

DAFTAR SINGKATAN

BMI	Body Mass Index
EMG	Electromyography
iEMG	Intergrated Electromyography
LDV	Lactate Different Value
LS	Lactate Score
MAV	Mean Absolute Value
MNF	Mean Frequency
MDF	Median Frequency
RMS	Root Mean Square
sEMG	Surface Electromyography

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang Masalah

Aktivitas fisik berlari semakin populer di kalangan masyarakat sebagai salah satu bentuk olahraga yang mudah diakses dan memberikan manfaat signifikan bagi kesehatan kardiovaskular. Menurut laporan *Running USA*, partisipasi dalam berbagai acara lari, seperti maraton dan kegiatan lari rekreasi, menunjukkan peningkatan yang signifikan dalam beberapa tahun terakhir [1]. Dalam beberapa tahun terakhir, khususnya hingga tahun 2025, olahraga lari telah menjadi salah satu tren gaya hidup sehat yang sangat populer di Indonesia. Data dari Garmin menunjukkan bahwa jumlah pelari di Indonesia meningkat hingga tiga kali lipat pada tahun 2024, dengan lebih dari 80 ribu pengguna aktif yang berlari, menandakan minat yang besar terhadap kebugaran dan kesehatan kardiovaskular di kalangan masyarakat urban. Fenomena ini tidak hanya mencerminkan kesadaran akan pentingnya aktivitas fisik, tetapi juga berkembang menjadi komunitas sosial yang kuat melalui berbagai event lari, mulai dari maraton hingga *fun run*, yang semakin marak digelar di berbagai kota. Pelari hobiis kini memandang lari sebagai sarana rekreasi sekaligus kompetisi yang dapat meningkatkan kualitas hidup dan kesehatan mental [2].

Pada era dengan teknologi yang sudah berkembang ini, penggunaan treadmill sebagai alat latihan telah menjadi populer di kalangan pelari hobiis karena memungkinkan kontrol penuh atas kecepatan dan kemiringan. Hal ini memungkinkan pelari untuk menyesuaikan intensitas latihan sesuai dengan kebutuhan masing-masing. Saat berlari sejumlah otot utama pada kaki bekerja secara sinergis untuk pergerakan, stabilitas, dan kekuatan. Otot utama yang bekerja diantaranya adalah otot betis seperti *gastrocnemius* dan *soleus* yang berperan dalam dorongan kaki, serta *tibialis anterior* yang membantu kontrol gerakan kaki saat menyentuh tanah. Otot paha seperti *biceps femoris* dan *rectus femoris* juga aktif dalam siklus lari untuk mengangkat dan mendorong kaki, memberikan tenaga dan stabilitas [3]. Otot-otot tersebut berperan yang saling mendukung dalam pergerakan

tubuh secara keseluruhan. Namun, aktivitas otot yang berlebihan bisa meningkatkan risiko cedera yang dipicu oleh kelelahan otot. Kelelahan otot merupakan fenomena yang sering terjadi pada pelari, hal ini ditandai dengan berkurangnya kapasitas otot untuk menjalankan aktivitas fisik secara normal [4].

Performa otot kaki sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor biomekanik dan fisiologis. Penelitian oleh Prasetio et al menunjukkan bahwa kelelahan otot dapat mempengaruhi stabilitas postural, yang pada gilirannya meningkatkan risiko terjatuh atau cedera saat bergerak. Dalam studi tersebut, ditemukan bahwa individu yang mengalami kelelahan otot menunjukkan penurunan kemampuan dalam menjaga keseimbangan, yang dapat berkontribusi pada gangguan mobilitas dan cedera [5].

Beberapa penelitian telah menunjukkan bahwa kelelahan otot dapat mengubah pola aktivasi otot dan koordinasi antar otot. Sebuah penelitian menemukan bahwa kelelahan tidak mengubah jumlah sinergi otot, tetapi mengubah bobot relatif otot-otot tersebut, yang mungkin merupakan strategi sistem saraf pusat untuk mempertahankan fungsi motorik yang optimal [6]. Penelitian lain menunjukkan bahwa otot-otot seperti *biceps femoris* dan *rectus femoris* menunjukkan tanda-tanda kelelahan lebih awal terutama saat berlari dengan intensitas tinggi, yang mengindikasikan pentingnya otot-otot ini dalam mempertahankan kinerja saat berlari [7]. Pada penelitian sebelumnya, diketahui bahwa *surface* atau permukaan lari, kecepatan, dan durasi berlari mempengaruhi tingkat aktivitas otot [8] [9].

