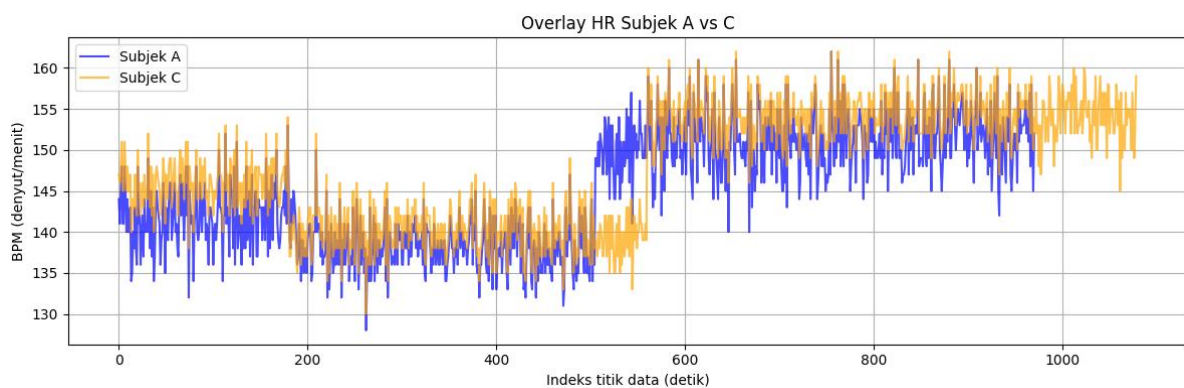
Gambar 4. 38 Grafik *Heatmap* Matriks Jarak *Dynamic Time Warping* (DTW) Data HR *Full Trek* Seluruh Subjek



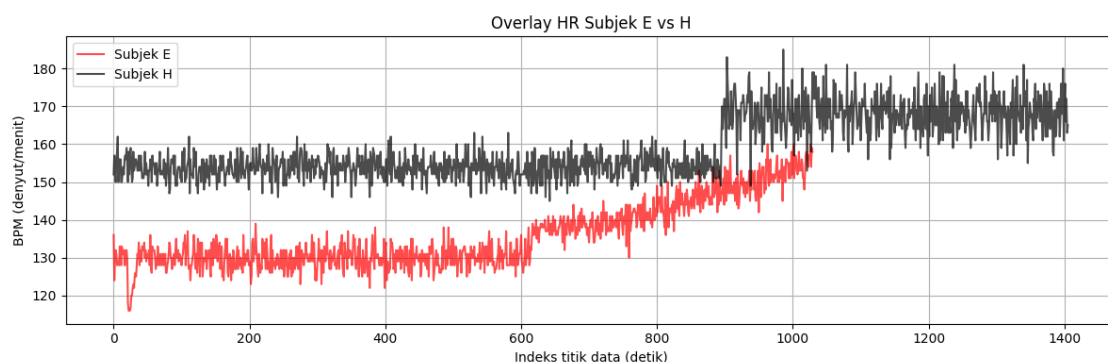
Gambar 4. 39 Grafik *Overlay* Deret Waktu HR Seluruh Subjek pada *Full Trek*

Perbandingan visualisasi antara dua pasangan subjek dengan jarak DTW ekstrim memperjelas karakteristik adaptasi ini. Gambar 4.40 memperlihatkan bahwa Subjek A dan Subjek C mempertahankan fluktuasi BPM yang konsisten, dengan rentang denyut jantung berkisar antara 135 hingga 150 BPM, dan perubahan nilai yang berlangsung secara bertahap

tanpa lonjakan ekstrem. Sebaliknya, Gambar 4.41 memperlihatkan bahwa Subjek H memulai aktivitas pendakian dengan denyut jantung tinggi, yaitu sekitar 155 BPM, yang kemudian mengalami peningkatan lebih lanjut hingga mencapai sekitar 175 BPM pada indeks waktu mendekati 1000. Subjek E, di sisi lain, menunjukkan tren peningkatan denyut jantung yang lebih gradual, dari sekitar 130 BPM menjadi 160 BPM, dengan laju perubahan yang lebih lambat dibandingkan Subjek H. Kedua grafik ini merupakan hasil perbandingan dua subjek menggunakan analisis DTW yang dikodekan pada Gambar 3.9.



Gambar 4. 40 Grafik *Overlay* Deret Waktu HR pada Subjek A dan Subjek C (*Full Trek*)



Gambar 4. 41 Grafik *Overlay* Deret Waktu HR pada Subjek E dan Subjek H (*Full Trek*)

Fenomena ini menimbulkan pertanyaan reflektif: sejauh mana variasi pola adaptasi denyut jantung antar subjek dipengaruhi oleh penggunaan aktif informasi fisiologis dari *smartwatch*, dan sejauh mana hal tersebut berkaitan dengan kapasitas aerobik, strategi pacing alami, serta tingkat kelelahan yang berbeda antar individu. Visualisasi perbandingan Subjek A dan Subjek C memperlihatkan stabilitas fluktuasi BPM dalam kisaran 135 hingga 150 BPM sepanjang trek, yang menunjukkan kontrol fisiologis yang lebih efisien terhadap beban aktivitas. Sebaliknya, perbedaan yang lebih mencolok antara Subjek E dan Subjek H, khususnya lonjakan denyut

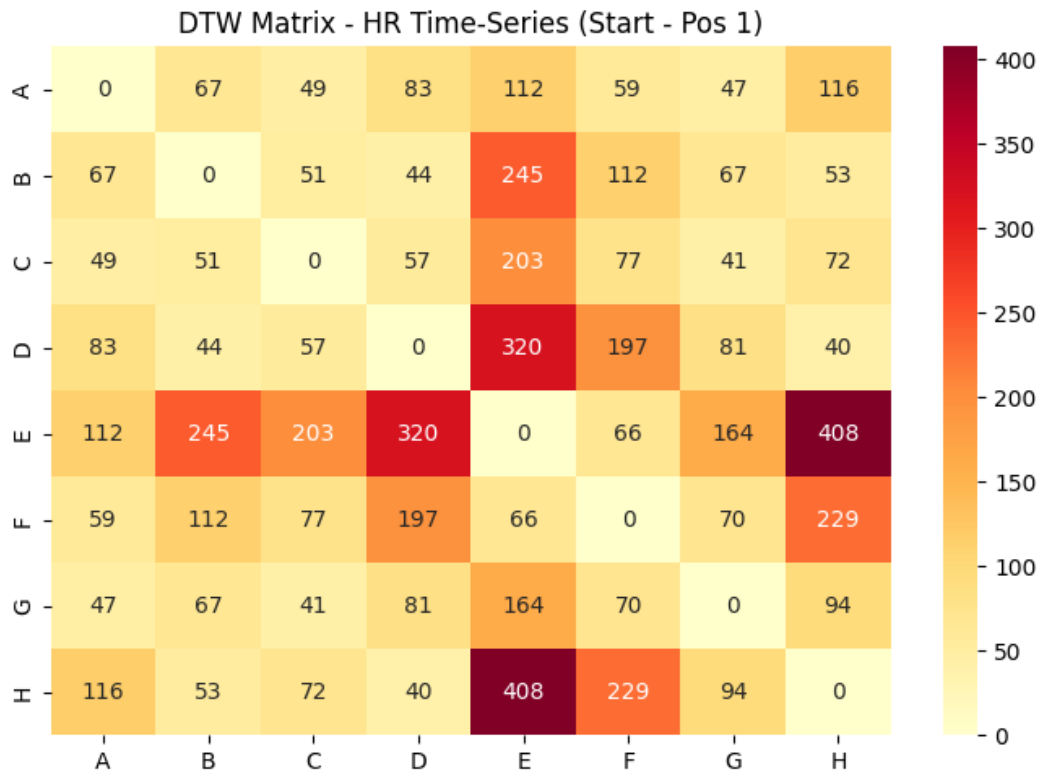
jantung Subjek H setelah indeks waktu 900, mengindikasikan adanya variasi dalam ketahanan fisiologis dan manajemen intensitas aktivitas.

Berdasarkan hasil analisis DTW Full Trek, ditemukan bahwa pola perubahan denyut jantung antar subjek selama pendakian menunjukkan perbedaan yang cukup jelas. Subjek A dan Subjek C, yang memiliki jarak DTW paling kecil, memperlihatkan pola denyut jantung yang hampir serupa, dengan fluktuasi yang stabil dan peningkatan yang bertahap sepanjang trek. Sebaliknya, Subjek E dan Subjek H, yang memiliki jarak DTW paling besar, menunjukkan perbedaan pola yang nyata, di mana Subjek H mengalami lonjakan denyut jantung yang lebih cepat dan tinggi dibandingkan Subjek E.

