

Analisis Inferensial Respons Fisiologis Pendaki terhadap Perubahan Ketinggian dan Tekanan Atmosfer

Agus Hayatal Falah¹, Shazana Dhiya Ayuni², Syamsudduha Syahririni³, Jamaaluddin⁴

^{1,2,3,4} Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Sidoarjo, Indonesia

¹lagushf@umsida.ac.id, ²shazana@umsida.ac.id, ³syahririni@umsida.ac.id, ⁴jamaaluddin@umsida.ac.id

Abstract—Changes in altitude and atmospheric pressure during climbing may affect peripheral oxygen saturation (SpO₂) and heart rate (HR). This study evaluates these responses inferentially by analyzing SpO₂, HR, and HR change relative to each participant's baseline (Δ HR). Four climbers were repeatedly measured at 214, 1165, and 1480 m above sea level using a MAX30102 sensor for SpO₂ and HR and a BMP280 sensor for atmospheric pressure. Descriptive statistics, the Friedman test, Kendall's W, and post-hoc Wilcoxon signed-rank tests were applied because of the small sample and repeated-measures design. Atmospheric pressure decreased from 1009.0 to 850.1 and 749.1 hPa. Mean SpO₂ decreased from $99.75 \pm 0.50\%$ to $89.25 \pm 2.22\%$ and $84.00 \pm 0.82\%$, whereas mean HR increased from 87.00 ± 4.24 BPM to 123.50 ± 5.07 BPM and 132.50 ± 2.08 BPM. Mean Δ HR reached +36.50 BPM at 1165 m and +45.50 BPM at 1480 m. The Friedman test showed significant overall differences for SpO₂, HR, and Δ HR ($\chi^2(2)=8.00$; $p=0.018$; Kendall's $W=1.00$), while pairwise Wilcoxon tests were not significant ($p=0.125$; Bonferroni-adjusted $p=0.375$). These findings extend the previous fuzzy-rule classification approach by using Δ HR as an individual response parameter. Interpretation remains limited by the small sample size ($n=4$) and the maximum tested altitude of 1480 m, which does not represent high-altitude exposure.

Keywords— *atmospheric pressure; SpO₂; heart rate; Δ HR; inferential statistics.*

Abstrak—Perubahan ketinggian dan tekanan atmosfer selama pendakian dapat memengaruhi saturasi oksigen perifer (SpO₂) dan denyut jantung (HR). Penelitian ini mengevaluasi respons tersebut secara inferensial melalui analisis SpO₂, HR, dan perubahan HR terhadap baseline masing-masing subjek (Δ HR). Empat pendaki diukur berulang pada ketinggian 214, 1165, dan 1480 mdpl menggunakan sensor MAX30102 untuk SpO₂ dan HR serta BMP280 untuk tekanan atmosfer. Statistik deskriptif, uji Friedman, Kendall's W, dan uji lanjut Wilcoxon signed-rank digunakan karena jumlah sampel kecil dan desain pengukuran berulang. Tekanan atmosfer menurun dari 1009,0 menjadi 850,1 dan 749,1 hPa. Rata-rata SpO₂ menurun dari $99,75 \pm 0,50\%$ menjadi $89,25 \pm 2,22\%$ dan $84,00 \pm 0,82\%$, sedangkan rata-rata HR meningkat dari $87,00 \pm 4,24$ BPM menjadi $123,50 \pm 5,07$ BPM dan $132,50 \pm 2,08$ BPM. Rata-rata Δ HR mencapai +36,50 BPM pada 1165 mdpl dan +45,50 BPM pada 1480 mdpl. Uji Friedman menunjukkan perbedaan global yang signifikan untuk SpO₂, HR, dan Δ HR ($\chi^2(2)=8,00$; $p=0,018$; Kendall's $W=1,00$), sedangkan uji pasangan Wilcoxon belum signifikan ($p=0,125$; p terkoreksi Bonferroni= $0,375$). Temuan ini memperluas pendekatan klasifikasi fuzzy sebelumnya dengan menggunakan Δ HR sebagai parameter respons individual. Interpretasi hasil masih dibatasi oleh jumlah subjek yang kecil ($n=4$) dan ketinggian maksimum 1480 mdpl yang belum merepresentasikan paparan high-altitude.

