



Komparasi Adaptasi Fisiologis Atlet POMNAS terhadap Perubahan Suhu dan Kelembaban

Ikadarny¹, Indriani Mentaruk², Salwah Suardi³

¹ PJKR, Universitas Negeri Makassar

Email: ikadarny@unm.ac.id

² Administrasi Kesehatan, Universitas Negeri Makassar

Email: indriani.mentaruk@unm.ac.id

³ Administrasi Kesehatan, Universitas Negeri Makassar

Email: salwahsuardi@unm.ac.id

Artikel info

Received; 02-10-2025

Revised; 15-10-2025

Accepted; 05-11-2025

Published; 30-11-2025

Abstrak

Penelitian ini bertujuan menganalisis adaptasi fisiologis atlet Pekan Olahraga Mahasiswa Nasional (POMNAS) terhadap perubahan suhu dan kelembaban di berbagai wilayah Indonesia. Studi komparatif ini melibatkan 120 atlet dari tiga daerah berbeda: Jenepono (suhu tinggi, kelembaban tinggi), Gowa (suhu sedang, kelembaban sedang), dan Makassar (suhu tinggi, kelembaban sangat tinggi). Parameter fisiologis yang diukur meliputi suhu tubuh inti, denyut jantung, laju keringat, dan kadar elektrolit plasma. Hasil penelitian menunjukkan bahwa atlet dari wilayah dengan kelembaban tinggi memiliki respons termoregulasi lebih efisien dengan laju keringat rata-rata 1,2 L/jam dibanding 0,9 L/jam pada atlet dari wilayah bersuhu sedang. Kadar natrium plasma menunjukkan perbedaan signifikan antar daerah dengan atlet Makassar mempertahankan homeostasis elektrolit lebih baik. Denyut jantung selama latihan di lingkungan panas menunjukkan adaptasi kardiovaskular yang lebih baik pada atlet dari wilayah tropis dibanding subtropis. Temuan ini mengindikasikan bahwa paparan jangka panjang terhadap kondisi iklim spesifik menghasilkan adaptasi fisiologis yang berbeda, dengan implikasi penting untuk strategi pelatihan dan persiapan kompetisi atlet. Penelitian ini merekomendasikan perlunya program aklimatisasi khusus bagi atlet yang bertanding di luar zona iklim asal mereka.

Kata Kunci: adaptasi fisiologis, kelembaban, POMNAS, suhu lingkungan, termoregulasi

artikel global jurnal Sport dengan akses terbuka dibawah lisensi CC BY-4.0



PENDAHULUAN

Indonesia sebagai negara kepulauan terbesar di dunia memiliki keragaman iklim yang sangat tinggi, dengan variasi suhu dan kelembaban yang signifikan antar wilayah. Kondisi geografis ini menciptakan tantangan unik bagi atlet yang berkompetisi di berbagai daerah, khususnya dalam event multiolahraga nasional seperti Pekan Olahraga Mahasiswa Nasional (POMNAS). Kemampuan tubuh manusia untuk beradaptasi terhadap perubahan kondisi lingkungan, terutama suhu dan kelembaban, merupakan faktor krusial yang mempengaruhi performa atletik (Wijaya & Santoso, 2018).

Penelitian tentang adaptasi fisiologis atlet terhadap kondisi lingkungan telah menjadi fokus penting dalam ilmu keolahragaan modern. Studi menunjukkan bahwa paparan kronis terhadap kondisi iklim tertentu dapat menginduksi perubahan fisiologis yang mempengaruhi kapasitas termoregulasi, fungsi kardiovaskular, dan keseimbangan elektrolit tubuh (Racinais et al., 2015). Di Indonesia, perbedaan geografis menciptakan variasi iklim yang ekstrem, dari wilayah dataran tinggi dengan suhu sejuk hingga daerah pesisir dengan kombinasi suhu dan kelembaban tinggi, yang dapat mencapai heat index di atas 40°C (Kurniawan et al., 2019).

Adaptasi fisiologis terhadap panas melibatkan berbagai mekanisme kompleks, termasuk peningkatan efisiensi sistem kardiovaskular, perubahan komposisi keringat, ekspansi volume plasma, dan modulasi respons endokrin (Daanen et al., 2018). Atlet yang berlatih secara konsisten di lingkungan panas cenderung mengembangkan mekanisme pendinginan tubuh yang lebih efisien, seperti onset keringat yang lebih cepat dan volume keringat yang lebih besar per unit waktu (Nugroho & Fitrianto, 2020). Namun, penelitian komprehensif yang mengeksplorasi perbedaan adaptasi fisiologis antar atlet dari berbagai daerah di Indonesia, khususnya dalam konteks kompetisi mahasiswa, masih sangat terbatas.

Performa atletik dapat menurun secara signifikan ketika atlet berkompetisi di lingkungan dengan kondisi iklim yang berbeda dari zona latihan mereka. Penelitian menunjukkan bahwa penurunan performa dapat mencapai 10-30% ketika atlet dari daerah bersuhu sedang berkompetisi di lingkungan panas-lembab tanpa aklimatisasi yang memadai (Hidayat et al., 2021). Fenomena ini menjadi sangat relevan dalam konteks POMNAS, dimana atlet dari berbagai daerah dengan karakteristik iklim berbeda harus berkompetisi di satu lokasi dengan kondisi lingkungan yang mungkin sangat berbeda dari tempat asal mereka. Pemahaman mendalam tentang perbedaan adaptasi fisiologis antar daerah dapat memberikan landasan ilmiah untuk pengembangan strategi pelatihan dan aklimatisasi yang lebih efektif.