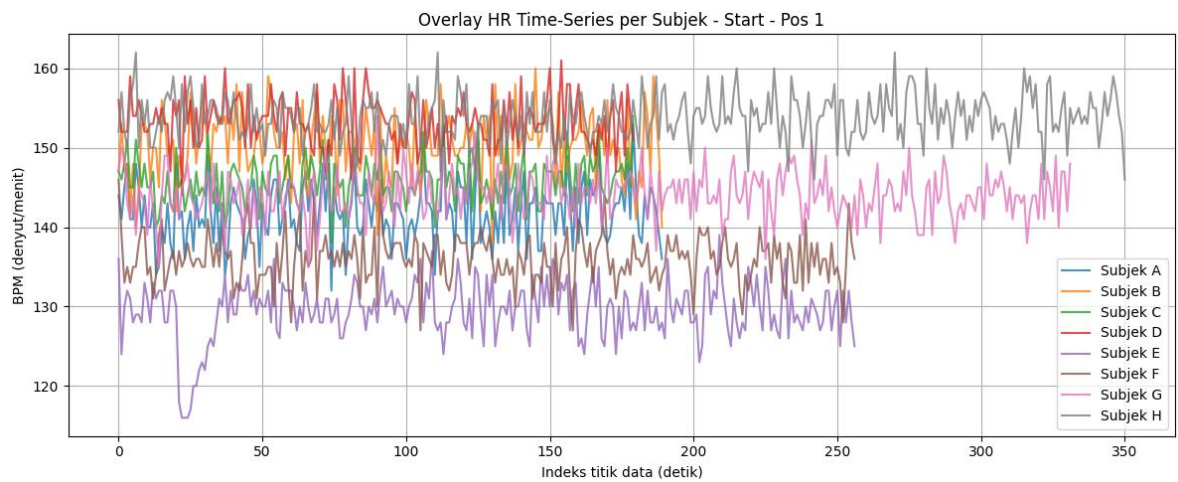
Hasil ini menunjukkan bahwa kemampuan tubuh untuk menyesuaikan diri terhadap beban aktivitas tidak sama pada setiap individu. Melalui analisis pola denyut jantung dengan DTW, dapat dilihat bahwa ada subjek yang mampu menjaga kestabilan respons fisiologisnya, sementara yang lain mengalami perubahan denyut jantung yang lebih drastis.

4.4.2 Analisis DTW pada Segmen Start–Pos 1

Analisis *Dynamic Time Warping* (DTW) pada segmen pendakian dari titik Start menuju Pos 1 memperlihatkan variasi pola denyut jantung antar subjek yang cukup nyata. Berdasarkan hasil yang ditampilkan pada Gambar 4.42, pasangan Subjek B dan Subjek D menunjukkan jarak DTW terkecil, menandakan kemiripan pola denyut jantung yang tinggi, sedangkan pasangan Subjek E dan Subjek H tercatat memiliki jarak DTW terbesar. Visualisasi *overlay* HR deret waktu per subjek pada segmen ini (Gambar 4.43) menunjukkan dinamika fluktuasi BPM yang cukup aktif, dengan rentang indeks waktu mulai dari 0 hingga 350 dan nilai BPM pada sumbu vertikal berkisar antara 120 hingga 160. Heatmap dan overlay ini merupakan output dari analisis DTW per segmen yang dijalankan menggunakan kode program pada Gambar 3.8.



Gambar 4. 42 Grafik *Heatmap* Matriks Jarak *Dynamic Time Warping* (DTW) Segmen *Start – Pos 1*



Gambar 4. 43 Grafik *Overlay* Deret Waktu HR per Subjek pada Segmen *Start –Pos 1*

Visualisasi *overlay* HR deret waktu pada Gambar 4.43 memperlihatkan dinamika denyut jantung masing-masing subjek secara lebih rinci. Sumbu horizontal (indeks waktu) berada pada rentang 0 hingga 350, sedangkan sumbu vertikal (BPM) berkisar antara 120 hingga 160. Subjek A dan Subjek C menunjukkan pola peningkatan denyut jantung yang stabil, bergerak dari

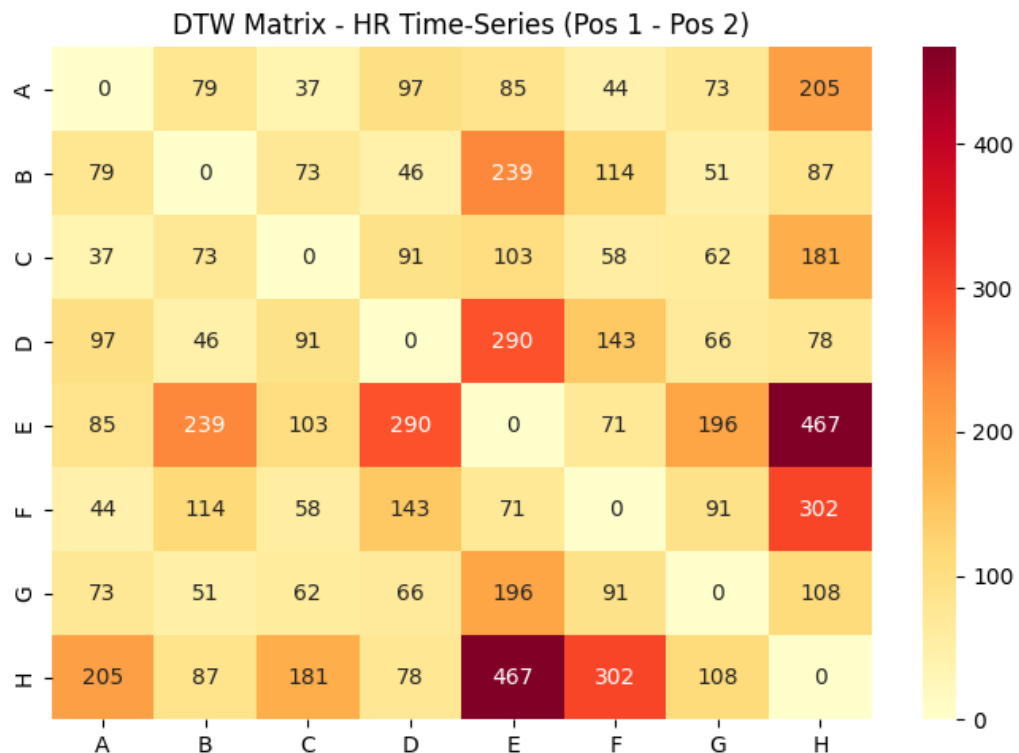
sekitar 125–130 BPM pada indeks waktu 0, menuju kisaran 140–150 BPM, tanpa mengalami lonjakan tajam. Subjek B dan Subjek D, yang mencatat jarak DTW rendah, memperlihatkan tren peningkatan BPM yang hampir sejajar, mencerminkan adaptasi kardiovaskular yang serupa terhadap beban awal pendakian. Subjek F dan Subjek G mempertahankan kestabilan denyut jantung dengan sedikit fluktuasi di pertengahan trek; Subjek G mengalami lonjakan minor di sekitar indeks waktu 200–250, sebelum kembali stabil.

Fenomena yang paling menonjol teramati pada Subjek E (berwarna ungu). Pada awal trek, Subjek E memulai dengan BPM pada kisaran 130–140 BPM, kemudian mengalami penurunan drastis ke rentang 120 BPM di sekitar indeks waktu 0–50, sebelum perlahan kembali meningkat ke kisaran semula pada indeks 150–200. Fenomena ini konsisten dengan observasi lapangan yang mencatat bahwa Subjek E mengalami gangguan fisiologis berupa muntah, sehingga mengharuskan istirahat sejenak. Fluktuasi ini memperlihatkan bagaimana gangguan fisiologis akut dapat secara langsung terekam dalam pola denyut jantung, mempengaruhi dinamika adaptasi awal terhadap aktivitas fisik.

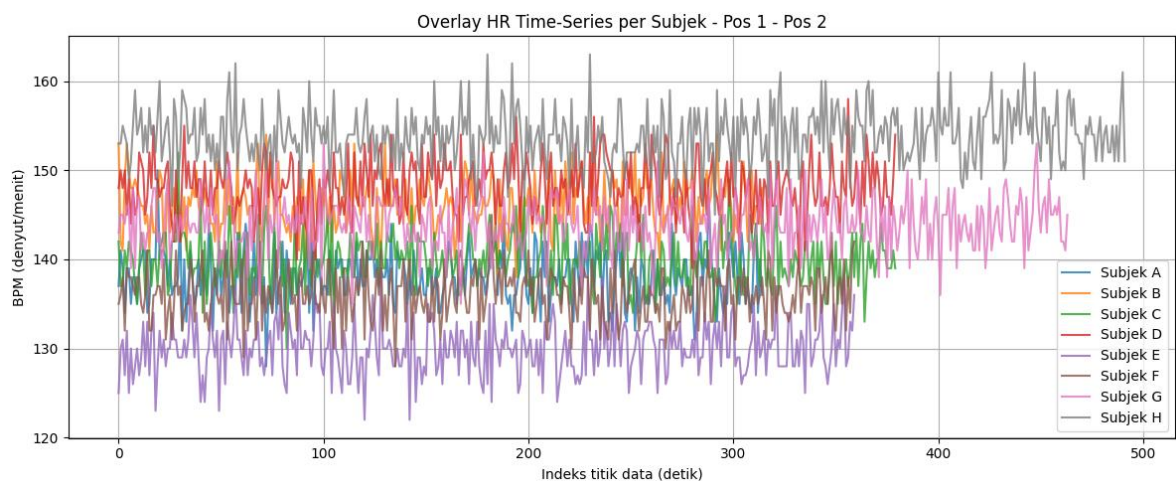
Integrasi hasil dari *heatmap* DTW dan *overlay HR* deret waktu pada segmen *Start* – Pos 1 memperlihatkan bahwa meskipun mayoritas subjek mengalami pola peningkatan denyut jantung yang stabil dan terkontrol, terdapat variasi individu yang disebabkan tidak hanya oleh kapasitas fisiologis, tetapi juga oleh faktor insidental di lapangan. Kesamaan pola pada Subjek B dan D mendukung nilai jarak DTW rendah mereka, sementara divergensi pada Subjek E dan H konsisten dengan nilai DTW yang tinggi.