Kata Kunci— *tekanan atmosfer; SpO₂; denyut jantung; Δ HR; statistik inferensial.*

I. PENDAHULUAN

Aktivitas pendakian gunung menyebabkan tubuh manusia terpapar perubahan kondisi lingkungan, terutama peningkatan ketinggian dan penurunan tekanan atmosfer. Penurunan tekanan barometrik pada ketinggian mengurangi tekanan parsial oksigen yang tersedia untuk proses respirasi dan dapat diikuti oleh perubahan respons fisiologis. Rojas-Camayo *et al.* [1] menunjukkan bahwa nilai saturasi oksigen perifer (SpO₂) cenderung menurun seiring peningkatan ketinggian. Kondisi tersebut dapat memengaruhi proses oksigenasi dan respons kardiovaskular selama paparan ketinggian.

Respons fisiologis terhadap perubahan ketinggian tidak selalu seragam pada setiap individu. Cobb *et al.* [2] melakukan pengamatan fisiologis berulang selama proses pendakian hingga ketinggian tinggi dan menunjukkan pentingnya pemantauan SpO₂ dan *heart rate* (HR) untuk menggambarkan respons tubuh selama proses *ascent*. Ouyang *et al.* [3] juga melaporkan bahwa individu yang mengalami *acute mountain sickness* (AMS) menunjukkan

SpO₂ yang lebih rendah dan HR yang lebih tinggi dibandingkan individu tanpa AMS. Temuan tersebut menunjukkan bahwa perubahan SpO₂ dan HR dapat memberikan informasi mengenai respons fisiologis individu terhadap kondisi hipoksia pada ketinggian.

Pemantauan parameter fisiologis secara berulang juga telah digunakan untuk mengevaluasi perkembangan respons terhadap altitude. Karinen *et al.* [4] menunjukkan bahwa pemantauan saturasi oksigen selama proses pendakian dapat memberikan informasi yang berkaitan dengan risiko AMS. Pada penelitian lainnya, Karinen *et al.* [5] melaporkan bahwa perubahan *heart rate variability* pada altitude menengah berkaitan dengan perkembangan AMS pada pendakian berikutnya. Mandolesi *et al.* [6] menunjukkan manfaat pemantauan SpO₂ dalam jangka lebih panjang untuk mengamati perkembangan kondisi fisiologis pada altitude, sedangkan Tannheimer *et al.* [7] memperlihatkan bahwa nilai SpO₂ dapat mengalami perubahan pada individu yang sama selama paparan ketinggian. Hasil-hasil tersebut mendukung pentingnya mempertimbangkan perubahan fisiologis relatif terhadap kondisi awal, tidak hanya nilai sesaat.

Perkembangan teknologi sensor memungkinkan SpO₂ dan HR diperoleh melalui sistem pemantauan portabel. Namun, validitas perangkat tetap menjadi aspek penting karena kondisi lingkungan dan metode pengukuran dapat memengaruhi hasil. Schiefer *et al.* [8] mengevaluasi validitas pengukuran SpO₂ menggunakan perangkat *wearable* pada ketinggian 4559 m dan menemukan bahwa performa perangkat perlu dipertimbangkan ketika digunakan pada kondisi altitude tinggi. Lauterbach *et al.* [9] juga mengevaluasi akurasi perangkat *wrist-worn pulse oximeter* pada kondisi hipoksia normobarik. Sementara itu, Bubb *et al.* [10] menunjukkan bahwa sistem *wearable in-ear pulse oximetry* dapat digunakan untuk memperoleh pengukuran SpO₂ pada rentang saturasi yang luas. Temuan tersebut memperlihatkan bahwa teknologi sensor portabel berpotensi mendukung pemantauan fisiologis, tetapi tetap memerlukan pengukuran dan interpretasi yang tepat.

Selain variasi yang disebabkan oleh kondisi lingkungan, respons terhadap hipoksia juga dapat berbeda antarindividu. Masschelein *et al.* [11] menunjukkan adanya variasi sensitivitas individu terhadap hipoksia. Ebihara *et al.* [12] juga melaporkan adanya hubungan antara respons hemodinamik pada ketinggian dan kejadian AMS. Oleh karena itu, penggunaan HR absolut saja belum tentu sepenuhnya menggambarkan besarnya respons kardiovaskular seseorang karena setiap individu dapat memiliki HR awal yang berbeda.

