

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Definisi Hemoglobin

Hemoglobin (Hb) merupakan protein globular yang mengandung unsur besi dan terdapat dalam sel darah merah (eritrosit). Senyawa ini berfungsi mengangkut oksigen dari paru ke seluruh jaringan tubuh serta membawa karbon dioksida dari jaringan kembali ke paru untuk dikeluarkan melalui proses pernapasan. Struktur hemoglobin tersusun atas empat rantai polipeptida, terdiri atas dua rantai alfa dan dua rantai beta, yang masing-masing berikatan dengan gugus heme mengandung atom besi sebagai pusat pengikat oksigen. Kehadiran atom besi ini memungkinkan hemoglobin berikatan secara sementara dengan molekul oksigen, sehingga mendukung proses transportasi oksigen yang efisien di dalam sistem sirkulasi (Gell, 2018).

Kadar hemoglobin dalam darah menjadi parameter penting dalam menilai kemampuan darah dalam mengedarkan oksigen ke seluruh tubuh. WHO mendefinisikan anemia sebagai kondisi dimana hemoglobin di bawah 13,0 g/dL pada laki-laki dan di bawah 12,0 g/dL pada perempuan. Namun, nilai referensi hemoglobin bisa berbeda-beda tergantung pada variabel individu seperti jenis kelamin, usia, ras, dan kondisi fisiologis tertentu (Domenica Cappellini *and* Motta, 2015)

Dalam dunia olahraga, hemoglobin memiliki peranan vital karena memengaruhi kapasitas aerobik seseorang. Kadar hemoglobin yang mencukupi memungkinkan distribusi oksigen ke jaringan otot selama aktivitas fisik berjalan optimal. Hal ini dapat berkontribusi langsung pada peningkatan nilai VO_{2Max} ,

yakni kemampuan maksimal tubuh dalam mengonsumsi oksigen selama latihan intensitas tinggi. Kadar hemoglobin yang rendah berkorelasi dengan menurunnya kemampuan fisik serta kualitas hidup, terutama pasien dengan penyakit paru obstruktif kronik (PPOK), menegaskan peran krusial hemoglobin dalam performa fisiologis (Ferrari *et al.*, 2015).

Pada atlet, kadar hemoglobin bisa mengalami peningkatan sebagai respons adaptif terhadap latihan intensif, terutama pada olahraga yang mengandalkan sistem energi aerobik. Kenaikan ini membantu meningkatkan pasokan oksigen ke otot dan berdampak pada peningkatan kapasitas $VO_2\text{Max}$. Metode pelatihan di ketinggian atau menggunakan hipoksia intermiten dapat merangsang eritropoiesis dan meningkatkan konsentrasi hemoglobin. Dengan demikian, pemantauan kadar hemoglobin menjadi komponen penting dalam manajemen kesehatan dan performa atlet (Hauser *et al.*, 2017).

2.2 Fungsi Hemoglobin

Fungsi hemoglobin untuk melepas dan mengikat oksigen dipengaruhi oleh kondisi fisiologis, antara lain tekanan parsial oksigen (pO_2), pH darah, suhu tubuh, dan konsentrasi karbon dioksida. Kondisi asidosis (pH menurun) akan menurunkan afinitas Hb terhadap O_2 , sehingga memfasilitasi pelepasan oksigen pada jaringan yang membutuhkan (Astuti, 2019).

Hemoglobin (Hb) tidak hanya berperan sebagai pengangkut oksigen dalam darah, tetapi juga memiliki fungsi penting dalam mendukung performa fisik, khususnya pada atlet. Kadar hemoglobin yang optimal memungkinkan pengangkutan oksigen yang efisien ke jaringan otot, yang sangat dibutuhkan selama

aktivitas fisik intensif. Terdapat hubungan signifikan antara kadar hemoglobin dengan kapasitas $VO_2\text{Max}$ pada pemain sepak bola, yang mengindikasikan peran penting hemoglobin dalam mendukung kapasitas aerobik atlet (Gunawan *et al.*, 2017).

Selain itu, hemoglobin juga berperan dalam proses pemulihan pasca-latihan. Kadar hemoglobin yang memadai dapat mempercepat eliminasi asam laktat dari otot, sehingga mengurangi kelelahan dan mempercepat pemulihan. Kadar hemoglobin dapat menyebabkan korelasi negatif yang signifikan antara dan kadar asam laktat pada atlet sepak bola remaja, yang menunjukkan peran hemoglobin dalam proses pemulihan metabolik setelah latihan intensif (Safitri *et al.*, 2020).