4.4.3 Analisis DTW pada Segmen Pos 1–Pos 2

Analisis *Dynamic Time Warping* (DTW) pada segmen kedua, dari Pos 1 menuju Pos 2, memperlihatkan pola variasi denyut jantung antar subjek yang berbeda dibandingkan segmen awal. Berdasarkan *heatmap* DTW pada Gambar 4.44, jarak DTW terkecil tercatat antara Subjek B dan Subjek D, serupa dengan pola pada segmen sebelumnya, sementara jarak terbesar teramati antara Subjek F dan Subjek H. Ini mengindikasikan bahwa sebagian subjek tetap mempertahankan kestabilan pola denyut jantung relatif serupa, sedangkan sebagian lainnya mulai menunjukkan perbedaan respons fisiologis yang lebih besar.



Gambar 4. 44 Grafik Heatmap Matriks Jarak *Dynamic Time Warping* (DTW) Segmen Pos 1–Pos 2



Gambar 4. 45 Grafik Overlay Deret Waktu HR per Subjek pada Segmen Pos 1–Pos 2

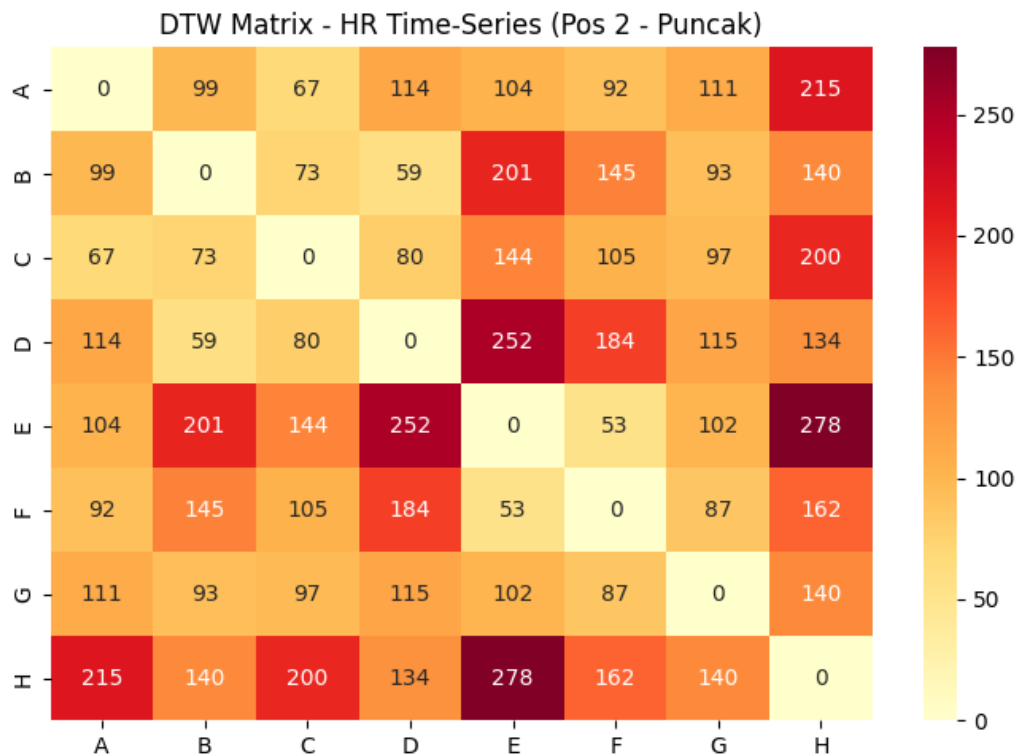
Visualisasi *overlay* HR deret waktu pada Gambar 4.45 menggambarkan perubahan denyut jantung subjek dengan lebih rinci pada segmen ini. Indeks waktu berkisar antara 0 hingga 500, dan sumbu BPM berada dalam rentang 120 hingga 170. Subjek A dan Subjek C memperlihatkan pola peningkatan denyut jantung yang tetap stabil, dengan pergerakan dari

kisaran 135 BPM pada awal segmen menuju kisaran 145–150 BPM menjelang indeks 400. menunjukkan adaptasi yang konsisten dan sinkron terhadap beban aktivitas. Subjek G memperlihatkan sedikit fluktuasi non-linear di sekitar indeks 200, dengan peningkatan tajam diikuti penurunan singkat, yang dapat menandakan perubahan ritme pacing saat pendakian. Subjek H menunjukkan tren peningkatan BPM yang lebih tinggi dibandingkan subjek lain, mencapai hampir 170 BPM pada indeks waktu akhir segmen, memperlihatkan akumulasi beban fisiologis yang lebih besar. Kedua visualisasi ini dihasilkan dari proses DTW per segmen menggunakan skrip analisis yang ditampilkan pada Gambar 3.8.

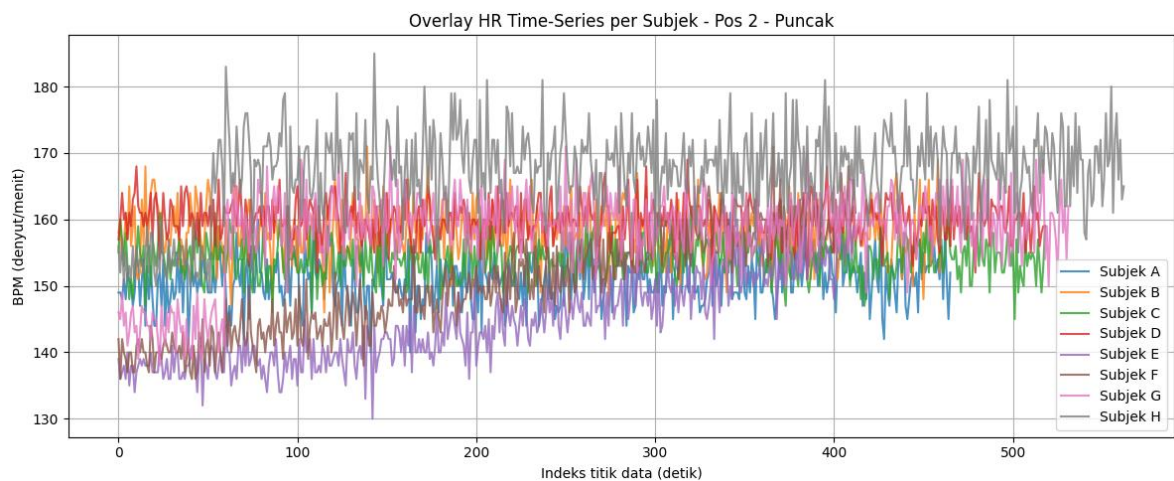
Integrasi analisis dari *heatmap* DTW dan *overlay* HR deret waktu memperjelas bahwa pada segmen Pos 1–Pos 2, variasi antar subjek mulai lebih kentara dibandingkan fase awal. Subjek B dan Subjek D mempertahankan pola peningkatan denyut jantung yang serupa dengan jarak DTW rendah, sedangkan Subjek F dan Subjek H memperlihatkan perbedaan pola yang lebih mencolok, tercermin dalam jarak DTW yang besar dan tren lonjakan BPM yang lebih tinggi. Temuan ini menunjukkan bahwa pada fase menengah pendakian, adaptasi terhadap beban aktivitas mulai mengalami fragmentasi antar individu, di mana faktor-faktor seperti kelelahan progresif, strategi pacing, dan perbedaan kapasitas aerobik semakin berpengaruh terhadap dinamika fisiologis masing-masing subjek.

4.4.4 Analisis DTW pada Segmen Pos 2–Puncak

Analisis *Dynamic Time Warping* (DTW) pada segmen terakhir, dari Pos 2 menuju puncak, memperlihatkan pola variasi denyut jantung antar subjek yang semakin melebar dibandingkan dua segmen sebelumnya. Berdasarkan *heatmap* DTW pada Gambar 4.46, jarak DTW terkecil tercatat antara Subjek A dan Subjek C, sedangkan jarak terbesar terjadi antara Subjek H dan Subjek F. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun sebagian subjek mampu mempertahankan kestabilan pola fisiologisnya, sebagian lainnya mulai mengalami perbedaan respons kardiovaskular yang lebih ekstrem menjelang puncak pendakian.



Gambar 4. 46 Grafik *Heatmap* Matriks Jarak *Dynamic Time Warping* (DTW) Segmen Pos 2–Puncak



Gambar 4. 47 Grafik *Overlay* Deret Waktu HR per Subjek pada Segmen Pos 2–Puncak

Visualisasi *overlay* HR deret waktu pada Gambar 4.47 memberikan gambaran perubahan denyut jantung subjek secara lebih terperinci. Indeks waktu berkisar dari 0 hingga 400, sedangkan rentang BPM berada antara 120 hingga 180. Subjek A dan Subjek C menunjukkan pola peningkatan denyut jantung yang stabil, bergerak dari kisaran 135–140 BPM di awal

segmen menuju kisaran 150–155 BPM pada indeks waktu 350–400, mencerminkan kontrol intensitas yang terjaga hingga menjelang puncak. Subjek B dan Subjek D juga menunjukkan pola peningkatan bertahap, meskipun dengan sedikit fluktuasi tambahan di sekitar indeks 200–300. Subjek E memperlihatkan pola peningkatan denyut jantung yang lambat, bergerak dari kisaran 130 BPM menuju 145 BPM tanpa lonjakan besar. Subjek F dan Subjek G menunjukkan fluktuasi BPM yang lebih besar, dengan Subjek F mengalami lonjakan cepat ke kisaran 165 BPM di indeks waktu 300, dan Subjek G menunjukkan pola fluktuatif sebelum stabil di kisaran 160 BPM. Subjek H memperlihatkan tren yang paling ekstrem, dengan BPM meningkat tajam dari sekitar 140 BPM menjadi hampir 180 BPM mendekati akhir segmen, mengindikasikan akumulasi beban fisiologis yang jauh lebih berat dibandingkan subjek lainnya. Visualisasi heatmap dan overlay deret waktu ini merupakan hasil dari eksekusi kode program DTW segmental pada Gambar 3.8.