Pada bidang sistem pemantauan pendaki, Meivita *et al.* [13] mengembangkan alat ukur kondisi kesehatan pendaki dengan menggunakan SpO₂ dan HR serta fuzzy logic. Ginoni [14] selanjutnya mengembangkan sistem peringatan dini terhadap kondisi tubuh pendaki menggunakan parameter fisiologis yang serupa. Kedua penelitian tersebut menunjukkan potensi penggunaan parameter fisiologis untuk mendukung sistem pemantauan, tetapi faktor lingkungan belum dianalisis secara mendalam sebagai bagian dari respons fisiologis individual.

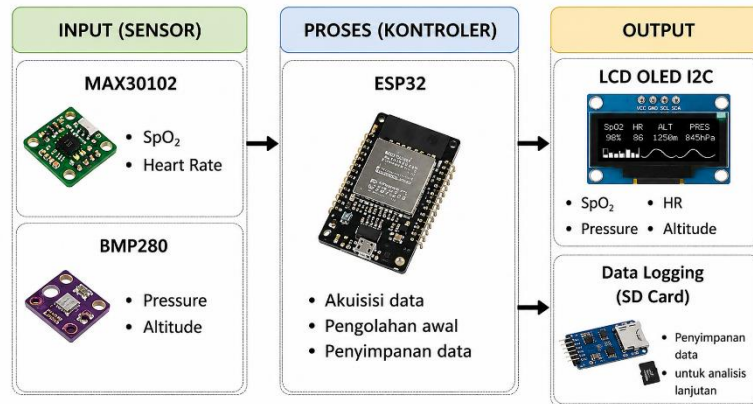
Penelitian Salsabil *et al.* [15], yang menjadi dasar penelitian ini, telah mengintegrasikan ESP32, MAX30102, dan BMP280 untuk memperoleh SpO₂, HR, serta tekanan atmosfer. Ketiga parameter tersebut diproses menggunakan 27 aturan fuzzy untuk menghasilkan kondisi Normal, Alert, dan Danger. Pengujian menunjukkan perubahan yang konsisten, yaitu penurunan SpO₂ serta peningkatan HR ketika tekanan atmosfer menurun pada altitude yang lebih tinggi. Namun, penelitian tersebut masih berorientasi pada fungsi perangkat dan klasifikasi berbasis aturan sehingga respons fisiologis yang diperoleh lebih banyak dibahas secara deskriptif.

Berdasarkan penelitian terdahulu, masih terdapat kebutuhan untuk menguji secara kuantitatif apakah perubahan SpO₂ dan HR pada beberapa tingkat ketinggian menunjukkan pola yang konsisten secara statistik. Selain itu, perubahan HR relatif terhadap kondisi awal individu belum menjadi fokus utama pada sistem pemantauan pendaki sebelumnya. Penelitian ini tidak mengusulkan perangkat sensor atau klasifikasi fuzzy baru, tetapi memperluas penelitian Salsabil *et al.* [15] dari rule-based health classification menuju analisis inferensial repeated measures dengan Δ HR sebagai parameter respons individual. Dengan demikian, kebaruan penelitian terletak pada penggunaan Δ HR dan pengujian inferensial terhadap data fisiologis berpasangan. Ruang lingkup temuan dibatasi pada empat subjek dan rentang pengukuran 214–1480 mdpl; titik tertinggi pengujian belum termasuk paparan high-altitude sehingga hasil tidak dimaksudkan untuk digeneralisasikan pada kondisi ketinggian tinggi.

II. METODE PENELITIAN

A. Metode

Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif dengan desain eksperimen lapangan berulang (repeated measures). Empat subjek yang sama diukur pada 214, 1165, dan 1480 mdpl. SpO₂ dan HR digunakan sebagai parameter fisiologis, sedangkan tekanan atmosfer dan ketinggian dicatat sebagai parameter lingkungan. Gambar 1 menunjukkan alur MAX30102 dan BMP280 menuju ESP32, lalu ke tampilan dan penyimpanan data sehingga parameter fisiologis dan lingkungan direkam pada rangkaian pengukuran yang sama.



Gambar 1. Blok diagram sistem pemantauan fisiologis pendaki

Setiap subjek beristirahat 10–15 menit pada titik awal untuk memperoleh HR baseline. Setelah pendakian menuju titik berikutnya, subjek beristirahat sekitar lima menit sebelum SpO₂, HR, tekanan atmosfer, dan ketinggian dicatat. Kode subjek dipertahankan agar ketiga pengukuran dapat dipasangkan. Gambar 2 merangkum urutan persiapan, baseline, pendakian, istirahat, pengukuran, dan penyimpanan data.



