

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Pengenalan masalah

Olahraga merupakan aktivitas yang banyak digemari masyarakat karena terbukti bermanfaat dalam menjaga kesehatan dan kebugaran tubuh. Namun, dibalik manfaat nya setiap aktivitas fisik juga memiliki resiko terhadap keselamatan apabila dilakukan dengan intensitas berlebihan, teknik yang keliru, ataupun tanpa mempertimbangkan kondisi lingkungan. Olahraga memang menjadi kunci utama dalam menjaga kebugaran, namun aktivitas ini bisa berbalik menjadi ancaman serius jika prinsip keamanan diabaikan. Keamanan dalam berolahraga bukan sekadar pelengkap, melainkan fondasi utama agar manfaat kesehatan dapat tercapai tanpa mengorbankan keselamatan fisik. Ketika seseorang terjebak dalam ambisi untuk mencapai target instan tanpa mempedulikan teknik yang benar atau penggunaan alat pelindung yang tepat, risiko cedera mekanis seperti robeknya ligamen, dislokasi sendi, hingga patah tulang menjadi konsekuensi yang sulit dihindari.

Dampak negatif akan semakin nyata jika seseorang terus memaksakan diri melampaui batas kemampuan tubuh atau mengabaikan sinyal kelelahan. Kondisi yang dikenal sebagai *overtraining* ini tidak hanya merusak jaringan otot secara kronis, tetapi juga dapat mengganggu sistem metabolisme dan imunitas tubuh. Lebih jauh lagi, ketidakpedulian terhadap kondisi fisis internal seperti memaksakan intensitas tinggi saat kondisi jantung tidak prima atau saat tubuh mengalami panas berlebih dapat memicu kegagalan fungsi organ mendadak yang bersifat fatal.

Salah satu aktivitas olahraga yang populer adalah mengangkat beban (*resistance training*), yang bertujuan untuk melatih kekuatan dan massa otot. Untuk mencapai tujuan tersebut, banyak atlet maupun penggemar kebugaran menerapkan praktik *Ego Lifting*. Praktik *Ego Lifting* ini mengharuskan pengguna peningkatan beban yang signifikan. Dalam penerapannya, banyak atlet maupun penggemar

kebugaran terdorong untuk berlatih hingga mencapai kondisi melampaui batas , namun dilakukan secara tiba-tiba. Namun, aktivitas yang berlebihan dan tidak sesuai dengan kondisi otot ini membawa risiko serius. Ambisi untuk memaksa otot bekerja melampaui batas fisiologisnya sering kali mengakibatkan kelelahan ekstrim (*muscle fatigue*) yang menjadi faktor risiko utama terjadinya cedera parah, seperti robekan otot bisep (*biceps tendon rupture*) [1].

Selain faktor intensitas beban, keselamatan dalam angkat beban juga sangat bergantung pada ketepatan teknik dan postur tubuh. Sayangnya, cedera bahu menjadi permasalahan yang sangat sering dialami oleh individu yang melakukan latihan angkat beban, baik pemula maupun atlet berpengalaman. Faktor penyebab dominan dari cedera ini adalah posisi angkat *dumbbell* yang tidak tepat, teknik yang salah, serta postur tubuh yang buruk saat menahan beban. Kesalahan teknik, seperti posisi siku yang terlalu melebar saat melakukan *shoulder press* atau jalur gerakan yang tidak sesuai dengan bidang *scapular*, dapat meningkatkan tekanan berlebih pada sendi bahu dan memicu cedera struktural. Tanpa pengawasan instruktur yang memadai, kesalahan-kesalahan kecil yang dilakukan berulang kali ini dapat berkembang menjadi gangguan kesehatan jangka panjang yang menghambat produktivitas dan performa atlet [2].

Lebih lanjut, aktivitas olahraga tidak hanya terbatas di dalam ruangan (*indoor*). Kegiatan olahraga di luar ruangan (*outdoor*) juga memiliki tantangan tersendiri yang berkaitan dengan kondisi lingkungan, yaitu risiko terjadinya *heatstroke*. *Heatstroke* merupakan kondisi medis darurat yang mengancam jiwa akibat kegagalan sistem termoregulasi tubuh dalam mengatasi paparan panas berlebihan. Risiko ini menjadi semakin krusial seiring dengan perubahan iklim global yang menyebabkan peningkatan suhu dan kelembaban ekstrim, terutama di wilayah tropis seperti Asia Tenggara. Bahaya *heatstroke* seringkali tidak disadari sejak awal karena gejalanya yang samar, seperti kelelahan ekstrim, yang mirip dengan kelelahan akibat olahraga biasa, namun dapat berujung fatal jika tidak segera ditangani. Oleh karena itu, diperlukan sebuah solusi terintegrasi yang mampu memantau kondisi otot untuk mencegah cedera bisep, mengoreksi posisi angkat

beban untuk melindungi bahu, serta mendeteksi risiko *heatstroke* akibat faktor lingkungan secara bersamaan [3].

Di sisi lain, proses relaksasi otot pasca-aktivitas fisik intensif menjadi krusial untuk memulihkan fungsi otot secara optimal, karena otot yang mengalami kontraksi berulang memerlukan waktu pemulihan agar serat otot kembali ke tegangan rendah. Relaksasi penting untuk menjaga fungsi otot tetap optimal serta mendukung pemulihan tubuh secara keseluruhan terutama otot kaki yang sering mengalami beban berulang. Jika proses relaksasi setelah aktivitas fisik tidak dilakukan dengan optimal, berbagai dampak negatif dapat muncul. Otot kaki yang mengalami stres berlebihan tanpa proses pemulihan yang baik dapat meningkatkan resiko cedera dan memperlambat proses pemulihan tubuh. Hal ini dikarenakan serat otot tidak memiliki waktu yang cukup untuk kembali ke kondisi normal. Namun, perbedaan kondisi otot tiap individu membuat proses relaksasi tidak dapat distandarisasi, karena beberapa faktor menyebabkan karakteristik otot setiap orang berbeda sehingga metode pemulihan yang sama belum tentu efektif untuk semua orang, ditambah ketegangan otot sering kali tidak terlihat secara kasat mata dan perasaan individu terhadap ketegangan atau kelelahan otot dapat bervariasi sehingga tidak selalu mencerminkan kondisi fisiologis yang sebenarnya, yang dapat menyebabkan kesalahan dalam penilaian mengenai kondisi relaksasi otot tersebut [4].

Berdasarkan uraian tersebut, dapat disimpulkan bahwa aktivitas olahraga, khususnya angkat beban dan olahraga luar ruangan, memiliki potensi risiko yang signifikan apabila tidak didukung oleh pemantauan kondisi tubuh dan lingkungan secara memadai. Empat permasalahan utama, yaitu risiko cedera bicep akibat kelelahan otot berlebih, cedera bahu akibat kesalahan teknik dan postur angkat beban, ancaman heat stroke akibat faktor lingkungan ekstrim, serta ketidakefektifan proses relaksasi otot pasca-aktivitas fisik, merupakan isu yang saling berkaitan dan sering terjadi dalam praktik olahraga sehari-hari. Keempat masalah tersebut tidak hanya berdampak pada keselamatan dan kesehatan individu, tetapi juga dapat menurunkan performa, menghambat proses pemulihan, serta berpotensi menimbulkan gangguan kesehatan jangka panjang. Oleh karena

itu, pemilihan keempat permasalahan ini menjadi relevan dan mendesak untuk diselesaikan guna meningkatkan keselamatan, efektivitas latihan, dan kesehatan jangka panjang para penggiat angkat beban pemula maupun profesional. Dalam penyelesaian masalah ini dilibatkan beberapa stakeholder, diantaranya:

1. Penggiat olahraga (pemula atau profesional)

Bagi penggiat olahraga, baik pemula maupun profesional, keempat permasalahan yang diidentifikasi memiliki dampak langsung terhadap keselamatan, performa, dan keberlanjutan aktivitas olahraga. Risiko cedera bisep akibat kelelahan otot berlebih menjadi ancaman utama ketika individu berlatih dengan intensitas tinggi tanpa memahami batas fisiologis otot, khususnya pada pemula yang masih minim pengalaman. Selain itu, cedera bahu akibat kesalahan teknik dan postur angkat beban sering terjadi karena kurangnya kesadaran terhadap biomekanika gerakan yang benar, yang jika dibiarkan dapat berkembang menjadi cedera jangka panjang.

Pada aktivitas olahraga luar ruangan, risiko heat stroke menjadi permasalahan serius bagi penggiat olahraga karena kondisi lingkungan yang tidak selalu dapat diprediksi dan sering kali diabaikan. Baik pemula maupun atlet profesional dapat mengalami gangguan kesehatan akut apabila tubuh tidak mampu beradaptasi terhadap suhu dan kelembaban ekstrim. Di sisi lain, proses relaksasi otot pasca-latihan yang tidak optimal, khususnya pada otot kaki yang sering menerima beban berulang, dapat memperlambat pemulihan dan meningkatkan risiko overtraining. Perbedaan karakteristik otot setiap individu juga menyebabkan kesulitan dalam menilai kondisi relaksasi secara subjektif, sehingga penggiat olahraga membutuhkan pendekatan yang lebih objektif untuk menjaga kondisi fisik tetap optimal.

2. Pelatih atau *personal trainer*

Bagi pelatih atau personal trainer, keempat permasalahan tersebut berkaitan erat dengan tanggung jawab profesional dalam menjamin

keselamatan dan efektivitas program latihan. Cedera bicep dan bahu yang disebabkan oleh praktik *Ego Lifting* serta kesalahan teknik mencerminkan tantangan dalam melakukan pengawasan yang konsisten, terutama ketika pelatih menangani banyak klien atau atlet secara bersamaan. Pengamatan visual dan koreksi verbal sering kali tidak cukup untuk mendeteksi kelelahan otot yang bersifat internal dan tidak kasat mata.

Selain itu, risiko heat stroke menjadi faktor penting yang harus dipertimbangkan pelatih dalam merancang intensitas, durasi, dan waktu latihan, khususnya pada sesi outdoor. Tanpa data lingkungan dan kondisi fisiologis atlet yang akurat, pelatih berpotensi mengambil keputusan latihan yang kurang aman. Permasalahan relaksasi otot pasca-latihan juga menjadi tantangan tersendiri karena pelatih harus menyesuaikan metode pemulihan dengan kondisi unik tiap individu. Oleh karena itu, keempat masalah tersebut menegaskan kebutuhan pelatih terhadap dukungan sistem pemantauan yang objektif dan real-time agar dapat menyusun program latihan yang lebih aman, adaptif, dan berbasis kondisi aktual atlet atau klien.

1.1.1 Informasi Pendukung Masalah

1.1.1.1 Risiko Cedera Bahu Akibat Kesalahan Posisi dan Teknik Angkat Beban

Kesalahan teknik dan postur yang tidak presisi merupakan kontributor utama terhadap tingginya angka insidensi cedera olahraga, khususnya pada sendi bahu yang memiliki mobilitas tinggi namun stabilitas yang rendah. Data menunjukkan bahwa cedera bahu mencakup sekitar 36% dari total cedera pada latihan beban, di mana *Shoulder Impingement Syndrome* menjadi diagnosis yang paling sering ditemui. Secara biomekanis, posisi siku yang salah secara signifikan meningkatkan tekanan mekanis pada tendon *supraspinatus*.