2.3 Kadar Normal Hemoglobin pada Manusia

Kadar hemoglobin normal pada manusia bervariasi tergantung pada jenis kelamin, usia, dan kondisi fisiologis tertentu. Menurut Organisasi Kesehatan Dunia (WHO), 13–17 g/dL pada pria dan 12–15 g/dL pada wanita dewasa merupakan kadar hemoglobin normal. Faktor-faktor yang dapat memengaruhi kadar hemoglobin meliputi status gizi, ketinggian tempat tinggal, hidrasi, dan adanya penyakit tertentu seperti anemia, talasemia, atau penyakit ginjal kronis. Pemeriksaan kadar hemoglobin secara rutin digunakan sebagai indikator kesehatan umum serta sebagai parameter penting dalam diagnosis berbagai gangguan hematologis (Who and Chan, 2011).

Dalam dunia olahraga, kadar hemoglobin sering menjadi fokus evaluasi karena berhubungan langsung dengan kapasitas transportasi oksigen yang memengaruhi daya tahan fisik. Atlet dengan kadar hemoglobin yang rendah

cenderung mengalami penurunan performa karena terbatasnya suplai oksigen ke otot aktif. Penelitian menunjukkan bahwa peningkatan kadar hemoglobin dapat meningkatkan kapasitas kerja otot dan efisiensi metabolisme aerobik, sehingga berkontribusi terhadap peningkatan performa dalam aktivitas ketahanan (Gore *et al.*, 2013)

Secara fisiologis, kadar hemoglobin dikendalikan oleh mekanisme eritropoiesis yang dituntun oleh hormon eritropoietin, yang secara dominan disintesis oleh ginjal sebagai respons fisiologis terhadap kondisi hipoksia jaringan, yaitu keadaan ketika suplai oksigen ke jaringan tubuh menurun. Peningkatan kebutuhan oksigen atau kondisi hipoksia kronis, seperti tinggal di dataran tinggi, dapat merangsang produksi eritropoietin dan meningkatkan sintesis hemoglobin. Proses ini menggambarkan adaptasi tubuh dalam mempertahankan homeostasis oksigen yang optimal dalam kondisi lingkungan yang menantang (Haase, 2013).

Pentingnya pemantauan kadar hemoglobin tidak hanya terbatas pada mendeteksi anemia, tetapi juga sebagai indikator kesiapan fisik dan kapasitas latihan seorang atlet. Beberapa federasi olahraga internasional bahkan menjadikan kadar hemoglobin sebagai salah satu parameter dalam paspor biologis atlet untuk mendeteksi penggunaan doping. Dengan demikian, pengukuran kadar hemoglobin secara berkala dapat memberikan informasi penting dalam perencanaan pelatihan dan pencegahan risiko performa menurun (Saugy, Lundby and Robinson, 2014).

Selain itu, pengaruh nutrisi terhadap kadar hemoglobin tidak dapat diabaikan. defisiensi zat besi, vitamin B12, atau asam folat merupakan penyebab umum rendahnya kadar hemoglobin. Kekurangan zat besi merupakan etiologi paling umum dari anemia secara global, yang ditandai dengan penurunan sintesis

hemoglobin. Oleh karena itu, asupan nutrisi yang memadai sangat penting untuk mendukung biosintesis hemoglobin serta menjaga kapasitas darah dalam mengangkut oksigen secara efisien (Camaschella, 2015).

2.3.1 Faktor yang Mempengaruhi Kadar Hemoglobin

Kadar hemoglobin dalam tubuh dipengaruhi oleh berbagai faktor yang kompleks, termasuk aspek genetik, nutrisi, kondisi fisiologis, serta lingkungan. Variasi genetik memainkan peran penting dalam menentukan konsentrasi hemoglobin. Variasi genetik, seperti mutasi pada gen HFE dan TMPRSS6, dapat memengaruhi produksi hemoglobin dan risiko anemia. Variasi ini berbeda antar populasi dan dapat memengaruhi respons individu terhadap defisiensi zat besi atau gangguan hematologis lainnya (Barrera-Reyes *and* Tejero, 2019).

Selain faktor genetik, status nutrisi, khususnya asupan zat besi, vitamin B12, dan asam folat, sangat berpengaruh terhadap kadar hemoglobin. Kekurangan nutrisi tersebut dapat menghambat proses eritropoiesis, yaitu pembentukan sel darah merah, yang pada akhirnya menurunkan konsentrasi hemoglobin dalam darah. Defisiensi zat besi merupakan penyebab utama anemia di seluruh dunia, terutama pada kelompok rentan seperti wanita hamil dan anak-anak (Camaschella, 2015).