Gambar 2. Prosedur pengambilan data

Tabel 1. Variabel penelitian dan definisi operasional

No	Variabel	Simbol	Definisi Operasional	Satuan	Jenis
1	Saturasi oksigen perifer	SpO ₂	Persentase saturasi oksigen yang diperoleh melalui MAX30102	%	Respons
2	Denyut jantung	HR	Denyut jantung per menit yang diperoleh melalui MAX30102	BPM	Respons
3	Perubahan denyut jantung	Δ HR	Selisih HR pada suatu ketinggian terhadap HR baseline	BPM	Respons
4	Tekanan atmosfer	Pressure	Tekanan atmosfer yang diperoleh melalui BMP280	hPa	Lingkungan
5	Ketinggian	Altitude	Ketinggian lokasi pengukuran	mdpl	Faktor pengukuran

Tabel 2. Titik pengukuran dan karakteristik lingkungan

No	Titik	Altitude (mdpl)	Pressure (hPa)	Kondisi
1	T0	214	1009,0	Baseline
2	T1	1165	850,1	Titik pengukuran 1
3	T2	1480	749,1	Titik pengukuran 2 (tertinggi)

B. Analisis Data

1. Statistik deskriptif digunakan untuk menghitung rata-rata, standar deviasi (SD), minimum, dan maksimum SpO₂, HR, tekanan atmosfer, ketinggian, serta Δ HR pada setiap titik pengukuran.
2. Analisis inferensial difokuskan pada perbedaan SpO₂, HR, dan Δ HR antar-tiga kondisi pengukuran pada subjek yang sama. Karena ukuran sampel hanya empat subjek, pengujian dilakukan menggunakan metode nonparametrik untuk repeated measures.
 - a. Uji Friedman digunakan sebagai uji global untuk membandingkan tiga kondisi pengukuran.
 - b. Jika uji Friedman signifikan, analisis dilanjutkan dengan uji Wilcoxon signed-rank dua arah untuk setiap pasangan ketinggian.

Untuk tiga perbandingan berpasangan, koreksi Bonferroni digunakan sehingga batas signifikansi post-hoc menjadi $\alpha'=0,05/3=0,0167$; p-value tanpa koreksi juga dilaporkan untuk menunjukkan keterbatasan resolusi statistik pada $n=4$.

C. Perhitungan Δ HR

Respons kardiovaskular individual dihitung sebagai selisih HR pada ketinggian h terhadap HR baseline subjek yang sama:

$$\Delta HR_{i,h} = HR_{i,h} - HR_{i,0}$$

dengan $HR_{i,0}$ adalah HR baseline subjek i pada 214 mdpl dan $HR_{i,h}$ adalah HR subjek i pada ketinggian h. Nilai Δ HR positif menunjukkan peningkatan HR dibandingkan baseline, sedangkan nilai yang lebih besar menunjukkan perubahan HR yang lebih besar terhadap kondisi awal individu.

D. Analisis Statistik

Karena ukuran sampel hanya empat subjek dan setiap individu diukur pada tiga kondisi, uji Friedman digunakan untuk mengevaluasi perbedaan global SpO₂, HR, dan Δ HR antar-ketinggian. Pengujian dilakukan secara terpisah untuk setiap parameter dengan taraf signifikansi $\alpha=0,05$.

Hipotesis uji Friedman:

H₀: distribusi parameter fisiologis sama pada seluruh kondisi ketinggian.

H₁: minimal terdapat satu kondisi ketinggian dengan distribusi parameter yang berbeda.

Uji global dinyatakan signifikan jika $p < 0,05$.

Apabila uji Friedman signifikan, dilakukan post-hoc Wilcoxon signed-rank test untuk tiga pasangan ketinggian dengan koreksi Bonferroni. Ukuran efek/konsistensi Friedman dinyatakan menggunakan Kendall's W:

$$W = \chi^2_F / [n(k - 1)]$$

dengan χ^2_F adalah statistik uji Friedman, n adalah jumlah subjek, dan k adalah jumlah kondisi pengukuran. Nilai W mendekati 1 menunjukkan urutan perubahan yang sangat konsisten di dalam sampel.