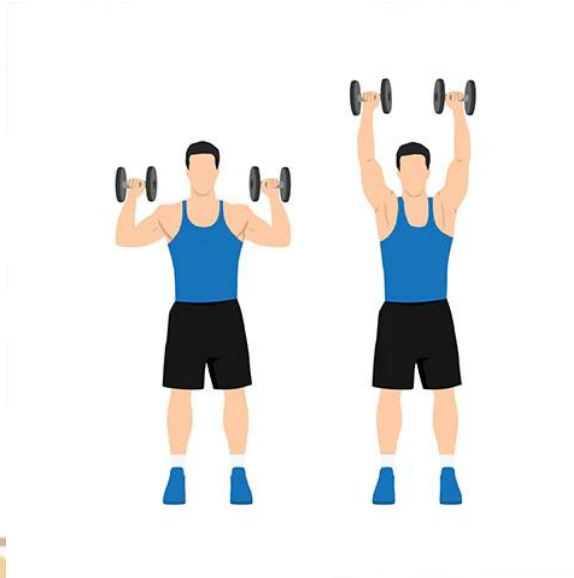
Latihan beban bahu menggunakan dumbell merupakan bagian penting dari program *resistance training* karena mampu meningkatkan kekuatan, hipertrofi

otot, serta stabilitas sendi bahu. Otot utama yang terlibat dalam latihan bahu adalah *deltoid anterior*, *deltoid medial*, dan *deltoid posterior*, yang masing-masing memiliki fungsi berbeda dalam pergerakan lengan. Pemilihan jenis latihan yang tepat diperlukan agar setiap bagian otot deltoid mendapatkan stimulus yang optimal dan seimbang [5]. Berikut jenis latihan otot bahu yang umum dimainkan menggunakan *dumbbell*:

1. Dumbbell Shoulder Press

Dumbbell shoulder *Press* adalah gerakan mendorong beban (*dumbbell* atau *barbell*) lurus ke arah langit dari posisi bahu. Ini adalah latihan untuk membangun kekuatan bahu secara keseluruhan karena melibatkan hampir seluruh otot tubuh bagian atas. Pada saat beban sejajar dengan bahu sudut siku yang aman ialah 45 hingga 60 derajat sedangkan untuk saat kondisi lockoutsiku harus lurus sempurna sehingga harus mendorong beban sampai tangan benar-benar lurus di atas kepala. Ketika tangan lurus sempurna, beban akan ditopang oleh susunan tulang yang sejajar dari pergelangan tangan hingga bahu, sehingga otot bisa beristirahat sejenak di puncak gerakan. Kesalahan fatal sering terjadi dikarenakan banyak orang membuka siku terlalu lebar ke samping (sejajar dengan badan) atau tidak meluruskan tangan sepenuhnya karena beban yang terlalu berat [5].

Posisi siku yang terlalu melebar ke samping saat menahan beban berat di atas kepala menempatkan bahu pada posisi paling rentan. Kondisi ini dapat menyebabkan Instabilitas Rotator Cuff atau bahkan Labral Tear (robekan pada bantalan sendi). jika posisi siku salah saat membawa beban berat, bola tersebut bisa bergeser atau menekan pinggiran piring (*labrum*) hingga robek. Penderita cedera ini biasanya merasakan bahu seperti "longgar", sering terdengar bunyi *klik* atau *pop* saat bergerak, dan kehilangan tenaga secara drastis untuk mengangkat benda di atas kepala [6].



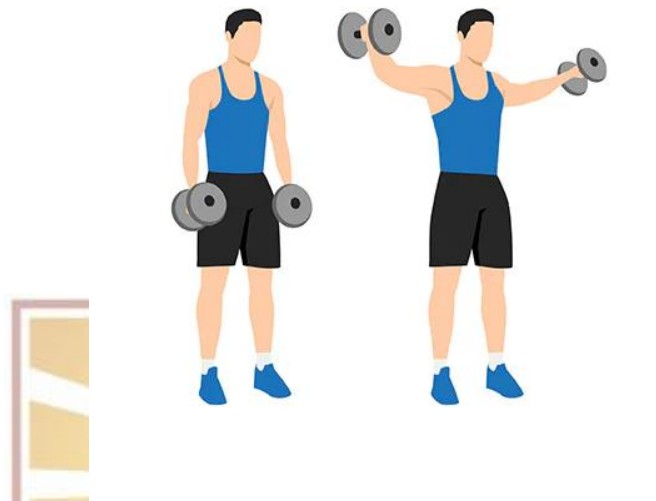
Gambar 1.1 Latihan overhead shoulder press

2. Dumbbell Lateral Raise

Latihan *Lateral Raise* dilakukan dengan cara mengangkat kedua tangan ke arah samping hingga sejajar dengan bahu, menyerupai kepakan sayap burung. Fokus utama gerakan ini adalah untuk membentuk otot bahu bagian samping (deltoid lateral). Secara teknis, siku tidak boleh dikunci mati (lurus total) melainkan harus sedikit ditekuk sekitar 10 hingga 15 derajat. Tekukan kecil ini berfungsi sebagai "suspensi" untuk melindungi sendi siku dari tekanan berlebih. Kesalahan yang sangat sering dilakukan pemula adalah mengangkat beban terlalu tinggi melewati garis bahu atau memutar lengan ke dalam secara berlebihan [5].

Jika posisi ini diabaikan, risiko kesehatan yang paling sering muncul adalah Shoulder Impingement Syndrome atau Sindrom Jepitan Bahu. Masalah ini terjadi karena adanya penyempitan ruang di bawah tulang akromion (ujung tulang belikat), sehingga tendon otot rotator cuff (penopang utama sendi bahu) terjepit dan tergesek setiap kali tangan diangkat. Orang awam sering merasakannya sebagai nyeri tajam seperti ditusuk jarum di bagian samping bahu, terutama saat mencoba mengangkat tangan ke samping atau saat memakai baju. Jika dibiarkan,

gesekan berulang ini bisa menyebabkan peradangan kronis (tendinitis) bahkan robekan kecil pada jaringan otot bahu [5], [7].



Gambar 1.2 Latihan lateral raise

3. Dumbbell Front Raise

Latihan *Front Raise* melibatkan gerakan mengangkat beban lurus ke depan hingga setinggi mata. Latihan ini dirancang khusus untuk mempertegas otot bahu bagian depan agar terlihat lebih menonjol dari arah depan. Hal terpenting dalam latihan ini adalah menjaga tubuh tetap tegak dan tidak mengayunkan pinggang untuk membantu mengangkat beban. Siku harus dijaga dalam posisi yang kaku namun tidak terkunci (statis) pada kemiringan 155 hingga 175 derajat. Seringkali, karena ingin mengangkat beban yang lebih berat dari kemampuan, seseorang secara tidak sadar menekuk dan meluruskan sikunya (seperti gerakan memancing) saat beban naik. Gerakan "curang" ini memindahkan beban dari otot bahu ke otot lengan depan [5].

Penyimpangan posisi ini dapat mengakibatkan Bicipital Tendinitis, yaitu peradangan pada tendon (tali pengikat otot) bicep yang melintasi sendi bahu bagian depan. Tendon bicep ini terletak di dalam sebuah jalur sempit

di tulang lengan atas; jika posisi tangan terus berubah-ubah saat mengangkat beban berat, tendon tersebut akan tergesek-gesek dengan dinding tulang seperti tali yang tergesek batu tajam. Gejalanya adalah rasa nyeri yang berdenyut atau panas di bagian depan bahu yang bisa menjalar hingga ke lengan atas. Nyeri ini biasanya akan semakin terasa saat Anda mencoba mengangkat benda berat atau bahkan saat melakukan aktivitas sederhana seperti menyisir rambut [8].



Gambar 1.3 Latihan front raise

penggunaan teknik yang benar dalam latihan angkat beban merupakan suatu kewajiban untuk menjaga keselamatan dan kesehatan otot serta sendi. Tidak hanya untuk menghindari risiko cedera akibat kesalahan gerakan, tetapi juga untuk memastikan efektivitas latihan sehingga otot dapat berkembang dengan optimal. Latihan beban memiliki standar posisi dan postur yang diakui secara biomekanis agar tetap aman dilakukan. Standar ini mencakup posisi siku, rentang gerakan, kestabilan tubuh, serta cara mengontrol beban agar tidak memberikan tekanan berlebihan pada sendi bahu. Untuk menghindari terjadinya cedera bahu ketika latihan beban berikut beberapa standar dalam mengangkat beban yang benar dan hal yang harus dihindari :

1. Posisi siku yang terlalu melebar hingga membentuk sudut 90° terhadap tubuh saat melakukan *Overhead Press* terbukti meningkatkan risiko

impingement atau jepitan pada sendi bahu. Posisi yang lebih aman secara biomekanis adalah menjaga siku sedikit ke arah depan (sekitar 45°) agar sejajar dengan bidang skapula (*scapular plane*), sehingga pergerakan sendi tetap berada dalam ruang gerak natural [9].

2. Penelitian biomekanis menunjukkan bahwa variasi gerakan angkat beban yang memaksa bahu berada pada posisi rotasi eksternal yang ekstrem akan mempersempit ruang *subacromial* dan memberikan tekanan besar pada struktur pendukung bahu. Kondisi ini sangat berisiko menyebabkan robekan tendon dan instabilitas sendi jangka panjang. Oleh karena itu, menjaga stabilitas siku sangat dibutuhkan [10].
3. Rentang gerakan (*range of motion*) juga harus diperhatikan. Menurunkan dumbbell terlalu rendah di bawah bahu dapat meregangkan sendi berlebihan dan meningkatkan risiko cedera pada tendon supraspinatus. Jalur beban yang aman adalah menurunkan dumbbell sampai sejajar dengan bahu, lalu mendorong ke atas dengan kontrol penuh [11].

Berdasarkan uraian informasi yang telah dipaparkan, dapat disimpulkan bahwa penerapan teknik angkat beban yang sesuai standar biomekanis merupakan langkah penting untuk mencegah cedera bahu sekaligus memastikan efektivitas latihan. Kesalahan seperti posisi siku yang terlalu melebar, penggunaan behind-the-neck press, maupun penurunan dumbbell hingga melewati batas aman terbukti meningkatkan risiko cedera serius, mulai dari shoulder impingement hingga robekan labrum. Oleh karena itu, pemahaman dan penerapan teknik yang benar bukan hanya sekadar aspek teknis, melainkan juga bentuk upaya perlindungan kesehatan yang perlu didukung melalui edukasi berkelanjutan dan pengembangan perangkat pendukung yang praktis serta mudah diakses.

Dalam penyelesaian masalah ini telah ada beberapa solusi yang berhubungan dengan pengurangan cedera bahu yang dialami oleh individu yang berlatih angkat beban dalam kesalahannya dalam mengangkat dumbbell, berikut solusi yang telah ada beserta kelebihan dan kekurangannya disajikan pada tabel 1.1

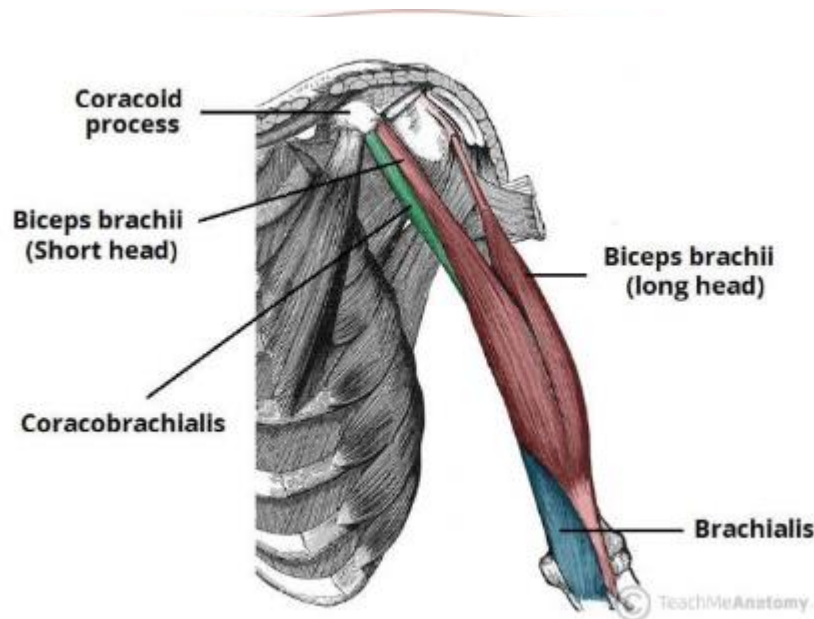
Tabel 1.1 Solusi yang telah ada

SOLUSI	KELEBIHAN	KEKURANGAN
Program latihan berdasarkan prinsip FITT (latihan dengan frekuensi, intensitas, jenis, waktu yang optimal) [12].	1. Mengurangi nyeri dan disabilitas dengan ukuran efek sedang hingga kecil. 2. program yang terstruktur dapat disesuaikan dengan kondisi individu.	1. Perlu fasilitas, waktu dan kepatuhan. 2. efektivitas bervariasi antar individu. 3. bukti jangka panjang masih kurang.
Latihan “below 90° elevation”, open-chain dan closed-chain untuk atlet overhead [13].	1. Mengurangi tekanan pada struktur bahu; 2. lebih aman bagi atlet overhead; evidence mendukung posisi tersebut sebagai latihan efektif.	1. Terbatas pada beban dan variasi. 2. mungkin kurang menantang bagi atlet yang sudah lanjut; 3. memerlukan instruksi yang tepat agar dilakukan dengan benar.
Mode latihan spesifik (scapular stability, eccentric training) [14].	1. Menunjukkan penurunan nyeri dan peningkatan fungsi. 2. membantu memperkuat otot penunjang bahu	1. Efek klinis mungkin kecil pada beberapa kasus. 2. membutuhkan perangkat atau instruksi yang lebih ahli; sulit dipantau sendiri.