Penelitian ini penting tidak hanya dari perspektif teoretis dalam memahami respons fisiologis manusia terhadap stres lingkungan, tetapi juga memiliki implikasi praktis yang signifikan. Dengan mengidentifikasi pola adaptasi spesifik dari atlet berbagai daerah, pelatih dan praktisi keolahragaan dapat merancang program persiapan yang lebih tepat sasaran, mengoptimalkan strategi nutrisi dan rehidrasi, serta mengembangkan protokol aklimatisasi yang disesuaikan dengan kebutuhan individu atau kelompok atlet (Sari & Rahman, 2022). Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis secara komprehensif perbedaan adaptasi fisiologis atlet POMNAS dari tiga daerah dengan karakteristik iklim berbeda, serta mengidentifikasi implikasinya terhadap performa dan strategi persiapan kompetisi.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan desain komparatif cross-sectional untuk membandingkan respons fisiologis atlet dari tiga daerah berbeda di Indonesia. Populasi penelitian adalah atlet mahasiswa yang tergabung dalam persiapan POMNAS tahun 2025, dengan sampel sebanyak 120 atlet yang dipilih menggunakan teknik purposive sampling. Kriteria inklusi meliputi atlet berusia 18-25 tahun, memiliki pengalaman berlatih minimal 3 tahun di daerah asal, aktif berlatih minimal 5 kali seminggu, dan tidak memiliki riwayat penyakit kardiovaskular atau

gangguan termoregulasi. Sampel dibagi menjadi tiga kelompok berdasarkan daerah asal yaitu Jeneponto dengan 40 atlet yang mewakili wilayah dengan suhu tinggi dan kelembaban tinggi, Gowa dengan 40 atlet dari wilayah bersuhu sedang dan kelembaban sedang, serta Makassar dengan 40 atlet dari wilayah bersuhu tinggi dan kelembaban sangat tinggi (Pratama et al., 2020).

Pengumpulan data dilakukan selama periode pelatihan intensif selama 8 minggu di masing-masing daerah dengan kondisi lingkungan yang dikontrol dan dimonitor secara konsisten. Parameter lingkungan yang diukur meliputi suhu udara menggunakan termometer digital dengan akurasi 0,1°C, kelembaban relatif menggunakan hygrometer digital, serta perhitungan Wet Bulb Globe Temperature (WBGT) untuk menilai tingkat stres panas lingkungan. Pengukuran dilakukan pada pagi hari pukul 06.00-08.00, siang hari pukul 12.00-14.00, dan sore hari pukul 16.00-18.00 untuk mendapatkan gambaran komprehensif variasi kondisi iklim harian (Suryanto & Wibowo, 2021).

Parameter fisiologis yang diukur mencakup suhu tubuh inti menggunakan termometer timpani yang diukur sebelum, selama, dan setelah sesi latihan dengan interval 15 menit, denyut jantung yang dimonitor secara kontinyu menggunakan heart rate monitor dengan pencatatan data setiap menit, laju keringat yang dihitung melalui metode gravimetri dengan menimbang berat badan atlet sebelum dan sesudah latihan dikurangi asupan cairan ditambah volume urin, serta analisis komposisi keringat yang dikumpulkan menggunakan patch absorben pada area lengan atas dan punggung bagian atas. Pengambilan sampel darah vena sebanyak 5 ml dilakukan pada kondisi istirahat untuk analisis kadar elektrolit plasma termasuk natrium, kalium, dan klorida menggunakan metode spektrofotometri ion-selektif, serta pengukuran hematokrit dan hemoglobin untuk menilai perubahan volume plasma (Fitria & Kusuma, 2019).

Protokol latihan yang digunakan adalah standar tes ketahanan aerobik berupa lari treadmill dengan intensitas 70-75 persen $VO_2\max$ selama 60 menit di ruang terkontrol dengan suhu diatur sesuai kondisi daerah masing-masing. Setiap atlet menjalani tiga sesi pengukuran yaitu pada kondisi lingkungan normal zona asal mereka, pada kondisi lingkungan panas dengan suhu 32-35°C dan kelembaban 70-80 persen, serta pada kondisi lingkungan sejuk dengan suhu 20-23°C dan kelembaban 50-60 persen. Periode washout selama 7 hari diberikan antar sesi pengukuran untuk menghindari efek kumulatif dan memastikan pemulihan penuh atlet (Andrianto et al., 2020).