Tabel 3. Analisis statistik

No	Tujuan	Variabel	Metode	Output
1	Menggambarkan data	SpO ₂ , HR, Δ HR	Mean, SD, minimum, maksimum	Mean $\pm$ SD, range
2	Menguji perbedaan antar-ketinggian	SpO ₂ , HR, Δ HR	Friedman test	χ^2 , df, p-value
3	Mengukur besar konsistensi efek	SpO ₂ , HR, Δ HR	Kendall's W	Effect size
4	Menguji pasangan ketinggian	SpO ₂ , HR, Δ HR	Wilcoxon + Bonferroni	p, p adj.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Perubahan Lingkungan dan Fisiologi

Peningkatan ketinggian dari 214 menjadi 1480 mdpl diikuti oleh penurunan tekanan atmosfer dari 1009,0 menjadi 749,1 hPa. Pada rentang yang sama, rata-rata SpO₂ menurun dari 99,75% menjadi 84,00%, sedangkan rata-rata HR meningkat dari 87,00 menjadi 132,50 BPM. Ringkasan pada Tabel 4 menunjukkan bahwa ketiga indikator berubah secara terarah pada setiap titik pengukuran, sehingga analisis selanjutnya difokuskan pada pola perubahan dalam subjek yang sama.

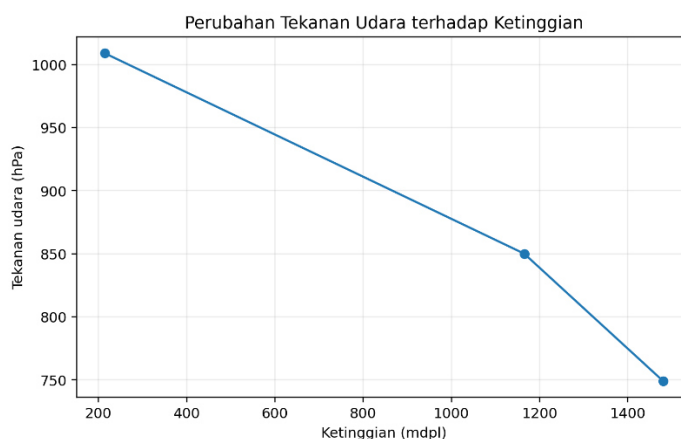
Tabel 4. Ringkasan hasil pengukuran

No	Altitude	Pressure	SpO ₂ Mean $\pm$ SD	HR Mean $\pm$ SD	Δ HR Mean $\pm$ SD
1	214 mdpl	1009,0 hPa	99,75 $\pm$ 0,50%	87,00 $\pm$ 4,24 BPM	0
2	1165 mdpl	850,1 hPa	89,25 $\pm$ 2,22%	123,50 $\pm$ 5,07 BPM	36,50 $\pm$ 1,91 BPM
3	1480 mdpl	749,1 hPa	84,00 $\pm$ 0,82%	132,50 $\pm$ 2,08 BPM	45,50 $\pm$ 4,43 BPM

B. Perubahan Tekanan Atmosfer dan SpO₂

Hasil pengukuran menunjukkan penurunan tekanan atmosfer yang monoton: 1009,0 hPa pada 214 mdpl, 850,1 hPa pada 1165 mdpl, dan 749,1 hPa pada 1480 mdpl. Dibandingkan baseline, penurunan tekanan mencapai 158,9 hPa pada 1165 mdpl dan 259,9 hPa pada 1480 mdpl. Gambar 3 memvisualisasikan pola lingkungan tersebut. Pada saat yang sama, rata-rata SpO₂ turun dari 99,75 $\pm$ 0,50% menjadi 89,25 $\pm$ 2,22% dan 84,00 $\pm$ 0,82% (Tabel 4). Arah perubahan SpO₂ ini konsisten dengan kecenderungan yang dilaporkan Rojas-Camayo et al. [1], tetapi rentang penelitian ini lebih rendah dan jumlah subjek jauh lebih kecil sehingga hasil hanya ditafsirkan sebagai pola pada sampel yang diuji.

Gambar 3 digunakan untuk menunjukkan perubahan tekanan sebagai karakteristik lingkungan pengujian, bukan untuk membuktikan hubungan kausal atau membangun model korelasi. Analisis korelasi tidak dilakukan karena hanya tersedia tiga tingkat ketinggian dan tujuan utama penelitian adalah membandingkan respons repeated measures antar-kondisi.