Berbagai pendekatan latihan dan teknologi telah terbukti membantu mengurangi risiko cedera bahu, namun masing-masing masih memiliki keterbatasan. Program latihan berbasis prinsip FITT, latihan “below 90° elevation”, maupun latihan

spesifik seperti scapular stability dan eccentric training memerlukan instruksi ahli, kepatuhan tinggi, serta hasilnya bervariasi antar individu. Sementara itu, teknologi seperti exoskeleton dapat meringankan beban bahu, tetapi biayanya mahal, kompleks, dan membatasi gerak. Oleh karena itu, masih diperlukan perangkat baru yang sederhana, terjangkau, dan mampu memberikan umpan balik real-time untuk memastikan posisi angkat atau teknik angkat beban yang benar, sehingga dapat mencegah cedera bahu secara efektif dan berkelanjutan.

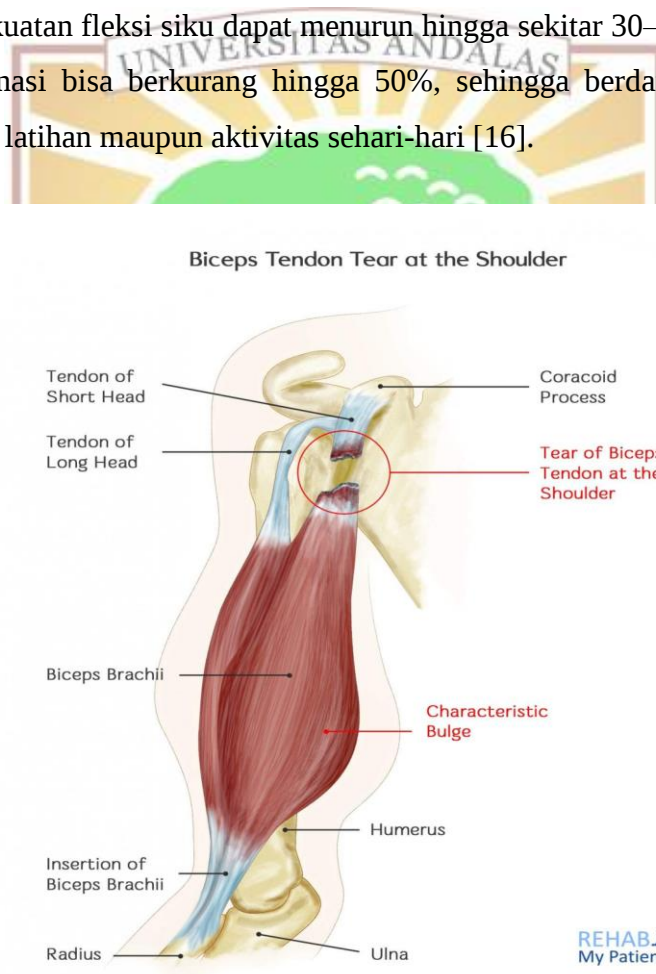
1.1.1.2 Cidera Otot *Bicep* Dan Praktek *Ego Lifting*



Gambar 1.4 Otot coracobrachialis (hijau), Biceps brachii (merah) dan brachialis (biru) pada lengan atas bagian depan Sumber: (Ltd, 2024)

Otot biceps brachii merupakan salah satu otot utama lengan atas yang memiliki dua kepala, yaitu long head dan short head. Kedua kepala ini bersatu pada perut otot kemudian melekat melalui tendon distal pada tulang radius [15]. Fungsi utama biceps adalah melakukan fleksi siku (membengkokkan lengan), supinasi lengan bawah (memutar telapak tangan ke atas), serta berperan dalam membantu stabilisasi sendi bahu. Karena perannya yang dominan dalam aktivitas sehari-hari maupun latihan beban, biceps sering menjadi fokus latihan bagi atlet maupun penghobi kebugaran.

Namun, struktur tendon biceps terutama bagian distal memiliki keterbatasan dalam menahan gaya tertentu. Gaya eksentrik yang besar, seperti saat otot berkontraksi untuk menahan beban dalam posisi fleksi, tetapi beban memaksa lengan untuk lurus kembali dapat mengakibatkan cedera otot dan memungkinkan terjadinya robekan pada tendon distal bicep. Kondisi ini sering muncul pada latihan angkat beban seperti bicep curl atau deadlift. Faktor risiko yang memperbesar kemungkinan cedera antara lain adalah usia paruh baya, jenis kelamin laki-laki, aktivitas angkat berat, merokok, penggunaan kortikosteroid, serta massa tubuh yang tinggi. Apabila robekan terjadi dan tidak segera diperbaiki, kekuatan fleksi siku dapat menurun hingga sekitar 30–40%, sedangkan kekuatan supinasi bisa berkurang hingga 50%, sehingga berdampak signifikan pada performa latihan maupun aktivitas sehari-hari [16].



Gambar 1.5 Short head Biceps Tendon Tear Sumber: (Patient, 2017)

Paksaan untuk menahan beban yang terlalu berat inipun dilakukan bukan tanpa sebab, namun dikarenakan praktik *Ego Lifting* yang mendorong pengguna untuk meningkatkan beban latihan secara signifikan dari waktu ke waktu. Praktik ini

sering dilakukan untuk menstimulasi adaptasi fisiologis sehingga otot dapat tumbuh lebih besar dan lebih kuat [17]. Selain itu, banyak atlet maupun penghobi kebugaran meyakini bahwa latihan yang dilakukan hingga titik *failure* (kelelahan) memberikan stimulus maksimal bagi pertumbuhan otot. Oleh sebab itu, mereka terdorong untuk menambah intensitas dan beban latihan agar benar-benar mencapai kondisi tersebut [18]. Akan tetapi, perlu dipahami bahwa, meskipun otot beradaptasi relatif cepat terhadap peningkatan beban, tendon memiliki suplai darah yang lebih terbatas sehingga proses adaptasinya lebih lambat. Akibatnya, dalam kondisi ketika otot sudah mampu mengangkat beban lebih berat, tendon justru bisa menjadi titik lemah yang berisiko mengalami cedera serius, termasuk robekan pada bagian distal [19].

Untuk mencegah terjadinya cedera diperlukan pemanasan dan peregangan sebelum latihan, serta memberikan waktu pemulihan yang cukup agar otot dan tendon dapat beradaptasi. Dengan penerapan metode latihan yang benar, risiko robekan tendon biceps dapat ditekan sehingga pertumbuhan massa otot tetap tercapai tanpa mengorbankan keselamatan. Oleh karena itu, penelitian lebih lanjut mengenai penerapan prinsip ini pada latihan *resistance training*, khususnya terkait otot biceps, menjadi sangat penting. Dengan pemahaman yang lebih mendalam, diharapkan dapat dirumuskan strategi latihan yang aman namun tetap efektif, sehingga baik atlet maupun penghobi fitness dapat mencapai hasil optimal tanpa harus menghadapi risiko cedera yang merugikan [20].

Kondisi ini meningkatkan risiko kesalahan dalam penerapan praktik *Ego Lifting*, terutama pada latihan isolasi seperti *bicep curl*. Tanpa pengawasan, banyak individu yang menaikkan beban terlalu cepat atau tidak memperhatikan tanda-tanda kelelahan otot, sehingga mendorong otot bekerja melampaui batas fisiologisnya. Latihan kekuatan yang dilakukan tanpa pemantauan sering kali menghasilkan overtraining lokal pada otot fleksor lengan, dan menjadi salah satu faktor risiko utama robekan tendon distal biceps pada individu non-atlet [23].

Selain itu, kehadiran pelatih tidak selalu menjamin pencegahan cedera. Dalam sesi latihan kelompok atau gym komersial, pelatih biasanya bertanggung jawab terhadap banyak klien sekaligus, sehingga pengawasan intensif sulit dilakukan.

Meskipun terdapat pelatih di fasilitas kebugaran, lebih dari 40% cedera latihan tetap terjadi akibat kurangnya perhatian individual dari pelatih atau keterlambatan dalam mendeteksi tanda-tanda overtraining [24]. Faktor subjektif seperti keinginan untuk “memaksa” otot hingga *failure* demi hasil maksimal sering kali membuat pelatih kesulitan mencegah pengguna melakukan repetisi berlebih.

Kombinasi antara kurangnya pengawasan personal, biaya pelatih yang tinggi, dan kesalahan persepsi terhadap batas kemampuan tubuh inilah yang memperparah resiko robekan otot biceps. Karena itu, muncul kebutuhan untuk mengembangkan alat bantu otomatis yang dapat mendeteksi tanda-tanda kelelahan atau tegangan otot secara objektif, sehingga bisa berfungsi sebagai sistem proteksi tambahan baik untuk individu yang berlatih tanpa pelatih, maupun bagi pelatih yang ingin memiliki alat monitoring objektif bagi kliennya.

Praktik *ego lifting* yang merupakan pemicu kelelahan serta cedera otot *biceps brachii* ini dapat dideteksi secara dini melalui dua parameter utama:

1. Indikator Kelelahan Otot

Kelelahan otot dapat dideteksi melalui nilai MDF yang menurun secara signifikan. MDF atau *Median Frequency* merupakan parameter dalam domain frekuensi yang sangat sensitif untuk mendeteksi perubahan fisiologis dan kelelahan otot secara berkelanjutan. Saat melakukan kontraksi berat yang dipaksakan (*ego lifting*), pusat frekuensi otot akan bergeser ke arah frekuensi yang lebih rendah (kompresi spektral). Penurunan nilai MDF menandakan terjadinya penurunan kecepatan konduksi serat otot akibat perubahan metabolik, yang jika terus dipaksakan, akan menyebabkan kegagalan otot dan robekan pada jaringan ikat [21][22].

MDF ditemukan dengan membagi total daya spektrum menjadi dua bagian yang sama besar, di mana frekuensi ini bertindak sebagai titik tengah (median) dari distribusi energi sinyal.

$$\int_{f_1}^{MDF} P(f)df = \int_{MDF}^{f_2} P(f)df = \frac{1}{2} \int_{f_1}^{f_2} P(f)df$$

Keterangan :

- $P(f)$ = Spektrum daya sinyal
- f_1, f_2 = Rentang frekuensi terendah dan tertinggi (*bandwith*)

2. Intensitas Aktivitas Otot

Untuk pengukuran rata-rata tingkat aktivitas listrik atau rekrutmen unit motorik saat mengangkat beban dihitung melalui MAV. MAV atau *Mean Absolute Value* adalah parameter statistik dalam domain waktu yang digunakan untuk mengukur amplitudo rata-rata atau intensitas dari sinyal aktivitas otot. Dalam praktik *ego lifting*, nilai MAV cenderung meningkat secara linear seiring bertambahnya beban atau ketika otot mulai lelah, karena sistem saraf dipaksa merekrut lebih banyak serat otot untuk mempertahankan gaya output. Jika nilai MAV meningkat secara ekstrim namun tidak disertai dengan gerakan yang stabil, hal ini menjadi indikator awal bahwa beban yang diangkat telah melebihi batas aman kemampuan otot [21][22].