Aktivitas otot yang mempengaruhi gerak dapat diukur menggunakan *Surface Electromyography* (sEMG). Alat ini merupakan alat yang efektif untuk mengukur kelelahan otot secara non-invasif, dengan kemampuan untuk mendeteksi perubahan dalam aktivitas listrik otot selama latihan [10]. Dengan menggunakan elektrode yang ditempatkan di permukaan kulit, sEMG dapat merekam sinyal listrik yang dihasilkan saat otot berkontraksi. Penelitian menunjukkan bahwa amplitudo sinyal sEMG cenderung meningkat seiring dengan kelelahan otot, yang dapat diukur melalui analisis parameter seperti *mean frequency* (MNF) dan *median frequency* (MDF) [10]. Fokus penelitian ini adalah untuk menganalisis pengaruh kelelahan otot pada performa pelari hobiis berdasarkan 3 faktor, yaitu landasan atau *surface*,

waktu, dan kecepatan berlari menggunakan *treadmill*, dengan pemanfaatan sEMG sebagai alat untuk mengukur kelelahan otot secara non-invasif.

Hal tersebut dipilih karena pelari hobiis memiliki pola aktivasi dan ketahanan kelelahan yang lebih stabil karena latihan rutin, sehingga perbedaan yang diamati dalam penelitian lebih mencerminkan pengaruh faktor uji seperti kecepatan, permukaan, dan durasi lari, bukan karena perbedaan kemampuan dasar [11]. Sebaliknya, pelari awam cenderung menunjukkan kelelahan akibat ketidakterbiasaan dalam berlari dan menunjukkan aktivasi otot yang tidak konsisten dan kelelahan yang lebih cepat akibat minimnya latihan, sehingga hasil yang diperoleh kurang merepresentasikan pengaruh faktor yang sebenarnya diuji [11]. Sementara itu, pelari atlet memiliki kapasitas fisik dan daya tahan otot yang jauh lebih tinggi serta adaptasi fisiologis yang optimal, menunjukkan aktivasi otot yang efisien, resistensi kelelahan yang tinggi dan fungsi neuromuskular yang unggul sebagai hasil dari adaptasi latihan intensif, sehingga efek kelelahan otot tidak terlalu terlihat secara signifikan [12].

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah disampaikan, berikut rumusan masalah yang dapat dijabarkan:

1. Bagaimana kelelahan memengaruhi sinyal EMG dan performa aktivitas otot *biceps femoris* dan otot *gastrocnemius* dengan kecepatan berlari yang berbeda?
2. Bagaimana pengukuran sEMG dapat digunakan dalam menilai performa dan kelelahan pada aktivitas otot *biceps femoris* dan otot *gastrocnemius*?
3. Apakah terdapat perbedaan sinyal EMG antara otot *biceps femoris* dan otot *gastrocnemius* berdasarkan tingkat aktivitasnya?

1.3. Tujuan dan Manfaat

1.3.1 Tujuan

1. Menganalisis sinyal EMG berdasarkan kelelahan dan performa otot *biceps femoris* dan otot *gastrocnemius* dengan kecepatan, durasi, dan permukaan berlari yang berbeda pada pelari hobiis setelah berlari.

2. Menghasilkan data statistik yang dapat digunakan untuk evaluasi kelelahan otot berdasarkan sinyal EMG yang dihasilkan dari otot *biceps femoris* dan *gastrocnemius*.
3. Mengidentifikasi perbedaan sinyal EMG berdasarkan tingkat aktivitas antar otot *biceps femoris* dan otot *gastrocnemius*.

1.3.2 Manfaat

1. Memberikan wawasan mengenai pengaruh kecepatan, durasi, dan permukaan berlari terhadap kelelahan otot pada pelari hobiis.
2. Menyediakan data statistik yang dapat diandalkan untuk evaluasi kegiatan otot dalam olahraga.

1.4. Batasan Masalah

Batasan masalah ini bertujuan untuk menentukan ruang lingkup, dan asumsi-asumsi yang berlaku dalam analisis perbandingan kelelahan pada otot pada pelari hobiis, diantaranya:

1. Penelitian ini membatasi subjek pelari hobiis berusia 18-22 tahun yang terbiasa melakukan latihan lari minimal tiga kali seminggu dan memiliki *Body Mass Index* (BMI) ideal.
2. Pengukuran hanya difokuskan pada dua otot utama, yaitu otot *biceps femoris* dan otot *gastrocnemius*.
3. Aktivitas lari akan diukur dengan sEMG dan dilakukan di atas *treadmill* dengan melakukan pemanasan atau precondition selama 3 menit dengan kecepatan 3.3 km/j kemudian berlari dengan kecepatan 6-10 km/j selama 5 menit untuk semua subjek. Pada penelitian Lin et al, dilakukan juga penelitian yang serupa dengan melakukan pengukuran di atas landasan, kecepatan, dan waktu yang berbeda [8].