Integrasi hasil *heatmap* DTW dan *overlay* HR deret waktu menunjukkan bahwa pada segmen Pos 2–Puncak, variabilitas pola denyut jantung antar subjek mencapai tingkat maksimum dibandingkan segmen sebelumnya. Subjek A dan C mempertahankan kestabilan adaptasi fisiologis yang konsisten, sementara Subjek H menunjukkan pola akumulasi beban kardiovaskular yang ekstrem. Temuan ini menegaskan bahwa pada fase akhir pendakian, ketahanan fisiologis individu memainkan peran utama dalam menentukan kestabilan respons terhadap beban aktivitas berat, dan variasi antar subjek menjadi semakin nyata serta dapat diidentifikasi dengan baik melalui pendekatan DTW dan interpretasi kurva deret waktu denyut jantung.

4.5 Analisis Kelompok Signifikan

Hasil uji perbandingan antar kelompok menunjukkan adanya perbedaan signifikan pada beberapa variabel utama, yaitu kecepatan pendakian ($p = 0,0045$), BPM ($p = 0,0453$), kalori terbakar ($p = 0,0120$), RPE ($p = 0,0000$), serta durasi zona ekstrem ($p = 0,0000$) dan zona anaerobik ($p = 0,0164$).

Pada variabel kecepatan pendakian, kelompok sadar memiliki median kecepatan yang lebih rendah tetapi sebaran nilai yang lebih luas dibandingkan kelompok tidak sadar. Pola ini menunjukkan strategi pacing yang fleksibel dan responsif terhadap kondisi fisiologis. Temuan ini diperkuat oleh hasil korelasi antara kecepatan dan BPM ($r = 0,812$; $p = 0,0000$), yang menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan hampir selalu diikuti oleh peningkatan beban kardiovaskular. Pengguna smartwatch yang sadar cenderung memanfaatkan informasi zona

detak jantung untuk mengatur kecepatan, sehingga menghindari akumulasi beban fisiologis yang berlebihan dan durasi yang terlalu panjang di intensitas ekstrem.

Pada variabel BPM, kelompok sadar menunjukkan distribusi yang lebih terkonsentrasi di sekitar median yang lebih rendah, mengindikasikan kontrol kardiovaskular yang lebih baik selama pendakian. Korelasi positif antara RPE dan BPM ($r = 0,41$; $p = 0,0476$) mendukung bahwa kestabilan denyut jantung berkontribusi pada penurunan persepsi kelelahan, sehingga subjek mampu mempertahankan kinerja fisik dengan tingkat kelelahan subjektif yang lebih rendah.

Perbedaan signifikan pada kalori terbakar menunjukkan bahwa kelompok sadar mengeluarkan energi lebih sedikit meskipun jumlah langkah tidak berbeda secara signifikan. Korelasi antara BMI dan Kalori ($r = 0,433$; $p = 0,0343$) menegaskan bahwa beban metabolik dipengaruhi oleh karakteristik tubuh. Strategi pacing adaptif pada kelompok sadar memungkinkan energi digunakan secara lebih efisien tanpa mengurangi volume langkah, konsisten dengan konsep *exercise economy* dalam fisiologi olahraga.

RPE yang lebih rendah pada kelompok sadar menunjukkan bahwa kesadaran terhadap indikator fisiologis berpengaruh tidak hanya pada aspek fisik, tetapi juga persepsi subjektif kelelahan. Korelasi RPE–Kalori ($r = 0,48$; $p = 0,0175$) mengindikasikan bahwa persepsi ini tidak semata-mata mencerminkan beban mekanik, melainkan juga dipengaruhi interpretasi kognitif terhadap data yang disajikan smartwatch.

Perbedaan signifikan pada durasi zona ekstrem dan anaerobik memperlihatkan bahwa kelompok tidak sadar cenderung menghabiskan lebih banyak waktu pada intensitas tinggi yang berpotensi memicu kelelahan cepat. Analisis DTW mendukung temuan ini, di mana subjek dari kelompok sadar (misalnya Subjek A dan C) mempertahankan fluktuasi BPM yang stabil, sementara subjek dari kelompok tidak sadar (misalnya Subjek H) menunjukkan lonjakan BPM yang tajam pada segmen akhir pendakian.

4.6 Analisis Hasil Kelompok Signifikan vs Tidak Signifikan

Perbedaan antara variabel yang menunjukkan signifikansi dan yang tidak signifikan dalam penelitian ini terutama dipengaruhi oleh keterkaitan langsung variabel tersebut terhadap proses *self-regulation* dan pacing adaptif yang difasilitasi oleh smartwatch. Variabel yang signifikan seperti kecepatan, detak jantung (BPM), kalori terbakar, RPE, serta durasi pada zona detak jantung ekstrem dan anaerobik merupakan indikator yang sensitif terhadap perubahan intensitas aktivitas dan dapat dimodifikasi secara langsung melalui umpan balik real-time. Pada

variabel-variabel ini, kelompok sadar cenderung melakukan penyesuaian perilaku, seperti mengatur kecepatan langkah, mengambil jeda strategis, atau menurunkan intensitas untuk mempertahankan zona detak jantung yang diinginkan. Temuan ini selaras dengan teori regulasi diri (*self-regulation theory*), di mana ketersediaan informasi fisiologis mendorong individu untuk secara aktif mengontrol output tubuh guna menjaga efisiensi metabolik dan menghindari kelelahan berlebih.

Sebaliknya, variabel yang tidak signifikan seperti jumlah langkah, SpO₂, suhu tubuh, dan *recovery heart rate* umumnya merepresentasikan aspek homeostasis atau respons fisiologis yang sifatnya lebih otonom dan kurang responsif terhadap intervensi perilaku sesaat. Contohnya, saturasi oksigen tetap stabil pada kedua kelompok karena aktivitas dilakukan pada ketinggian moderat tanpa paparan hipoksia ekstrem, sehingga pengaruh strategi pacing terhadap parameter ini sangat minimal. Demikian pula, suhu tubuh dipengaruhi oleh akumulasi beban fisiologis, kondisi lingkungan, dan mekanisme termoregulasi yang bekerja secara otomatis, sehingga efek pengaturan intensitas melalui smartwatch hanya terbatas pada laju peningkatan, bukan pada nilai akhirnya.

Integrasi hasil korelasi memperkuat interpretasi ini. Hubungan positif antara RPE, BPM, dan kalori menunjukkan bahwa variabel yang signifikan memiliki keterkaitan erat antara persepsi subjektif dan indikator objektif, yang dapat dimoderasi melalui pengelolaan intensitas berbasis umpan balik. Sebaliknya, variabel yang tidak signifikan umumnya tidak memiliki korelasi kuat dengan indikator perilaku, sehingga sulit dimodifikasi dalam jangka pendek. Analisis DTW terhadap pola BPM antar subjek juga mendukung temuan ini, di mana kelompok sadar menunjukkan keseragaman pola respons kardiovaskular yang lebih tinggi, sedangkan pada variabel seperti SpO₂ atau suhu tubuh, pola antar individu cenderung homogen tanpa perbedaan mencolok.

Dengan demikian, perbedaan utama antara hasil signifikan dan tidak signifikan dalam penelitian ini terletak pada derajat keterpengaruhan variabel terhadap regulasi perilaku berbasis data real-time. Variabel yang erat kaitannya dengan kontrol intensitas aktivitas menunjukkan respons adaptif yang nyata terhadap kesadaran penggunaan smartwatch, sedangkan variabel yang lebih bergantung pada mekanisme fisiologis otonom atau kondisi lingkungan relatif tidak terpengaruh secara signifikan oleh intervensi ini.

BAB V

KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan analisis empiris yang sistematis dan mendalam sebagaimana diuraikan dalam Bab 4, simpulan utama penelitian ini dirumuskan untuk merepresentasikan kontribusi temuan terhadap tujuan penelitian yang telah ditetapkan. Simpulan ini tidak hanya merangkum hasil-hasil utama, tetapi juga mencerminkan integrasi kerangka konseptual, teoritis, dan metodologis yang telah dikembangkan sejak Bab 1 hingga Bab 4, sehingga memberikan gambaran utuh dan menyeluruh terhadap peta temuan penelitian.

Merujuk pada tujuan penelitian yang telah dirumuskan pada Bab 1, hasil studi ini menunjukkan bahwa seluruh tujuan penelitian telah tercapai. Penelitian ini berhasil mengidentifikasi pengaruh penggunaan *smartwatch* terhadap indikator fisiologis, perilaku aktivitas, dan persepsi kelelahan pada pendaki gunung Generasi Z, sekaligus menjelaskan peran tingkat kesadaran pengguna terhadap pemantauan data fisiologis dalam memengaruhi kemampuan adaptasi tubuh dan persepsi kelelahan. Temuan tersebut memperlihatkan bahwa tingkat kesadaran yang tinggi memungkinkan pengguna untuk memanfaatkan data fisiologis secara lebih efektif dalam mengatur intensitas aktivitas, mempertahankan kestabilan respons fisiologis, dan mengurangi akumulasi kelelahan. Selain itu, penelitian ini memberikan implikasi aplikatif yang signifikan, baik bagi pengembang teknologi *wearable* dalam merancang fitur yang responsif terhadap perilaku pengguna, maupun bagi pendaki Generasi Z dalam memanfaatkan *smartwatch* secara strategis sebagai instrumen pengaturan aktivitas fisik berbasis umpan balik waktu nyata.