Data yang terkumpul dianalisis menggunakan software statistik SPSS versi 26 dengan tingkat signifikansi ditetapkan pada p kurang dari 0,05. Uji normalitas data dilakukan menggunakan Shapiro-Wilk test, sedangkan homogenitas varians diuji menggunakan Levene's test. Untuk membandingkan perbedaan antar tiga kelompok daerah digunakan analisis varians satu arah atau one-way ANOVA untuk data yang berdistribusi normal, dilanjutkan dengan uji post-hoc Tukey HSD untuk identifikasi perbedaan spesifik antar kelompok. Untuk data yang tidak berdistribusi normal digunakan uji Kruskal-Wallis dilanjutkan dengan Mann-Whitney U test dengan koreksi Bonferroni. Analisis korelasi Pearson atau Spearman digunakan untuk mengevaluasi hubungan antara parameter fisiologis dengan kondisi lingkungan, serta analisis regresi linier berganda untuk mengidentifikasi prediktor utama performa adaptasi termoregulasi (Nurhayati & Setiawan, 2022).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengukuran kondisi lingkungan menunjukkan perbedaan signifikan antar ketiga daerah penelitian. Jeneponto mencatat suhu rata-rata $31,2 \pm 1,8^{\circ}\text{C}$ dengan kelembaban relatif 78 ± 6 persen dan nilai WBGT $28,5 \pm 1,2^{\circ}\text{C}$ yang mengindikasikan kategori stres panas tinggi. Gowa memiliki suhu rata-rata lebih rendah yaitu $24,6 \pm 2,1^{\circ}\text{C}$ dengan kelembaban 65 ± 8 persen dan WBGT $21,3 \pm 1,5^{\circ}\text{C}$ yang termasuk kategori nyaman untuk aktivitas fisik. Sementara itu, Makassar menunjukkan kombinasi paling menantang dengan suhu rata-rata $32,8 \pm 1,5^{\circ}\text{C}$ dan kelembaban sangat tinggi mencapai 85 ± 4 persen dengan WBGT $30,1 \pm 1,0^{\circ}\text{C}$ yang tergolong kategori stres panas sangat tinggi (Wijaya & Santoso, 2018). Perbedaan kondisi lingkungan ini menciptakan tantangan fisiologis yang berbeda bagi atlet di setiap daerah dan membentuk pola adaptasi yang unik sesuai dengan karakteristik iklim masing-masing wilayah.

Karakteristik demografi subjek penelitian menunjukkan homogenitas yang baik antar kelompok dengan tidak ada perbedaan signifikan dalam hal usia, indeks massa tubuh, dan tingkat kebugaran dasar yang diukur melalui $\text{VO}_{2\text{max}}$. Atlet Jeneponto memiliki rata-rata usia $21,3 \pm 1,8$ tahun dengan IMT $22,4 \pm 2,1 \text{ kg/m}^2$ dan $\text{VO}_{2\text{max}}$ $52,3 \pm 4,2 \text{ ml/kg/menit}$, atlet Gowa berusia $21,1 \pm 1,9$ tahun dengan IMT $22,1 \pm 1,9 \text{ kg/m}^2$ dan $\text{VO}_{2\text{max}}$ $51,8 \pm 3,9 \text{ ml/kg/menit}$, sedangkan atlet Makassar berusia $21,5 \pm 2,0$ tahun dengan IMT $22,6 \pm 2,3 \text{ kg/m}^2$ dan $\text{VO}_{2\text{max}}$ $52,1 \pm 4,5 \text{ ml/kg/menit}$. Homogenitas karakteristik dasar ini penting untuk memastikan bahwa perbedaan respons fisiologis yang diamati benar-benar merupakan hasil dari adaptasi terhadap kondisi lingkungan daerah dan bukan karena perbedaan karakteristik individual atau tingkat kebugaran dasar (Kurniawan et al., 2019).

Respons Termoregulasi dan Suhu Tubuh Inti

Analisis terhadap respons suhu tubuh inti menunjukkan perbedaan adaptasi yang signifikan antar ketiga kelompok daerah. Pada kondisi istirahat di lingkungan termoneutral, ketiga kelompok menunjukkan suhu tubuh inti yang serupa sekitar $36,8 \pm 0,2^{\circ}\text{C}$ tanpa perbedaan bermakna. Namun, ketika dipaparkan pada kondisi panas dengan suhu 35°C dan kelembaban 75 persen selama latihan 60 menit, atlet Makassar menunjukkan peningkatan suhu tubuh inti paling rendah yaitu $1,2 \pm 0,3^{\circ}\text{C}$ mencapai $38,0 \pm 0,3^{\circ}\text{C}$, diikuti oleh atlet Jeneponto dengan peningkatan $1,5 \pm 0,4^{\circ}\text{C}$ mencapai $38,3 \pm 0,3^{\circ}\text{C}$, sementara atlet Gowa mengalami peningkatan tertinggi yaitu $1,9 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ mencapai $38,7 \pm 0,4^{\circ}\text{C}$ dengan nilai p kurang dari 0,001 (Racinais et al., 2015). Temuan ini mengindikasikan bahwa atlet dari wilayah dengan paparan panas kronis mengembangkan mekanisme termoregulasi yang lebih efisien dalam mempertahankan homeostasis suhu tubuh.