MAV dihitung dengan menjumlahkan nilai absolut dari setiap sampel sinyal dalam satu jendela waktu (*window*), kemudian membaginya dengan jumlah total sampel dalam jendela tersebut.

$$MAV = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_i|$$

Keterangan :

- N = Jumlah sampel dalam satu jeda waktu
- x_i = Nilai amplitudo sinyal pada sampel ke- i

Kondisi kritis yang memicu cedera ini yaitu ketika otot bicep dipaksa menahan gaya eksentrik yang besar. Hal ini terjadi saat Anda telah menekuk lengan, namun beban yang terlalu berat memaksa lengan untuk lurus kembali secara tiba-tiba sementara otot masih berusaha berkontraksi kuat untuk menahannya. Kondisi ini diperparah oleh praktik ego lifting dimana pengguna memaksakan beban yang melampaui ambang batas fisiologis tendon. Selain itu, cedera seringkali diawali dengan gerakan kompensasi atau "cheating". Ketika beban terlalu berat, tubuh cenderung melakukan ayunan pinggang atau perubahan posisi siku yang tidak stabil untuk membantu mengangkat beban. Ketidakmampuan untuk mempertahankan teknik yang benar ini menyebabkan distribusi beban yang tidak merata, sehingga tendon distal bicep menjadi titik lemah utama yang rentan mengalami robekan total [25].

Kelelahan otot secara fisiologis ditandai dengan penurunan kemampuan untuk menghasilkan gaya (*force*) atau daya (*power*) maksimal yang terjadi secara bertahap selama melakukan latihan fisik berulang. Penurunan kemampuan menghasilkan gaya ini menjadi pemicu utama cedera bicep karena ketika otot tidak lagi mampu menahan beban mekanis secara optimal, tegangan tersebut dialihkan langsung ke struktur tendon distal bicep [26].

Salah satu kebutuhan yang harus dipenuhi untuk masalah ini yaitu solusi harus menggunakan komponen dengan bahan yang aman, tidak menyebabkan iritasi, serta memenuhi standar kesehatan dan keselamatan internasional. Ini dikarenakan alat akan digunakan secara langsung oleh manusia saat melakukan aktivitas fisik, baik melalui kontak kulit (wearable band, sensor strap, casing sensor), maupun interaksi mekanik dengan mesin bicep curl [27].

Pemenuhan kebutuhan ini memastikan alat yang dikembangkan tidak hanya efektif secara teknis, tetapi juga aman, higienis, dan nyaman digunakan, baik oleh atlet maupun pengguna umum yang melakukan latihan rutin. Dengan demikian, perangkat dapat diterima secara luas tanpa menimbulkan risiko kesehatan sekunder.

Tabel 1.2 Solusi Yang Telah Ada

Solusi	Kelebihan	Kekurangan
Teknik Latihan yang Benar & Beban Progresif [28]	1. Melatih tendon secara bertahap dengan beban yang sesuai akan meningkatkan kapasitas tendon menahan stres mekanik, sehingga mengurangi risiko mikro-robekan dan cedera akut jika lonjakan beban terlalu besar. 2. Membantu adaptasi struktur tendon (misalnya peningkatan kekakuan tendon dan ukuran penampangnya) sehingga tendon menjadi lebih kuat dan lebih tahan terhadap beban tinggi. 3. Mempertahankan keseimbangan otot dan koordinasi gerakan, sehingga beban tidak hanya	1. Perlu pemahaman teknik yang benar dan pengawasan terutama di awal; tanpa supervisi atau panduan, teknik latihan bisa keliru, malah meningkatkan risiko cedera. 2. Adaptasi tendon memerlukan waktu; tendon merespons lebih lambat dibanding otot. Jika terlalu agresif atau progresifitas terlalu cepat, bisa terjadi overuse atau stres mikro yang akhirnya menyebabkan cedera. 3. Membutuhkan disiplin: konsistensi dalam latihan, porsi pemulihan, dan progresi yang terukur. Banyak orang tergoda loncat ke beban tinggi

	jatuh pada satu titik tendon saja, mengurangi kemungkinan cedera karena bentuk gerakan yang buruk atau ketidakseimbangan otot.	sebelum tendon siap. 4. Tidak semua orang punya akses ke pelatih atau fasilitas yang dapat mengoreksi bentuk gerakan secara akurat.
Nutrisi & Gaya Hidup Sehat [29]	1. Nutrisi yang baik, terutama asupan protein, kolagen atau peptida kolagen, vitamin C, dan mikronutrien lainnya, dapat mendukung produksi kolagen dan kesehatan jaringan ikat (tendon), mempercepat adaptasi dan regenerasi setelah stres mekanik. 2. Gaya hidup sehat seperti tidak merokok, tidur cukup, stres terkelola, menjaga hidrasi dan berat badan ideal akan membantu tendon tetap dalam	1. Banyak penelitian dalam area nutrisi & tendon yang masih kecil scale-nya, berdasarkan populasi tertentu, atau bersifat observasional. Artinya, rekomendasi spesifik (berapa gram kolagen, kapan dikonsumsi, jenis diet optimal) belum sangat konsisten. 2. Efek nutrisi biasanya lebih lambat terlihat dibanding perubahan fisik dari latihan, dan tidak selalu cukup sendiri jika beban latihan tidak sesuai, atau teknik latihan buruk.

	kondisi optimal dan mengurangi faktor risiko internal yang memperlemah tendon. 3. Suplemen tertentu (kolagen, gelatin, vitamin C) sudah menunjukkan bukti klinis bahwa dikombinasikan dengan latihan bisa memberikan hasil yang lebih baik daripada latihan saja dalam hal kekuatan tendon, struktur tendon, dan pengurangan gejala tendinopati.	3. Suplemen dan diet bisa mahal atau tidak tersedia di semua lokasi; juga risiko kualitas produk (kontaminasi, label kurang akurat). 4. Toleransi individu berbeda; beberapa orang mungkin tidak merespons sama terhadap suplemen kolagen atau mungkin memiliki kondisi medis tertentu yang mempengaruhi metabolisme (mis. gangguan penyerapan, alergi).
Deteksi Dini & Manajemen Nyeri [30]	1. Dengan mendeteksi gejala awal (nyeri ringan, tidak nyaman, kaku) dan melakukan intervensi (mengurangi beban latihan, istirahat, modifikasi gerakan), dapat mencegah perkembangan ke cedera yang lebih	1. Gejala awal mungkin ringan dan mudah diabaikan; orang sering tetap melanjutkan latihan meskipun ada sinyal kecil dari tubuh, sehingga deteksi dini gagal. 2. Perlu self-awareness dan disiplin untuk

	serius seperti robekan total tendon. 2. Memungkinkan penggunaan terapi konservatif yang lebih efektif dan mencegah kebutuhan operasi atau penanganan yang lebih drastis. 3. Mengurangi waktu pemulihan keseluruhan dan dampak pada aktivitas sehari-hari atau olahraga jika cedera ditangani sejak awal. 4. Bisa meningkatkan kesadaran dan literasi tubuh: seseorang belajar mengenal batas dan respon tubuhnya terhadap stres latihan, yang membantu preventif jangka panjang.	bertindak (mengurangi beban, istirahat, evaluasi), yang sering kali sulit dalam kultur olahraga / gym dimana “push through pain” kadang dianggap bagus. 3. Manajemen nyeri dini sering memerlukan akses ke profesional (fisioterapi, dokter olahraga) untuk diagnosis dan rekomendasi latihan/pemulihan, yang bisa mahal atau tidak tersedia di semua tempat. 4. Nyeri bisa dikarenakan banyak hal (sendi, saraf, tendon, otot), jadi diagnosis yang salah bisa menyebabkan intervensi yang tidak efektif atau bahkan memperburuk situasi jika salah langkah.
--	--	--

1.1.1.3 Gejala Klinis dan Kondisi Heatstroke

Berbagai data dan fakta menunjukkan bahwa permasalahan *heatstroke* merupakan isu serius yang memerlukan penanganan komprehensif:

1. Suhu tubuh sangat tinggi, biasanya di atas 40°C. Peningkatan ini merupakan tanda utama bahwa mekanisme pendinginan tubuh gagal bekerja.[31]
2. Kulit penderita biasanya tampak lebih merah dibandingkan kondisi normal, terasa sangat panas saat disentuh, dan sering kali berubah menjadi kering meskipun seseorang sedang berada di lingkungan panas.[32]
3. Wajah tampak kebingungan, linglung, atau respons lambat terhadap sekitar. Individu terlihat linglung, responnya lambat, sulit memahami percakapan, berbicara tidak jelas, tampak gelisah, kebingungan, bahkan bisa berperilaku agresif tanpa sebab jelas.[33]
4. Detak jantung meningkat pesat dengan denyut lebih dari 130 kali per menit, menandakan jantung bekerja sangat keras untuk mengimbangi stres panas tubuh dan membantu sirkulasi darah dalam usaha mendinginkan tubuh secara internal.[34]
5. Napas menjadi cepat, dangkal, dan pendek sebagai upaya tubuh mempercepat pertukaran oksigen dan proses penguapan panas lewat pernafasan namun ini tidak cukup sehingga suhu tubuh tetap tinggi.[34]

Solusi yang telah ada untuk permasalahan ini adalah pemantauan cuaca pada lahan pertanian oleh mahasiswa unsera. prototipe “Early Warning System Heat Stroke” yang dibuat mahasiswa Unsera. Alat ini memberi sinyal peringatan saat suhu lingkungan melebihi batas aman sehingga pengguna segera istirahat. Alat ini memanfaatkan sensor suhu untuk deteksi dini kondisi panas ekstrem, diikuti *pemrosesan threshold* dan pemberian sinyal peringatan kepada pengguna lebih awal sebelum gejala *heatstroke* parah terjadi [35]. Kekurangan dari alat ini adalah selain tidak dapat digunakan di dalam ruangan, alat ini juga bisa gagal mendeteksi suhu tubuh yang naik karena aktivitas fisik yang dilakukan individu.

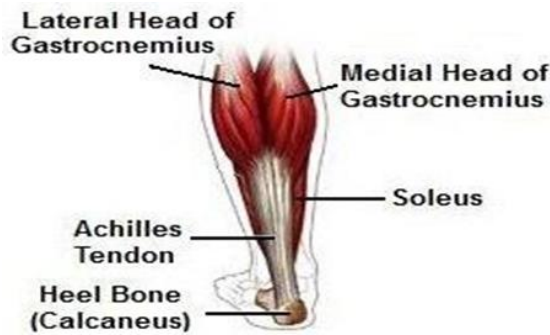
1.1.1.4 Karakteristik Kontraksi dan Relaksasi Otot Gastrocnemius

Setiap aktivitas olahraga melibatkan siklus kontraksi dan relaksasi otot yang berlangsung. Kontraksi terjadi ketika serabut otot menerima rangsangan dari sistem saraf, menyebabkan pemendekan serabut dan menghasilkan gaya untuk menggerakkan anggota tubuh. Sebaliknya relaksasi terjadi ketika rangsangan berhenti dan serabut otot kembali ke panjang semula sehingga tegangan otot menurun. Dalam olahraga, keseimbangan antara kontraksi dan relaksasi sangat penting untuk menjaga koordinasi gerakan, efektivitas tenaga, serta mencegah terjadinya ketegangan berlebihan [36].

Dalam konteks olahraga, perubahan kondisi otot dari kontraksi menuju relaksasi dapat digambarkan melalui beberapa aspek fisiologis. Secara umum relaksasi berkaitan dengan berkurangnya neuromuskular, perbaikan sirkulasi darah, dan pemulihan kapasitas mekanik otot. Selama fase relaksasi, tegangan otot menurun dan otot cenderung kembali ke sifat yang lebih elastis dibandingkan saat berkontraksi [37].

Otot tungkai merupakan kelompok otot besar yang berperan dominan dalam hampir semua aktivitas olahraga, baik yang bersifat aerobik seperti berjalan, berlari, dan bersepeda, maupun anaerobik seperti sprint dan lompat. Secara anatomi, otot tungkai terbagi menjadi beberapa kelompok utama, yaitu otot paha depan (*quadriceps*), otot paha belakang (*hamstring*), serta otot betis (*gastrocnemius* dan *soleus*). Kelompok otot ini secara bersama-sama berfungsi untuk menopang berat badan, mengontrol posisi sendi, dan menghasilkan gaya dorong yang dibutuhkan saat bergerak [38].