Tabel 5.1 berikut memetakan ketercapaian tujuan penelitian secara ringkas:

Tabel 5. 1 Pemetaan Ketercapaian Tujuan Penelitian

No	Tujuan Penelitian	Hasil Temuan Utama
1	Mengidentifikasi pengaruh smartwatch terhadap data fisiologis, perilaku aktivitas, dan persepsi kelelahan	Perbedaan signifikan pada BPM, kalori terbakar, kecepatan, dan RPE antara kelompok sadar dan tidak sadar; kontrol intensitas lebih baik pada kelompok sadar

Tabel 5. 1 Pemetaan Ketercapaian Tujuan Penelitian. (lanjutan)

No	Tujuan Penelitian	Hasil Temuan Utama
2	Menjelaskan peran kesadaran pengguna terhadap pemantauan data fisiologis	Kelompok sadar mempertahankan pola BPM lebih stabil, durasi zona aman lebih panjang, dan menghindari lonjakan ekstrem (analisis DTW).
3	Memberikan manfaat aplikatif bagi pengembang wearable dan pendaki Generasi Z	Identifikasi korelasi variabel kunci (RPE–BPM, BMI–BPM, suhu tubuh–BPM/kalori) untuk rekomendasi personalisasi dan mitigasi risiko.

5.1.1 Pengaruh Kesadaran terhadap Penggunaan Smartwatch terhadap Respons Fisiologis, Perilaku Aktivitas, dan Persepsi Kelelahan Pendaki Generasi Z

Berdasarkan hasil analisis data yang disajikan secara komprehensif pada Bab 4, dapat disimpulkan bahwa tingkat kesadaran terhadap fitur pemantauan fisiologis pada smartwatch memainkan peran penting dalam membentuk respons fisiologis, pola aktivitas, dan persepsi kelelahan pada pendaki gunung Generasi Z. Kesimpulan ini menjawab secara langsung pertanyaan penelitian pertama dalam Bab 1.2 serta sejalan dengan tujuan yang dinyatakan dalam Bab 1.4 mengenai identifikasi pengaruh penggunaan smartwatch dalam konteks aktivitas mendaki.

Secara empirik, kelompok pendaki dengan tingkat kesadaran tinggi menunjukkan respons detak jantung (BPM) yang lebih stabil dan terkontrol, disertai efisiensi pengeluaran kalori yang lebih baik dibandingkan kelompok dengan kesadaran rendah (Bab 4.2.2 dan 4.2.3). Temuan ini selaras dengan prinsip dalam Teori Self-Regulation (Bab 2.1), yang menyatakan bahwa pemantauan aktif terhadap umpan balik fisiologis memungkinkan individu untuk menyesuaikan intensitas aktivitas secara dinamis. Penyesuaian ini merupakan mekanisme adaptif yang penting dalam menjaga performa tubuh tetap dalam zona optimal serta menghindari beban fisiologis yang berlebihan. Meskipun pemulihan detak jantung (Recovery HR) tidak menunjukkan signifikansi statistik, arah perbedaan yang menguntungkan kelompok sadar mengindikasikan adanya kecenderungan adaptasi fisiologis yang lebih baik dalam jangka panjang.

Selain itu, temuan mengenai perbedaan signifikan dalam kecepatan pendakian (Bab 4.2.1) menunjukkan bahwa smartwatch bukan hanya alat pengukur, tetapi juga instrumen yang mendorong pengambilan keputusan perilaku secara real-time. Pendaki dengan kesadaran tinggi terhadap data smartwatch cenderung menerapkan strategi pacing yang lebih konsisten dan

adaptif, mencerminkan bentuk konkret dari “adaptasi aktivitas” sebagaimana dirumuskan dalam pendekatan metodologis penelitian ini (Bab 1.5 dan Bab 3). Sebaliknya, ketiadaan perbedaan signifikan dalam jumlah langkah (Bab 4.2.3) memperkuat argumen bahwa efisiensi metabolik kelompok sadar lebih dipengaruhi oleh regulasi intensitas aktivitas, bukan hanya kuantitas gerakan.

Adapun dalam aspek persepsi kelelahan, analisis menunjukkan perbedaan signifikan pada skor RPE antara kedua kelompok, di mana kelompok dengan kesadaran tinggi melaporkan tingkat kelelahan subjektif yang lebih rendah (Bab 4.2.4). Temuan ini mendukung validitas Teori Persepsi Kelelahan (Bab 2.1), yang menekankan bahwa persepsi kelelahan merupakan hasil integratif antara sinyal fisiologis dan interpretasi kognitif. Akses terhadap data fisiologis secara langsung melalui smartwatch memberikan peluang bagi pendaki untuk menyesuaikan harapan, mengelola fokus perhatian, dan mengembangkan strategi aktivitas yang lebih rasional, sehingga menghasilkan persepsi kelelahan yang lebih rendah. Dengan demikian, smartwatch berfungsi bukan hanya sebagai alat pemantau, tetapi juga sebagai katalisator peningkatan kesadaran tubuh (*bodily awareness*), yang secara menyeluruh memperkaya pengalaman dan pengelolaan aktivitas fisik dalam konteks mendaki.

5.1.2 Pengaruh Tingkat Kesadaran terhadap Adaptasi Fisiologis dan Persepsi Kelelahan

Salah satu implikasi penting dari studi ini adalah penegasan bahwa peran smartwatch dalam mendukung manajemen aktivitas fisik tidak bergantung semata pada keberadaan teknologinya, melainkan sangat ditentukan oleh tingkat kesadaran kognitif pengguna dalam mengolah dan merespons informasi yang disediakan. Temuan ini secara langsung menjawab pertanyaan penelitian kedua sebagaimana dirumuskan dalam Bab 1.2, yakni “Sejauh mana perbedaan tingkat kesadaran terhadap fitur pemantauan fisiologis pada smartwatch memengaruhi respons tubuh dan persepsi kelelahan selama aktivitas hiking?”, serta berkontribusi dalam pencapaian tujuan eksploratif terkait dampak kesadaran terhadap proses adaptasi fisiologis (Bab 1.4).

Partisipan dengan tingkat kesadaran tinggi menunjukkan kemampuan *self-regulation* yang lebih unggul, sebagaimana tercermin dalam stabilitas fisiologis dan pola respons tubuh yang lebih adaptif selama pendakian. Temuan ini konsisten dengan kerangka teori mengenai perangkat wearable dan pemantauan tubuh (Bab 2.1), yang menekankan bahwa keterlibatan aktif dalam pemrosesan data fisiologis menghasilkan efek regulatif yang lebih signifikan.

Lebih lanjut, hasil analisis *time series* berbasis metode Dynamic Time Warping (DTW) pada Bab 4.4 menunjukkan bahwa kelompok sadar mempertahankan pola perubahan BPM yang lebih seragam dan terkoordinasi, khususnya pada fase pendakian dengan intensitas meningkat seperti segmen Pos 1–Pos 2 dan Pos 2–Puncak (Bab 4.4.3 dan 4.4.4). Sebaliknya, kelompok dengan kesadaran rendah menunjukkan ketidakaturan pola yang mengindikasikan adaptasi fisiologis yang tidak stabil, strategi pacing yang kurang efektif, serta heterogenitas dalam kapasitas aerobik individu.

Selain aspek fisiologis, kesadaran yang tinggi terhadap sinyal tubuh internal yang diperoleh melalui smartwatch juga meningkatkan *bodily awareness* pengguna—sebuah komponen krusial dalam mekanisme *self-regulation* (Bab 2.1). Tingkat kesadaran ini memungkinkan individu untuk membuat keputusan secara real-time terkait intensitas aktivitas, alokasi waktu istirahat, maupun strategi pacing yang sesuai dengan kondisi tubuh aktual. Konsekuensinya, akumulasi kelelahan dapat ditekan, dan efisiensi energi dapat dioptimalkan sepanjang pendakian. Oleh karena itu, perangkat wearable tidak hanya berfungsi sebagai alat pemantau pasif, tetapi dapat berkembang menjadi sistem interaktif yang mendukung peningkatan pemahaman diri serta kapasitas adaptasi fisiologis dalam situasi aktivitas fisik ekstrem.

5.1.3 Korelasi Antarvariabel Kunci dan Implikasinya

Analisis korelasi antar variabel utama, sebagaimana dipaparkan dalam Bab 4.3, memberikan kontribusi penting dalam mengungkap dinamika internal respons fisiologis dan persepsi kelelahan selama aktivitas pendakian. Hasil ini menguatkan hipotesis hubungan antarvariabel yang telah dirumuskan dalam tahap interpretasi awal penelitian (Bab 3.4), serta menegaskan kompleksitas interaksi multidimensi antara aspek fisiologis, perseptual, dan antropometris yang secara kolektif memengaruhi performa fisik dan pengalaman subjektif individu.

Pertama, teridentifikasi korelasi positif yang moderat antara persepsi kelelahan (RPE) dengan indikator beban fisiologis seperti detak jantung (BPM) dan kalori yang terbakar (Bab 4.3.1). Meskipun tidak bersifat kuat, hubungan ini menegaskan bahwa persepsi kelelahan tidak semata ditentukan oleh aspek fisiologis objektif, melainkan merupakan konstruksi multidimensional yang juga dipengaruhi oleh faktor kognitif dan kontekstual. Temuan ini mendukung prinsip dalam Teori Persepsi Kelelahan (Bab 2.1), yang menekankan pentingnya integrasi antara informasi internal dan evaluasi subjektif. Oleh karena itu, pemanfaatan data

dari smartwatch menuntut adanya pemahaman interpretatif dari pengguna, agar angka-angka yang tersedia dapat ditransformasikan menjadi strategi adaptif yang relevan secara fisiologis dan psikologis.

