

DAFTAR ISTILAH

ANOVA	: Analisis varians, teknik statistik untuk membandingkan perbedaan antara lebih dari dua grup.
sEMG	: Metode untuk mengukur aktivitas listrik otot permukaan.
EMG	: Teknik yang digunakan untuk merekam sinyal listrik yang dihasilkan oleh otot saat berkontraksi.
LDV	: Nilai perbedaan kadar laktat antara darah arteri dan vena yang digunakan untuk mengukur performa olahraga atau kondisi fisik.
MAV	: Mean Absolute Value, nilai rata-rata absolut yang digunakan dalam analisis sinyal untuk mengukur kekuatan atau amplitudo sinyal dalam periode waktu tertentu.
RMS	: Metode statistik untuk menghitung rata-rata kuadrat dari nilai-nilai yang ada dalam sinyal, yang kemudian diakarkan.
MDF	: Frekuensi median yang digunakan dalam analisis sinyal untuk menentukan titik tengah distribusi frekuensi dari sinyal.
SEN	: Ukuran ketidakteraturan atau kompleksitas dalam spektrum frekuensi sebuah sinyal.
HSD	: Uji statistik yang digunakan setelah ANOVA untuk mengidentifikasi perbedaan signifikan antara setiap pasangan grup dalam analisis.
FCR	: Otot pada lengan bawah yang berfungsi untuk menekuk pergelangan tangan dan memindahkan tangan ke arah ibu jari.
DEL	: Otot deltoid adalah otot utama di bahu yang berfungsi untuk mengangkat lengan ke samping dan membantu dalam berbagai gerakan bahu.
COM	: Merujuk pada kombinasi atau kerja bersama antara otot Flexor Carpi Radialis (FCR) dan otot Deltoideus (DEL). Gabungan aktivitas kedua otot ini dapat dianalisis untuk mempelajari bagaimana sinyal listrik atau EMG dari kedua otot ini berinteraksi, terutama dalam konteks pergerakan tangan dan lengan.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang Masalah

Panjat dinding atau sering disebut dengan *Sport climbing* telah ada di Indonesia sejak tahun 1960 dan telah menjadi anggota KONI pada tahun 1994. Panjat dinding dibagi dalam beberapa kategori antara lain *Lead, Speed dan Boulder*. Panjat dinding digemari banyak komunitas di seluruh Indonesia. Dari berbagai kalangan muda maupun tua [1]. Panjat dinding adalah olahraga yang sangat mengandalkan daya tahan fisik dan kekuatan otot, terutama pada otot-otot lengan, bahu, dan inti tubuh. Dalam olahraga ekstrem, terutama panjat dinding diperlukan kondisi fisik yang sangat baik karena kegiatan panjat dinding ini melawan gravitasi, dan diperlukan anggota tubuh sebagai pendorong dan penyeimbang untuk mencapai posisi yang lebih tinggi. Dalam olahraga terdapat beberapa kondisi fisik yang berperan dalam pencapaian, yaitu kekuatan, kecepatan, daya tahan, kelenturan, keseimbangan, koordinasi, dan kelincahan. [2]

Dalam melakukan panjat dinding, sering kali dihadapkan pada tantangan untuk mempertahankan kekuatan dan daya tahan mereka selama sesi pemanjatan yang berlangsung lama dan memerlukan kemampuan untuk mempertahankan performa optimal meskipun mengalami kelelahan. Oleh karena itu, analisis daya tahan otot menjadi krusial untuk memahami kapasitas fisik hobiis dalam olahraga ini [3]. Performa daya tahan otot pada individu yang aktif secara fisik biasanya lebih baik dibandingkan dengan mereka yang kurang aktif. Hal ini terkait dengan adaptasi otot yang timbul dari rutinitas latihan reguler. [4] Oleh karena itu, evaluasi performa daya tahan otot sangatlah penting bagi atlet dan hobiis panjat dinding agar dapat meningkatkan efisiensi latihan dan mengurangi risiko cedera. Namun, tantangan utama yang dihadapi selama panjat dinding adalah kelelahan otot.

Kelelahan (*fatigue*) adalah berkurangnya keadaan unit fungsional tubuh, yang nantinya mempengaruhi dalam melaksanakan tugas. Dalam hal itu kelelahan sangat berpengaruh bagi kinerja seorang atlet. Kelelahan dapat juga didefinisikan

sebagai kondisi ketika individu mengalami perlambatan gerak dan menurunnya kondisi dan kekuatan otot akibat aktivitas yang dilakukannya [2]. Kelelahan otot ini sering terjadi pada otot-otot yang menopang beban signifikan selama panjat dinding, seperti otot *Flexor Carpi Radialis* di lengan bawah dan otot *Deltoideus* di bahu. *Flexor Carpi Radialis* berperan penting dalam fleksibilitas dan stabilitas pergelangan tangan, yang sangat dibutuhkan untuk menggenggam pijakan atau celah kecil pada dinding. Sementara itu, otot *Deltoideus*, yang bertugas mengangkat dan mengontrol gerakan bahu, berfungsi mempertahankan posisi tubuh dan membantu pergerakan lengan. Ketika otot-otot ini mengalami kelelahan, kemampuan pemanjat untuk mempertahankan cengkeraman dan stabilitas tubuh menurun, sehingga berpotensi menurunkan performa serta meningkatkan risiko cedera. Kelelahan dapat muncul dikarenakan aktivitas fisik baik dalam pertandingan maupun Latihan sehingga mempengaruhi performa. Kelelahan dibedakan menjadi 2 macam, kelelahan otot dan kelelahan umum. Kelelahan otot diartikan sebagai menurunnya kerja otot dikarenakan aktivitas yang berat. Dalam konteks olahraga panjat dinding, ketika kelelahan otot terjadi, kekuatan otot lengan serta otot tungkai yang kurang maksimal, terutama cengkraman menyebabkan kelelahan saat pemanjatan dan ketidakmampuan bertahan di atas trek. [5]