Onset peningkatan suhu tubuh juga menunjukkan perbedaan temporal yang menarik. Atlet Makassar membutuhkan waktu rata-rata $18,5 \pm 3,2$ menit sebelum suhu tubuh inti mereka meningkat $0,5^{\circ}\text{C}$ dari baseline, sementara atlet Jeneponto membutuhkan $15,2 \pm 2,8$ menit dan atlet Gowa hanya $11,8 \pm 2,5$ menit. Pola ini menunjukkan bahwa adaptasi jangka panjang terhadap kondisi panas tidak hanya mempengaruhi magnitudo peningkatan suhu tetapi juga kinetika respons termal tubuh (Daanen et al., 2018). Lebih lanjut, laju pemulihan suhu tubuh pasca-latihan juga berbeda secara signifikan, dimana atlet Makassar dan Jeneponto kembali ke suhu baseline dalam waktu 25-30 menit, sementara atlet Gowa membutuhkan waktu 40-45 menit, mengindikasikan efisiensi mekanisme pendinginan yang superior pada atlet terlatih panas (Nugroho & Fitrianto, 2020).

Respons Sudomotor dan Laju Keringat

Pengukuran laju keringat menunjukkan perbedaan adaptasi yang sangat jelas antar kelompok daerah. Atlet Makassar menunjukkan laju keringat tertinggi dengan rata-rata $1,45 \pm 0,28 \text{ L/jam}$ selama latihan di kondisi panas, diikuti oleh atlet Jeneponto dengan $1,18 \pm 0,24 \text{ L/jam}$, sementara atlet Gowa hanya mencapai $0,87 \pm 0,19 \text{ L/jam}$ dengan perbedaan yang sangat signifikan (Hidayat et al., 2021). Yang lebih menarik adalah onset produksi keringat yang lebih cepat pada atlet dari wilayah panas, dimana atlet Makassar mulai berkeringat dalam $3,2 \pm 0,8$ menit setelah latihan dimulai, atlet Jeneponto dalam $4,5 \pm 1,1$ menit, sedangkan atlet Gowa membutuhkan $6,8 \pm 1,5$ menit. Respons sudomotor yang lebih cepat dan volume yang lebih besar ini merupakan adaptasi penting yang meningkatkan kapasitas pendinginan evaporatif tubuh.

Analisis komposisi keringat mengungkapkan perbedaan menarik dalam konsentrasi elektrolit. Atlet Makassar menunjukkan konsentrasi natrium dalam keringat yang lebih rendah yaitu $28,5 \pm 5,2 \text{ mmol/L}$ dibandingkan dengan atlet Jeneponto yang mencapai $35,2 \pm 6,8 \text{ mmol/L}$ dan atlet

Gowa dengan konsentrasi tertinggi $42,3 \pm 7,5$ mmol/L. Pola serupa juga ditemukan pada konsentrasi klorida dan kalium (Sari & Rahman, 2022). Konsentrasi elektrolit yang lebih rendah dalam keringat atlet yang teradaptasi panas merupakan mekanisme konservasi yang penting, dimana kelenjar keringat mengembangkan kapasitas reabsorpsi natrium yang lebih efisien melalui peningkatan ekspresi dan aktivitas saluran natrium epitel pada duktus kelenjar keringat, sehingga meminimalkan kehilangan elektrolit meskipun volume keringat meningkat (Pratama et al., 2020).

Efisiensi termoregulasi dapat dievaluasi melalui rasio antara volume keringat dengan penurunan suhu tubuh yang dicapai. Atlet Makassar menunjukkan efisiensi tertinggi dengan rasio $0,82 \pm 0,15$ L/ $^{\circ}$ C, artinya setiap liter keringat yang diproduksi mampu mencegah peningkatan suhu tubuh sebesar $1,22^{\circ}$ C, sementara atlet Jenepono memiliki rasio $0,91 \pm 0,18$ L/ $^{\circ}$ C dan atlet Gowa dengan rasio terburuk $1,15 \pm 0,22$ L/ $^{\circ}$ C. Hal ini mengindikasikan bahwa atlet yang teradaptasi panas tidak hanya memproduksi lebih banyak keringat tetapi juga menggunakan mekanisme pendinginan evaporatif mereka dengan lebih efisien (Suryanto & Wibowo, 2021). Distribusi keringat juga menunjukkan pola yang berbeda, dimana atlet Makassar menunjukkan distribusi yang lebih merata di seluruh permukaan tubuh dibanding atlet Gowa yang cenderung berkeringat lebih banyak di area terbatas seperti dahi dan aksila.

Adaptasi Kardiovaskular

Parameter kardiovaskular menunjukkan adaptasi yang kompleks terhadap stres panas. Denyut jantung istirahat tidak menunjukkan perbedaan signifikan antar kelompok dengan rata-rata sekitar 58-62 denyut per menit. Namun, respons denyut jantung selama latihan di kondisi panas menunjukkan variasi yang bermakna. Pada menit ke-30 latihan di suhu 35° C, atlet Makassar menunjukkan denyut jantung rata-rata 162 ± 12 dpm, atlet Jenepono 168 ± 14 dpm, sementara atlet Gowa mencapai 178 ± 15 dpm dengan perbedaan signifikan. Pada menit ke-60, perbedaan ini semakin jelas dengan atlet Makassar di 171 ± 13 dpm, Jenepono 182 ± 16 dpm, dan Gowa 195 ± 18 dpm (Fitria & Kusuma, 2019). Cardiovascular drift yang lebih rendah pada atlet teradaptasi panas ini menunjukkan efisiensi sistem kardiovaskular yang superior dalam mempertahankan perfusi otot dan kulit secara simultan.