Kedua, ditemukannya korelasi positif yang signifikan antara Indeks Massa Tubuh (BMI) dan beban fisiologis (BPM dan Kalori) (Bab 4.3.2) memperkuat pemahaman bahwa individu dengan komposisi tubuh lebih besar akan menghadapi tuntutan metabolik dan kardiovaskular yang lebih tinggi pada intensitas aktivitas yang serupa. Temuan ini selaras dengan prinsip Fisiologi Aktivitas (Bab 2.1), dan menyoroti pentingnya memperhitungkan parameter antropometrik dalam interpretasi data wearable. Dengan demikian, penggunaan smartwatch dalam konteks hiking memerlukan kalibrasi individual yang mempertimbangkan BMI sebagai variabel kontrol penting, seperti yang telah dirancang dalam metodologi penelitian (Bab 3.1.1), agar rekomendasi aktivitas tidak bias dan tetap akurat secara personal.

Ketiga, korelasi positif yang kuat antara kecepatan pendakian dan respons kardiovaskular (BPM) (Bab 4.3.3) merepresentasikan prinsip dasar fisiologi olahraga, yaitu hubungan proporsional antara intensitas kerja otot dan peningkatan kebutuhan oksigen. Data smartwatch secara konsisten memvalidasi pola ini, memperkuat keandalan perangkat dalam mengukur perubahan dinamika fisiologis selama aktivitas hiking. Selain itu, korelasi ini menunjukkan bahwa pengguna dengan kesadaran tinggi dapat mengandalkan parameter kecepatan dan BPM untuk melakukan penyesuaian intensitas secara real-time, guna mencegah kelelahan berlebih (*over-reaching*) dan menjaga performa optimal.

Namun demikian, korelasi positif antara suhu tubuh dengan BPM, kalori terbakar, dan kecepatan pendakian (Bab 4.3; Gambar 4.35–4.37) menggarisbawahi dimensi kritis yang perlu diwaspadai. Meskipun secara statistik menunjukkan hubungan linier yang stabil, dari sudut pandang fisiologi terapan, peningkatan suhu tubuh yang bersamaan dengan peningkatan beban metabolik dan intensitas aktivitas dapat menimbulkan beban termal yang signifikan bagi tubuh. Ini merupakan respons fisiologis kompensatoris terhadap stres lingkungan dan aktivitas fisik, yang jika tidak dikendalikan, berpotensi menyebabkan dehidrasi, penurunan performa, atau risiko *heat exhaustion*. Dengan demikian, meskipun korelasi ini bersifat positif secara numerik, dalam konteks praktis, ia mengindikasikan potensi risiko yang perlu diantisipasi. Pemantauan suhu melalui smartwatch, meskipun bukan variabel utama dalam desain intervensi penelitian ini, terbukti memberikan sinyal penting bagi pengguna dalam pengambilan keputusan strategis terkait perlambatan kecepatan, istirahat, atau kebutuhan pendinginan.

Secara keseluruhan, analisis korelasi antarvariabel ini memperkaya pemahaman mengenai interaksi integral antara aspek fisiologis, perseptual, dan antropometris selama aktivitas pendakian pada populasi Generasi Z. Temuan ini tidak hanya mengkonfirmasi asumsi-asumsi teoritis yang diajukan pada awal penelitian, tetapi juga memperluas cakupan pemanfaatan smartwatch dari sekadar alat monitoring menjadi sarana analisis personal berbasis konteks. Hal ini menggarisbawahi pentingnya literasi data fisiologis bagi pengguna agar mampu menginterpretasikan hubungan-hubungan antarvariabel secara adaptif dan reflektif terhadap kondisi tubuh dan lingkungan.

5.2 Limitasi Penelitian

Penelitian ini tidak terlepas dari sejumlah keterbatasan yang dapat memengaruhi validitas eksternal dan ketepatan penerapan metodologis secara menyeluruh. Keterbatasan tersebut muncul sebagai konsekuensi dari berbagai kendala praktis selama proses perancangan dan pelaksanaan studi di lapangan.

Pertama, keterbatasan anggaran menjadi faktor krusial yang membatasi kapasitas rekrutmen partisipan. Besarnya biaya operasional, yang mencakup transportasi, konsumsi partisipan, serta biaya administratif pendakian seperti tiket masuk dan retribusi parkir, menyebabkan ukuran sampel tidak dapat diperluas secara optimal. Implikasi dari keterbatasan ini adalah berkurangnya kemampuan generalisasi hasil penelitian terhadap populasi yang lebih luas, mengingat jumlah partisipan yang terbatas berpotensi kurang merepresentasikan heterogenitas karakteristik fisiologis dan perilaku pengguna.

Kedua, faktor eksternal berupa kondisi geografis dan iklim pada lokasi penelitian turut menjadi hambatan. Variabilitas cuaca di lingkungan pegunungan yang tidak dapat diprediksi serta keterbatasan waktu kolaboratif antara peneliti dan subjek menimbulkan kendala dalam penjadwalan pengambilan data. Meskipun upaya telah dilakukan untuk menjaga konsistensi kondisi lingkungan dengan memilih waktu yang relatif moderat, terdapat beberapa insiden pembatalan pengumpulan data akibat hujan lebat selama proses pendakian. Kejadian ini tidak hanya mengganggu kontinuitas penelitian, tetapi juga menyebabkan eskalasi biaya per subjek secara signifikan.

Ketiga, keterbatasan teknis pada perangkat yang digunakan juga menjadi tantangan. Akurasi sensor pada smartwatch, khususnya dalam pengukuran suhu tubuh dan kadar oksigen darah (SpO_2), sangat bergantung pada posisi pemasangan sensor yang presisi. Dalam praktiknya, kondisi fisiologis pascapendakian seperti produksi keringat yang tinggi serta

kesulitan subjek untuk mempertahankan posisi diam, sering kali mengganggu kestabilan kontak antara perangkat dan kulit, sehingga berpotensi menurunkan reliabilitas data fisiologis yang diperoleh secara real-time.

Keempat, keterbatasan sumber daya manusia juga menjadi hambatan dalam fase pengumpulan data. Tidak tersedianya asisten penelitian secara tetap akibat keterbatasan anggaran menyebabkan sebagian besar proses pengambilan data harus dilakukan sendiri oleh peneliti. Hal ini berdampak pada meningkatnya beban kerja dan kelelahan fisik peneliti, serta menurunkan efisiensi pelaksanaan, terutama ketika pengumpulan data dilakukan terhadap dua subjek dalam waktu yang berdekatan, sehingga memerlukan keberangkatan lapangan secara beruntun.

Meskipun berbagai keterbatasan ini mempengaruhi skala dan efisiensi pelaksanaan penelitian, hasil yang diperoleh tetap memberikan kontribusi bermakna terhadap pengembangan pengetahuan di bidang terkait, serta menjadi pijakan bagi studi lanjutan yang lebih luas dan terstruktur.

5.3 Saran Penelitian

Merujuk pada simpulan utama yang telah diuraikan sebelumnya, penelitian ini menawarkan sejumlah rekomendasi yang ditujukan kepada berbagai pemangku kepentingan, dengan basis pada temuan empiris yang diperoleh dalam Bab 4. Rekomendasi ini dirancang untuk mendukung optimalisasi pemanfaatan smartwatch dalam aktivitas fisik, khususnya dalam konteks pendakian, serta memberikan kontribusi konseptual dan metodologis bagi pengembangan riset lanjutan yang relevan di bidang ini.

5.3.1 Saran Bagi Pengguna Smartwatch

Agar manfaat smartwatch dalam aktivitas fisik seperti pendakian gunung dapat dioptimalkan, pengguna disarankan untuk tidak terbatas pada pemantauan data secara pasif, melainkan mengembangkan kesadaran aktif dalam menginterpretasikan informasi fisiologis yang ditampilkan. Hasil penelitian, khususnya pada Bab 4.2.2 dan 4.2.4, menunjukkan bahwa partisipan dengan tingkat kesadaran tinggi terhadap data menunjukkan regulasi fisiologis yang lebih stabil (misalnya dalam variabel BPM dan kalori), serta persepsi kelelahan (RPE) yang lebih rendah dibandingkan kelompok lain.

Dengan demikian, pemahaman terhadap makna fisiologis dari setiap parameter yang tersedia seperti detak jantung, estimasi pengeluaran kalori, kecepatan pendakian, dan suhu

tubuh (Bab 4.3) menjadi krusial dalam upaya menjaga performa dan mencegah kelelahan berlebih. Disarankan agar pengguna membekali diri dengan literasi dasar mengenai fisiologi olahraga, guna mendukung penggunaan smartwatch sebagai instrumen *self-regulation*, sebagaimana dikaji dalam Teori Self-Regulation (Bab 2.1). Pendekatan ini memungkinkan individu untuk menyesuaikan intensitas aktivitas secara real-time berdasarkan kondisi tubuh aktual.

Lebih lanjut, penerapan strategi pacing yang berbasis pada data pribadi dengan mempertimbangkan faktor individual seperti Indeks Massa Tubuh (BMI), sebagaimana ditunjukkan dalam Bab 4.3.2 perlu dijadikan landasan dalam pengambilan keputusan selama aktivitas fisik. Strategi ini berpotensi meningkatkan efisiensi energi, menekan risiko kelelahan dini, serta memastikan adaptasi fisiologis yang lebih aman dan efektif selama proses pendakian atau latihan intensitas tinggi lainnya.