Panjat dinding yang sulit kemungkinan besar dibatasi oleh kelelahan otot lokal. Dalam sebuah penelitian oleh Watts dkk. [6], dilaporkan bahwa ketidakmampuan untuk menghasilkan kekuatan cengkraman yang cukup pada pegangan adalah alasan untuk jatuh saat memanjat tebing hingga gagal. Selain itu, kekuatan dan daya tahan cengkraman tetap berkurang selama 20 menit setelah pemanjatan yang menunjukkan bahwa memanjat membebani otot-otot yang mencengkram [6]. Kelompok otot yang menjadi lelah selama panjat dinding dapat dianggap sebagai yang paling penting dalam panjat tebing karena performa panjat dinding dapat dibatasi oleh daya tahan otot-otot ini. Memahami otot-otot mana yang penting, terutama dalam panjat dinding tingkat tinggi, diperlukan untuk membantu individu yang tertarik untuk merancang program pelatihan untuk meningkatkan performa panjat dinding.

Pada penelitian ini dilakukan untuk mengetahui secara mendalam terhadap performa dari daya tahan otot *Flexor Carpi Radialis* dan *Deltoideus* lengan kanan

pada kondisi *fatigue*. Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi dan mengevaluasi performa daya tahan otot *Flexor Carpi Radialis* dan *Deltoideus* pada hobiis panjat dinding melalui pengukuran *Surface Electromyography* (sEMG). Melalui evaluasi ini, diharapkan dapat ditemukan rekomendasi latihan yang lebih efektif untuk meningkatkan ketahanan otot, mengurangi kelelahan, dan meminimalkan risiko cedera bagi hobiis panjat dinding.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah ditinjau dan dijelaskan, maka didapatkan rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana aktivitas pemanjatan yang direpresentasikan oleh sinyal sEMG mempengaruhi daya tahan anaerobik (stamina) dan kekuatan otot *Flexor Carpi Radialis* dan *Deltoideus*?
2. Bagaimana perbedaan daya tahan anaerobik (stamina) dan kekuatan otot antara laki-laki dan perempuan pada hobiis panjat dinding?
3. Bagaimana parameter-parameter dari sinyal sEMG, dapat digunakan untuk mengidentifikasi tingkat kelelahan otot berdasarkan daya tahan anaerobik (stamina) dan kekuatan otot?

1.3. Tujuan dan Manfaat

1.3.1 Tujuan

Berdasarkan latar belakang dan rumusan masalah yang telah disusun, tujuan penelitian ini adalah:

1. Menganalisis pengaruh aktivitas pemanjatan terhadap daya tahan anaerobik (stamina) dan kekuatan otot *Flexor Carpi Radialis* dan *Deltoideus* menggunakan sinyal sEMG pada hobiis panjat dinding.
2. Mengevaluasi perbedaan daya tahan anaerobik (stamina) dan kekuatan otot antara laki-laki dan perempuan pada hobiis panjat dinding.
3. Mengevaluasi parameter-parameter sinyal sEMG dalam mengidentifikasi tingkat kelelahan otot berdasarkan daya tahan anaerobik (stamina) dan kekuatan otot.

1.3.2 Manfaat

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini antara lain:

1. Memberikan wawasan mendalam mengenai hubungan antara kelelahan otot dan performansi pemanjatan, khususnya pada otot-otot yang berperan penting dalam aktivitas panjat dinding.
2. Menyediakan data empiris yang dapat digunakan untuk mengembangkan program latihan yang lebih efektif, dengan fokus pada peningkatan daya tahan anaerobik (stamina) otot *Flexor Carpi Radialis* dan *Deltoideus*.
3. Membantu para pelatih dan atlet panjat dinding dalam memahami faktor-faktor fisiologis yang mempengaruhi performa otot, sehingga dapat membantu dalam mengoptimalkan performa atlet dan mengurangi risiko cedera akibat kelelahan otot.
4. Memperkuat literatur ilmiah tentang hubungan antara sinyal EMG, kandungan asam laktat, dan parameter fisiologis lainnya terhadap kinerja otot dalam olahraga ekstrem seperti panjat dinding.