1.5. Metode Penelitian

Pada penelitian ini akan dilakukan dengan beberapa metode untuk mengumpulkan dan menganalisis data. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Studi Teoritis/Literatur

Studi Teoritis/Literatur bertujuan untuk mengumpulkan informasi dari sumber-sumber akademis yang relevan, seperti jurnal ilmiah, buku, dan publikasi lainnya yang membahas topik terkait sEMG, analisis otot saat berlari, kelelahan otot, dan metode analisis statistik. Studi literatur ini akan digunakan sebagai dasar pemahaman mengenai teori konsep yang diperlukan dalam penelitian, serta untuk membandingkan hasil penelitian dengan penelitian sebelumnya.

2. Desain Eksperimen

Desain Eksperimen berfokus pada prosedur penelitian yang terperinci, termasuk spesifikasi alat yang digunakan, seperti perangkat sEMG untuk merekam aktivitas otot, *treadmill* untuk berlari, serta protokol uji coba. Pada tahap ini juga mencakup persiapan dan pengaturan parameter yang disesuaikan dengan tujuan penelitian.

3. *Subject Trials*

Pada tahap ini, *subject trials* merupakan tahap pengumpulan data di mana subjek yang telah memenuhi data inklusi (pelari hobiis berusia 18–22 tahun yang terbiasa berlatih lari minimal tiga kali seminggu dengan BMI ideal) menjalani uji coba di *treadmill*. Dalam tahap ini, sinyal EMG dari otot biceps femoris dan gastrocnemius akan direkam menggunakan perangkat sEMG sebelum dan sesudah subjek berlari. Setiap subjek akan menjalani sesi berlari di *treadmill* sesuai protokol, dengan fokus pengumpulan data yang konsisten untuk menganalisis perubahan sinyal EMG yang menunjukkan tingkat kelelahan otot.

4. Analisis Data dan Evaluasi

Data yang terkumpul dari hasil *subject trials* akan dianalisis menggunakan metode statistik, yaitu *Two-way ANOVA* dan *Paired T-test*, untuk mengevaluasi tingkat kelelahan otot biceps femoris dan gastrocnemius sebelum dan sesudah aktivitas berlari.

Analisis ini akan mengidentifikasi perbedaan signifikan hasil kuantitatif mengenai perubahan yang terjadi. Hasil analisis ini akan dievaluasi untuk menarik

kesimpulan yang mendukung terkait dampak latihan berlari pada kelelahan otot bagi pelari hobiis.

1.6. Jadwal Pelaksanaan

Jadwal pelaksanaan tugas akhir ini disusun untuk mengatur alur pengerjaan dan mencapai target secara sistematis. Beberapa *milestone* ditetapkan sebagai indikator pencapaian dalam setiap tahap pekerjaan. Pada halaman berikutnya adalah tahapan dan estimasi waktu pelaksanaan

Tabel 1. 1 Jadwal dan *Milestone*

No	Deskripsi Tahapan	Durasi	Tanggal Selesai	<i>Milestone</i>
1	Studi Literatur	2 Minggu	30 November 2024	Mengetahui <i>research gap</i> pada penelitian terdahulu
2	<i>Design Experiment</i>	2 Minggu	14 Desember 2024	Mengetahui Target, Subjek dan <i>List</i> alat yang digunakan
3	Pengambilan Data	2 Minggu	24 Februari 2025	Pengambilan data dari subjek
4	Pengolahan Data	3 Minggu	15 Maret 2025	Diketahui pengaruh serta dampak penelitian terhadap tujuan penelitian
5	Penyusunan Laporan/buku TA	5 Minggu	26 April 2025	Buku TA selesai

BAB II

KAJIAN PUSTAKA

Bab ini menguraikan landasan teoritis yang mencakup konsep olahraga lari, performa saat berlari, mekanisme kelelahan otot, karakteristik otot *biceps femoris* dan *gastrocnemius*, serta penggunaan metode *electromyography* (EMG) yang bertujuan untuk menyediakan kerangka ilmiah dalam menganalisis aktivitas kelelahan otot dan factor-faktor yang mempengaruhinya.