5.3.2 Saran Bagi Pengembang Smartwatch

Sejalan dengan temuan bahwa tingkat kesadaran pengguna berperan krusial dalam menentukan sejauh mana smartwatch dapat dimanfaatkan secara optimal dalam aktivitas fisik (Bab 5.1.2), pengembang dan produsen perangkat wearable disarankan untuk memprioritaskan inovasi yang mendukung peningkatan literasi pengguna melalui fitur edukatif dan visualisasi data yang intuitif serta kontekstual. Mengacu pada hasil analisis deret waktu dengan Dynamic Time Warping (Bab 4.4), pengembangan fitur interpretatif yang mampu mengenali pola fisiologis secara real-time dan memberikan rekomendasi adaptif yang bersifat personal, seperti “Detak jantung Anda cenderung tinggi secara konsisten dalam segmen ini, pertimbangkan untuk mengurangi intensitas” atau “Pergerakan Anda menunjukkan indikasi kelelahan, disarankan melakukan jeda istirahat”, akan secara signifikan meningkatkan nilai praktis dan pengalaman pengguna dari perangkat ini.

Lebih lanjut, dengan memperhatikan risiko fisiologis spesifik yang dihadapi pendaki gunung terutama potensi hipotermia direkomendasikan pengembangan fitur pengukuran suhu tubuh secara berkala maupun real-time yang dapat terintegrasi dengan parameter kardiovaskular seperti BPM. Kolaborasi data suhu dan detak jantung dapat dimanfaatkan sebagai sistem peringatan dini terhadap penurunan suhu inti tubuh, sehingga memberikan waktu intervensi yang lebih luas sebelum kondisi mencapai ambang kritis.

Selain itu, integrasi sistem deteksi otomatis terhadap tren data yang mendekati batas fisiologis ekstrem, termasuk indikator awal stres termal sebagaimana diidentifikasi melalui

korelasi suhu tubuh dengan variabel kecepatan dan kalori (Bab 4.3), akan memperkuat fungsi preventif dari perangkat. Tak kalah penting, pengembangan fitur yang dapat menganalisis data historis pengguna untuk menghasilkan strategi pacing yang disesuaikan secara individual dengan kondisi fisiologis aktual akan menjadi inovasi bernilai tambah dalam konteks aktivitas fisik berintensitas tinggi, seperti pendakian gunung.

5.3.3 Saran Penelitian Selanjutnya

Hasil penelitian ini membuka peluang bagi eksplorasi lanjutan di berbagai bidang yang bertumpu pada keterbatasan dan temuan yang telah diuraikan pada Bab 4. Penelitian di masa mendatang disarankan untuk memperluas cakupan demografis, tidak hanya terbatas pada Generasi Z, tetapi juga mencakup kelompok usia lainnya guna mengidentifikasi perbedaan dalam adaptasi dan penggunaan smartwatch. Hal ini penting mengingat temuan spesifik yang diperoleh terkait Generasi Z dalam subbab 4.2. Selain itu, mengingat pengaruh signifikan dari tingkat kesadaran pengguna terhadap respons fisiologis dan kelelahan sebagaimana dijabarkan pada subbab 5.1.1 dan 5.1.2, studi longitudinal dapat dilakukan untuk mengevaluasi dampak jangka panjang penggunaan smartwatch dengan tingkat kesadaran tinggi terhadap adaptasi fisiologis, strategi pacing, dan persepsi kelelahan pengguna dari waktu ke waktu.

Lebih lanjut, pendekatan kualitatif atau metode campuran sangat dianjurkan untuk mengkaji secara mendalam faktor-faktor psikologis dan motivasional yang memengaruhi tingkat kesadaran pengguna terhadap data yang ditampilkan oleh smartwatch, serta hambatan dalam interpretasi dan pemanfaatan data fisiologis yang belum dapat dijelaskan secara menyeluruh melalui pendekatan kuantitatif yang digunakan dalam Bab 4.

Secara khusus dalam ranah Ilmu Informatika, temuan ini memiliki implikasi yang signifikan untuk pengembangan riset di bidang Ilmu Data (Data Science) dan Pembelajaran Mesin (Machine Learning). Data smartwatch yang bersifat kaya dan kompleks memberikan peluang untuk merancang algoritma deteksi risiko lanjut, misalnya melalui pengembangan dan implementasi model *machine learning* atau *deep learning* untuk deteksi dini kondisi kritis seperti hipotermia. Hal ini relevan dengan temuan korelasi antara suhu tubuh dan respons fisiologis (Bab 4.3) serta urgensi deteksi dini risiko seperti yang telah disinggung pada subbab 5.2.2. Penelitian lanjutan dapat difokuskan pada integrasi data multisensor (seperti suhu tubuh, detak jantung, variabilitas detak jantung, pola aktivitas, dan data lingkungan) untuk mengidentifikasi *digital biomarkers* yang mampu mendeteksi risiko sebelum gejala klinis muncul.

Selain itu, pengembangan sistem umpan balik adaptif dan prediktif berbasis *machine learning* menjadi sangat potensial, khususnya yang mampu mempelajari pola fisiologis individu secara longitudinal sebagaimana pendekatan *Dynamic Time Warping (DTW)* yang telah diterapkan dalam subbab 4.4 guna memberikan rekomendasi real-time yang bersifat personal terkait strategi pacing, hidrasi, istirahat, maupun koreksi teknik untuk mengoptimalkan performa sekaligus meminimalkan risiko cedera atau kelelahan berlebih. Upaya lain yang dapat dikembangkan mencakup peningkatan kualitas dan interpretabilitas data melalui penerapan metode *data science* untuk menangani permasalahan *noise* dan *missing data*, serta mengembangkan teknik visualisasi data yang lebih informatif dan user-friendly. Terakhir, pengembangan model prediktif untuk estimasi kelelahan dan kebutuhan pemulihan berdasarkan riwayat aktivitas, pola tidur, dan data fisiologis lainnya yang direkam smartwatch juga merupakan arah penelitian yang sangat menjanjikan di masa mendatang.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, M., Khan, A., Mazzara, M., & Distefano, S. (2020). Seeking Optimum System Settings for Physical Activity Recognition on Smartwatches. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 944, 220–233. https://doi.org/10.1007/978-3-030-17798-0_19
- Bizzozero-Peroni, B., Díaz-Goñi, V., Jiménez-López, E., Rodríguez-Gutiérrez, E., Sequí-Domínguez, I., Núñez de Arenas-Arroyo, S., López-Gil, J. F., Martínez-Vizcaino, V., & Mesas, A. E. (2024). Daily Step Count and Depression in Adults: A Systematic Review and Meta-Analysis. *JAMA Network Open*, 7(12), e2451208. <https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2024.51208>
- Bıçakcı, H. S., Santopietro, M., & Guest, R. (2023). Activity-based electrocardiogram biometric verification using wearable devices. *IET Biometrics*, 12(1), 38–51. <https://doi.org/10.1049/bme2.12105>
- Boudreaux, B. D., Hebert, E. P., Hollander, D. B., Williams, B. M., Cormier, C. L., Naquin, M. R., Gillan, W. W., Gusew, E. E., & Kraemer, R. R. (2018). Validity of Wearable Activity Monitors during Cycling and Resistance Exercise. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 50(3), 624–633. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000001471>
- Cosoli, G., Antognoli, L., Veroli, V., & Scalise, L. (2022). Accuracy and Precision of Wearable Devices for Real-Time Monitoring of Swimming Athletes. *Sensors*, 22(13). <https://doi.org/10.3390/s22134726>
- Dimock, M. (2019). Defining generations: Where Millennials End and Generation Z Begins. In *Pew Research Center* (Vol. 17, Issue 1). <https://www.pewresearch.org/short-reads/2019/01/17/where-millennials-end-and-generation-z-begins/>
- Guo, Y., & Sato, H. (2023). Smartwatch In-Air Signature Time Sequence Three-Dimensional Static Restoration Classification Based on Multiple Convolutional Neural Networks. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(6). <https://doi.org/10.3390/app13063958>
- Haryana, N. R., Rosmiati, R., Purba, E. M., & Firmansyah, H. (2023). Gaya Hidup Generasi Z Dalam Konteks Perilaku Makan, Tingkat Stres, Kualitas Tidur dan Kaitannya Dengan Status Gizi: Literature Review. *Jurnal Gizi Kerja Dan Produktivitas*, 4(2), 253–268. <https://doi.org/10.52742/jgkp.v4i2.195>
- Henriksen, A., Mikalsen, M. H., Woldaregay, A. Z., Muzny, M., Hartvigsen, G., Hopstock, L. A., & Grimsgaard, S. (2018). Using fitness trackers and smartwatches to measure physical activity in research: Analysis of consumer wrist-worn wearables. *Journal of Medical*

