



PT Cipta Digital
Edukasi

MEMBACA GERAK TUBUH

Analisis Biomekanik dalam Fisioterapi

Catherine Hermawan Salim, Jerry Maratis, Syakilah Aldiansyah, Siti Hannah, Grace Lexa Dinanti, Ririn Agustin, Vania Salsabila, Sayyidati Sariah Salsabila, Annisa Nadila RamadanI, Sabrina Ramadhanti, Muhammad Galih Pratama, Radit Julianto, Harris Rizky Fajar Abadi, Kayla Salina, Sebastian Jonathan, Nasnia Lilam, Nailah Ayu Irma Sanjaya, Aurora Nasywa Syakib, Firda Ayu Maharani, Christopher Coran Deo, Luthvya Rmadhani, Jazzy Angela Alwyn, Bohal Septianus Naftali Siregar, dan Rafi Alfathaya

Membaca Gerak Tubuh Analisis Biomekanik dalam Fisioterapi

Catherine Hermawan Salim
Jerry Maratis
Syakilah Aldiansyah
Siti Hannah
Grace Lexa Dinanti
Ririn Agustin
Vania Salsabila
Sayyidati Sariah Salsabila
Annisa Nadila RamadanI
Sabrina Ramadhanti
Muhammad Galih Pratama
Radit Julianto
Harris Rizky Fajar Abadi
Kayla Salina
Sebastian Jonathan
Nasnia Lilam
Nailah Ayu Irma Sanjaya
Aurora Nasywa Syakib
Firda Ayu Maharani
Christopher Coran Deo
Luthvya Rmadhani
Jazzy Angela Alwyn
Bohal Septianus Naftali Siregar
Rafi Alfathaya

PT CIPTA DIGITAL EDUKASI

Anggota IKAPI: No. 666/DKI/2026



Membaca Gerak Tubuh Analisis Biomekanik dalam Fisioterapi

Penulis : Catherine Hermawan Salim, Jerry Maratis, Syakilah Aldiansyah, Siti Hannah, Grace Lexa Dinanti, Ririn Agustin, Vania Salsabila, Sayyidati Sariah Salsabila, Annisa Nadila RamadanI, Sabrina Ramadhanti, Muhammad Galih Pratama, Radit Julianto, Harris Rizky Fajar Abadi, Kayla Salina, Sebastian Jonathan, Nasnia Lila, Nailah Ayu Irma Sanjaya, Aurora Nasywa Syakib, Firda Ayu Maharani, Christopher Coran Deo, Luthvya Rmadhani, Jazzy Angela Alwyn, Bohal Septianus Naftali Siregar, dan Rafi Alfathaya

ISBN : 978-634-7808-31-8 (PDF)

Penyunting Naskah : Rikhanatus Saliha, S.Sos.

Tata Letak : Rikhanatus Saliha, S.Sos.

Desain Sampul : Novikean Keysah Sanisri

Penerbit

PT Cipta Digital Edukasi

Jl. Wijaya Ii/Wijaya Grand Centre Blok G-15, Desa/Kelurahan Pulo, Kec. Kebayoran Baru, Kota Adm. Jakarta Selatan, Provinsi DKI Jakarta, Kode Pos: 1216

E-Mail : penerbitcde@gmail.com

Website : cideka.com

© Hak cipta dilindungi oleh undang-undang

Berlaku selama 50 (lima puluh) tahun sejak Ciptaan tersebut pertama kali dilakukan pengumuman.

Dilarang mengutip atau memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini tanpa izin tertulis dari penerbit. Ketentuan Pidana Sanksi Pelanggaran Pasal 2 UU Nomor 19 Tahun 2002 Tentang Hak Cipta.

1. Barang siapa dengan sengaja dan tanpa hak melakukan perbuatan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 2 ayat (1) atau Pasal 49 ayat (1) dan ayat (2) dipidana dengan pidana penjara masing-masing paling singkat 1 (satu) bulan dan/atau denda paling sedikit Rp1.000.000,00 (satu juta rupiah), atau pidana penjara paling lama 7 (Tujuh) tahun dan/atau denda paling banyak Rp5.000.000.000,00 (lima miliar rupiah).
2. Barang siapa dengan sengaja menyerahkan, menyiarkan, memamerkan, mengedarkan atau menjual kepada umum suatu Ciptaan atau barang hasil pelanggaran Hak Cipta atau Hak Terkait sebagaimana dimaksud pada ayat (1) dipidana dengan pidana penjara paling lama 5 (lima) tahun dan/atau denda paling banyak Rp500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah)

