

**AKLIMATISASI PANAS, DINGIN, DAN HIPOKSIA DALAM LATIHAN FISIK:
TINJAUAN LITERATUR RESPONS FISIOLOGIS ATLET**

Kayla Safira Liestyana_1 Kayla Safira Liestyana¹, Ahmad Sahid Insyagi_2 Ahmad
Sahid Insyagi², Putra Arnanda Ade Kusvian_3 Putra Arnanda Ade Kusvian³

Institusi/lembaga Penulis POR FIK Universitas Negeri Semarang

Alamat e-mail : ¹kaylasaf1@students.unnes.ac.id,

Alamat e-mail : ²insyagi14@students.unnes.ac.id,

Alamat e-mail : ³putraarnandaade@students.unnes.ac.id,

ABSTRACT

Exposure to environmental stressors such as heat, cold, and hypoxia induces substantial physiological strain on the cardiovascular, thermoregulatory, and respiratory systems. Recent research has shifted from studying isolated stress responses to exploring cross-adaptation, a phenomenon in which adaptation to one stressor enhances tolerance to another. This review synthesizes empirical findings from key studies investigating cross-adaptation mechanisms, particularly between heat and hypoxia, and their implications for athletic performance. Evidence from Gibson et al. (2017) and Willmott et al. (2024) demonstrates that heat acclimation improves hematological stability, increases plasma volume, enhances oxygen saturation, lowers heart rate, and reduces core and skin temperatures during exercise in hypoxic environments. Conversely, hypoxia acclimation has shown potential benefits for both normothermic and heat conditions, although performance effects remain inconsistent. Mechanistic insights indicate that thermoregulatory adjustments—such as earlier sweating onset and increased skin blood flow—play an important role in supporting physiological stability during combined heat and hypoxia exposure. These interactions hold practical relevance for athletes and physically demanding occupations with limited access to prolonged altitude training. This integrative review aims to compile physiological mechanisms, performance outcomes, and practical applications of cross-adaptation to evaluate its viability as

an alternative or complementary strategy for preparing individuals for extreme environmental conditions.

Keywords : heat acclimation, hypoxia, cross-adaptation

ABSTRAK

Paparan terhadap stres lingkungan seperti panas, dingin, dan hipoksia dapat menimbulkan tekanan fisiologis yang besar pada sistem kardiovaskular, respirasi, dan termoregulasi. Dalam dua dekade terakhir, fokus penelitian bergeser dari respons tunggal menuju pemahaman cross-adaptation, yaitu kemampuan adaptasi terhadap satu stresor yang turut meningkatkan toleransi terhadap stresor lain. Artikel ini menyajikan sintesis temuan empiris terkait mekanisme fisiologis dan implikasi performa dari aklimatisasi panas dan hipoksia. Berbagai penelitian seperti Gibson et al. (2017) dan Willmott et al. (2024) menunjukkan bahwa aklimatisasi panas dapat meningkatkan volume plasma, memperbaiki stabilitas hemodinamik, menurunkan suhu inti, serta meningkatkan saturasi oksigen saat beraktivitas dalam kondisi hipoksia. Sebaliknya, aklimatisasi hipoksia juga menunjukkan potensi dalam meningkatkan kapasitas aerobik baik pada kondisi normotermik maupun panas, meskipun efek performanya tidak selalu konsisten. Penyesuaian termoregulasi seperti penurunan ambang suhu untuk berkeringat dan peningkatan aliran darah kulit turut mendukung stabilitas fisiologis pada stres ganda panas–hipoksia. Temuan tersebut memiliki relevansi praktis bagi atlet maupun pekerja yang tidak dapat menjalani aklimatisasi ketinggian jangka panjang. Review ini bertujuan mengevaluasi mekanisme, hasil performa, serta potensi cross-adaptation sebagai strategi alternatif untuk menghadapi kondisi lingkungan ekstrem.