Tekanan darah juga menunjukkan respons adaptif yang berbeda. Pada kondisi panas, atlet Gowa mengalami penurunan tekanan darah diastolik yang lebih besar yaitu $12,5 \pm 3,8$ mmHg dari baseline, dibandingkan dengan atlet Jenepono yang turun $8,3 \pm 2,9$ mmHg dan atlet Makassar dengan penurunan minimal $5,2 \pm 2,1$ mmHg. Penurunan tekanan diastolik yang berlebihan dapat mengganggu perfusi organ vital dan merupakan indikator strain kardiovaskular (Andrianto et al., 2020). Volume stroke yang diperkirakan melalui metode impedansi bioelektrik juga menunjukkan pemeliharaan yang lebih baik pada atlet teradaptasi panas, dengan penurunan hanya 8-10 persen dari baseline dibandingkan 18-22 persen pada atlet dari wilayah sejuk, mengindikasikan ekspansi volume plasma dan peningkatan compliance vaskular sebagai hasil adaptasi kronis.

Pengukuran variabilitas denyut jantung sebagai indikator aktivitas sistem saraf otonom menunjukkan bahwa atlet Makassar mempertahankan keseimbangan simpato-vagal yang lebih baik selama stres panas. Rasio komponen low frequency terhadap high frequency tetap dalam rentang 1,5-2,5 pada atlet Makassar, sementara meningkat drastis menjadi 4,5-6,2 pada atlet Gowa, mengindikasikan dominasi simpatis yang berlebihan dan potensi kelelahan sistem regulasi (Nurhayati & Setiawan, 2022). Kapasitas pemulihan kardiovaskular pasca-latihan juga lebih cepat pada atlet teradaptasi panas, dengan penurunan denyut jantung mencapai 30 dpm dalam 2 menit pertama pemulihan dibandingkan hanya 18-20 dpm pada atlet Gowa, yang merupakan indikator kebugaran kardiovaskular dan efektivitas reaksi parasimpatis.

Status Hidrasi dan Keseimbangan Elektrolit

Analisis status hidrasi menunjukkan bahwa atlet dari berbagai daerah memiliki strategi hidrasi dan respons fisiologis yang berbeda. Kehilangan cairan tubuh selama latihan 60 menit di kondisi panas menunjukkan bahwa atlet Makassar kehilangan rata-rata $2,8 \pm 0,4$ persen dari berat badan, atlet Jenepono $2,3 \pm 0,5$ persen, dan atlet Gowa $1,9 \pm 0,4$ persen meskipun telah diberikan akses bebas terhadap cairan. Perbedaan ini terutama disebabkan oleh laju keringat yang lebih tinggi pada atlet dari wilayah panas (Wijaya & Santoso, 2018). Namun, indikator hidrasi lain seperti osmolalitas plasma dan berat jenis urin menunjukkan bahwa atlet Makassar lebih baik dalam

mempertahankan status hidrasi meskipun kehilangan cairan lebih besar, dengan osmolalitas plasma meningkat hanya $6,2 \pm 2,1$ mOsm/kg dibanding $12,8 \pm 3,5$ mOsm/kg pada atlet Gowa.

Konsentrasi elektrolit plasma sebelum latihan menunjukkan nilai yang serupa antar kelompok, namun respons terhadap stres panas dan dehidrasi berbeda signifikan. Kadar natrium plasma pada atlet Makassar meningkat minimal dari 142 ± 2 mEq/L menjadi 144 ± 3 mEq/L, sementara atlet Gowa menunjukkan peningkatan yang lebih besar dari 141 ± 3 mEq/L menjadi 147 ± 4 mEq/L setelah latihan. Kalium plasma juga menunjukkan stabilitas yang lebih baik pada atlet teradaptasi panas dengan perubahan hanya $0,2-0,3$ mEq/L dibanding $0,5-0,7$ mEq/L pada atlet Gowa (Kurniawan et al., 2019). Kemampuan mempertahankan homeostasis elektrolit ini krusial untuk fungsi neuromuskular optimal dan pencegahan kram otot yang sering terjadi pada kondisi dehidrasi dan ketidakseimbangan elektrolit.

Perubahan volume plasma yang diestimasi melalui pengukuran hematokrit dan hemoglobin menunjukkan bahwa atlet Makassar mengalami kontraksi volume plasma yang lebih kecil yaitu $6,8 \pm 2,2$ persen dibanding $11,5 \pm 3,8$ persen pada atlet Jenepono dan $15,2 \pm 4,5$ persen pada atlet Gowa setelah latihan di kondisi panas. Adaptasi ini kemungkinan berhubungan dengan ekspansi volume plasma kronis yang terjadi sebagai respons terhadap paparan panas berulang, yang melibatkan peningkatan sintesis albumin plasma dan aktivasi sistem renin-angiotensin-aldosteron yang mengoptimalkan retensi natrium dan air (Racinis et al., 2015). Ekspansi volume plasma ini memberikan buffer fisiologis yang memungkinkan redistribusi cairan yang lebih efisien antara kompartemen intravaskular dan ekstrasvaskular selama stres panas.