2.1 Olahraga Lari

Pada tahun 1896, olahraga lari menjadi salah satu kategori dalam perlombaan olimpiade modern. Olahraga lari merupakan bagian dari cabang atletik. Dalam konteks atletik, lari adalah salah satu cabang yang menguji kecepatan, ketahanan, dan strategi peserta untuk menyelesaikan jarak tertentu dalam waktu tercepat [13]. Saat berlari, tubuh mengandalkan kekuatan dan kecepatan pada kaki, serta mengayunkan lengan untuk membantu menjaga keseimbangan. Selain itu, kondisi tubuh ketika berlari cenderung melayang karena hanya ada satu kaki yang menjejak tanah dalam satu waktu [14].



Gambar 2. 1 Ilustrasi Berlari [15]

Saat ini, olahraga lari menjadi semakin populer dan di kalangan masyarakat modern, sehingga banyak orang memanfaatkan aktivitas olahraga lari untuk tetap aktif dan sehat. Semakin banyaknya peminat dalam olahraga ini, telah berkembang juga komunitas lari yang menjadi salah satu faktor pendorong popularitas lari [16]. Olahraga lari secara rutin dapat meningkatkan kesehatan fisik dan kualitas hidup. Individu yang aktif berlari memiliki kebugaran kardiorespirasi yang baik, kekuatan otot yang lebih tinggi, serta fleksibilitas tubuh yang lebih baik dibandingkan dengan

individu yang tidak berolahraga secara teratur [17]. Selain manfaat fisik, olahraga lari juga memberikan dampak positif pada kesehatan mental. Dengan manfaat fisik dan mental yang signifikan, berlari tidak hanya membantu individu menjaga kebugaran tetapi juga memperkuat interaksi sosial dan meningkatkan kualitas hidup secara keseluruhan.

2.2 Performa Saat Berlari

Kekuatan kaki merupakan faktor utama saat berlari yang dapat mempengaruhi kecepatan, daya tahan, dan efisiensi gerakan. Kekuatan otot kaki dan otot tungkai dapat secara signifikan meningkatkan kemampuan berlari dan memainkan peran krusial dalam performa lari [16]. Performa olahraga lari tidak hanya bergantung pada kecepatan tetapi juga pada teknik, kesehatan fisik, dan dukungan komunitas.

Untuk meningkatkan performa saat berlari, disarankan untuk melakukan berbagai jenis latihan kekuatan seperti *squat* untuk memperkuat kekuatan otot paha depan atau *hamstring* dan *lunges* untuk memperkuat kekuatan otot kaki dan menjaga keseimbangan tubuh. Latihan kekuatan tidak hanya meningkatkan performa lari, tetapi juga membantu mencegah cedera. Kekuatan otot yang baik membantu pelari mengurangi risiko cedera akibat kelelahan otot dan teknik lari yang buruk. Selain itu, latihan kekuatan juga membantu pelari mempertahankan postur tubuh yang benar saat berlari [17].

2.3 Kelelahan pada Otot

Kelelahan otot didefinisikan sebagai penurunan kemampuan otot untuk menghasilkan kekuatan dan efisiensi akibat aktivitas fisik yang berlebihan. Kelelahan otot terjadi ketika terjadi ketidakseimbangan antara produksi energi dan pengeluaran energi dalam sel otot. Selama berolahraga, tubuh menghasilkan energi melalui metabolisme aerobik dan anaerobik. Aktivitas yang berkepanjangan atau tinggi meningkatkan produksi asam laktat, yang dapat mempengaruhi fungsi otot [18]. Gejala umum kelelahan pada otot meliputi nyeri otot yang menimbulkan ketidaknyamanan pada otot setelah aktivitas fisik, penurunan kekuatan yang bisa menimbulkan kesulitan dalam melakukan aktivitas sehari-hari, dan kesulitan berkonsentrasi karena kelelahan [19].

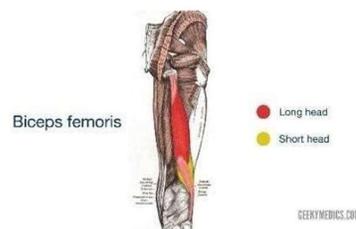
Kelelahan otot merupakan kondisi umum yang sangat memengaruhi kinerja fisik, tetapi juga dapat memengaruhi kesehatan mental. Akibat dari kelelahan otot seringkali menurunkan motivasi dan konsentrasi sehingga dapat mempengaruhi kehidupan sehari-hari. Dengan memahami penyebab dan mekanisme di balik kelelahan ini dan menerapkan strategi pemulihan yang tepat, individu dapat meningkatkan kinerja fisiknya dan mengurangi risiko cedera.

2.4 Otot

Pada subbab ini membahas otot *biceps femoris* yang merupakan salah satu kelompok *hamstring* yang memiliki peran signifikan dalam mekanisme gerak.