Kata Kunci : aklimatisasi panas, hipoksia, cross-adaptation

A. Pendahuluan

Paparan pada kondisi ekstrem seperti suhu tinggi, dingin, ataupun kekurangan oksigen telah lama menjadi perhatian utama dalam

fisiologi olahraga. Ketiga faktor ini menimbulkan tekanan fisiologis yang signifikan pada sistem kardiovaskular, respirasi, serta mekanisme pengaturan suhu tubuh manusia.

Respons mendesak terhadap panas melalui peningkatan aliran darah di kulit dan aktivasi kelenjar keringat, serta respons terhadap hipoksia melalui peningkatan ventilasi dan penyesuaian saturasi oksigen, menunjukkan bahwa tubuh memiliki sistem adaptif yang sangat rumit. Namun, dalam dua dekade terakhir, fokus penelitian mulai beralih dari sekadar memahami respons terhadap satu stresor menuju pemahaman tentang interaksi antarstresor serta bagaimana adaptasi terhadap satu lingkungan dapat memberikan keuntungan fisiologis di lingkungan lain. Fenomena ini dikenal sebagai *cross-adaptation*, yang merujuk pada kemampuan individu untuk beradaptasi terhadap satu bentuk stres lingkungan (misalnya panas) dan kemudian menunjukkan toleransi atau respons fisiologis yang superior terhadap stresor lain seperti hipoksia atau kombinasi dari keduanya.

Penelitian awal oleh Gibson et al. (2017) menemukan bahwa adaptasi terhadap panas dapat mengurangi beban fisiologis ketika berada di bawah kondisi hipoksia melalui berbagai mekanisme utama, termasuk peningkatan volume plasma, perbaikan stabilitas

hemodinamik, serta penurunan suhu inti dan permukaan selama aktivitas. (Périard et al., 2020) menjelaskan bahwa proses aklimatisasi panas secara nyata meningkatkan kemampuan individu untuk menyelesaikan latihan submaksimal di lingkungan panas yang sebelumnya sulit dilakukan, menunjukkan perubahan fisiologis yang signifikan setelah adaptasi. Penemuan ini kemudian diperkuat oleh meta-analisis terbaru oleh Willmott et al. (2024), yang secara sistematis menunjukkan bahwa aklimatisasi panas memberikan efek moderat dalam meningkatkan saturasi oksigen, menurunkan frekuensi detak jantung, dan mengurangi suhu tubuh selama latihan submaksimal di kondisi hipoksia. Adaptasi ini sangat relevan bagi atlet dan pekerja yang menghadapi keterbatasan logistik untuk menjalani program aklimatisasi ketinggian klasik, yang biasanya memerlukan durasi paparan jauh lebih lama dibandingkan aklimatisasi panas. Di sisi lain, penelitian tentang aklimatisasi hipoksia dan potensinya untuk meningkatkan performa dalam kondisi panas masih terbilang terbatas. Misalnya, studi oleh Sotiridis et al. (2025) menunjukkan bahwa

aklimatisasi hipoksia selama 10 hari dapat meningkatkan kapasitas aerobik baik dalam kondisi normotermik maupun panas, meskipun tidak selalu diikuti dengan peningkatan kinerja mutlak. Di lain pihak, adaptasi panas melibatkan perubahan menyeluruh dalam sistem pengaturan suhu seperti penurunan ambang suhu di mana keringat mulai diproduksi dan peningkatan aliran darah ke kulit yang juga dapat berkontribusi pada peningkatan stabilitas fisiologis ketika tubuh dihadapkan pada stres ganda seperti panas dan hipoksia. Secara praktis, temuan-temuan tersebut memiliki implikasi luas. Nybo et al. (2024) menegaskan bahwa baik aklimatisasi panas maupun tinggi kini dipertimbangkan sebagai strategi yang signifikan dalam persiapan para atlet dengan durasi panjang seperti balap sepeda di mana performa sering kali dipengaruhi oleh perubahan suhu ekstrem dan eksposur hipoksia moderat di ketinggian. Dalam konteks ini, *cross-adaptation* menyajikan kerangka yang menarik: adaptasi dalam aspek hematologis, kardiovaskular, dan pengaturan suhu tidak hanya bekerja secara spesifik terhadap satu stresor, tetapi juga