KATA PENGANTAR

Puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas tersusunnya buku referensi yang berjudul *Membaca Gerak Tubuh: Analisis Biomekanik dalam Fisioterapi*. Buku ini hadir untuk memberikan pemahaman mengenai prinsip-prinsip biomekanik dan penerapannya dalam analisis gerak tubuh untuk mendukung praktik fisioterapi. Melalui buku ini, pembaca diharapkan dapat memahami bagaimana pengamatan dan analisis gerak tubuh dapat membantu mendiagnosis masalah muskuloskeletal, merencanakan intervensi terapeutik, dan meningkatkan efektivitas rehabilitasi pasien.

Buku ini ditujukan untuk masyarakat umum agar menjadi bacaan yang mudah dipahami oleh fisioterapis, mahasiswa fisioterapi, tenaga kesehatan, maupun siapa saja yang memiliki minat terhadap ilmu gerak dan rehabilitasi.

Jakarta, Juni 2026

Tim Penyusun

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	iii
DAFTAR ISI.....	iv
Bab 1: Analisis Pengaruh Kompresi pada Tulang Belakang.....	1
1.1 Pendahuluan dan Konsep Dasar Kompresi pada Tulang Belakang.....	1
Bab 2: Analisis Biomekanika Postur Duduk Mahasiswa Fisioterapi saat Belajar di Depan Laptop.....	12
2.1 Analisis Biomekanika Postur Duduk Mahasiswa Fisioterapi Saat Belajar di Depan Laptop.....	12
Bab 3: Analisis Biomekanik Pola Jalan Normal dan Abnormal pada Pasien OA Lutut	25
3.1 Analisis Biomekanik Pola Jalan Normal dan Abnormal pada Pasien OA Lutut	25
Bab 4: Analisis Biomekanik Gerakan Servis pada Atlet Bulutangkis; Implikasi bagi Fisioterapi.....	34
4.1 Konsep Dasar Bulutangkis	34
Bab 5: Analisis Biomekanik pada Flat Foot	47
5.1 Analisi Biomekanik pada Flat Foot.....	47
Bab 6: Analisis Komprehensif Biomekanika Pola Jalan dan Stabilitas Keseimbangan Tubuh.....	61
6.1 Analisis Komprehensif Biomekanik Pola Jalan dan Stabilitas Keseimbangan Tubuh.....	61
Bab 7: Genu Valgus Tinjauan Biomekanik pada Ekstremitas Bawah.....	71
7.1 Genu Valgus Tinjauan Biomekanik Pada Ekstremitas Bawah	71
Bab 8: Analisis Biomekanika pada Genu Varus	82
8.1 Analisis Biomekanuk pada Genu Varus.....	82

Bab 9: Analisis Biomekanik pada Atlit Tennis.....	102
9.1 Analisis Biomekanik Pada Atlit Tennis	102
Bab 10: Analisis Biomekanik pada Atlet Sepak Bola	115
10.1 Analisis Biomekanik Pada Atlet Sepak Bola	115
Bab 11: Analisis Biomekanik pada Atlet Basket.....	124
Bab 12: Analisis Biomekanik Pola Jalan Normal dan Abnormal pada Pasien Osteoarthritis (OA) HIP	133
12.1 Analisis Biomekanik Pola Jalan Normal dan Abnormal pada Pasien Osteoarthritis (OA) HIP.....	133
Profil Penulis	142
Daftar Pustaka.....	155

Bab 1: Analisis Pengaruh Kompresi pada Tulang Belakang

1.1 Pendahuluan dan Konsep Dasar Kompresi pada Tulang Belakang

Kompresi pada tulang belakang merupakan kondisi yang menggambarkan adanya tekanan yang bekerja pada berbagai struktur terkait tulang belakang termasuk vertebra yang membentuk kerangka utama, diskus intervertebralis yang berperan sebagai bantalan antar vertebra, sumsum tulang belakang yang menjadi jalur utama sistem saraf pusat, serta jaringan lunak di sekitarnya seperti otot yang memberikan dukungan dan gerakan, ligamen yang menjaga stabilitas antar tulang, dan saraf yang menghantarkan sinyal sensorik maupun motorik ke seluruh tubuh. Kondisi kompresi pada tulang belakang dapat diklasifikasikan berdasarkan tujuan dan penyebab terjadinya menjadi dua kategori yang sangat berbeda satu sama lain karena memiliki konsekuensi dan penanganan yang tidak sama pula.