Diantara kelompok otot tungkai, otot betis memiliki peranan penting dalam menghasilkan tenaga dorong tubuh. Otot ini terdiri atas *gastrocnemius* dan *soleus*, di mana *gastrocnemius* merupakan otot yang paling dominan saat aktivitas olahraga dinamis, karena berhubungan langsung dengan lutut dan tumit. Sehingga *gastrocnemius* sering menjadi titik rawan kelelahan dan kram.



Gambar 1.6 Gambar otot betis

Gastrocnemius merupakan otot bi-artikular dengan dua kepala yaitu:

- a. Kepala media yang umumnya lebih tebal dan kuat sehingga menghasilkan kontribusi lebih besar pada fleksi plantar.
- b. Kepala lateral yang lebih ramping dan kadang memiliki tulang sesamoid kecil (*fabella*) yang membantu stabilitas lutut [38].

Kondisi relaksasi otot dapat dideteksi dengan beberapa metode non-invasif yaitu:

1. Kondisi aliran listrik otot

Aliran listrik otot mencerminkan aktivitas potensial aksi serat gastrocnemius. Dalam kondisi rileks, intensitas aliran listrik rendah yaitu di bawah 20 persen dari kontraksi maksimal, menandakan hanya rekrutmen postural minimum untuk menjaga posisi berdiri. Saat otot belum rileks atau banyak mengalami kelelahan, intensitas aliran listrik meningkat karena sistem saraf akan merekrut lebih banyak unit motor untuk mengkompensasi penurunan efisiensi serat akibat akumulasi metabolit.

Sebagai parameter utama digunakan RMS karena mencerminkan amplitudo global aktivitas listrik otot gastrocnemius, yang berkorelasi langsung dengan kekuatan kontraksi. RMS dihitung dari sinyal listrik otot gastrocnemius yang sudah diproses dengan frekuensi dan sampling yang sudah ditentukan [39].

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2}$$

$$f_s \geq 2 \times f_{\max}$$

$$f_s \geq 2 \times 500 = 1000 \text{ Hz}$$

Kondisi kontraksi maksimal pada otot gastrocnemius biasanya didapatkan dengan cara berdiri jinjit sekuat tenaga dalam posisi yang tidak banyak bergerak. Tumit ditarik naik kuat sementara bagian depan kaki diberi tahanan sehingga otot bekerja maksimal tapi tetap pada posisi yang hampir tetap selama beberapa saat. Sedangkan kondisi normal atau istirahat sepenuhnya didapatkan ketika duduk dengan posisi tubuh rileks dan kedua tungkai tidak menahan beban [40].

Agar hasil dapat dibandingkan antar subjek, RMS dinormalisasi terhadap *Maximum Voluntary Contraction* sebagai baseline.

$$\%MVC = \frac{RMS_{current}}{RMS_{MVC}} \times 100 \%$$

2. Getaran mekanis

Relaksasi otot dapat dideteksi melalui analisis amplitudo getaran transversal yang dihasilkan oleh kontraksi serat otot. Getaran ini mencerminkan aktivitas mekanis langsung di otot, dimana amplitudonya berubah sesuai kondisi fisiologis. Saat otot aktif, getaran bersifat kuat dan cepat karena sinkronisasi serat cepat. Pada *fatigue* awal, getaran justru meningkat karena rekrutmen serat tambahan untuk kompensasi. *Fatigue* parah menyebabkan getaran lemah dan lambat akibat dominasi serat lambat. Kondisi relaksasi ditandai getaran sangat kecil yang stabil khas aktivitas postural minimum [41].

Getaran diukur melalui *Root Mean Square* yang dihitung dengan rumus:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2}$$

3. Tekanan Otot

Relaksasi otot dapat diketahui melalui tekanan yang muncul di kulit betis akibat perubahan volume otot saat kontraksi dan relaksasi. Saat otot berkontraksi, volumenya membesar sehingga menekan kulit di atasnya dan saat relaks, tekanan menurun kembali. Perubahan tekanan ini mencerminkan aktivitas mekanik otot secara langsung.

Tekanan otot yang belum relaks ditandai seperti betis menggumpal atau tegang pasca olahraga terjadi karena volume otot masih besar, ketegangan serat belum normal, dan fluktuasi tekanan akibat firing otot tidak sinkron. Tekanan otot yang sudah relaks yaitu seperti betis orang duduk santai yang tidak menegang dan lunak [42].

Solusi yang telah ada dari permasalahan ini adalah alat sEMG klinis yang biasanya digunakan di rumah sakit. Alat ini dapat digunakan untuk merekam aktivitas listrik yang dihasilkan oleh serabut otot ketika berkontraksi maupun relaksasi. Kelebihan dari alat ini adalah bersifat invasif dan non-invasif sehingga memiliki akurasi tinggi, mampu memberikan gambaran langsung mengenai aktivitas listrik otot secara real time. Namun kelemahan sEMG klinis ini adalah ukurannya yang masih konvensional dan juga biaya perangkat yang cukup tinggi [43].

1.1.2 Analisis Masalah dan Konstrain

Berikut analisis masalah yang terbagi dari beberapa aspek:

1. Aspek Kesehatan dan Keselamatan

Risiko cedera bahu akibat teknik yang salah merupakan penyebab dominan cedera bahu, seperti *Shoulder Impingement* dan robekan *Rotator Cuff*, terutama bila posisi siku terlalu melebar (90°) atau beban diturunkan terlalu rendah melewati batas aman. Otot yang tidak rileks secara optimal setelah aktivitas fisik dapat meningkatkan resiko cedera. Penilaian subjektif yang tidak akurat memungkinkan individu kembali beraktivitas terlalu cepat, sehingga memperlambat proses pemulihan dan menurunkan performa fisik. Otot bisep yang tidak mengalami proses relaksasi optimal

setelah tekanan fisik berisiko tinggi mengalami kelelahan kronis dan cedera karena serat otot tidak memiliki waktu cukup untuk kembali ke kondisi normal. Paparan panas berlebihan saat berolahraga di luar ruangan dapat menyebabkan kegagalan sistem termoregulasi tubuh, yang ditandai dengan suhu tubuh di atas 40°C.

Berdasarkan analisis aspek kesehatan ini didapatkan, didapatkan konstrain sebagai berikut:

- a. Sistem dibangun harus memenuhi standar nyaman digunakan dan tidak membahayakan ketika digunakan, sehingga tidak menimbulkan masalah baru.

2. Aspek ekonomi

Cedera otot dan penanganan *heatstroke* menimbulkan beban finansial besar bagi individu (biaya operasi, fisioterapi) maupun pemerintah, di mana anggaran kesehatan nasional untuk penyakit terkait cuaca panas terus meningkat. Cedera dan kelelahan ekstrim mengurangi kapasitas kerja individu dan atlet, yang berdampak pada kerugian ekonomi di sektor terkait (binaraga, olahraga prestasi, hingga sektor luar ruangan).

Berdasarkan analisis aspek ekonomi ini didapatkan, didapatkan konstrain sebagai berikut:

- a. Sistem yang dibangun harus dalam standar *low-cost* sehingga dapat terjangkau oleh para penggiat olahraga dan tidak melebihi biaya pengobatan jika terjadinya cedera.
- b. Sistem yang dibangun harus dapat diselesaikan dalam waktu 6 bulan pengerjaan, untuk menekan harga dari segi *development-cost*.

3. Aspek Biomekanika dan Fisiologi Latihan

Durasi latihan yang melampaui ambang batas pemulihan neuromuskular merupakan faktor risiko utama terjadinya cedera dalam olahraga angkat

beban secara umum. Data menunjukkan bahwa setelah melewati 45 hingga 60 menit sesi latihan beban yang intens, tubuh mengalami penurunan kontrol motorik akibat kelelahan otot .

Berdasarkan analisis aspek Biomekanika dan Fisiologi Latihan ini didapatkan, didapatkan konstrain sebagai berikut:

- a. Sistem dibangun harus mampu berjalan hingga 60 menit atau selama sesi latihan.

1.1.3 Kebutuhan yang harus dipenuhi

Kebutuhan yang harus dipenuhi berdasarkan masalah yang telah disajikan adalah sebagai berikut:

1. Sistem yang dikembangkan harus mampu melakukan kemampuan untuk mengetahui posisi dumbbell atau gerakan yang salah ketika latihan otot bahu, mendeteksi cedera pada otot bicep, mengetahui kondisi normal otot betis setelah olahraga, serta mampu mengetahui gejala *heatstroke* .
2. Kebutuhan Komputasi dan Analisis Kecepatan Aspek komputasi dan analisis merupakan inti dari sistem *real-time*, menuntut kecepatan dan akurasi yang tinggi.
3. Sistem mampu memberikan umpan balik yang instan, jelas, dan dapat disesuaikan dengan jenis risiko yang terdeteksi.

1.1.4 Tujuan

Berdasarkan hasil analisis terhadap masalah serta kebutuhan yang harus dipenuhi, maka tujuan dari perancangan alat ini adalah untuk menghasilkan perangkat yang dapat mendeteksi ketika terjadi kesalahan posisi dumbbell atau cara mengangkat yang tidak tepat, memastikan pemantauan kontinu kondisi individu untuk menilai kesiapan aktivitas di luar ruangan, mencegah terjadinya cedera robekan otot biceps, mampu mendeteksi kondisi relaksasi otot setelah aktivitas fisik, menyediakan feedback secara *real-time*, serta menghadirkan alat yang mudah digunakan. Sehingga, dapat mengurangi terjadinya cedera bahu ketika berlatih angkat beban.

1.2 Solusi

1.2.1 Karakteristik Produk

1.2.1.1 Fitur Dasar

1. *Sensing Capability*

Sistem mampu untuk mendeteksi posisi angkat *dumbbell* dan pergerakan tubuh pengguna selama latihan otot bahu, mendeteksi panas tubuh dan indikasi terjadinya *heatstroke*, mampu mendeteksi aktivitas otot secara akurat dan stabil selama latihan otot bisep, dan mendeteksi parameter penting yang berhubungan dengan kondisi rileks otot yang ingin diketahui, sehingga sistem dapat memantau keadaan fisiologis secara objektif.

2. *Computing Performance*

Sistem memiliki kemampuan pemrosesan data secara cepat dan akurat, agar kondisi otot dan panas tubuh ketika aktivitas fisik berat dapat dipantau secara *real time* dan yang bersamaan sehingga perubahan terjadi tidak terlewatkan.

3. *Data recording and Storage*

Sistem harus mampu melakukan merekam dan menyimpan hasil pembacaan dan kualitas dari aktivitas fisik intensitas tinggi baik olahraga angkat beban ataupun olahraga di luar ruangan.

4. *Data Processing*

Sistem dapat mengolah data mentah dari sensor menjadi data yang informasi yang dapat digunakan seperti posisi angkat beban yang salah, kelelahan otot, dan tingkat panas tubuh.

5. Respon Langsung

Sistem dapat memberikan keluaran atau *feedback* secara langsung ketika digunakan oleh pengguna.

1.2.2 Usulan Solusi

1.2.2.1 Solusi 1 : Perangkat keamanan Berolahraga *Wearable* Berbasis Sensor Fleksibel, Suhu, dan *Electromyography* (EMG)

Solusi “Perangkat keamanan Berolahraga *Wearable* Berbasis Sensor Fleksibel, Suhu, dan *Electromyography* (EMG)” diusulkan sebagai pendekatan terpadu yang menyatukan berbagai metode pemantauan fisiologis dan biomekanik untuk menyelesaikan permasalahan keselamatan olahraga yang telah diidentifikasi. Dalam solusi ini, sistem tidak hanya berperan sebagai alat pemantau umum, tetapi secara eksplisit dirancang untuk mengimplementasikan sekumpulan teknik pengukuran dan pengolahan sinyal yang berbeda pada masing-masing aspek masalah, dengan tetap berada dalam satu kerangka perangkat *wearable*. Untuk permasalahan risiko *heatstroke* pada individu yang beraktivitas di lingkungan panas, solusi ini melakukan pengukuran parameter fisiologis. Sistem ini memanfaatkan kombinasi pengukuran suhu tubuh dan kenaikan atau lonjakan suhu tubuh yang kemudian diproses sebagai satu kesatuan pola untuk mengenali munculnya tekanan panas. Secara teknis tubuh manusia memiliki suhu normal kisaran 35-36.6 derajat celcius[0]. Dengan mengukur kenaikan suhu tubuh yang mendekati 40 derajat celcius atau lonjakan kenaikan suhu yang drastis maka pendekatan ini memungkinkan deteksi dini risiko sengatan panas.