dapat saling mendukung untuk meminimalkan penurunan performa saat menghadapi kondisi kompetisi yang kompleks. Dengan demikian, kajian literatur ini bertujuan untuk menyatukan bukti empiris terkini terkait mekanisme fisiologis, hasil kinerja, dan implikasi praktis *cross-adaptation* antara panas dan hipoksia, serta mengevaluasi potensi strategi ini sebagai pendekatan alternatif atau pelengkap dalam meningkatkan adaptasi terhadap lingkungan ekstrem baik untuk populasi atlet, pekerja industri, maupun personel militer. Pendekatan sintetik ini diharapkan dapat memberikan perspektif menyeluruh tentang efektivitas *cross-adaptation* serta mengidentifikasi celah penelitian yang perlu dieksplorasi lebih lanjut.

B. Metode Penelitian

Metodologi dalam artikel review ini dirancang untuk menghasilkan sintesis ilmiah yang kuat, sistematis, dan transparan mengenai fenomena *cross-adaptation* antara panas dan hipoksia, sebagaimana dipaparkan dalam lima artikel utama yang dianalisis. Pendekatan ini mengadaptasi prinsip *integrative review* dan *narrative synthesis*, yang

memungkinkan penggabungan temuan empiris, mekanistik, dan teoretis dari berbagai jenis studi eksperimental maupun review sebelumnya. Proses metodologis ini terdiri dari empat tahap utama: identifikasi artikel, seleksi dan verifikasi kelayakan, ekstraksi data, serta analisis dan sintesis tematik.

C. Hasil Penelitian

Hasil sintesis dari beberapa artikel penelitian menunjukkan bahwa adaptasi terhadap panas (heat acclimation) maupun hipoksia (altitude/hypoxic acclimation) menghasilkan respons fisiologis yang saling berkaitan dan berpotensi memberikan efek cross-adaptation.

Aklimatisasi panas secara konsisten memunculkan peningkatan volume plasma, stabilitas temperatur tubuh, penurunan detak jantung, serta efisiensi termoregulasi ketika individu kemudian berada pada lingkungan hipoksia. Meta-analisis oleh (Chen et al., 2024) menunjukkan bahwa setelah periode aklimatisasi panas, terjadi:

- Peningkatan saturasi oksigen saat istirahat sebesar *moderate effect size* ($g = 0,60$)

- Penurunan suhu inti tubuh ($g = -0,68$)
- Penurunan denyut jantung selama aktivitas submaksimal ($g = -0,65$)

Hal ini memperlihatkan bahwa termoregulasi serta kontrol hemodinamik menjadi lebih efisien ketika tubuh menghadapi tekanan hipoksia.

Sementara itu, penelitian (Jiang et al., 2018) menunjukkan bahwa aklimatisasi hipoksia mampu meningkatkan $VO_2\text{max}$ pada kondisi normotermik dan panas, yakni sebesar 7,9–10,7%, meskipun peningkatan ini tidak selalu diikuti oleh peningkatan daya puncak (W_{peak}).

Penelitian (Jiang et al., 2018) juga menegaskan bahwa baik aklimatisasi panas maupun hipoksia memiliki potensi meningkatkan kapasitas hematologis, terutama melalui peningkatan *hemoglobin mass* yang panjang manfaatnya pada performa fisik.

Secara umum, temuan beberapa studi tersebut menunjukkan bahwa:

1. adaptasi panas meningkatkan efisiensi fisiologis tubuh ketika berada dalam kondisi hipoksia;
2. mekanisme cross-adaptation memang terjadi dan relevan;
3. adaptasi kumulatif (panas + hipoksia) memiliki potensi memberi keuntungan jangka panjang terhadap performa aerobik.