- Internet Research*, 20(3). <https://doi.org/10.2196/jmir.9157>
- Hughes, A., Shandhi, M. M. H., Master, H., Dunn, J., & Brittain, E. (2023). Wearable Devices in Cardiovascular Medicine. *Circulation Research*, 132(5), 652–670. <https://doi.org/10.1161/CIRCRESAHA.122.322389>
- Imbach, F., Candau, R., Chailan, R., & Perrey, S. (2020). Validity of the Stryd Power Meter in Measuring Running Parameters at Submaximal Speeds. *Sports*, 8(7), 1–19. <https://doi.org/10.3390/sports8070103>
- Kusuma, A. I., Putra, I. B., & Utamayasa, I. G. D. (2023). Efektifitas Teknologi Sensor Alat Olahraga Neuro Dancepada Simulator dengan Menggunakan Smart Watch terhadap Heart Rate, Tekanan Darah dan Pencegahan Resiko Obesitas. *Jurnal Pendidikan Kesehatan Rekreasi*, 9(2), 217–224. <https://ojs.mahadewa.ac.id/index.php/jpkr/article/download/2656/2106>
- Martín-Escudero, P., Cabanas, A. M., Dotor-Castilla, M. L., Galindo-Canales, M., Miguel-Tobal, F., Fernández-Pérez, C., Fuentes-Ferrer, M., & Giannetti, R. (2023). Are Activity Wrist-Worn Devices Accurate for Determining Heart Rate during Intense Exercise? *Bioengineering*, 10(2), 1–18. <https://doi.org/10.3390/bioengineering10020254>
- Mehta, S., Kwatra, N., Jain, M., & McDuff, D. (2024). Examining the challenges of blood pressure estimation via photoplethysmogram. *Scientific Reports*, 14(1), 1–17. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-68862-1>
- Navalta, J. W., Montes, J., Bodell, N. G., Aguilar, C. D., Lujan, A., Guzman, G., Kam, B. K., Manning, J. W., & DeBeliso, M. (2018). Wearable Device Validity in Determining Step Count During Hiking and Trail Running. *Journal for the Measurement of Physical Behaviour*, 1(2), 86–93. <https://doi.org/10.1123/jmpb.2018-0010>
- NCD Risk Factor Collaboration. (2023). *Diabetes. Evolution of diabetes over time*. The Lancet. <http://www.ncdrisc.org/>
- Nurwanto, F., Ardiyanto, I., & Wibirama, S. (2017). Light sport exercise detection based on smartwatch and smartphone using k-Nearest Neighbor and Dynamic Time Warping algorithm. *Proceedings of 2016 8th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering: Empowering Technology for Better Future, ICITEE 2016*, 2–6. <https://doi.org/10.1109/ICITEED.2016.7863299>
- Rakuten Insight. (2022). *Survey on wearable technology usage in Indonesia*. Rakuten Insight. <https://goodstats.id/article/statistik-pengguna-wearable-tech-di-indonesia-QbR6l>
- Reithe, H., Marty, B., Torrado, J. C., Førsum, E., Husebo, B. S., Erdal, A., Kverneng, S. U.,

- Sheard, E., Tzoulis, C., & Patrascu, M. (2025). Cross-evaluation of wearable data for use in Parkinson's disease research: a free-living observational study on Empatica E4, Fitbit Sense, and Oura. *BioMedical Engineering Online*, 24(1). <https://doi.org/10.1186/s12938-025-01353-0>
- Rustika, R., Driyah, S., Oemiati, R., & Hartati, N. S. (2019). Prediktor Sindrom Metabolik : Studi Kohor Prospektif Selama Enam Tahun di Bogor, Indonesia. *Media Penelitian Dan Pengembangan Kesehatan*, 29(3), 215–224. <https://doi.org/10.22435/mpk.v29i3.654>
- Sagl, G., Resch, B., Petutschnig, A., Kyriakou, K., Liedlgruber, M., & Wilhelm, F. H. (2019). Wearables and the quantified self: Systematic benchmarking of physiological sensors. *Sensors (Switzerland)*, 19(20). <https://doi.org/10.3390/s19204448>
- Siahaan, M. (2024). *Forecast of smartwatch users in Indonesia (2020-2029)*. Statista. <https://www.statista.com/forecasts/1493570/indonesia-number-of-smartwatch-users>
- Sobarna, A., Asmara, H., Sunarsi, D., Sanusi, A., & Suharja, S. (2021). Analisis aktivitas fisik pada penyandang obesitas menggunakan smartwatch. *JPPI (Jurnal Penelitian Pendidikan Indonesia)*, 7(1), 28–34. <https://doi.org/10.29210/02021767>
- Strava. (2024). *Year in Sport Trend Report*. <https://press.strava.com/articles/strava-releases-year-in-sport-trend-report>
- Szymkowiak, A., Melović, B., Dabić, M., Jeganathan, K., & Kundi, G. S. (2021). Information technology and Gen Z: The role of teachers, the internet, and technology in the education of young people. *Technology in Society*, 65(March). <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2021.101565>
- Utomo, M. F., & Sulhatun. (2024). Eksplorasi Peran Smartwatch Android berbasis IoT dalam Bidang Kesehatan. *Jurnal Sains Dan Teknologi 4.0 (JST 4.0)*, 1(2), 15–23. <https://jurnal.komputasi.org/index.php/jst/article/view/23>
- Validnews. (2022). *Siska Nirmala; Mimpi Gunung Bebas Sampah*. Validnews. <https://validnews.id/kultura/siska-nirmala-mimpi-gunung-bebas-sampah>
- van Lier, H. G., Pieterse, M. E., Garde, A., Postel, M. G., de Haan, H. A., Vollenbroek-Hutten, M. M. R., Schraagen, J. M., & Noordzij, M. L. (2020). A standardized validity assessment protocol for physiological signals from wearable technology: Methodological underpinnings and an application to the E4 biosensor. *Behavior Research Methods*, 52(2), 607–629. <https://doi.org/10.3758/s13428-019-01263-9>
- Varatharajan, R., Manogaran, G., Priyan, M. K., & Sundarasekar, R. (2018). Wearable sensor devices for early detection of Alzheimer disease using dynamic time warping algorithm.

- Cluster Computing*, 21(1), 681–690. <https://doi.org/10.1007/s10586-017-0977-2>
- Warren, A. (2020). *Running head: HIKING AS NATURE'S THERAPY 1 HIKING AS NATURE'S THERAPY*. 2020(April).
- ACSM. (2021). *ACSM's Guidelines for Exercise Testing and Prescription (11th ed.)*. Wolters Kluwer.
- Thompson, W. R., et al. (2020). The importance of heart rate monitoring in exercise prescription. *Current Sports Medicine Reports*, 19(7), 251–256. <httpsdoi.org10.1249JSR.0000000000000731>
- Bongers, C. C. W. G., et al. (2020). Thermoregulation and hydration during outdoor exercise in the heat. *Sports Medicine*, 50(1), 15–27. <httpsdoi.org10.1007s40279-019-01162-2>
- Fudge, B. W., et al. (2018). Pacing strategies during prolonged exercise. *Sports Medicine*, 48(8), 1761–1776. <httpsdoi.org10.1007s40279-018-0921-3>
- Burtscher, M., et al. (2018). Effects of hypoxia on exercise capacity New insights into limitations and adaptations. *European Journal of Preventive Cardiology*, 25(14), 1387–1395. <httpsdoi.org10.11772047487318783892>
- Peçanha, T., et al. (2017). Heart rate recovery Autonomic determinants, methods of assessment and association with mortality and cardiovascular diseases. *Clinical Physiology and Functional Imaging*, 37(5), 393–399. <httpsdoi.org10.1111cpf.12364>
- Haddad, M., et al. (2017). Rating of perceived exertion during high-intensity interval training A comprehensive review. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 12(7), 994–1002. <httpsdoi.org10.1123ijspp.2016-0594>.
- Lancaster, G. A., Thabane, L., & Ma, J. (2019). Guidelines for reporting non-randomised pilot and feasibility studies. *Pilot and Feasibility Studies*, 5, 114. <https://doi.org/10.1186/s40814-019-0499-1>.
- Hecksteden, A., Kraushaar, J., Scharhag-Rosenberger, F., & Meyer, T. (2018). Individual response to exercise training – A statistical perspective. *Journal of Applied Physiology*, 124(6), 1519–1530. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00714.2017>.
- Townsend, N. E., et al. (2018). Living high-training low increases hypoxic ventilatory response of endurance athletes. *Journal of Applied Physiology*, 125(4), 1015–1025. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00279.2018>
- Tosi, F., et al. (2019). Effects of uphill and downhill walking on gait variability and metabolic cost in healthy adults. *Gait & Posture*, 73, 281–286. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2019.07.258>.

Vohs, K. D., & Baumeister, R. F. (Eds.). (2016). Handbook of self-regulation: Research, theory, and applications (3rd ed.). The Guilford Press

LAMPIRAN

Data Primer

Data primer yang dikumpulkan selama penelitian ini meliputi catatan respons fisiologis (detak jantung, SpO2, suhu tubuh), persepsi kelelahan (RPE), dan perilaku aktivitas (kecepatan, kalori terbakar, jumlah langkah) dari partisipan selama sesi pendakian. Data ini telah dianonimkan untuk menjaga privasi partisipan.

- **Dataset Respons Fisiologis Smartwatch dan RPE Partisipan:** Berkas ini berisi data detak jantung, SpO2, suhu tubuh, kecepatan, total langkah, kalori yang terbakar dan RPE dari seluruh partisipan dalam format .xlsx, dikelompokkan berdasarkan identitas partisipan anonim dan segmen pendakian.
 - [Tautan ke Dataset Fisiologis](#)

Kode Analisis Data

Seluruh skrip dan kode yang digunakan untuk pemrosesan, analisis statistik, serta penerapan metode *Dynamic Time Warping (DTW)* dalam penelitian ini tersedia untuk ditinjau dalam satu *notebook* komprehensif.

- **Skrip Analisis Data Komprehensif (Google Colab Notebook):** *Notebook* ini berisi seluruh skrip dan kode Python/R (sesuaikan dengan yang Anda gunakan) untuk pemrosesan data (termasuk normalisasi), implementasi metode *Dynamic Time Warping (DTW)*, serta analisis statistik yang mendukung temuan penelitian ini. Anda dapat membuka dan menjalankan *notebook* ini langsung di lingkungan Google Colab.
 - [Tautan ke Google Colab Notebook Anda](#)

Dokumentasi Saat Pengambilan