1.4. Batasan Masalah

Berdasarkan latar belakang dan rumusan masalah yang telah dijelaskan sebelumnya, penelitian ini menerapkan beberapa batasan untuk menjaga fokus dan validitas hasil yang diharapkan. Penelitian ini memiliki batasan-batasan berikut untuk menjaga fokus dan validitas hasil:

1. Penelitian ini akan berfokus hanya pada dua otot utama, yaitu *Flexor Carpi Radialis* dan *Deltoideus* lengan kanan, yang dianggap krusial dalam mempertahankan kekuatan genggamannya selama aktivitas panjat dinding. Otot lain yang berperan dalam panjat dinding, seperti otot punggung atau kaki, tidak akan dianalisis secara rinci.
2. Penelitian ini membatasi pengamatan pada performa daya tahan anaerobik (stamina) otot sebagai representasi kondisi *fatigue* yang diinduksi melalui aktivitas panjat dinding.
3. Penelitian akan dilakukan pada hobiis panjat dinding.
4. Penelitian dilakukan di fasilitas panjat dinding indoor untuk memastikan lingkungan yang terkontrol tanpa faktor eksternal yang memengaruhi hasil.

5. Hanya subjek yang dalam kondisi fisik sehat tanpa cedera yang diikutsertakan.

1.5. Metode Penelitian

Penelitian ini akan dilakukan dengan menggunakan beberapa metode untuk mengumpulkan dan menganalisis data yang relevan. Adapun metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Studi Teoritis/Literatur

Pada tahap ini, peneliti akan mengumpulkan dan mempelajari literatur yang relevan terkait daya tahan anaerobik (stamina) otot, kelelahan otot, dan pengukuran menggunakan *Surface Electromyography* (sEMG). Kajian literatur ini mencakup pemahaman tentang fisiologi otot, khususnya *Flexor Carpi Radialis* dan *Deltoideus*, serta teori terkait metode pengukuran sinyal otot. Studi teoritis ini bertujuan untuk menyediakan landasan ilmiah yang kuat dan sebagai referensi dalam merancang dan memahami hasil penelitian.

2. Desain Eksperimen

Setelah kajian literatur selesai, tahap ini berfokus pada perancangan eksperimen yang akan dilakukan. Desain eksperimen mencakup pemilihan subjek, peralatan yang akan digunakan (terutama perangkat sEMG), prosedur eksperimen, serta variabel-variabel yang akan diukur. Seperti, penentuan otot dan trek.

3. Subject Trials

Dalam tahap ini, penelitian berfokus pada eksperimen yang akan dilakukan secara langsung pada subjek hobiis panjat dinding dengan Batasan usia antara 18-25 tahun. Setiap subjek akan menjalani sesi pemanjatan sambil dipantau menggunakan sEMG untuk merekam aktivitas otot *Flexor Carpi Radialis* dan *Deltoideus*. Proses ini bertujuan untuk mendapatkan data mengenai respons otot terhadap beban dan durasi aktivitas selama panjat dinding. Pengujian ini akan dilaksanakan sesuai dengan prosedur eksperimen yang telah dirancang pada tahap sebelumnya.

4. Analisis Data dan Evaluasi

Pada tahap akhir ini melibatkan pengolahan data sEMG yang diperoleh selama *Subject Trials*, data yang terkumpul dari hasil *subject trials* akan dianalisis menggunakan metode statistik, yaitu *Two-way Repeated Measure ANOVA* dan *correlation test* untuk mengevaluasi tingkat kelelahan otot. Data ini kemudian akan dianalisis untuk menentukan performa daya tahan otot *Flexor Carpi Radialis* dan *Deltoideus*.

1.6. Jadwal Pelaksanaan

Berikut merupakan Jadwal pelaksanaan yang akan menjadi acuan dalam mengevaluasi tahap-tahap pekerjaan

Tabel 1. 1 Jadwal Pelaksanaan dan Milestone Penelitian

No.	Deskripsi Tahapan	Durasi	Tanggal Selesai	Milestone
1.	Studi Literatur	2 Minggu	16 November 2024	Kajian Literatur, mencari reserch gap dan penelitian terd
2.	Design Eksperimen	3 Minggu	7 Desember 2024	Menentukan kriteria subjek yang sesuai, Menyusun prosedur eksperimen, dan memilih pengukuran
3.	Pengambilan Data	3 Minggu	13 Februari 2025	Pengambilan data subjek
4.	Pengolahan Data	5 Minggu	17 Maret 2025	Proses pengolahan data dari hasil pengukuran menggunakan sEMG
5.	Penyusunan Laporan/buku TA	6 Minggu	26 April 2025	Penyusunan laporan akhir hingga buku TA selesai

‘BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini membahas teori dan konsep yang relevan dengan penelitian, termasuk tentang olahraga panjat dinding, analisis kinerja otot, serta faktor-faktor yang mempengaruhi daya tahan dalam olahraga ini. Tinjauan pustaka ini bertujuan untuk memberikan dasar teori yang mendukung penelitian dan mengidentifikasi celah dalam literatur yang ada.