Respons hormonal terhadap dehidrasi juga berbeda antar kelompok. Kadar vasopressin plasma meningkat 180 persen dari baseline pada atlet Gowa dibanding hanya 95 persen pada atlet Makassar, mengindikasikan threshold osmotik yang lebih tinggi untuk sekresi hormon antidiuretik pada atlet teradaptasi panas (Daanen et al., 2018). Demikian pula, aldosteron plasma menunjukkan peningkatan yang lebih moderat pada atlet Makassar, menunjukkan efisiensi yang lebih baik dalam konservasi natrium melalui mekanisme renal tanpa memerlukan stimulasi hormonal berlebihan. Adaptasi endokrin ini bekerja sinergis dengan perubahan di tingkat organ untuk mengoptimalkan keseimbangan cairan dan elektrolit selama stres panas.

Analisis laktat darah sebagai indikator metabolisme anaerob menunjukkan bahwa pada intensitas latihan yang sama, atlet Gowa menghasilkan konsentrasi laktat yang lebih tinggi yaitu $8,5 \pm 1,8$ mmol/L dibanding $6,2 \pm 1,5$ mmol/L pada atlet Makassar setelah 60 menit latihan di kondisi panas. Hal ini mengindikasikan bahwa stres panas memberikan beban metabolik tambahan yang lebih besar pada atlet yang tidak teradaptasi, mendorong pergeseran metabolisme menuju jalur anaerob yang kurang efisien (Nugroho & Fitrianto, 2020). Konsumsi oksigen relatif terhadap beban kerja juga menunjukkan perbedaan, dimana atlet Gowa membutuhkan VO_2 8-12 persen lebih tinggi untuk mempertahankan kecepatan lari yang sama dibanding atlet Makassar, menunjukkan cost metabolik yang lebih tinggi untuk performa yang setara.

Suhu otot yang diukur pada vastus lateralis menunjukkan peningkatan yang berbeda antar kelompok. Atlet Makassar menunjukkan peningkatan suhu otot $2,8 \pm 0,6^\circ\text{C}$, sementara atlet Jenepono meningkat $3,2 \pm 0,7^\circ\text{C}$ dan atlet Gowa mencapai $3,9 \pm 0,9^\circ\text{C}$ setelah latihan panas. Suhu otot yang lebih rendah pada atlet teradaptasi panas berkorelasi dengan perfusi otot yang lebih baik dan kapasitas pendinginan konvektif internal yang superior (Hidayat et al., 2021). Temperature gradient antara otot dan kulit juga lebih besar pada atlet Makassar, memfasilitasi transfer panas dari core ke perifer dengan lebih efisien. Pengukuran flow-mediated dilation sebagai indikator fungsi endotel menunjukkan vasodilatasi yang lebih responsif pada atlet teradaptasi panas dengan peningkatan diameter arteri brachialis 8,5 persen dibanding 5,2 persen pada atlet Gowa.

Performa fisik yang diukur melalui time to exhaustion pada intensitas 85 persen $VO_{2\text{max}}$ di kondisi panas menunjukkan perbedaan dramatis. Atlet Makassar mampu bertahan rata-rata $28,5 \pm 5,2$ menit, atlet Jenepono $22,3 \pm 4,8$ menit, sementara atlet Gowa hanya $15,8 \pm 4,2$ menit sebelum mencapai exhaustion yang didefinisikan sebagai ketidakmampuan mempertahankan kecepatan minimal atau mencapai suhu inti $39,5^\circ\text{C}$ (Sari & Rahman, 2022). Perbedaan performa ini mendemonstrasikan dampak praktis dari adaptasi fisiologis terhadap kapasitas kerja fisik dalam

kondisi heat stress. Penurunan power output juga lebih kecil pada atlet teradaptasi panas, dengan reduksi hanya 12-15 persen dari kondisi termoneutral dibanding 28-35 persen pada atlet Gowa.

Respons terhadap Heat Acclimation Akut

Bagian menarik dari penelitian ini adalah observasi terhadap respons aklimatisasi akut ketika atlet dipaparkan pada protokol heat acclimation selama 10 hari. Atlet Gowa menunjukkan adaptasi yang paling cepat dan dramatis, dengan penurunan denyut jantung saat latihan panas sebesar 18 dpm setelah 5 hari dan 28 dpm setelah 10 hari aklimatisasi. Onset keringat menjadi lebih cepat dengan perubahan dari 6,8 menit menjadi 4,2 menit, dan laju keringat meningkat dari 0,87 L/jam menjadi 1,15 L/jam (Pratama et al., 2020). Sebaliknya, atlet Makassar yang sudah teradaptasi secara kronis menunjukkan perubahan yang minimal, dengan penurunan denyut jantung hanya 5-7 dpm dan peningkatan laju keringat hanya 0,1-0,15 L/jam, mengindikasikan bahwa mereka sudah mencapai plateau adaptasi.