Dalam menyelesaikan permasalahan pemantauan pemulihan otot gastrocnemius setelah aktivitas fisik, solusi ini menerapkan pendekatan berbasis Maximum Voluntary Contraction (MVC) sebagai acuan kuantitatif untuk mengevaluasi tingkat aktivasi dan pemulihan otot [44]. Sistem diawali dengan pengukuran sinyal EMG saat kontraksi maksimal sebelum aktivitas olahraga guna memperoleh nilai referensi kemampuan maksimal otot individu. Sinyal EMG yang diperoleh, baik pada fase MVC maupun pada fase pemulihan setelah latihan, diproses melalui tahapan penguatan dan penyaringan sinyal pada rentang frekuensi fisiologis EMG (20-500 Hz) untuk menekan noise frekuensi rendah

akibat pergerakan dan gangguan frekuensi tinggi [45]. Sinyal hasil penyaringan kemudian di sampling oleh sistem dengan frekuensi sampling yang memenuhi kriteria Nyquist sehingga karakteristik spektral sinyal EMG tetap terjaga [46]. Untuk merepresentasikan intensitas kontraksi otot secara stabil, sinyal EMG diproses menggunakan teknik penyearahan dan dievaluasi dalam jendela waktu (window) tertentu untuk menghitung nilai Root Mean Square (RMS) sebagai fitur domain waktu yang merepresentasikan energi sinyal otot. Nilai RMS pada kondisi pemulihan selanjutnya dinormalisasi terhadap nilai RMS pada kondisi MVC untuk memperoleh persentase aktivasi otot (%MVC), yang digunakan sebagai indikator relatif tingkat kerja otot terhadap kapasitas maksimalnya [47]. Berdasarkan nilai %MVC tersebut, sistem memetakan kondisi otot ke dalam beberapa tingkat pemulihan, seperti relaks dan belum relaks, sehingga mampu memberikan representasi kuantitatif dan adaptif terhadap proses pemulihan otot pasca aktivitas olahraga tanpa bergantung pada kondisi baseline statis [48].

Permasalahan kesalahan teknik pada latihan angkat beban latihan bahu dengan dumbell diatasi dalam solusi ini melalui pemantauan gerakan pada posisi tubuh yang digunakan selama latihan menggunakan sensor fleksibel (*flex sensor*) yang dirancang untuk mendeteksi kesalahan posisi atau teknik penggunaan dumbbell dengan memantau siku. Sistem ini menempel langsung pada tubuh pengguna di area siku bagian dalam atau lipatan siku, sehingga mampu memberikan deteksi yang lebih personal dan sensitif terhadap pergerakan sendi. Dengan pendekatan ini, pengguna dapat menerima peringatan secara langsung apabila posisi bahu tidak sesuai dengan batas biomekanik aman yang telah ditentukan. Dengan menetapkan batas ambang sudut siku berdasarkan referensi teknik yang benar, sistem dapat mengklasifikasikan segmen latihan sebagai gerakan dengan teknik baik atau mengandung kesalahan, dan secara konseptual dapat dipadukan dengan pendekatan inferensi berbasis logika fuzzy untuk menilai tingkat keteraturan gerak secara lebih halus. Hasil analisis yang diperoleh dari sistem kemudian disampaikan kepada pengguna melalui output capability berupa getaran. Indikator ini berfungsi untuk memberikan umpan balik secara langsung selama latihan berlangsung. Dengan adanya getaran tersebut, pengguna dapat mengetahui apakah posisi atau sudut gerakan yang dilakukan sudah sesuai dengan standar latihan

yang benar atau masih perlu diperbaiki. Melalui cara ini, pengguna dapat segera melakukan penyesuaian terhadap gerakan tanpa harus menghentikan latihan, sehingga latihan menjadi lebih efektif, aman, dan membantu dalam memperbaiki teknik secara real-time.

Sementara itu, permasalahan terkait ketegangan dan kelelahan otot biseps serta resiko cedera akibat praktik *ego lifting* ditangani melalui pemantauan tingkat aktivitas otot secara *real-time* melalui sinyal EMG. Dalam solusi *Smart Sport Wearable Device*, aktivitas otot biseps diproses melalui rangkaian sinyal yang mencakup penyaringan menggunakan *Band-pass Filter* untuk mereduksi *noise*. Data tersebut kemudian diolah menggunakan algoritma *Fast Fourier Transform* (FFT) untuk mendapatkan fitur spektral *Median Frequency* (MDF) serta kalkulasi *Mean Absolute Value* (MAV) sebagai fitur intensitas domain waktu. Sistem melakukan komputasi di mana kondisi penurunan MDF secara drastis yang diiringi dengan nilai MAV yang tinggi diidentifikasi sebagai kelelahan otot bisep serta indikasi praktik *ego lifting*. Informasi ini kemudian diposisikan sebagai dasar penentuan kapan sistem harus memberikan *output* berupa peringatan melalui *haptic* atau getaran instan kepada pengguna. Hal ini bertujuan agar latihan dapat segera disesuaikan sebelum terjadi robekan tendon atau cedera serius.

Secara keseluruhan, *Smart Sport Wearable Device* sebagai solusi pertama tidak hanya menyatukan keempat permasalahan dalam satu wadah fisik yang sama, tetapi juga menyatukan pendekatan ilmiah dan teknik penyampaian data yang berbeda untuk masing-masing permasalahan. Modul pemantauan *heatstroke* meliputi pemodelan respons termal dan kardiorespirasi terhadap lingkungan, modul pemulihan *gastrocnemius* menggunakan analisis fitur sinyal terhadap kondisi dasar, modul teknik dumbbell menggunakan analisis gerak berbasis dinamika dan orientasi, sedangkan modul biseps mengandalkan indikator kelelahan otot yang tersaji dalam perubahan pola sinyal. Integrasi keempat pendekatan ini ke dalam satu sistem wearable menjadikan solusi 1 sebagai platform yang mampu memberikan gambaran menyeluruh tentang keselamatan dan kualitas latihan pengguna, sekaligus menunjukkan bahwa setiap permasalahan

diselesaikan dengan metode yang spesifik dan saling melengkapi dalam satu kerangka desain yang sama.

1.2.2.2 Solusi 2 : Sistem Monitoring Keamanan Berolahraga berbasis Sensor Tekanan Menggunakan *Force Myography* (FMG), Optik (*Computer Vision*), dan Termal

Solusi kedua yang diusulkan adalah “Sistem Monitoring Keamanan Berolahraga berbasis Sensor Tekanan Menggunakan *Force Myography* (FMG), Optik (*Computer Vision*), dan Termal”. Sistem ini dirancang untuk menganalisis kondisi fisiologis tubuh dengan mengintegrasikan penangkapan menggunakan optik dan termal untuk mendeteksi kondisi panas tubuh ketika terjadinya *heatstroke*, posisi tubuh ketika latihan otot bahu yang tidak sesuai teknik, dan kondisi ketika terjadinya kelelahan otot bisep atau mendekati kondisi otot robek, ditambah dengan sensor tekanan ketika otot betis volumenya meningkat sehingga menekan kulit di atasnya.

Untuk permasalahan kesalahan teknik pada latihan angkat beban latihan bahu dengan dumbell diperoleh melalui penggunaan kamera RGB atau *depth camera* yang berfungsi untuk menangkap gambar atau video pergerakan pengguna secara *real-time*. Kamera ditempatkan di depan area latihan dengan jarak sekitar 1,5 hingga 2 meter untuk memastikan seluruh tubuh bagian atas terlihat dengan jelas. Kamera ini dihubungkan mikrokontroler memiliki kemampuan pemrosesan citra cukup tinggi.

Pengolahan data dalam konteks pengenalan gerakan manusia diawali dengan tahap *pose estimation*. *Pose estimation* merupakan teknik dalam bidang *computer vision* dan *machine learning* yang digunakan untuk mendeteksi dan memperkirakan posisi titik-titik sendi tubuh manusia dari citra atau video yang diambil oleh kamera. Tujuan utama dari teknik ini adalah untuk mengenali postur atau gerakan manusia secara otomatis melalui analisis posisi dan hubungan antar sendi tubuh. Hasil dari proses ini biasanya berupa koordinat titik-titik sendi yang disusun menjadi model kerangka tubuh dua dimensi (*2D skeleton*) atau tiga dimensi (*3D skeleton*) [49].

Dalam tahap *data processing*, citra yang ditangkap kamera terlebih dahulu diproses untuk mengekstraksi fitur-fitur penting yang berkaitan dengan posisi tubuh manusia. Sistem *pose estimation* menggunakan algoritma berbasis *deep learning*, terutama *Convolutional Neural Network (CNN)*, untuk mengenali pola visual pada tubuh manusia dan mengidentifikasi lokasi titik sendi. Algoritma ini menghasilkan keluaran berupa peta probabilitas (*heatmap*) yang menunjukkan kemungkinan posisi setiap sendi pada citra tersebut. Setelah koordinat sendi berhasil diidentifikasi, data ini kemudian disimpan dalam format numerik, seperti matriks atau array, untuk dianalisis lebih lanjut, misalnya untuk pengenalan gerakan, analisis postur, atau pelacakan aktivitas [50].

Force Myography (FMG) memantau kondisi relaksasi otot gastrocnemius dengan mengukur tekanan yang timbul pada permukaan kulit akibat perubahan volume otot selama kontraksi dan relaksasi. Ketika otot betis berkontraksi, volumenya meningkat sehingga menekan kulit di atasnya, dan saat relaks, tekanan menurun secara signifikan. Perubahan tekanan ini mencerminkan aktivitas mekanik otot secara non-invasif untuk menilai kondisi relaksasi pasca-aktivitas fisik.

Pengukuran dilakukan dengan Root Mean Square (RMS) sebagai fitur utama, dihitung menggunakan sliding window 256 ms dengan langkah 100 ms untuk intensitas tekanan dinamis. Sinyal tekanan diproses melalui low-pass filter <10 Hz untuk menghilangkan noise mekanik, diikuti rectification dan smoothing. Baseline dicatat saat kontraksi plantarflexion maksimal sebelum olahraga, sedangkan monitoring dilakukan saat istirahat standing pasca-exercise.

Klasifikasi kondisi otot menggunakan relative change method. Relaksasi relatif ditandai penurunan RMS dan stabilitas tekanan rendah, menunjukkan volume otot kembali normal. Non-relaksasi ditandai peningkatan signifikan atau fluktuasi besar akibat kontraksi residu.

Penempatan sensor melingkar di medial gastrocnemius dengan frekuensi sampling 1 kHz untuk menangkap perubahan tekanan rinci. Metode ini efektif karena hanya memerlukan satu data baseline, memungkinkan evaluasi otomatis dengan

informasi jelas kepada pengguna tentang status pemulihan otot betis secara real-time [51].

Lalu, terkait permasalahan kelelahan otot biseps dan risiko cedera akibat praktik *Ego Lifting*, dirancang sistem deteksi kelelahan otot bicep berbasis kamera dengan memanfaatkan pengolahan visual dan machine learning untuk menganalisis perubahan gerakan tubuh yang mengindikasikan kelelahan otot. Kamera merekam aktivitas fisik pengguna, seperti gerakan bicep curl, kemudian sistem melakukan ekstraksi fitur visual berupa posisi sendi, kecepatan gerak, sudut siku, atau getaran mikro (micro-tremor) yang muncul saat otot mulai kehilangan kestabilan kontraksi [52]. Perubahan morfologi otot, seperti pergeseran permukaan otot (muscle displacement), dapat dihitung melalui citra kamera dan dijadikan parameter kuantitatif untuk menilai kerja otot .