2.1. Panjat Dinding

Panjat dinding atau sering disebut dengan *Wall climbing* telah ada di Indonesia sejak tahun 1960 dan telah menjadi anggota KONI pada tahun 1994. Panjat dinding dibagi dalam beberapa kategori antara lain *Lead*, *Speed* dan *Boulder*. Panjat dinding digemari banyak komunitas di seluruh Indonesia. Dari berbagai kalangan muda maupun tua [1]. Panjat dinding merupakan olahraga memanjat sebuah dinding buatan yang dilengkapi dengan batu pijakan buatan. Berbeda dengan Panjat Tebing, Panjat Dinding bisa dilakukan di ruangan terbuka maupun ruangan tertutup. Panjat Dinding juga relatif lebih aman dari Panjat Tebing karena tidak terpengaruh kondisi cuaca [7]. Panjat dinding merupakan salah satu olahraga tantangan dan mempunyai resiko yang sangat besar. Cabang olahraga ini dulunya berasal dari panjat tebing. Dalam perkembangannya, olahraga panjat tebing dimodifikasi menjadi panjat dinding yang membedakan panjat tebing dengan panjat dinding adalah medianya. Panjat dinding medianya tebing buatan sedangkan panjat tebing medianya tebing alam. Olahraga panjat dinding sebagai salah satu cabang olahraga yang penuh tantangan dan resiko. [8]

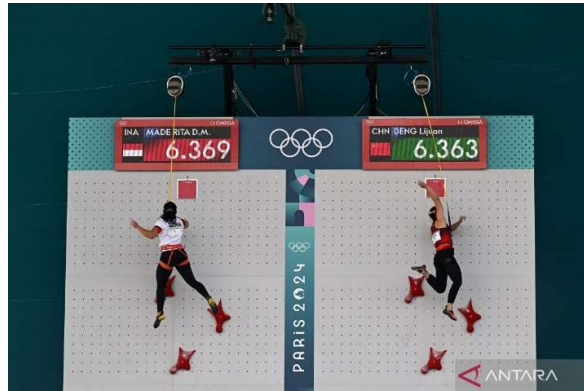
2.1.1 Jenis Pemanjatan Panjat Dinding

Olahraga Panjat Dinding merupakan olahraga yang memerlukan Teknik tertentu untuk dapat menyelesaikan rintangan. Dalam Panjat Dinding kita mengenal 3 jenis Latihan dan dinding yang berbeda, 3 jenis tersebut adalah speed climbing, lead climbing dan bouldering.

a. Speed Climbing

Speed climbing adalah jenis manjat panjat tebing yang menekankan pada kecepatan dalam menghadapi puncak dinding panjat dinding dalam waktu

terkurangi mungkin. Dalam *speed climbing*, pemanjat berlomba untuk mencapai puncak dinding panjat tebing secepat mungkin, dan medannya tidak terlalu rumit seperti tipe lainnya. *Speed Climbing* juga salah satu kategori yang diperlombakan dalam kompetisi panjat tebing dan menjadi kategori paling populer di Indonesia. Pada Gambar 2.1 merupakan contoh *speed climbing* pada Paris 2024 Olympics.



Gambar 2.1 *Speed Climbing* Paris 2024 Olympics [9]

b. *Lead Climbing*

Jenis manjat *lead climbing* adalah pemanjatan dengan menggunakan tali yang dilakukan oleh dua orang atau lebih di mana seseorang harus memanjat lebih dulu (lead) untuk memasang pengaman bagi pemanjat berikutnya. *Lead climbing* menggunakan harness yang diikatkan tali dan terhubung dengan Belayer (pemanjat berikutnya), bisa dilakukan di tebing alam atau dinding buatan. *Lead Climbing* juga mengenalkan kita kepada alat-alat manjat seperti harness, belay device, tangga tali, chock, cam device, piton, dan lain sebagainya [7]. Pada Gambar 2.2 merupakan contoh *Lead Climbing*.



Gambar 2.2 *Lead Climbing* [10]

c. *Bouldering*

Bouldering adalah jenis olahraga panjat dinding yang melibatkan pemanjatan pendek tanpa menggunakan tali pengaman utama. Sebagian besar *bouldering* dilakukan di luar ruangan, seperti di tebing alami atau di dinding buatan, dan menggunakan peralatan tambahan seperti matras atau *crash pad* untuk melindungi pendaki saat jatuh. *Bouldering* dapat membantu mengurangi depresi, meningkatkan massa otot, daya tahan/stamina, dan kinerja jantung. Latihan *Bouldering* juga dapat dikombinasikan dengan *lead climbing* untuk kembali meningkatkan kemampuan dan mengaplikasikan teknik [7]. Pada Gambar 2.3 merupakan contoh jenis *bouldering*.



Gambar 2.3 *Bouldering* [11]

2.2 Anatomi Fisiologi Otot

Otot merupakan suatu kumpulan sel yang terbentuk menjadi organ/alat yang dapat bergerak. Otot adalah sebuah jaringan konektif yang tugas utamanya adalah berkontraksi yang berfungsi untuk menggerakkan bagian-bagian tubuh baik yang disadari maupun yang tidak. Otot disebut alat gerak aktif karena mampu berkontraksi, sehingga mampu menggerakkan tulang. semua sel-sel otot mempunyai kekhususan yaitu untuk berkontraksi. otot membentuk 40-50% berat badan, kira-kira sepertiganya merupakan protein tubuh dan setengahnya tempat terjadinya aktivitas metabolik saat tubuh istirahat. Terdapat lebih dari 600 buah otot pada tubuh manusia. Sebagian besar otot-otot tersebut dilekatkan pada tulang-tulang kerangka tubuh oleh tendon, dan sebagian kecil ada yang melekat di bawah permukaan kulit [12]. Sistem otot yang memungkinkan terjadinya pergerakan,

mempertahankan posisi, membantu pergerakan darah, makanan dan urin, dan memproduksi panas tubuh. [13]

2.2.1 Otot Flexor Carpi Radialis

Otot Flexor Carpi Radialis(FCR) merupakan salah satu otot fleksor pada lengan bawah yang berperan penting dalam gerakan pergelangan tangan. Otot ini berasal dari *epikondilus medial humerus* dan memanjang di sepanjang lengan bawah, melewati sisi lateral pergelangan tangan, hingga berinsersi pada pangkal tulang metakarpal kedua dan ketiga. Fungsi utama dari otot FCR adalah untuk membantu fleksi dan abduksi pergelangan tangan [14]. Pada gambar 2.4 merupakan letak *Otot Flexor Carpi Radialis* pada manusia.