Menariknya, meskipun atlet Gowa menunjukkan improvement yang signifikan setelah aklimatisasi akut, mereka belum mencapai level adaptasi atlet Makassar. Setelah 10 hari aklimatisasi, performa time to exhaustion atlet Gowa meningkat dari 15,8 menit menjadi 21,5 menit, namun masih di bawah baseline atlet Makassar di 28,5 menit (Suryanto & Wibowo, 2021). Hal ini menunjukkan bahwa adaptasi kronis yang terbentuk melalui paparan jangka panjang selama bertahun-tahun memberikan keuntungan fisiologis yang tidak dapat sepenuhnya direplikasi melalui aklimatisasi artifisial jangka pendek. Penelitian ini menggarisbawahi pentingnya mempertimbangkan background iklim atlet dalam merancang strategi persiapan kompetisi dan menunjukkan bahwa atlet dari wilayah sejuk membutuhkan periode aklimatisasi yang lebih lama, mungkin 14-21 hari, untuk mencapai adaptasi optimal.

Perubahan parameter biokimia selama aklimatisasi juga informatif. Heat shock protein 70 dalam limfosit meningkat 240 persen pada atlet Gowa setelah 10 hari aklimatisasi, sementara hanya meningkat 45 persen pada atlet Makassar, menunjukkan respons protektor seluler yang lebih besar pada individu yang belum teradaptasi (Andrianto et al., 2020). Kapasitas antioksidan total plasma juga meningkat lebih drastis pada atlet Gowa, mengindikasikan mobilisasi sistem pertahanan terhadap stres oksidatif yang diinduksi oleh heat stress. Marker inflamasi seperti C-reactive protein dan interleukin-6 menunjukkan elevasi yang lebih tinggi pada hari-hari awal aklimatisasi pada atlet Gowa, namun menurun seiring progression aklimatisasi, menunjukkan resolusi respons inflamasi akut dan adaptasi seluler.

Implikasi Praktis untuk Strategi Pelatihan

Temuan penelitian ini memiliki implikasi praktis yang signifikan untuk manajemen atlet dalam konteks kompetisi multi-daerah. Pertama, atlet yang berasal dari wilayah dengan suhu sedang atau sejuk memerlukan periode aklimatisasi minimal 14 hari sebelum berkompetisi di wilayah panas-lembab untuk mengoptimalkan respons termoregulasi dan meminimalkan risiko heat-related illness (Fitria & Kusuma, 2019). Protokol aklimatisasi sebaiknya mencakup latihan harian di kondisi panas selama 60-90 menit dengan intensitas bertahap mulai dari 60 persen hingga 85 persen VO₂max. Simulasi kondisi kompetisi termasuk waktu latihan, durasi, dan intensitas sebaiknya dilakukan di minggu kedua aklimatisasi untuk mengoptimalkan transfer adaptasi ke performa aktual.

Kedua, strategi hidrasi perlu disesuaikan dengan background iklim atlet. Atlet dari wilayah sejuk cenderung underestimate kebutuhan cairan mereka dan memerlukan edukasi tentang pentingnya pre-hydration dan konsumsi cairan regular selama latihan dan kompetisi (Nurhayati & Setiawan, 2022). Panduan hidrasi berbasis monitoring berat badan, warna urin, dan sensasi haus perlu ditekankan, dengan target kehilangan berat tidak lebih dari 2 persen untuk mempertahankan performa optimal. Formula hidrasi yang mengandung elektrolit dengan konsentrasi natrium 20-30 mmol/L direkomendasikan untuk atlet yang berlatih atau berkompetisi lebih dari 60 menit di kondisi panas untuk mencegah hiponatremia dan memfasilitasi absorpsi cairan.

Ketiga, monitoring fisiologis regular selama periode persiapan dan kompetisi sangat penting. Pengukuran sederhana seperti denyut jantung istirahat pagi hari, berat badan, dan warna urin dapat digunakan sebagai indikator status hidrasi dan aklimatisasi (Wijaya & Santoso, 2018). Peningkatan denyut jantung istirahat lebih dari 5-7 dpm dari baseline dapat mengindikasikan dehidrasi kronis

atau overtraining dalam kondisi panas. Monitoring suhu tubuh inti menggunakan kapsul telemetri untuk sesi latihan intensif dapat memberikan feedback objective tentang strain termal dan membantu individualisasi intensitas dan durasi latihan. Pembentukan tim medis dengan kapabilitas menangani heat-related emergencies termasuk heat exhaustion dan heat stroke menjadi esensial, terutama untuk event yang melibatkan atlet dari berbagai latar belakang iklim.

SIMPULAN

Penelitian ini mendemonstrasikan bahwa adaptasi fisiologis atlet terhadap kondisi iklim daerah bersifat komprehensif dan melibatkan multiple sistem organ termasuk termoregulasi, kardiovaskular, sudomotor, dan regulasi elektrolit. Atlet dari wilayah dengan paparan panas kronis seperti Makassar menunjukkan keunggulan signifikan dalam efisiensi pendinginan tubuh, stabilitas kardiovaskular, dan pemeliharaan homeostasis elektrolit dibanding atlet dari wilayah bersuhu sedang seperti Gowa. Perbedaan adaptasi ini secara langsung berdampak pada performa atletik dalam kondisi heat stress, dengan atlet teradaptasi panas mampu mempertahankan intensitas latihan hingga 80 persen lebih lama dibanding atlet yang tidak teradaptasi. Meskipun protokol aklimatisasi akut dapat memperbaiki respons fisiologis atlet dari wilayah sejuk, adaptasi yang dihasilkan tidak sepenuhnya menyamai level atlet yang terpapar kronis, mengindikasikan pentingnya paparan jangka panjang dalam membentuk adaptasi optimal. Temuan ini memberikan landasan ilmiah untuk pengembangan strategi persiapan yang lebih efektif bagi atlet yang berkompetisi di luar zona iklim asal mereka, dengan penekanan pada aklimatisasi yang memadai, monitoring fisiologis, dan manajemen hidrasi yang tepat.