Variabilitas biologis juga memengaruhi kadar hemoglobin. Hormon eritropoietin, yang diproduksi oleh ginjal sebagai respons terhadap hipoksia jaringan, memainkan peran kunci dalam regulasi produksi hemoglobin. Kondisi seperti penyakit ginjal kronis dapat mengganggu produksi eritropoietin, yang pada gilirannya dapat menyebabkan penurunan kadar hemoglobin (Haase, 2013).

Kondisi fisiologis dan lingkungan juga berperan dalam memengaruhi kadar hemoglobin. Misalnya, individu yang tinggal di daerah dengan ketinggian tinggi

cenderung memiliki kadar hemoglobin yang lebih tinggi sebagai respons adaptif terhadap hipoksia lingkungan. Pada ketinggian di atas 1000 meter, terjadi peningkatan produksi hemoglobin untuk mengimbangi penurunan tekanan oksigen atmosfer. Selain itu, kebiasaan merokok juga dapat meningkatkan kadar hemoglobin karena karbon monoksida dalam asap rokok mengikat hemoglobin, sehingga tubuh merespons dengan meningkatkan produksinya (Karakochuk *et al.*, 2019).

Kadar hemoglobin juga dapat dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti jenis kelamin, usia, dan status gizi. Anemia, yang ditandai dengan kadar hemoglobin rendah, dapat mengurangi kapasitas pengangkutan oksigen dan menurunkan performa fisik. Oleh karena itu, pemantauan kadar hemoglobin penting dalam program pelatihan atlet untuk memastikan bahwa mereka memiliki kapasitas aerobik yang optimal. Terdapat hubungan antara kadar hemoglobin dengan tingkat $VO_2\text{Max}$ pada atlet, yang menekankan pentingnya pemantauan kadar hemoglobin dalam konteks olahraga (Sinaga, 2013).

2.4 Pengertian $VO_2\text{Max}$

$VO_2\text{Max}$, atau konsumsi oksigen maksimal, merupakan parameter fisiologis yang menggambarkan kapasitas maksimal tubuh dalam mengambil, mengangkut, dan memanfaatkan oksigen selama aktivitas fisik intensitas tinggi. Nilai ini mencerminkan efisiensi sistem kardiovaskular dan pernapasan dalam mendukung metabolisme aerobik selama latihan berat. $VO_2\text{Max}$ dianggap sebagai indikator terbaik dari kapasitas aerobik seseorang, yang mencerminkan kemampuan tubuh

dalam mengangkut dan memanfaatkan oksigen selama aktivitas fisik maksimal (Akalan, Kravitz *and* Robergs, 2004; Bruggisser *et al.*, 2024).

VO₂Max biasanya diukur dalam satuan mililiter oksigen per kilogram berat badan per menit (mL/kg/menit), yang memungkinkan perbandingan antar individu dengan ukuran tubuh berbeda. Pengukuran VO₂max dilakukan melalui tes latihan maksimal yang bertahap, seperti tes treadmill atau ergometer sepeda, dengan pemantauan konsumsi oksigen secara langsung menggunakan spirometri terbuka. Selain itu, metode verifikasi tambahan, seperti uji verifikasi, disarankan untuk memastikan bahwa nilai VO₂Max yang diperoleh benar-benar mencerminkan kapasitas maksimal individu (Poole *and* Jones, 2017).

Dalam beberapa tahun terakhir, penggunaan perangkat *wearable* untuk estimasi VO₂Max telah meningkat. Namun, akurasi perangkat ini bervariasi tergantung pada algoritma yang digunakan. Perangkat yang menggunakan informasi dari kondisi istirahat cenderung melebihi estimasi VO₂Max, sementara perangkat yang menggunakan data dari aktivitas fisik menunjukkan akurasi yang lebih tinggi. Meskipun demikian, untuk tujuan klinis atau olahraga, metode estimasi ini masih memerlukan perbaikan agar dapat diandalkan secara individu (Molina-Garcia *et al.*, 2022).

Secara keseluruhan, VO₂Max tetap menjadi parameter penting dalam menilai kapasitas aerobik dan kesehatan kardiovaskular individu. Pemahaman yang mendalam tentang definisi, metode pengukuran, dan faktor-faktor yang memengaruhi VO₂Max sangat penting bagi para profesional kesehatan dan olahraga dalam merancang program latihan dan intervensi yang efektif.