Dengan bantuan model pembelajaran mesin seperti Convolutional Neural Network (CNN) dan Long Short-Term Memory (LSTM), sistem mampu mengenali pola-pola kelelahan berdasarkan perubahan gerak yang terjadi secara berulang. Pendekatan visi komputer dapat memprediksi parameter internal dan eksternal kelelahan selama latihan ketahanan dengan akurasi tinggi, menjadikannya solusi potensial untuk pemantauan kondisi otot secara berkelanjutan [53]. Deteksi berbasis kamera ini bekerja dengan menganalisis inkonsistensi pola gerak seperti penurunan kecepatan repetisi, perubahan sudut siku, atau tremor kecil yang secara fisiologis muncul ketika otot mendekati titik failure.

Sistem untuk mendeteksi risiko *heatstroke* dengan menggabungkan teknologi *Internet of Things (IoT)*, *computer vision*, *thermal imaging*, *machine learning*, dan *edge computing*. Berbagai perangkat seperti kamera RGB, kamera thermal, serta sensor suhu, kelembaban, dan UV saling terhubung untuk mengumpulkan data lingkungan dan kondisi individu secara real-time tanpa alat yang ditempelkan pada tubuh.

Data dari semua sensor digabungkan menggunakan *multisensor data fusion* agar hasil deteksi lebih akurat dan tetap berfungsi meskipun salah satu sensor

mengalami gangguan. Kamera RGB menganalisis wajah, warna kulit, dan keberadaan individu, sementara kamera thermal mengukur suhu permukaan tubuh secara non-invasif. Data lingkungan digunakan sebagai konteks tambahan untuk menilai tingkat risiko panas.

Pada tahap pemrosesan, sistem menerapkan algoritma *face detection/recognition*, deteksi kemerahan kulit, serta klasifikasi suhu menggunakan *threshold* atau model *machine learning*. Seluruh data kemudian dievaluasi untuk menghasilkan skor risiko *heatstroke* pada tiap individu atau area.

Pemrosesan dilakukan di *edge device* agar respons tetap cepat, hemat bandwidth, dan lebih aman. Jika terdeteksi risiko tinggi, sistem otomatis mengirimkan peringatan melalui alarm visual/audio dan notifikasi digital. Data tersimpan dalam database terenkripsi, serta dilengkapi fitur privasi seperti anonymisasi video dan pemberitahuan bahwa area dipantau AI.

1.2.2.3 Solusi 3 : Set Perangkat Olahraga Berbasis Sensor IMU (*Inertial Measurement Unit*), Sensor Termal Pada Wajah, Getaran Mekanis (*Mechanomyography*), dan Pendeteksi Kelelahan Otot Bisep menggunakan *Force Sensor*

Solusi ketiga yang diusulkan adalah “Set Perangkat Olahraga Berbasis Sensor IMU (*Inertial Measurement Unit*), Sensor Termal Pada Wajah, Getaran Mekanis (*Mechanomyography*), dan Pendeteksi Kelelahan Otot Bisep menggunakan *Force Sensor*”. Sistem ini dirancang untuk menganalisis kondisi fisiologis tubuh dengan mengintegrasikan penangkapan menggunakan Sensor IMU yang mengukur kecepatan sudut atau seberapa cepat perangkat berputar pada sumbu X, Y, dan Z ketika latihan angkat beban otot bahu dengan dumbbell, penangkap citra termal pada wajah untuk mengetahui kondisi *heatstroke* pada saat olahraga di luar ruangan, pendeteksian kondisi kelelahan otot bisep menggunakan sensor tekanan pada saat latihan beban, dan pendeteksian kondisi kelelahan otot betis menggunakan pengukuran aktivitas otot yang memanfaatkan getaran mekanis yang timbul pada permukaan kulit akibat kontraksi serat otot.

Untuk permasalahan kesalahan teknik pada latihan angkat beban latihan bahu dengan dumbbell diperoleh melalui sensor IMU, yang dirancang untuk mendeteksi kesalahan posisi dan orientasi alat saat digunakan. Sistem ini memungkinkan pengguna untuk mengetahui apakah teknik angkat beban yang dilakukan sudah sesuai dengan standar biomekanik yang benar, terutama pada area bahu dan pergelangan tangan. Prinsip kerja utama alat ini adalah mengukur percepatan dan sudut kemiringan dumbbell secara real-time, kemudian memberikan umpan balik langsung apabila posisi pengguna menyimpang dari batas ideal yang telah ditetapkan.

Dalam hal *sensing capability*, Menggunakan sensor accelerometer, yaitu perangkat mikro-elektromekanik (MEMS) yang dirancang untuk mengukur percepatan suatu objek dalam satu atau beberapa sumbu. Pada dasarnya, sensor ini mendeteksi perubahan kecepatan objek dalam waktu, baik itu gerakan dinamis maupun komponen gravitasi. Dalam implementasi modern, banyak accelerometer yang mampu mengukur percepatan dalam tiga sumbu (x, y, z), sehingga menghasilkan vektor percepatan total objek. Sensor ini umum digunakan dalam bidang seperti penginderaan getaran (vibration sensing), navigasi, wearable devices, otomotif, dan aplikasi robotik [54].

Prinsip kerja accelerometer berbasis MEMS biasanya berdasar konsep *massa proof mass* yang digantungkan pada sistem pegas mikro. Ketika sistem mengalami percepatan, massa tersebut akan bergeser relatif terhadap struktur referensi. Pergeseran ini kemudian diubah menjadi perubahan sinyal elektrik melalui berbagai metode (kapasitif, piezoresistif, piezoelektrik). Dalam salah satu tinjauan komprehensif mengenai teknologi ini, struktur kapasitif banyak digunakan pada accelerometer MEMS karena kemudahan integrasi dan sensitivitas yang layak [55]

Dalam desain MEMS accelerometer, sering dipertimbangkan trade-off antara sensitivitas, noise, dan bandwidth. Semakin tinggi sensitivitas biasanya berdampak pada penurunan *bandwidth* atau peningkatan noise, sehingga diperlukan desain optimal dan sirkuit penyangga (*buffering*) yang baik. Studi desain kapasitor MEMS modern juga memperlihatkan bahwa parameter seperti

panjang dan lebar bilah (*beam*), jumlah jari-jari (*fingers*) interdigitasi, dan geometri massa menjadi krusial dalam mencapai sensitivitas dan linearitas target [56]. Dalam rangka penggunaan praktis, kalibrasi sensor accelerometer sangat penting. Kalibrasi mencakup kompensasi kesalahan skala (*scale factor*), *offset*, dan koreksi antar-sumbu (*misalignment*). Tanpa kalibrasi baik, pembacaan percepatan dapat mengalami deviasi signifikan, terutama jika digunakan dalam sistem navigasi atau pengukuran getaran presisi.

Pendeteksian kondisi kelelahan otot betis (*gastrocnemius*) menggunakan Mechanomyography (MMG) yang merupakan pendekatan pengukuran aktivitas otot dengan memanfaatkan getaran mekanis transversal yang timbul pada permukaan kulit akibat kontraksi serat otot (frekuensi dominan 10-50 Hz). Getaran ini merupakan manifestasi langsung dari proses mekanik internal otot yang terjadi bersamaan dengan aktivitas bioelektrik. Pengolahan sinyal melibatkan bandpass filter 10-50 Hz untuk isolasi frekuensi getaran otot, diikuti ekstraksi fitur Root Mean Square (RMS) dan Mean Absolute Value (MAV) pada window analysis 500 ms.

Analisis lanjutan menggunakan Mean Power Frekuensi (MPF) dan Median Frekuensi (MDF) dari transformasi Fourier untuk mentransmisikan spektrum frekuensi ke arah rendah saat kelelahan, serta Discrete Wavelet Transform (DWT) untuk menghilangkan transisi kontraksi-relaksasi pada sinyal non-stasioner. Metode Relative Change Assessment membandingkan RMS pasca-aktivitas terhadap baseline plantarflexion maksimal sebelum olahraga, di mana $RMS \leq 30\%$ baseline menandakan relaksasi relatif (energi mekanis minimum) dan $RMS > 60\%$ baseline menunjukkan kondisi non-relaksasi (kontraksi residu aktif) [57].

Kemudian untuk masalah praktik *Ego Lifting* yang mengakibatkan kelelahan otot biseps dan risiko cedera, dirancang sistem deteksi dini kelelahan bicep otot secara real-time dengan menggunakan force sensor (load cell) yang ditempatkan pada pegangan tangan pengguna. Prinsip utamanya adalah bahwa kelelahan otot ditandai oleh penurunan kemampuan menghasilkan gaya (*force*) yang terjadi secara bertahap selama latihan berulang. Dalam konteks biomekanika, kelelahan otot (*muscle fatigue*) merupakan kondisi dimana otot kehilangan kapasitasnya

untuk menghasilkan gaya akibat aktivitas kontraksi yang berkelanjutan [58]. Dengan demikian, pemantauan gaya selama latihan dapat menjadi indikator fisiologis yang efektif untuk mendeteksi kelelahan dan mencegah cedera, terutama robekan otot bisep yang sering disebabkan oleh kelebihan beban.

Force sensor yang digunakan dalam sistem ini umumnya berbasis strain gauge, yang mampu mengubah deformasi mekanis menjadi sinyal listrik yang proporsional terhadap gaya yang diterima. Sensor ini dihubungkan dengan amplifier dan ADC module untuk mengkonversi sinyal analog menjadi data digital yang akurat [59]. Data tersebut kemudian diolah oleh mikrokontroler untuk menghitung parameter gaya seperti puncak gaya (*peak force*), rata-rata gaya (*mean force*), dan laju perkembangan gaya (*Rate of Force Development/RFD*) pada setiap repetisi. Penggunaan modul load cell berbasis mikrokontroler memiliki tingkat validitas dan reliabilitas yang tinggi untuk pengukuran gaya secara langsung, selama dilakukan proses kalibrasi dan penyaringan sinyal yang tepat [60].

Smart Helmet merupakan perangkat *wearable* yang dirancang untuk mendeteksi risiko *heatstroke* dengan menggabungkan *embedded health monitoring*, biosensor, dan *vision-based analytics*. Helm ini memantau tanda vital dari area kepala yang dekat dengan pusat regulasi suhu tubuh seperti suhu tubuh, detak jantung, dan tingkat hidrasi untuk menilai kondisi pengguna secara real-time.

Sensor fisiologis ditempatkan di bagian dalam helm (dahi, pelipis, belakang kepala), sementara sensor lingkungan seperti suhu udara dan kelembapan membantu memberikan konteks eksternal. Semua data dikirim ke mikrokontroler yang mengolahnya menggunakan algoritma *machine learning* atau *fuzzy logic* untuk menghasilkan skor risiko *heatstroke* berdasarkan kombinasi berbagai parameter, bukan hanya satu ambang batas.

Helm juga dilengkapi kamera mini (RGB/thermal) yang menjalankan *computer vision* guna mendeteksi ekspresi wajah, kemerahan kulit, serta tanda kelelahan atau perubahan perilaku. Pemrosesan dilakukan langsung pada prosesor *edge* agar respons tetap cepat dan hemat energi.

Saat helm digunakan, sensor dan kamera langsung aktif mengumpulkan data. Mikrokontroler menggabungkan serta menganalisis sinyal secara real-time. Jika risiko melewati batas aman, sistem mengeluarkan peringatan melalui LED, buzzer, display, atau notifikasi ke aplikasi. Data dan riwayat peringatan disimpan secara lokal atau di cloud, dengan perlindungan privasi seperti anonymisasi video dan kontrol akses.

1.2.3 Analisis Usulan Masalah

Berdasarkan solusi-solusi yang telah diberikan, berikut merupakan analisis usulan solusi dengan menggunakan *House of Quality* (HoQ).