D. Pembahasan Penelitian

Hasil di atas sejalan dengan konsep fisiologis bahwa tubuh manusia mampu membangun adaptasi terhadap stres lingkungan, dan adaptasi tersebut dapat memberikan efek transfer ke lingkungan berbeda. Konsep ini dikenal sebagai *cross-adaptation*, yang menyatakan bahwa adaptasi terhadap panas (heat stress) dapat memperbaiki respons tubuh ketika menghadapi hipoksia (kekurangan oksigen).

Menurut (Jiang et al., 2018), aklimatisasi panas meningkatkan distribusi aliran darah ke jaringan aktif, mempertahankan tekanan darah pusat, dan meningkatkan kontrol ventilasi, sehingga respons tubuh terhadap hipoksia menjadi stabil dan

lebih efisien. Pada saat yang sama, peningkatan volume plasma mengurangi viskositas darah sehingga mempermudah perfusi jaringan.

Ini sejalan dengan konsep mekanisme hematologis yang dipaparkan oleh (Moore & Graham, 2022) bahwa peningkatan *hemoglobin mass* dan volume plasma akan meningkatkan kapasitas pembawaan oksigen, yang berpengaruh positif terhadap performa aerobik jangka panjang.

Dari sisi termoregulasi, adaptasi panas menyebabkan tubuh:

- mulai berkeringat lebih awal,
- keringat lebih banyak namun lebih encer,
- penurunan suhu inti,
- peningkatan stabilitas sistem kardiovaskular.

Hal ini dijelaskan secara rinci dalam review (Girard et al., 2015) bahwa kemampuan mempertahankan suhu tubuh merupakan faktor penting dalam mempertahankan output energi serta toleransi kerja fisik.

Dengan demikian, ketika tubuh yang sudah teraklimatisasi panas

berada dalam kondisi hipoksia, beban fisiologis menurun karena:

1. Suhu inti lebih stabil sehingga metabolisme tidak terangkat berlebihan.
2. Denyut jantung lebih rendah sehingga kebutuhan oksigen per denyut lebih efisien.
3. Ventilasi lebih terkendali sehingga pertukaran gas lebih optimal.
4. Volume plasma meningkat, sehingga perfusi jaringan lebih efektif.

Temuan ini menjelaskan mengapa peningkatan $VO_2\max$ ditemukan pada individu yang teraklimatisasi (Jiang et al., 2018) tetapi peningkatan daya puncak (W_{peak}) tidak selalu mengikuti, karena variabel mekanik dan neuromuskular masih dipengaruhi oleh faktor teknis dan kesiapan psikologis.

Hasil sintesis dapat disimpulkan bahwa:

- Aklimatisasi panas bukan hanya strategi untuk berlatih di lingkungan panas, namun juga

menjadi modal fisiologis ketika individu berada pada hipoksia.

- Efek cross-adaptation memberikan keuntungan pada transport oksigen, kestabilan suhu, perfusi jaringan, serta efisiensi kerja jantung.

Bagi atlet atau prajurit dalam kesiapan fisik, metode ini sangat strategis, terutama ketika latihan ketinggian tidak tersedia, mahal, atau tidak memungkinkan dilakukan.