2.4.1 Otot *Biceps Femoris*

Otot *Biceps Femoris* merupakan salah satu otot utama yang terletak di posterior paha dan merupakan bagian dari kelompok otot *hamstring*. Otot ini terdiri dari dua kepala, yaitu kepala panjang (*long head*) dan kepala pendek (*short head*). Kepala panjang pada otot *biceps femoris* berasal dari *ischial tuberosity* dan *ligament sakrotuberus*, sedangkan kepala pendek berasal dari *lateral lip* atau garis aspera femur dan *suprakondilar lateral femur*. Pada pemasangannya, kedua kepala dari *biceps femoris* bersatu dan memasuki bagian kepala lateral fibula dan bagian kepala Panjang diinervasi oleh cabang *tibial* dari *saraf sciatic*, sedangkan bagian kepala pendek diinervasi oleh cabang fibular umum dari *saraf sciatic* [3].



Gambar 2. 2 Otot *Biceps Femoris* [20]

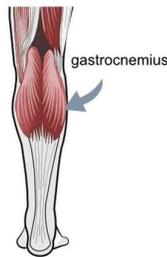
Otot *biceps femoris* merupakan otot yang sangat penting dalam aktivitas fisik, terutama dalam olahraga yang melibatkan sprinting atau aktivitas berkecepatan tinggi. Otot *biceps femoris* berfungsi melenturkan kaki pada sendi lutut dan meregangkan paha pada sendi pinggul. Selain itu, otot *biceps femoris* juga membantu untuk stabilisasi panggul selama bergerak terutama saat membungkuk

ke depan. Cedera pada otot *biceps femoris*, terutama pada kepala panjang, adalah salah satu cedera otot *hamstring* yang paling umum terjadi pada atlet [21].

Setelah membahas peran otot *biceps femoris*, pembahasan berikutnya beralih ke otot *gastrocnemius*. Sebagai bagian utama dari kelompok otot betis, *gastrocnemius* memiliki peran kritis dalam mekanisme plantar fleksi pergelangan kaki dan stabilitas tubuh.

2.4.2 Otot *Gastrocnemius*

Otot *Gastrocnemius* adalah otot besar yang terletak di bagian belakang tungkai bawah dan merupakan bagian dari kelompok otot betis. Otot *gastrocnemius* merupakan kunci penting dari banyak aktivitas fisik. Struktur dari otot ini memiliki dua kepala, yaitu kepala medial yang berasal dari bagian *medial femur* di atas sendi lutut, dan kepala lateral yang berasal dari dari *lateral femur* di atas sendi lutut. Kedua kepala ini bersatu menjadi satu tendon yang melekat pada tumit melalui *tendon achilles* [3].



Gambar 2. 3 Otot *Gastrocnemius* [22]

Otot *Gastrocnemius* merupakan otot yang paling dangkal dan membentuk penonjolan betis, otot ini memiliki fungsi untuk melakukan plantar flexion atau menekuk kaki ke arah bawah di pergelangan kaki dan berkontribusi dalam flexi lutut. Contohnya, jika seseorang yang sedang berdiri mulai mencondongkan tubuh ke depan, otot *gastrocnemius* dan otot betis lainnya akan meregang. Akibatnya, refleks peregangan dimulai pada otot-otot ini, yang menyebabkan otot-otot tersebut berkontraksi dan membangun kembali postur tubuh yang tegak. Jenis refleks peregangan yang serupa terjadi pada otot-otot tulang kering ketika seseorang yang berdiri mulai bersandar ke belakang [3].

2.5 Body Mass Index (BMI)

Body Mass Index (BMI) adalah metode yang digunakan untuk memeriksa massa tubuh. BMI dihitung menggunakan rumus sederhana yang menghubungkan berat badan dan tinggi badan seseorang. Rumus ini dirancang untuk memberikan gambaran cepat mengenai status berat badan individu [23]. Berikut adalah Rumus yang digunakan dalam perhitungan BMI:

$$BMI = \frac{\text{Berat Badan (kg)}}{\text{Tinggi Badan (m)}^2} \quad (2.1)$$

Perhitungan ini juga dilakukan untuk mengelompokkan individu ke dalam kategori seperti berat badan kurang, berat badan normal, kelebihan berat badan, dan obesitas, yang dapat menjadi indikator resiko kesehatan tertentu [23]. Pada tabel 2.1 menunjukkan kategori BMI untuk Pria dan Wanita.