Tabel 1.3 Tabel House of Quality

Fitur Dasar Konstrain	Rating	▲	▲	▲	▲	▲	
		Sensing Capability	Computing Performance	Data recording and Storage	Data Processing	Respon Langsung	
Komponen mudah didapatkan dan $Low\ cost \leq Rp.5.000.000$	5	●	●	●	○	●	
dapat diselesaikan dalam waktu 6 bulan	5	●	○	△	△	●	
Mampu berjalan hingga 60 menit	5	●	●	●	●	●	
Nyaman digunakan dan tidak membahayakan	3	●	○	○	○	●	
Importance Rating		90	74	64	54	90	372
Percentage Rating		24,19 %	19,8 9%	17,2 %	14,51 %	24,19 %	100%
Solusi 1: Perangkat keamanan Berolahraga <i>Wearable</i> Berbasis Sensor Fleksibel, Suhu, dan <i>Electromyography</i> (EMG)		●	○	●	●	●	4,5852
Solusi 2: Sistem Monitoring Keamanan Berolahraga berbasis Sensor Tekanan Menggunakan <i>Force Myography</i> (FMG), Optik (<i>Computer Vision</i>), dan Termal		●	●	●	○	○	4,254
Solusi 3: Set Perangkat Olahraga Berbasis Sensor IMU (<i>Inertial Measurement Unit</i>), Sensor Termal Pada Wajah, Getaran Mekanis (<i>Mechanomyography</i>), dan Pendeteksi Kelelahan Otot Bisep menggunakan <i>Force Sensor</i>		○	○	●	●	●	4,1014

Tabel 1.4 Tabel keterangan HoQ

Simbol	Nilai	Hubungan
●	5	Berhubung kuat
○	3	berhubung normal
△	1	Berhubungan jauh
	0	Tidak berhubungan

Konstrain Komponen Mudah Didapatkan dan *Low Cost* memiliki hubungan yang kuat dengan *Sensing Capability*, *Computing Performance*, *Data Recording*, dan *Respon Langsung*. Hal ini karena pemilihan jenis sensor, prosesor, dan memori penyimpanan merupakan penyumbang terbesar dalam *Bill of Materials* (BOM). Penggunaan komponen yang umum di pasaran akan menekan biaya produksi di bawah Rp5.000.000 secara signifikan. Hubungannya dengan *Data Processing* dinilai normal (sedang), sebab kompleksitas pemrosesan data lebih banyak bergantung pada algoritma (perangkat lunak) yang tidak membebani biaya fisik secara langsung.

Konstrain dapat diselesaikan dalam waktu 6 bulan memiliki hubungan yang kuat dengan *Sensing Capability* dan *Respon Langsung*. Hal ini dikarenakan pemilihan sensor dan modul respon yang "siap pakai" sangat menentukan kecepatan integrasi sistem. Hubungan lemah atau normal (simbol segitiga dan lingkaran kosong) terlihat pada *Computing Performance*, *Data Recording*, dan *Data Processing*. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun aspek perangkat keras harus cepat diselesaikan, pengembangan algoritma pemrosesan dan manajemen penyimpanan data memerlukan waktu iterasi yang lebih fleksibel, namun tidak menjadi penghambat utama dalam lini masa fisik proyek selama 6 bulan.

Konstrain Mampu berjalan hingga 60 menit memiliki hubungan yang sangat kuat dengan seluruh fitur dasar (*Sensing*, *Computing*, *Data Recording*, *Data Processing*, dan *Respon Langsung*). Hal ini dikarenakan durasi operasional berkaitan erat dengan manajemen daya (konsumsi baterai). Semakin aktif sensor

bekerja, semakin cepat prosesor mengolah data, dan semakin sering sistem memberikan respon, maka beban daya akan semakin besar. Untuk mencapai target 60 menit, seluruh subsistem teknis harus dioptimalkan agar bekerja secara efisien tanpa menguras energi secara berlebihan.

Konstrain Nyaman digunakan dan tidak membahayakan memiliki hubungan yang kuat dengan *Sensing Capability* dan *Respon Langsung*. Hal ini disebabkan karena kedua fitur tersebut merupakan titik kontak fisik utama antara perangkat dengan tubuh pengguna (seperti penempatan sensor pada kulit atau modul *feedback*). Material sensor harus ergonomis agar tidak menimbulkan iritasi. Sementara itu, hubungan dengan *Computing Performance*, *Data Recording*, dan *Data Processing* dinilai normal (sedang) karena aspek-aspek ini bekerja di latar belakang (sisi digital/elektronik) dan hanya berpengaruh pada kenyamanan jika menimbulkan panas berlebih pada perangkat.

Berikut hasil perhitungan dengan menggunakan *house of quality* pada ketiga solusi:

$$\text{Solusi 1 : } [(5 \times 24,19\%) + (3 \times 19,89\%) + (5 \times 17,2\%) + (5 \times 14,19\%) + (5 \times 24,19\%)] = 4,5852$$

$$\text{Solusi 2 : } [(5 \times 24,19\%) + (5 \times 19,89\%) + (5 \times 17,2\%) + (3 \times 14,19\%) + (3 \times 24,19\%)] = 4,2154$$

$$\text{Solusi 3 : } [(3 \times 24,19\%) + (3 \times 19,89\%) + (5 \times 17,2\%) + (5 \times 14,19\%) + (5 \times 24,19\%)] = 4,1014$$

Rincian Hasil HoQ yang didapatkan dari hubungan kebutuhan sebagai berikut:

Solusi 1: "Perangkat Keamanan Berolahraga *Wearable* Berbasis Sensor Fleksibel, Suhu, dan *Electromyography* (EMG)" Memiliki nilai tertinggi yaitu 4,5852. Solusi pertama ini memiliki hubungan kuat pada aspek *Sensing Capability*, *Data Recording*, *Data Processing*, dan *Respon Langsung*. Sebagai perangkat *wearable* terintegrasi, solusi ini menempel langsung pada tubuh (siku dan otot target), sehingga keunggulan utamanya terletak pada akurasi deteksi sinyal fisiologis

(EMG dan Suhu) serta mekanik (Sensor Fleksibel) dengan *noise* yang minim. Hal ini mendukung kemampuan Data Processing yang efisien melalui algoritma filter dan ekstraksi fitur (RMS, MDF) untuk menghasilkan keputusan yang cepat. Hubungan kuat pada Respon Langsung didapatkan dari mekanisme umpan balik haptic (getaran) yang memberikan koreksi instan kepada pengguna tanpa gangguan visual.

Sementara itu, Computing Performance memiliki hubungan normal (nilai 3). Hal ini dinilai positif karena menunjukkan bahwa solusi ini tidak menuntut daya komputasi yang berlebihan. Penggunaan algoritma deterministik (bukan *Deep Learning* berat) memungkinkan penggunaan mikrokontroler hemat daya, yang secara langsung menjaga suhu perangkat tetap rendah (mendukung Biokompatibilitas) dan menekan biaya produksi (BOM) agar tetap memenuhi konstrain *Low Cost* (<Rp5.000.000).

Solusi 2: "Sistem Monitoring Keamanan Berolahraga berbasis Sensor Tekanan (FMG), Optik (*Computer Vision*), dan Termal" Memiliki nilai 4,254. Solusi kedua memiliki hubungan kuat pada Sensing Capability, Computing Performance, dan Data Recording. Kekuatan solusi ini terletak pada penggunaan teknologi canggih seperti kamera RGB, kamera termal, dan algoritma *pose estimation* (CNN/LSTM) yang mampu menangkap data lingkungan dan gerak secara komprehensif tanpa banyak kabel. Tingginya nilai Computing Performance merefleksikan kebutuhan prosesor berspesifikasi tinggi (*high-end* atau *edge computing*) untuk mengolah data visual dan termal secara *real-time*.

Namun, hubungan dengan Data Processing dan Respon Langsung bernilai normal (nilai 3). Hal ini disebabkan oleh kompleksitas pemrosesan citra yang berpotensi menimbulkan latensi lebih tinggi dibandingkan sensor analog langsung. Selain itu, umpan balik berupa alarm visual/audio dianggap kurang intuitif dibandingkan getaran fisik pada tubuh saat pengguna sedang fokus melakukan angkatan berat. Penggunaan komponen optik dan termal juga menjadi beban biaya terbesar, yang melemahkan posisinya terhadap konstrain biaya.

Solusi 3: "Set Perangkat Olahraga Berbasis Sensor IMU, Sensor Termal Wajah, MMG, dan *Force Sensor*" Memiliki nilai terendah yaitu 4,1014. Solusi ketiga ini memiliki hubungan kuat pada Data Recording, Data Processing, dan Respon Langsung. Kekuatan pemrosesan datanya didukung oleh penggunaan metode analisis sinyal yang kompleks seperti *Discrete Wavelet Transform* (DWT) untuk MMG dan logika *Fuzzy* pada helm pintar. Respon langsung juga dinilai kuat karena adanya sistem peringatan pada perangkat.

Akan tetapi, kelemahan utama terlihat pada Sensing Capability dan Computing Performance yang hanya bernilai normal (nilai 3). Hal ini dikarenakan sifat sistem yang terfragmentasi (sensor terpisah di helm, lengan, dan alat/dumbbell). Integrasi data dari sumber yang berbeda lokasi (IMU di alat vs Termal di wajah vs MMG di betis) menurunkan efisiensi *sensing* secara keseluruhan dibandingkan sistem terpusat. Selain itu, kebutuhan kalibrasi presisi untuk sensor inersia (IMU) dan gaya menambah kompleksitas operasional yang mengurangi nilai kepraktisan bagi pengguna awam.

1.2.4 Solusi Yang Dipilih

Solusi yang dipilih Adalah Solusi 1 "Perangkat Keamanan Berolahraga *Wearable* Berbasis Sensor Fleksibel, Suhu, dan *Electromyography* (EMG)", dikarenakan solusi 1 sebagai solusi terbaik tidak hanya didasarkan pada kinerja fitur dasarnya, tetapi juga karena kemampuannya yang paling optimal dalam memenuhi seluruh konstrain desain yang ketat, mulai dari biaya, waktu, hingga standar keamanan medis.

Pertama, ditinjau dari Konstrain Komponen Mudah Didapatkan dan *Low Cost*, Solusi 1 menunjukkan keunggulan yang signifikan dibandingkan solusi lainnya. Solusi ini memanfaatkan komponen elektronika standar yang tersedia luas di pasaran, seperti sensor fleksibel resistif, elektroda EMG permukaan, sensor suhu digital, dan mikrokontroler umum. Solusi 1 mampu menekan *Bill of Materials* (BOM) secara efektif. Hal ini memastikan biaya produksi dapat dijaga di bawah target Rp5.000.000 tanpa mengorbankan fungsionalitas utama sistem.

Kedua, terkait Konstrain dan Kenyamanan, Solusi 1 memiliki keunggulan. Meskipun perangkat ini bersentuhan langsung dengan kulit, penggunaan algoritma pemrosesan sinyal yang efisien (seperti *band-pass filter* dan kalkulasi RMS) memungkinkan penggunaan prosesor berdaya rendah. Hal ini meminimalkan panas yang dihasilkan perangkat (disipasi termal rendah), sehingga aman dan nyaman digunakan pada kulit dalam durasi lama.

Ketiga, dalam menghadapi Konstrain Waktu Penyelesaian (6 Bulan), arsitektur Solusi 1 dinilai paling realistis untuk direalisasikan. Kompleksitas integrasi sensor analog dan pengolahan sinyal digital (DSP) pada Solusi 1 memiliki tingkat kesulitan yang lebih terukur dibandingkan pengembangan model *Deep Learning* yang kompleks. Pendekatan deterministik pada algoritma Solusi 1 mempercepat proses *debugging* dan kalibrasi sistem, sehingga target penyelesaian fungsional dalam waktu enam bulan sangat mungkin dicapai.

Terakhir, pemenuhan Konstrain Durasi Operasional (60 Menit) sangat didukung oleh efisiensi manajemen daya pada Solusi 1. Dengan beban komputasi yang ringan, konsumsi energi baterai menjadi sangat hemat. Hal ini menjamin perangkat dapat beroperasi stabil selama sesi latihan penuh tanpa memerlukan kapasitas baterai yang besar dan berat, yang kembali mendukung prinsip desain *wearable* yang ringkas dan ringan.

Secara keseluruhan, Solusi 1 dipilih karena menawarkan keseimbangan terbaik antara performa teknis dan batasan sumber daya, menjadikannya produk yang dapat dibuat, ekonomis, nyaman, dan aman bagi pengguna.