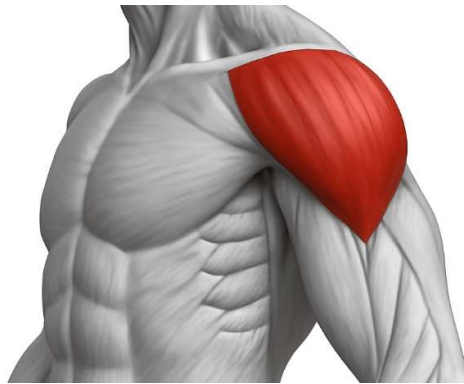


Gambar 2. 4 *Otot Flexor Carpi Radialis*

FCR berfungsi sebagai otot primer dalam melakukan gerakan fleksi pergelangan tangan, terutama saat dibutuhkan kekuatan pada gerakan memegang dan mencengkeram benda. Selain itu, otot ini juga mendukung stabilitas pergelangan tangan selama aktivitas sehari-hari yang melibatkan gerakan halus maupun kasar, seperti mengetik, menulis, hingga olahraga yang menggunakan tangan seperti panjat dinding. Otot ini berasal dari epicondylus medial humerus dan melekat pada basis metacarpal II [15]. Pada penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa otot ini juga berkontribusi pada kontrol postural, memberikan dukungan yang diperlukan saat melakukan aktivitas yang melibatkan gerakan tangan secara dinamis.

2.2.2 Otot *Deltoideus*

Otot Deltoideus merupakan salah satu otot utama yang berperan dalam gerakan bahu. Otot ini terbagi menjadi tiga bagian utama, yaitu pars clavicularis (serabut depan), pars acromialis (serabut tengah), dan pars spinalis (serabut belakang), yang masing-masing memiliki peran spesifik dalam berbagai gerakan bahu seperti abduksi, fleksor, dan ekstensor bahu [16] [17]. Pars clavicularis bertanggung jawab dalam fleksor, adduksi, dan rotasi medial, sedangkan pars acromialis berperan dalam abduksi, dan pars spinalis untuk ekstensi dan rotasi lateral bahu [18]. Kombinasi dari ketiga bagian ini memungkinkan *Deltoideus* berfungsi dinamis dalam menggerakkan bahu ke berbagai arah [19]. Pada gambar 2.5 merupakan letak *Otot Deltoid* pada manusia.



Gambar 2. 5 *Otot Deltoid*

Otot *Deltoid* berperan penting dalam aktivitas sehari-hari seperti mengangkat lengan, mendorong, dan menarik. Menurut penelitian yang sudah ada Otot *Deltoid* bekerja sama dengan otot-otot sekitar seperti Rotator Cuff untuk menjaga stabilitas bahu [20]. Otot Deltoid memainkan peran kunci dalam abduksi lengan, dimulai dari posisi 15° dan berlanjut hingga 90°. Selain itu, otot ini juga membantu dalam gerakan rotasi lengan. [21]

2.2.3 Kontraksi Otot

Dalam otot terdapat zat yang sangat peka terhadap rangsang disebut asetilkolin. Otot yang terangsang menyebabkan asetilkolin terurai membentuk miogen yang merangsang pembentukan aktomiosin. Hal ini menyebabkan otot berkontraksi sehingga otot yang melekat pada tulang bergerak. Saat berkontraksi, otot membutuhkan energi dan oksigen [22]. Oksigen diberikan oleh darah,

sedangkan energi diperoleh dari penguraian ATP (adenosin trifosfat) dan kreatinfosfat. ATP terurai menjadi ADP (adenosin difosfat) + Energi. Selanjutnya, ADP terurai menjadi AMP (adenosin monofosfat) + Energi. Kreatinfosfat terurai menjadi kreatin + fosfat + energi. Energi-energi ini semua digunakan untuk kontraksi otot. [12]

2.2.4 Mekanisme Kontraksi Otot

Mekanisme kontraksi otot sebenarnya merupakan bagian dari mekanisme kerja otot. Otot-otot berkontraksi dan melemas untuk dapat menggerakkan tubuh. Kontraksi otot ini dapat berupa pengencangan, pemendekan, atau pemanjangan otot [23]. Contohnya, ketika Anda memegang atau mengambil sesuatu, ada otot yang memendek sehingga Anda bisa melakukan gerakan menggenggam. Setiap proses kontraksi dan pelepasan yang timbul adalah respon dari sistem saraf. Berikut merupakan beberapa urutan mekanisme kontraksi otot:

1. Sinyal dari sistem saraf

Mekanisme kontraksi otot dimulai ketika adanya sinyal dari sistem saraf yang dikirim ke sel-sel dalam otot (sistem muskular). Sinyal ini adalah respons yang diperintahkan otak ketika hendak melakukan sesuatu yang memerlukan gerakan otot. [23]