Gambar 3. Perubahan Tekanan Atmosfer terhadap Ketinggian

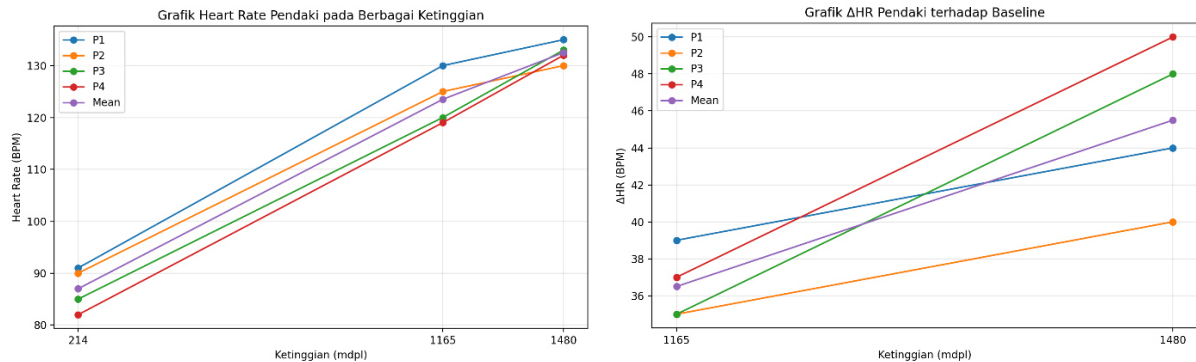
C. Perubahan HR dan Δ HR

Peningkatan HR menunjukkan pola yang sama arah tetapi berbeda besar antarindividu. Rata-rata HR meningkat dari 87,00 BPM pada baseline menjadi 123,50 BPM pada 1165 mdpl dan 132,50 BPM pada 1480 mdpl. Setelah dinormalisasi terhadap baseline masing-masing subjek, rata-rata Δ HR adalah +36,50 $\pm$ 1,91 BPM pada 1165 mdpl dan +45,50 $\pm$ 4,43 BPM pada 1480 mdpl. Tabel 5 dan Gambar 4 memperlihatkan bahwa seluruh subjek mengalami peningkatan HR, tetapi perubahan tambahan dari 1165 ke 1480 mdpl tidak identik: P1 dan P2 bertambah 5 BPM,

sedangkan P3 dan P4 bertambah 13 BPM. Pola ini mendukung penggunaan ΔHR untuk menampilkan respons individual yang tidak sepenuhnya terlihat dari HR absolut saja.

Tabel 5. ΔHR setiap subjek

No	Pendaki	HR 214 mdpl	HR mdpl 1165	ΔHR 1165	HR mdpl 1480	ΔHR 1480
1	P1	91	130	+39	135	+44
2	P2	90	125	+35	130	+40
3	P3	85	120	+35	133	+48
4	P4	82	119	+37	132	+50
5	Mean	87,00	123,50	+36,50	132,50	+45,50



Gambar 4. Grafik heart rate setiap pendaki pada tiga ketinggian (kiri) dan ΔHR setiap pendaki terhadap baseline (kanan)

D. Analisis Inferensial

Uji Friedman diterapkan secara terpisah pada SpO_2 , HR, dan ΔHR untuk tiga kondisi pengukuran berulang. Ketiga parameter menghasilkan $\chi^2(2)=8,00$ dan $p=0,018$, sehingga terdapat bukti perbedaan global antar-kondisi pada taraf $\alpha=0,05$. Dengan $n=4$ dan $k=3$, Kendall's W dihitung sebagai $W=8/[4(3-1)]=1,00$. Nilai ini menunjukkan urutan perubahan yang sepenuhnya konsisten pada keempat subjek dalam sampel, tetapi tidak boleh ditafsirkan sebagai estimasi efek populasi yang stabil karena ukuran sampel sangat kecil.

Tabel 6. Hasil Friedman Test

No	Parameter	χ^2	df	p-value	Kendall's W
1	SpO_2	8,000	2	0,018	1,000
2	HR	8,000	2	0,018	1,000
3	ΔHR	8,000	2	0,018	1,000

Ringkasan uji global pada Tabel 6 menunjukkan hasil yang sama untuk ketiga parameter: $\chi^2(2)=8,00$, $p=0,018$, Kendall's $W=1,00$.