Tabel 2. 1 Kategori BMI [24]

Kategori	Rentang BMI (kg/m ²)	Pria	Wanita
Berat Badan Kurang	< 18,5	Kurus	Kurus
Berat Badan Normal (ideal)	18,5 – 22,9	Normal	Normal
Kelebihan Berat Badan	25,0 – 24,9	Kelebihan Berat	Kelebihan Berat
Obesitas I	≥ 30	Obesitas I	Obesitas I
Obesitas II	≥ 30	Obesitas II	Obesitas II

Masing-masing kategori yang terdapat pada tabel 2.1 menunjukkan bahwa berat badan kurang (*underweight*) menunjukkan adanya risiko malnutrisi dan kesehatan yang buruk. Berat badan normal (*normal weight*) mencerminkan proporsi berat badan yang sehat. Kelebihan berat badan (*overweight*) mengindikasikan peningkatan risiko terhadap masalah kesehatan, sementara obesitas tingkat I dan II menunjukkan risiko kesehatan yang signifikan sehingga memerlukan perhatian medis khusus.

2.6 EMG dan Asam Laktat

Pada sub-bab ini dibahas peran Elektromiografi (EMG) dan asam laktat dalam menganalisis kelelahan otot, di mana EMG mengukur aktivitas listrik otot, sedangkan asam laktat menjadi penanda biokimia untuk memahami perubahan metabolik selama aktivitas fisik.

2.6.1 *Electromyography* (EMG)

Electromyography (EMG) adalah teknik yang digunakan untuk merekam aktivitas listrik otot. EMG mengukur sinyal listrik yang dihasilkan pada otot saat otot berkontraksi [25]. Sinyal ini dapat memberikan informasi terkait kesehatan otot, saraf, dan dapat membantu dalam berbagai kondisi medis. Selain itu, EMG juga digunakan dalam penelitian untuk memahami mekanisme kontraksi otot dan kelelahan otot.

Perekaman sinyal EMG dilakukan dengan menempatkan elektroda pada kulit di atas otot yang akan dianalisis untuk mendeteksi aktivitas listrik yang dihasilkan oleh serat otot saat berkontraksi [25]. Sinyal yang direkam kemudian akan dianalisis untuk menentukan amplitudo dan frekuensi aktivitas otot, yang pada umumnya peningkatan amplitudo menunjukkan aktivitas otot, sedangkan penurunan amplitudo menunjukkan indikasi kelelahan atau cedera pada otot [26].

Pada sub-bab berikutnya akan dibahas mengenai *surface Electromyography* (sEMG) tentang bagaimana teknologi tersebut diterapkan secara spesifik pada pengukuran aktivitas otot melalui pendekatan non-invasif, yang memberikan keuntungan praktis dalam berbagai aplikasi penelitian dan klinis.

2.6.2 *Surface Electromyography* (sEMG)

Surface Electromyography (sEMG) adalah alat diagnostik yang digunakan untuk menganalisis sistem otot dan saraf. Sinyal listrik otot diukur selama kontraksi untuk memberikan informasi dan membantu dalam proses diagnosis medis. Dalam aplikasinya, sEMG menggunakan metode *non-invasive* dengan meletakkan elektroda di atas permukaan kulit untuk merekam sinyal dari otot. Secara konvensional, untuk mengevaluasi perawatan, sEMG digunakan untuk memahami

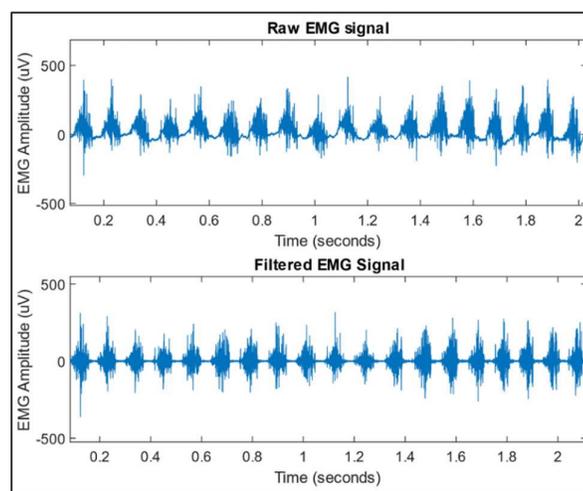
kondisi tertentu, seperti kelelahan otot, denervasi, persarafan ulang, koordinasi otot, pembagian beban, dan kelenturan [27].

Penggunaan sEMG memungkinkan pengukuran yang lebih akurat terhadap aktivitas otot selama latihan, memberikan data real-time yang dapat digunakan untuk menyesuaikan intensitas latihan sesuai dengan kebutuhan individu. Selain itu, sEMG juga dapat digunakan untuk memantau pemulihan otot setelah cedera, dengan analisis pola aktivasi otot yang dapat membantu fisioterapis dalam merancang program rehabilitasi yang lebih tepat.