2. Reaksi kimia dalam otot

Otot mengandung serat-serat yang disebut dengan myosin. Saat sinyal dari sistem saraf sampai di sambungan neuromuskular, saraf motorik akan mengeluarkan zat kimia yang disebut dengan asetilkolin. Zat ini akan berikatan dengan reseptor di luar serat otot dan terjadilah reaksi kimia di dalam otot. Tergantung dari aktivitas yang akan dilakukan, serat-serat myosin akan mengencang, memendek, mengendur, atau meregang. Reaksi kimia tersebut memicu keluarnya kalsium dalam otot dan merangsang kinerja senyawa aktin (tipis) dan myosin (tebal). Nantinya, akan membangun struktur jembatan silang. Jadi, peranan kalsium dalam kontraksi otot adalah untuk mengikat *troponin* (kelompok protein) dan mengubah bentuknya. Selama kontraksi otot berlangsung, akan terjadi pengurangan karbohidrat yang menjadi sumber energi. [23]

3. Melemasnya otot

Saat sinyal dari sistem saraf sudah berhenti, reaksi kimia dalam otot akan kembali seperti semula dan membuat otot memanjang atau melemas. Ini membalikkan mekanisme kontraksi otot. [23]

2.3 Kelelahan (*Fatigue*)

Kelelahan yang disebabkan oleh olahraga adalah sensasi umum yang dialami setiap orang. Selama berolahraga, beban kerja dapat menimbulkan sensasi yang begitu kuat sehingga seseorang harus mengurangi beban kerja atau bahkan menghentikan latihan. Kelelahan ditandai dengan berkurangnya kemampuan untuk menghasilkan power atau kekuatan tertentu, yang dapat dilihat setelah adanya aktivitas yang dilakukan secara intens. Kelelahan adalah sebuah mekanisme perlindungan tubuh agar tubuh menghindari kerusakan lebih lanjut dan disertai penurunan efisiensi dan ketahanan [24]. Terjadi dua jenis kelelahan, yaitu kelelahan otot dan kelelahan umum.

2.3.1 Kelelahan (*Fatigue*) Otot

Kelelahan otot adalah suatu kondisi dimana otot sudah tidak mampu melakukan kontraksi diakibatkan kontraksi otot yang kuat dan lama. Kelelahan otot merupakan penurunan kapasitas otot untuk menghasilkan kekuatan atau tenaga setelah aktivitas berkepanjangan atau intens. Kondisi ini sering kali disebabkan oleh akumulasi produk sampingan metabolik, seperti asam laktat, dan pengurangan kemampuan saraf untuk menstimulasi otot secara efektif. Manajemen kelelahan otot bertujuan untuk mengurangi risiko cedera akibat kelelahan dan mempertahankan performa otot selama aktivitas. [25]

Secara umum, kelelahan otot dapat terjadi karena dua faktor utama: kelelahan pusat (*central fatigue*), yang melibatkan sistem saraf pusat, dan kelelahan perifer (*peripheral fatigue*), yang terjadi di serat otot itu sendiri. Kelelahan pusat melibatkan sistem saraf pusat yang mengurangi sinyal ke otot, sedangkan kelelahan perifer terjadi akibat perubahan dalam serat otot itu sendiri. Pada penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa kelelahan perifer terutama disebabkan oleh gangguan pada siklus kalsium di dalam serat otot, yang berperan penting dalam

kontraksi otot. Selain itu, kelelahan juga disebabkan oleh deplesi glikogen, penumpukan ion hidrogen, dan perubahan keseimbangan elektrolit. [26]

2.3.2 Kelelahan (*Fatigue*) Umum

Kelelahan umum ditandai dengan berkurangnya kemauan untuk bekerja yang sebabnya adalah persyaratan psikis. Penyebab kelelahan umum adalah monoton, intensitas, dan lamanya kerja mental dan fisik, keadaan lingkungan. Pada penelitian sebelumnya kelelahan memengaruhi lebih dari sekadar fisik, hal itu juga berdampak signifikan pada aspek kognitif, di mana seseorang mungkin mengalami kesulitan dalam berkonsentrasi, mengingat, atau membuat keputusan yang tepat. Kelelahan juga menunjukkan bahwa durasi pada intensitas pekerjaan dapat memengaruhi tingkat kelelahan individu, terutama pada pekerja dengan tuntutan fisik yang tinggi. [27]

2.4 Daya Tahan Anaerobik (Stamina)

Daya tahan anaerobik atau stamina adalah kemampuan tubuh untuk menghasilkan energi tanpa melibatkan oksigen secara signifikan, terutama selama aktivitas intensitas tinggi dalam durasi singkat. Dalam konteks panjat dinding, daya tahan anaerobik berperan penting saat pendaki harus menyelesaikan rute-rute teknis dengan intensitas tinggi, seperti pada *bouldering* atau bagian sulit jalur yang membutuhkan kekuatan eksplosif. Energi pada aktivitas ini diperoleh melalui metabolisme anaerobik, yang memanfaatkan glikogen otot sebagai bahan bakar utama untuk memecah glukosa dengan cepat tanpa menggunakan oksigen.