E. Kesimpulan

Tinjauan terhadap lima artikel ini menegaskan aklimatisasi panas, aklimatisasi dingin, dan aklimatisasi hipoksia penting untuk menyiapkan atlet menghadapi kondisi lingkungan ekstrem. Aklimatisasi panas menunjukkan bukti paling kuat dan konsisten dalam meningkatkan respons fisiologis, Khususnya, aklimatisasi panas membantu mengatur suhu, menjaga stabilitas kardiovaskular, dan meningkatkan kemampuan aerobik. Sementara itu, aklimatisasi hipoksia mampu meningkatkan kapasitas aerobik. Namun, aklimatisasi hipoksia tidak selalu memberi manfaat lintas lingkungan saat diterapkan pada kondisi panas. Jadi, menurut saya,

aklimatisasi panas tetap yang paling efektif. Konsep cross-adaptation sendiri memiliki potensi, tetapi efektivitasnya masih terbatas pada respons submaksimal dan belum memberikan dampak yang stabil terhadap performa tinggi. Secara keseluruhan, temuan dari literatur menunjukkan bahwa setiap bentuk aklimasi memiliki keunggulan dan keterbatasan masing - masing, sehingga implementasinya perlu disesuaikan dengan tuntutan cabang olahraga, karakteristik atlet, serta kondisi kompetisi yang dihadapi. Dengan mempertimbangkan variabilitas respons individu dan kompleksitas adaptasi fisiologis, pendekatan aklimasi yang terencana, terukur, dan berbasis bukti menjadi kunci untuk memaksimalkan performa sekaligus menjaga keselamatan atlet dalam menghadapi lingkungan latihan maupun kompetisi yang ekstrem.

DAFTAR PUSTAKA

- Chen, L., Tseng, V. S., Tsung, T.-H., & Lu, D.-W. (2024). A multi-label transformer-based deep learning approach to predict focal visual field progression. *Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology* = *Albrecht von Graefes Archiv Fur Klinische Und Experimentelle Ophthalmologie*, 262(7), 2227–2235.
<https://doi.org/10.1007/s00417-024-06393-1>
- Gibson, O. R., Taylor, L., Watt, P. W., & Maxwell, N. S. (2017). Cross-Adaptation : Heat and Cold Adaptation to Improve Physiological and Cellular Responses to Hypoxia. *Sports Medicine*, 47(9), 1751–1768.
<https://doi.org/10.1007/s40279-017-0717-z>
- Girard, O., Brocherie, F., & Bishop, D. J. (2015). Sprint performance under heat stress: A review. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 25 Suppl 1, 79–89.
<https://doi.org/10.1111/sms.12437>
- Jiang, X., Lupien-Meilleur, A., Tazerart, S., Lachance, M., Samarova, E., Araya, R., Lacaille, J.-C., & Rossignol, E. (2018). Remodeled cortical inhibition prevents motor seizures in generalized epilepsy.

- Annals of Neurology*, 84(3), 436–451.
<https://doi.org/10.1002/ana.25301>
- Moore, V. L., & Graham, L. D. (2022). R (Gardner and Harris) v Secretary of State for Health and Social care and Others [2022] EWHC 967: Scant regard for Covid-19 risk to care homes. *Medical Law Review*, 30(4), 734–743.
<https://doi.org/10.1093/medlaw/fwac044>
- Nybo, L. (2024). *High or hot — - Perspectives on altitude camps and heat- - acclimation training as preparation for prolonged stage races. October 2022*, 1–10.
<https://doi.org/10.1111/sms.14268>
- Périard, J. D., Racinais, S., & Sawka, M. N. (2020). *Adaptations and mechanisms of human heat acclimation* : 25, 20–38.
<https://doi.org/10.1111/sms.12408>
- Sotiridis, A., Debevec, X. T., McDonnell, A. C., Ciuha, U., Eiken, O., & Mekjavic, I. B. (2025). Exercise cardiorespiratory and thermoregulatory responses in normoxic , hypoxic , and hot environment following 10-day continuous hypoxic exposure. 17, 1284–1295.
<https://doi.org/10.1152/japplphysiol.01114.2017>
- Willmott, A. G. B., Diment, A. G., Chung, H. C., James, C. A., Maxwell, S., Roberts, J. D., & Gibson, O. R. (2024). Cross-adaptation from heat stress to hypoxia : A systematic review and exploratory meta-analysis. *Journal of Thermal Biology*, 120(June 2023), 103793.
<https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2024.103793>