Sub-bab berikutnya akan membahas mengenai karakteristik utama sinyal EMG beserta faktor yang dapat mempengaruhi kualitas dan interpretasi sinyal tersebut dalam analisis aktivitas otot.

2.6.3 Karakteristik dan Faktor yang Memengaruhi Sinyal EMG

Sinyal EMG memiliki beberapa karakteristik utama seperti amplitudo, frekuensi, dan durasi. Amplitudo sinyal EMG bervariasi sesuai dengan kekuatan kontraksi otot, jenis otot, serta kondisi fisiologis setiap individu. Frekuensi sinyal EMG biasanya berada dalam rentang 20 Hz hingga 500 Hz, yang memberikan informasi tentang tipe serat otot yang aktif dan tingkat kelelahan otot. Selain itu durasi sinyal EMG mencerminkan lamanya kontraksi otot, yang penting dalam menganalisis aktivitas otot selama gerakan tertentu [28].



Gambar 2. 4 Sinyal EMG [20]

Kualitas sinyal EMG juga dipengaruhi oleh beberapa faktor. Posisi elektroda bisa mempengaruhi sinyal EMG, di mana elektroda harus ditempatkan dengan tepat di atas otot yang diteliti dan sejajar serat otot untuk mendapatkan sinyal yang akurat. Kondisi kulit seperti kelembapan juga mempengaruhi kualitas sinyal [28]. *Noise* juga sering kali menjadi kendala dalam pengukuran sinyal EMG, baik yang berasal dari sumber eksternal dari aktivitas otot lain maupun dari sumber internal seperti interferensi listrik. Penggunaan filter yang tepat dapat membantu untuk mengurangi noise. Selain itu, kondisi fisiologis, termasuk kelelahan otot, suhu tubuh, dan kesehatan individu secara umum juga mempengaruhi karakteristik sinyal EMG [29].

Pada sub-bab berikutnya dibahas mengenai bagaimana kelelahan otot direpresentasikan melalui analisis sinyal sEMG dan pengukuran asam laktat untuk memahami hubungan keduanya dalam konteks aktivitas otot.

2.6.4 Representasi Kelelahan Otot pada sEMG dan Asam Laktat

Kelelahan otot adalah fenomena fisiologis yang kompleks, hal ini dapat dievaluasi secara efektif melalui penggunaan sEMG dan analisis asam laktat. sEMG memungkinkan pemahaman aktivitas listrik otot selama kontraksi dengan indikator utama kelelahan yang terlihat dari fitur domain waktu seperti *Root Mean Square* (RMS) dan fitur domain frekuensi rata-rata dan median [10].

Analisis komponen frekuensi dalam sinyal sEMG mengungkapkan fenomena yang dikenal sebagai kompresi spektral, di mana spektrum daya bergeser ke arah frekuensi yang lebih rendah seiring dengan berlanjutnya kelelahan. Pergeseran ini dapat diukur dengan menggunakan metrik seperti frekuensi rata-rata (MDF) dan frekuensi rata-rata (MDF), yang keduanya menurun seiring dengan meningkatnya tingkat kelelahan [30][31]. Secara khusus, penurunan yang signifikan pada MDF telah dikaitkan dengan kelelahan otot perifer, sehingga menjadikannya indikator yang dapat diandalkan untuk menilai kondisi otot.

Akumulasi asam laktat selama aktivitas fisik yang intensif menyebabkan penurunan pH dalam sel otot yang mengganggu produksi energi dan berkontribusi terhadap munculnya kelelahan serta rasa nyeri [32]. Dengan memadukan data sEMG dan penanda biokimia seperti kadar asam laktat, dapat

memberikan pemahaman mengenai mekanisme kelelahan pada otot yang dapat membantu untuk pengotimalan program latihan.

2.7 Fitur Ekstraksi

Pada sub-bab ini membahas fitur-fitur ekstraksi yang digunakan dalam analisis sinyal surface electromyography (sEMG). Proses ini bertujuan untuk memperoleh informasi penting dari sinyal mentah guna merepresentasikan aktivitas otot secara kuantitatif. Dalam penelitian ini, fitur yang digunakan meliputi *Mean Absolute Value* (MAV), *Root Mean Square* (RMS), *Integrated EMG* (iEMG), *Median Frequency* (MDF), *Mean Frequency* (MnF), dan *Spectral Entropy*. Fitur-fitur tersebut dipilih karena mampu menggambarkan intensitas, distribusi energi, dan kompleksitas spektral sinyal sEMG selama aktivitas berlari.