Pada analisis post-hoc, seluruh perbandingan Wilcoxon signed-rank menghasilkan $p=0,125$ (dua arah, tanpa koreksi). Setelah koreksi Bonferroni untuk tiga perbandingan, p terkoreksi menjadi 0,375 dan batas signifikansi menjadi $\alpha'=0,0167$; karena itu tidak ada pasangan ketinggian yang signifikan. Perbedaan antara hasil Friedman yang signifikan dan post-hoc yang tidak signifikan terutama mencerminkan ukuran sampel $n=4$ dan keterbatasan resolusi p -value pada uji berpasangan, sehingga interpretasi difokuskan pada konsistensi arah perubahan, bukan pada klaim perbedaan pasangan yang definitif.

Tabel 7. Hasil Post-hoc Wilcoxon Signed-Rank

No	Variabel	Perbandingan	p-value (raw; Bonf.)
1	SpO_2	214 vs 1165 mdpl	0,125; 0,375
2	SpO_2	214 vs 1480 mdpl	0,125; 0,375
3	SpO_2	1165 vs 1480 mdpl	0,125; 0,375

No	Variabel	Perbandingan	p-value (raw; Bonf.)
4	HR	214 vs 1165 mdpl	0,125; 0,375
5	HR	214 vs 1480 mdpl	0,125; 0,375
6	HR	1165 vs 1480 mdpl	0,125; 0,375
7	Δ HR	214 vs 1165 mdpl	0,125; 0,375
8	Δ HR	214 vs 1480 mdpl	0,125; 0,375
9	Δ HR	1165 vs 1480 mdpl	0,125; 0,375

IV. KESIMPULAN

Pada empat pendaki yang diamati berulang, peningkatan ketinggian dari 214 hingga 1480 mdpl diikuti oleh penurunan tekanan atmosfer dari 1009,0 menjadi 749,1 hPa, penurunan rata-rata SpO₂ dari 99,75% menjadi 84,00%, dan peningkatan rata-rata HR dari 87,00 menjadi 132,50 BPM. Δ HR menunjukkan perubahan terhadap baseline individual sebesar +36,50 BPM pada 1165 mdpl dan +45,50 BPM pada 1480 mdpl. Uji Friedman menunjukkan perbedaan global yang signifikan untuk SpO₂, HR, dan Δ HR [$\chi^2(2)=8,00$; $p=0,018$; Kendall's W=1,00], tetapi seluruh uji pasangan Wilcoxon signed-rank tidak signifikan ($p=0,125$; p Bonferroni=0,375). Dengan demikian, kontribusi utama penelitian ini adalah memperluas klasifikasi fuzzy pada penelitian sebelumnya [15] menjadi evaluasi inferensial repeated measures dan penggunaan Δ HR sebagai parameter respons individual. Temuan harus dipandang sebagai studi awal karena hanya melibatkan $n=4$ dan ketinggian maksimum 1480 mdpl, yang belum merepresentasikan high-altitude. Penelitian lanjutan memerlukan jumlah subjek dan titik ketinggian yang lebih besar sebelum hasil dapat digeneralisasikan.

V. DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. Rojas-Camayo, C. R. Mejia, D. Callacondo, J. A. Dawson, M. Posso, C. A. Galvan, et al., "Reference values for oxygen saturation from sea level to the highest human habitation in the Andes in acclimatised persons," *Thorax*, vol. 73, no. 8, pp. 776–778, 2018, doi: 10.1136/thoraxjnl-2017-210598.
- [2] A. B. Cobb, D. Z. H. Levett, K. Mitchell, W. Aveling, D. Hurlbut, E. Gilbert-Kawai, et al., "Physiological responses during ascent to high altitude and the incidence of acute mountain sickness," *Physiological Reports*, vol. 9, no. 7, Art. no. e14809, Apr. 2021, doi: 10.14814/phy2.14809.
- [3] Q. Ouyang, Y. Yang, D. Zou, Y. Peng, W. Zhang, Y. Yang, and Y. Ma, "Incidence and risk factors of acute mountain sickness during ascent to Hoh Xil and the physiological responses before and after acclimatization," *Turkish Journal of Emergency Medicine*, vol. 24, no. 4, pp. 226–230, 2024, doi: 10.4103/tjem.tjem_44_24.
- [4] H. M. Karinen, J. E. Peltonen, M. Kähönen, and H. O. Tikkanen, "Prediction of acute mountain sickness by monitoring arterial oxygen saturation during ascent," *High Altitude Medicine & Biology*, vol. 11, no. 4, pp. 325–332, 2010, doi: 10.1089/ham.2009.1060.
- [5] H. M. Karinen, A. Uusitalo, H. Vähä-Ypyä, M. Kähönen, J. E. Peltonen, P. K. Stein, J. Viik, and H. O. Tikkanen, "Heart rate variability changes at 2400 m altitude predicts acute mountain sickness on further ascent at 3000–4300 m altitudes," *Frontiers in Physiology*, vol. 3, Art. no. 336, 2012, doi: 10.3389/fphys.2012.00336.
- [6] G. Mandolesi, G. Avancini, M. Bartesaghi, E. Bernardi, L. Pomidori, and A. Cogo, "Long-term monitoring of oxygen saturation at altitude can be useful in predicting the subsequent development of moderate-to-severe acute mountain sickness," *Wilderness & Environmental Medicine*, vol. 25, no. 4, pp. 384–391, 2014, doi: 10.1016/j.wem.2014.04.015.
- [7] M. Tannheimer, R. van der Spek, F. Brenner, R. Lechner, J. M. Steinacker, and G. Treff, "Oxygen saturation increases over the course of the night in mountaineers at high altitude (3050–6354 m)," *Journal of Travel Medicine*, vol. 24, no. 5, Art. no. tax041, 2017, doi: 10.1093/jtm/tax041.

-
- [8] L. M. Schiefer, G. Treff, F. Treff, P. Schmidt, L. Schäfer, J. Niebauer, et al., “Validity of peripheral oxygen saturation measurements with the Garmin Fēnix 5X Plus wearable device at 4559 m,” *Sensors*, vol. 21, no. 19, Art. no. 6363, 2021, doi: 10.3390/s21196363.
- [9] C. J. Lauterbach, P. A. Romano, L. A. Greisler, and M. R. Kuennen, “Accuracy and reliability of commercial wrist-worn pulse oximeter during normobaric hypoxia exposure under resting conditions,” *Research Quarterly for Exercise and Sport*, vol. 92, no. 3, pp. 549–558, 2021, doi: 10.1080/02701367.2020.1759768.
- [10] C. A. B. Bubb, M. Weber, N. Kretsch, R. Heim, I. Zellhuber, S. Schmid, et al., “Wearable in-ear pulse oximetry validly measures oxygen saturation between 70% and 100%: A prospective agreement study,” *Digital Health*, vol. 9, Art. no. 20552076231211169, 2023, doi: 10.1177/20552076231211169.
- [11] E. Masschelein, R. Van Thienen, M. Thomis, and P. Hespel, “High twin resemblance for sensitivity to hypoxia,” *Medicine & Science in Sports & Exercise*, vol. 47, no. 1, pp. 74–81, 2015, doi: 10.1249/MSS.0000000000000386.
- [12] T. Ebihara, K. Shimizu, Y. Mitsuyama, H. Ogura, et al., “Association between high cardiac output at altitude and acute mountain sickness: Preliminary study on Mt. Fuji,” *Journal of Physiological Anthropology*, vol. 42, Art. no. 6, 2023, doi: 10.1186/s40101-023-00322-7.
- [13] D. N. Meivita, S. B. Utomo, and B. Supeno, “Rancang bangun alat ukur kondisi kesehatan pada pendaki gunung berbasis fuzzy logic,” in *Proc. Seminar Nasional Aplikasi Teknologi Informasi (SNATI)*, Yogyakarta, Indonesia, 2016.
- [14] F. H. Ginoni, “Sistem peringatan dini terhadap kondisi tubuh pada pendaki gunung berbasis fuzzy logic,” *Skripsi, Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Nasional Malang, Malang, Indonesia*, 2019.
- [15] A. A. F. Salsabil, A. H. Falah, Jamaaluddin, and I. Sulistiyowati, “Design and build an early warning system for health conditions in climbers based on fuzzy logic,” *Journal of Electrical Engineering and Computer (JEECOM)*, vol. 8, no. 1, pp. 140–147, 2026, doi: 10.33650/jeeecom.v8i1.15028.