2.5 Cara pemeriksaan VO₂Max di KONI Jawa Timur

Multistage Fitness Test (MFT), atau yang dikenal sebagai *beep test*, merupakan metode lapangan yang umum digunakan untuk mengukur kapasitas aerobik maksimal (VO₂Max). Tes ini melibatkan aktivitas lari bolak-balik sejauh 20 meter dengan kecepatan yang meningkat secara bertahap, diatur oleh sinyal audio. Setiap tahap berlangsung selama satu menit, dan kecepatan lari meningkat sebesar 0,5 km/jam pada setiap tahap berikutnya. Peserta diharuskan mencapai garis batas sebelum bunyi *beep* berikutnya terdengar, dan tes berlanjut hingga peserta tidak mampu mengikuti kecepatan yang ditentukan oleh sinyal audio. Protokol ini telah digunakan secara luas dalam berbagai program kebugaran dan penelitian ilmiah (Oktaviani, 2024). Pelaksanaan MFT dimulai dengan peserta berdiri di belakang garis awal dan berlari menuju garis seberang sejauh 20 meter. Setelah mencapai garis, peserta harus berbalik arah dan kembali ke garis awal sebelum bunyi *beep* berikutnya terdengar. Tes ini berlangsung dalam beberapa level dengan durasi waktu yang semakin singkat, menuntut peningkatan intensitas lari secara bertahap. Tes akan dihentikan ketika peserta gagal mencapai garis pada waktu *beep* sebanyak dua kali berturut-turut, yang menandakan batas maksimal kapasitas aerobik peserta (Rohmah and Hamdani, 2022; Ihsan, 2024)

Metode MFT memiliki beberapa keunggulan, antara lain hanya memerlukan peralatan sederhana seperti pita pengukur, audio player, dan ruang lapang. Selain itu, MFT dapat dilakukan secara massal sehingga efisien untuk pengujian kelompok besar. Validitas metode ini juga cukup tinggi dengan koefisien validitas mencapai 0,88 untuk dewasa dan 0,80 untuk remaja, sehingga hasil estimasi VO₂Max dari MFT dapat dipercaya sebagai indikator kebugaran kardiorespirasi. Pengukuran

VO₂Max melalui MFT sangat berguna dalam memantau perkembangan kebugaran jasmani secara berkala (Fitriyadi, 2018).

Penelitian oleh (Paradisis *et al.*, 2014) menemukan bahwa jumlah *shuttle* yang diselesaikan dalam MFT memiliki korelasi yang kuat dengan VO₂Max yang diukur secara langsung, dengan nilai korelasi sebesar $r = 0,87$ ($p < 0,05$). Hal ini menunjukkan bahwa MFT dapat digunakan sebagai alat yang andal untuk mengestimasi kapasitas aerobik individu (Widodo *and* Hanani, 2021).

Secara praktis, hasil akhir MFT berupa level dan jumlah *shuttle* (balikan) yang berhasil dicapai peserta digunakan untuk memperkirakan nilai VO₂Max dengan rumus atau tabel prediksi yang telah distandarisasi. Nilai VO₂Max ini menggambarkan kemampuan maksimal tubuh dalam mengonsumsi oksigen selama aktivitas fisik intensif, yang sangat penting sebagai parameter kebugaran kardiovaskular. Oleh karena itu, MFT menjadi pilihan metode pemeriksaan yang efektif dan efisien dalam berbagai penelitian maupun evaluasi kebugaran atlet maupun masyarakat umum (Nidommudin *and* Irawan, 2018; Ihsan, 2024).

2.6 Interpretasi Hasil pada Pemeriksaan VO₂Max

Interpretasi hasil MFT bertujuan untuk mengklasifikasikan tingkat kebugaran aerobik individu berdasarkan nilai VO₂Max yang diperoleh. Nilai VO₂Max dihitung dari jumlah tahap atau level yang berhasil diselesaikan oleh peserta selama tes berlangsung. Setiap level mencerminkan peningkatan intensitas lari, sehingga semakin tinggi level yang dicapai, semakin tinggi pula estimasi kapasitas aerobik peserta. Hasil ini kemudian dibandingkan dengan tabel norma yang disesuaikan berdasarkan usia dan jenis kelamin untuk menentukan kategori

kebugaran, seperti sangat kurang, kurang, sedang, baik, atau sangat baik (Arief Satria Ramadan *et al.*, 2024)

Interpretasi hasil MFT dilakukan dengan membandingkan nilai $VO_2\text{Max}$ yang diperoleh dengan kategori kebugaran yang telah distandarisasi. Klasifikasi ini membantu dalam menilai tingkat kebugaran individu berdasarkan kapasitas aerobik maksimal yang dicapai selama tes. Kategori $VO_2\text{Max}$ dibagi menjadi enam tingkat: luar biasa ($\geq 52,4$ ml/kg/menit), sangat baik (46,5–52,4 ml/kg/menit), baik (42,5–46,4 ml/kg/menit), sedang (36,5–42,4 ml/kg/menit), kurang (33,0–36,4 ml/kg/menit), dan sangat kurang ($\leq 33,0$ ml/kg/menit) (Rendhitya Prima Putra, 2021).