Pengukuran daya tahan anaerobik dapat dilakukan melalui tes laktat, yaitu mengukur konsentrasi asam laktat dalam darah selama atau setelah aktivitas fisik intensitas tinggi. Peningkatan kadar asam laktat mencerminkan kemampuan tubuh dalam menangani akumulasi produk metabolisme anaerobik. Dalam latihan panjat dinding, pengujian ini dapat memberikan gambaran tentang efektivitas sistem energi anaerobik pendaki dan membantu dalam merancang program pelatihan yang sesuai.

Melalui latihan yang terstruktur dan pengukuran daya tahan anaerobik yang terpantau, pendaki dapat meningkatkan kemampuan mereka dalam menyelesaikan rute sulit dengan efisiensi tinggi, menjadikan daya tahan anaerobik sebagai elemen penting dalam peningkatan performa panjat dinding.

2.5 Cedera Otot

Olahraga panjat dinding membutuhkan kekuatan otot yang besar, kelenturan, serta kemampuan koordinasi tubuh yang baik. Tingginya intensitas latihan dan tantangan fisik dalam olahraga ini menjadikan atlet rentan mengalami berbagai jenis cedera otot. Cedera otot dalam panjat dinding biasanya terjadi pada otot-otot ekstremitas atas, terutama lengan, bahu, dan jari, yang berfungsi sebagai penopang utama dalam memanjat. Cedera otot adalah gangguan atau kerusakan pada jaringan otot yang dapat disebabkan oleh aktivitas fisik berlebihan, trauma, atau penggunaan berulang. Dalam konteks olahraga panjat dinding, cedera otot sering disebabkan oleh gerakan yang repetitif, beban statis yang tinggi, dan kelelahan otot akibat tekanan yang terus-menerus pada otot tertentu. Cedera ini dapat berupa strain (tarikan) atau robekan pada serabut otot. [28]

Sebagian besar cedera otot dalam panjat dinding terjadi pada otot-otot yang sering digunakan untuk menopang beban tubuh, yaitu otot *Deltoideus*, otot bisep, otot pektoralis, serta otot-otot jari dan lengan bawah. Tekanan pada otot-otot ini meningkat secara signifikan ketika pemanjat melakukan gerakan tertentu seperti *dyno* (gerakan melompat ke pegangan yang lebih tinggi) dan *lock-off* (menahan posisi pada satu tangan). Otot bisep, misalnya, sangat rentan mengalami cedera karena berperan dalam menarik tubuh ke atas, terutama pada panjat dinding dengan pegangan kecil atau saat melakukan gerakan yang membutuhkan tenaga besar secara tiba-tiba. [29]

2.6 Electromyography (EMG) dan Asam Laktat

Electromyography (EMG) adalah metode yang digunakan untuk mengukur aktivitas listrik yang dihasilkan oleh otot selama kontraksi. Pengukuran EMG dapat memberikan informasi mengenai intensitas kerja otot, koordinasi antar otot, serta membantu mengidentifikasi potensi cedera yang diakibatkan oleh aktivitas fisik yang tinggi. Dalam olahraga panjat dinding, EMG menjadi alat penting untuk

memahami bagaimana otot-otot bekerja dan merespons berbagai gerakan serta intensitas beban saat memanjat. Penggunaan EMG juga dapat membantu dalam mengidentifikasi risiko cedera otot dalam olahraga panjat dinding.

Data EMG diperoleh dengan menempatkan sensor yang dapat menangkap sinyal listrik otot pada permukaan kulit (*surface* EMG) atau dengan memasukkan elektode jarum kecil langsung ke dalam otot (*intramuscular* EMG), tergantung pada kedalaman otot yang ingin diukur.

2.6.1 Surface Electromyography (sEMG)

Surface Electromyography (sEMG) merupakan teknik non-invasif yang diukur pada permukaan kulit, mencerminkan efek kumulatif potensial aksi otot dan aktivitas saraf pada kulit, memberikan informasi berharga tentang aktivitas neuromuscular. Dibandingkan dengan teknologi pemantauan lainnya, sEMG mampu memberikan umpan balik waktu nyata, memungkinkan pengukuran dinamis dan secara langsung mencerminkan keadaan kontraksi otot yang menyebabkan gerakan anggota tubuh. Hal ini menjadikannya sumber umpan balik utama untuk tindakan intervensi eksternal dan memiliki kepentingan penelitian yang signifikan, menjadikannya alat penelitian yang populer dalam ilmu olahraga dan rehabilitasi. [30]

Pengukuran sEMG merupakan metode yang mudah, sederhana, dan non-invasif untuk menilai gaya otot secara keseluruhan. Telah dibuktikan bahwa kekuatan genggam dapat digunakan sebagai indikator kelemahan otot. Selain itu, sEMG dapat secara akurat mencerminkan kelelahan otot lokal pada tubuh manusia dan merupakan cara yang efektif untuk melacak dan mengevaluasi koordinasi otot, memprediksi gerakan lengan bawah dan sudut sendi. [30]