2.7.1 *Mean Absolute Value* (MAV)

Mean Absolute Value (MAV) merupakan fitur yang umum digunakan dalam analisis sinyal sEMG. MAV merepresentasikan rata-rata nilai absolut sinyal dalam suatu interval waktu, mencerminkan tingkat aktivitas dan kontraksi otot secara keseluruhan. Fitur ini sederhana namun efektif untuk menggambarkan amplitudo sinyal, dan sering digunakan dalam analisis biomekanik [33]. Nilai MAV dihitung dengan persamaan berikut:

$$MAV = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |X_k| \quad (2.2)$$

Dimana:

N = Jumlah total sampel dalam domain waktu

x_i = Nilai sampel sinyal EMG ke-i

$|x_i|$ = Nilai absolut setiap sinyal data EMG ke-i

2.7.2 Root Mean Square (RMS)

Root Mean Square (RMS) adalah fitur domain waktu yang menghitung akar dari rata-rata kuadrat sinyal EMG dalam suatu periode. RMS tidak hanya mencerminkan amplitudo, tetapi juga energi sinyal, sehingga berkaitan langsung dengan kekuatan kontraksi dan beban kerja otot. Dibandingkan MAV, RMS lebih sensitif terhadap fluktuasi besar, membuatnya lebih akurat dalam menggambarkan aktivitas otot yang dinamis. Fitur ini sering digunakan untuk analisis kelelahan otot dan estimasi kekuatan kontraksi [33][34]. Nilai RMS dihitung dengan persamaan berikut:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (2.3)[33]$$

Dimana:

N = Jumlah sampel dalam domain waktu

x_i = Nilai sampel sinyal EMG ke-i

2.7.3 Intergrated EMG (iEMG)

Integrated EMG (IEMG) adalah fitur domain waktu yang dihitung dari penjumlahan nilai absolut amplitudo sinyal EMG dalam periode tertentu. IEMG mencerminkan total aktivitas listrik otot dan digunakan untuk menilai tingkat kontraksi secara keseluruhan. Nilai IEMG yang tinggi menunjukkan aktivasi otot yang lebih besar, sehingga fitur ini berguna dalam analisis performa, kelelahan, dan pemulihan otot [33]. Nilai iEMG dihitung dengan persamaan berikut:

$$iEMG = \sum_{k=1}^N |x_k| \quad (2.4)$$

Dimana:

N = Jumlah amplitudo sinyal EMG dalam jeda waktu analisis

x_k = Nilai amplitudo sinyal EMG pada sampel ke-k

$|x_k|$ = Nilai absolut dari amplitudo sinyal EMG

2.7.4 Median Frequency (MDF)

Median Frequency (MDF) adalah fitur domain frekuensi yang menunjukkan titik tengah spektrum daya sinyal EMG, di mana energi terbagi dua secara seimbang. MDF digunakan untuk mendeteksi kelelahan otot karena mencerminkan perubahan fisiologis dan metabolik selama aktivitas. Penurunan nilai MDF menandakan penurunan aktivitas serabut otot cepat dan rekrutmen motor unit, menjadikannya indikator penting dalam analisis performa dan daya tahan otot [35]. Nilai MDF dihitung dengan persamaan berikut:

$$\sum_{j=1}^{MDF} P_j = \sum_{j=MDF}^M P_j = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^M P_j \quad (2.5)$$

Dimana:

P_j = Nilai spektrum daya (power spectral density) pada frekuensi ke- j . Ini menunjukkan besarnya energi sinyal pada frekuensi tersebut.

M = Jumlah total titik frekuensi yang dianalisis (misalnya, dari 1 sampai M).

MDF = Indeks frekuensi median yang dicari.

2.7.4 Mean Frequency (MnF)

Mean frequency (MnF) dari sinyal elektromiografi (EMG) merupakan parameter penting dalam menganalisis aktivitas otot, khususnya dalam memahami kelelahan otot dan dinamika pergerakan. MnF mencerminkan rata-rata frekuensi dalam spektrum sinyal EMG dan banyak digunakan dalam konteks klinis maupun olahraga. Seiring meningkatnya kelelahan otot, nilai MnF cenderung menurun, yang menunjukkan pergeseran spektral ke frekuensi yang lebih rendah selama aktivitas berulang [36]. Perubahan ini menjadi indikator perkembangan kelelahan. Untuk meningkatkan kegunaannya, sebuah model AM-FM dua komponen telah dikembangkan guna menilai secara simultan frekuensi repetisi latihan dan kelelahan otot