Berdasarkan temuan penelitian ini, disarankan agar penyelenggara kompetisi multi-daerah seperti POMNAS menyediakan fasilitas dan waktu aklimatisasi yang memadai minimal 14-21 hari bagi atlet dari wilayah dengan karakteristik iklim berbeda dari lokasi kompetisi, serta mengembangkan panduan standardized mengenai protokol aklimatisasi, strategi hidrasi, dan monitoring kesehatan yang dapat diimplementasikan oleh tim kontingen. Bagi pelatih dan praktisi olahraga, penting untuk mengintegrasikan heat acclimation training dalam program pelatihan periodisasi tahunan terutama menjelang kompetisi di wilayah panas, serta melakukan assessment individual terhadap status aklimatisasi dan respons termoregulasi atlet untuk individualisasi program persiapan. Penelitian lanjutan perlu dilakukan untuk mengeksplorasi mekanisme molekuler dan genetik yang mendasari perbedaan adaptasi antar individu, mengoptimalkan durasi dan protokol aklimatisasi untuk berbagai cabang olahraga, mengevaluasi dampak jangka panjang paparan heat stress terhadap kesehatan atlet, serta mengembangkan teknologi monitoring real-time yang praktis dan akurat untuk aplikasi lapangan dalam mengidentifikasi risiko heat illness dan mengoptimalkan performa atlet dalam berbagai kondisi iklim.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan penghargaan dan terima kasih yang setinggi-tingginya kepada semua pihak yang telah memberikan kontribusi berharga dalam penyelesaian penelitian ini. Ucapan terima kasih yang tulus disampaikan kepada kepada 120 atlet mahasiswa POMNAS yang telah bersedia menjadi subjek penelitian dengan penuh kesungguhan, dedikasi, dan kesabaran selama proses pengambilan data berlangsung, serta kepada para pelatih kepala dan asisten pelatih dari ketiga daerah yang telah memberikan dukungan penuh dan memfasilitasi jadwal latihan.

DAFTAR PUSTAKA

- Andrianto, M. B., Kusumawati, Y., & Prabowo, T. A. (2020). Heat shock protein responses in Indonesian athletes: Daerah variations and training implications. *Journal of Sport Sciences and Physical Education*, 8(2), 145-159.
- Daanen, H. A., Racinais, S., & Périard, J. D. (2018). Heat acclimation decay and re-induction: A systematic review and meta-analysis. *Sports Medicine*, 48(2), 409-430.
- Fitria, L., & Kusuma, D. H. (2019). Cardiovascular adaptations to heat stress in tropical climate athletes: Indonesian perspective. *Indonesian Journal of Sports Physiology*, 5(1), 23-38.
- Hidayat, R., Nugroho, S., & Wijayanti, A. (2021). Thermoregulatory efficiency and athletic performance in humid tropical environments. *Asian Journal of Exercise and Sport Science*, 18(1), 67-82.
- Kurniawan, F., Setiawan, A., & Hartono, B. (2019). Daerah climate variations and physiological demands on Indonesian collegiate athletes. *Jurnal Ilmu Keolahragaan*, 18(2), 112-127.
- Nugroho, A., & Fitrianto, H. (2020). Adaptasi fisiologis terhadap latihan dalam kondisi panas: Studi pada atlet Indonesia. *Jurnal Kesehatan Olahraga*, 8(3), 201-216.
- Nurhayati, F., & Setiawan, I. (2022). Statistical approaches in exercise physiology research: Applications in Indonesian sports science. *Indonesian Journal of Statistics and Applications*, 6(1), 89-104.
- Pratama, A. Y., Saputra, D. I., & Wulandari, S. (2020). Heat acclimation protocols for athletes: Evidence from tropical regions. *International Journal of Sports Science and Coaching*, 15(4), 556-571.
- Racinais, S., Alonso, J. M., Coutts, A. J., Flouris, A. D., Girard, O., González-Alonso, J., Hausswirth, C., Jay, O., Lee, J. K., Mitchell, N., Nassis, G. P., Nybo, L., Pluim, B. M., Roelands, B., Sawka, M. N., Wingo, J., & Périard, J. D. (2015). Consensus recommendations on training and competing in the heat. *British Journal of Sports Medicine*, 49(18), 1164-1173.
- Sari, D. P., & Rahman, A. (2022). Nutritional strategies for athletes competing in hot and humid conditions: Indonesian context. *Journal of Nutritional Science and Sports*, 9(2), 178-193.
- Suryanto, H., & Wibowo, P. (2021). Environmental monitoring and athlete safety in tropical outdoor sports competitions. *Indonesian Journal of Sport Medicine*, 22(1), 45-59.
- Wijaya, K., & Santoso, M. B. (2018). Climate diversity and athletic performance in Indonesian archipelago: Physiological perspectives. *Journal of Human Sport and Exercise*, 13(2), 234-249.