2.6.2 Prinsip dan Karakteristik Sinyal sEMG

sEMG mengukur potensial aksi yang dihasilkan oleh serat otot saat berkontraksi. sEMG awalnya digunakan untuk keperluan medis dan penelitian, namun kini telah meluas penggunaannya dalam berbagai bidang, termasuk olahraga dan biomekanika. sEMG bekerja dengan mendeteksi perubahan tegangan listrik yang muncul saat otot beraktivitas. Tegangan ini kemudian direkam dalam bentuk sinyal yang mencerminkan tingkat aktivitas dan kondisi fisiologis otot. [31]

sEMG memiliki frekuensi dalam kisaran 10-500 Hz, dengan amplitudo antara 0.01 hingga 5 mV, bergantung pada tingkat aktivitas otot dan letak elektode [32]. Sinyal ini sangat dipengaruhi oleh faktor eksternal seperti penempatan elektode, gerakan tubuh, dan artefak noise. Karena itu, metode signal processing sangat penting untuk memastikan keakuratan data. Analisis spektral memungkinkan untuk mengidentifikasi frekuensi dominan yang berkaitan dengan kelelahan otot. Seiring bertambahnya kelelahan, frekuensi dominan cenderung menurun. [33]

Metode pemrosesan sinyal sEMG seperti *Root Mean Square* (RMS), *Mean Absolute Value* (MAV), Spectral Entropy, dan Median Frekuensi (MDF) digunakan untuk menganalisis aktivitas otot dan mendeteksi kelelahan. RMS mengukur intensitas sinyal dan menggambarkan kekuatan kontraksi otot, sedangkan MAV menghitung rata-rata absolut sinyal untuk menilai tingkat aktivitas otot [34]. Metode-metode ini memungkinkan analisis sEMG yang lebih mendalam sehingga mengetahui lebih rinci mengenai kondisi dan performa otot dalam berbagai konteks olahraga.

2.6.3 Representasi Kelelahan Otot pada sEMG

Kelelahan otot dapat teridentifikasi melalui perubahan karakteristik sinyal sEMG, seperti penurunan frekuensi median (MDF). Penurunan frekuensi ini disebabkan oleh peningkatan rekrutmen serat otot lambat selama kelelahan, yang menghasilkan penurunan kecepatan konduksi saraf [32]. Seiring meningkatnya kelelahan otot, sinyal sEMG mengalami peningkatan amplitudo, karena tubuh berusaha mengompensasi penurunan kekuatan otot dengan mengaktifkan lebih banyak unit motorik [33]. Analisis spektral sEMG juga menunjukkan penurunan pada MDF yang dikaitkan dengan kondisi kelelahan. [34]

2.6.4 Asam Laktat sebagai Indikator Kelelahan

Asam laktat dihasilkan sebagai produk sampingan metabolisme anaerobik dan meningkat selama aktivitas otot yang intens, terutama ketika oksigen yang disuplai tidak mencukupi. Saat konsentrasi asam laktat dalam darah meningkat, pH otot menurun, menyebabkan penurunan fungsi enzimatik dan kontraktile otot, yang pada akhirnya mengakibatkan kelelahan. Asam laktat sering diukur untuk

menentukan intensitas dan durasi aktivitas otot yang optimal dalam pelatihan [35]. Pada penelitian sebelumnya menekankan bahwa hubungan antara kadar asam laktat dan kelelahan otot penting dalam menentukan batas intensitas latihan. [36]

2.6.5 Hubungan antara sEMG dan Asam Laktat

Hubungan antara sinyal sEMG dan asam laktat telah diidentifikasi dalam berbagai penelitian, di mana peningkatan amplitudo sEMG sering kali terjadi bersamaan dengan peningkatan kadar asam laktat [37]. Ini menunjukkan bahwa kedua parameter tersebut memberikan indikasi yang komplementer untuk kelelahan otot. Penggunaan kombinasi analisis sEMG dan kadar asam laktat memberikan pendekatan yang lebih komprehensif dalam memahami respons otot terhadap aktivitas yang intens dan kelelahan [38]. Pada penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa pengukuran simultan sEMG dan asam laktat memungkinkan pelacakan kelelahan dengan akurasi lebih tinggi, memberikan informasi yang bermanfaat dalam pengaturan intensitas latihan. [37]

2.7 Fitur Ekstraksi

Dalam analisis sinyal EMG, proses ekstraksi fitur menjadi tahap krusial untuk mengubah data mentah menjadi informasi yang bermakna dan dapat diinterpretasikan. Beberapa fitur yang umum digunakan meliputi *Mean Absolute Value* (MAV) dan *Root Mean Square* (RMS) yang merepresentasikan karakteristik amplitudo sinyal secara waktu, serta *Median Frequency* yang memberikan gambaran distribusi frekuensi dominan dalam sinyal. Selain itu, Spektral Entropy digunakan untuk mengukur kompleksitas dan tingkat ketidakteraturan pada spektrum frekuensi sinyal EMG. Kombinasi keempat fitur ini memungkinkan analisis yang lebih komprehensif dalam mendeteksi dan memahami aktivitas otot secara kuantitatif.

2.7.1 Mean Absolute Value (MAV)

Mean Absolute Value (MAV) adalah salah satu fitur domain waktu yang paling sederhana dan paling banyak digunakan dalam analisis sinyal EMG. MAV mengukur nilai rata-rata absolut dari sinyal, yang secara langsung merepresentasikan intensitas aktivitas otot selama periode pengamatan. Fitur ini sangat berguna dalam menggambarkan level aktivitas otot secara umum karena