Hasil MFT dapat bervariasi tergantung pada kelompok subjek yang diuji. Sebagai ilustrasi, pada pemain sepak bola U-23 menunjukkan bahwa sebagian besar pemain berada dalam kategori "sangat buruk" (44,44%), dengan hanya 5,55% pemain yang mencapai kategori "sangat baik". Data ini menyoroti pentingnya interpretasi hasil MFT dalam konteks spesifik kelompok atlet, yang dapat digunakan untuk mengidentifikasi kebutuhan peningkatan kebugaran dan merancang intervensi yang tepat (Alfarizi *et al.*, 2023).

Hasil MFT dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti intensitas aktifitas fisik setiap hari, ketinggian dataran tempat tinggal kondisi lingkungan saat tes. Oleh karena itu, untuk mendapatkan interpretasi yang akurat, tes harus dilakukan dengan standar prosedur yang konsisten dan dalam kondisi yang optimal. Selain itu, hasil MFT sebaiknya digunakan bersama dengan penilaian kebugaran lainnya untuk mendapatkan gambaran yang lebih komprehensif mengenai kondisi fisik individu (Arya T Candra and Moh Agung Setiabudi, 2021).

2.7 Hubungan Kadar Hemoglobin dengan $VO_2\text{Max}$

Kadar hemoglobin merupakan salah satu parameter penting dalam sistem transportasi oksigen dalam tubuh manusia. Hemoglobin berfungsi mengikat oksigen di paru dan mengantarkannya ke jaringan tubuh, sehingga sangat berperan dalam proses metabolisme aerobik. $VO_2\text{Max}$, atau volume oksigen maksimal, adalah ukuran kapasitas maksimal tubuh dalam mengonsumsi oksigen selama aktivitas fisik intens. Oleh karena itu, kadar hemoglobin yang optimal sangat berpengaruh terhadap nilai $VO_2\text{Max}$ seseorang, karena peningkatan hemoglobin dapat meningkatkan kemampuan darah dalam mengangkut oksigen ke otot-otot aktif (Wulandari, Kaidah *and* Hudani, 2022).

Beberapa penelitian menunjukkan adanya korelasi positif antara kadar hemoglobin dengan nilai $VO_2\text{Max}$. Misalnya, studi literatur yang mengkaji 16 penelitian terkait menemukan bahwa sekitar 93,75% penelitian tersebut menunjukkan hubungan signifikan antara kadar hemoglobin dan $VO_2\text{Max}$ pada atlet. Hal ini mengindikasikan bahwa peningkatan kadar hemoglobin cenderung diikuti oleh peningkatan kapasitas aerobik yang diukur melalui $VO_2\text{Max}$. Namun, variasi hasil tersebut juga dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti jenis kelamin, cabang olahraga, intensitas latihan, komposisi tubuh, dan kondisi anemia yang dialami individu (Wulandari, Kaidah *and* Hudani, 2022).

Secara fisiologis, peningkatan kadar hemoglobin memungkinkan lebih banyak oksigen yang dapat diangkut oleh darah ke jaringan otot selama aktivitas fisik. Hal ini berdampak langsung pada peningkatan $VO_2\text{Max}$ karena otot menerima oksigen yang cukup untuk menghasilkan energi secara aerobik. Sebaliknya, rendahnya kadar hemoglobin dapat menyebabkan penurunan kapasitas

pengangkutan oksigen, sehingga menurunkan nilai $VO_2\text{Max}$ dan performa fisik secara keseluruhan (Hariyanti *et al.*, 2017; Hariyanti, Rahayu *and* Pitriani, 2020)

Meski mayoritas studi menunjukkan hubungan positif, terdapat pula penelitian yang tidak menemukan korelasi signifikan antara kadar hemoglobin dan $VO_2\text{Max}$, yang kemungkinan disebabkan oleh perbedaan populasi, metode pengukuran, dan kondisi kesehatan subjek. Oleh karena itu, hubungan antara kadar hemoglobin dan $VO_2\text{Max}$ perlu dipahami dalam konteks faktor-faktor lain yang memengaruhi performa fisik, serta pentingnya mempertimbangkan variabel individual dalam penelitian lanjutan (Batubara *and* Sinaga, 2012; Wulandari, Kaidah *and* Hudani, 2022).