DEFINISI KOMPRESI TULANG BELAKANG

Kompresi tidak disengaja atau yang sering disebut sebagai kompresi patologis adalah bentuk tekanan yang muncul secara tidak sengaja akibat berbagai faktor dan menjadi penyebab timbulnya masalah kesehatan pada sistem muskuloskeletal maupun sistem saraf tubuh manusia. Penyebab utama dari kompresi patologis ini sangat beragam mulai dari adanya beban fisik yang terlalu berat yang diberikan pada tulang belakang baik dalam bentuk mengangkat beban berat dengan posisi tubuh yang salah sehingga gaya beban tidak tersebar merata, maupun bekerja dalam posisi membungkuk dalam waktu yang lama sehingga tulang belakang harus menahan tekanan terus menerus tanpa jeda yang cukup. Selain itu posisi tubuh yang tidak tepat dalam aktivitas sehari-hari seperti duduk dengan badan miring ke satu sisi, penggunaan bantal atau alas tidur yang tidak sesuai dengan bentuk tulang belakang, serta kebiasaan tidur dengan posisi yang tidak nyaman juga dapat menyebabkan terjadinya kompresi patologis pada tulang belakang. Kondisi khusus seperti kehamilan terutama pada trimester ketiga juga menjadi faktor risiko karena adanya peningkatan berat badan yang signifikan dan pergeseran pusat gravitasi tubuh ke arah depan sehingga memberikan tekanan tambahan pada bagian vertebra lumbal.

STRUKTUR DAN FUNGSI TULANG BELAKANG

Tulang belakang atau yang secara medis disebut kolumna vertebralis merupakan struktur yang sangat kompleks dan penting bagi tubuh manusia karena terdiri atas tiga puluh tiga vertebra yang

tersusun secara bersegmen mulai dari bagian servikal yang berada di daerah leher, kemudian melanjutkan ke bagian torakal yang berada di daerah dada, bagian lumbal yang berada di daerah pinggang, bagian sakral yang telah menyatu menjadi satu di daerah pantat, hingga bagian koksiks yang berada di ujung paling bawah tulang belakang. Struktur tulang belakang ini memiliki tiga lengkungan fisiologis yang sangat penting untuk menjaga keseimbangan dan fungsi tubuh yaitu lordosis servikal yang berbentuk melengkung ke depan di daerah leher, kifosis torakal yang berbentuk melengkung ke belakang di daerah dada, dan lordosis lumbal yang berbentuk melengkung ke depan di daerah pinggang.



Gambar 1.1 Diagram anatomi susunan tulang belakang manusia beserta jumlah ruasnya. Sumber: Kemendikbud RI Modul Biologi (2020)

Struktur anatomi tulang belakang mencakup berbagai komponen yang saling bekerja sama untuk mendukung fungsi

keseluruhan sistem muskuloskeletal tubuh. Vertebra sebagai unit dasar pembentuk tulang belakang memiliki bagian badan vertebra yang berfungsi sebagai penyangga utama untuk menahan berat badan dan berbagai beban yang diberikan pada tubuh, serta memiliki bagian tulang belakang vertebra yang membentuk saluran tertutup untuk melindungi sumsum tulang belakang dari berbagai bentuk cedera yang mungkin terjadi. Di antara setiap badan vertebra terdapat diskus intervertebralis yang merupakan jaringan lunak yang elastis dan terdiri dari dua bagian utama yaitu anulus fibrosus yang berada di bagian luar dan memiliki struktur yang lebih kaku serta kuat untuk menjaga bentuk diskus, dan nukleus pulposus yang berada di bagian dalam dan memiliki konsistensi yang lebih lunak serta menyerupai gel untuk berperan sebagai peredam kejutan dan membantu menyebarkan beban secara merata pada permukaan articular vertebra. Ligamen adalah struktur jaringan ikat yang padat dan kuat yang menghubungkan setiap vertebra satu sama lain sehingga memberikan dukungan tambahan dan menjaga stabilitas tulang belakang agar tidak terjadi pergeseran yang tidak diinginkan. Otot yang berada di sekitar tulang belakang dibagi menjadi dua kelompok utama yaitu otot dalam seperti multifidus dan transversus abdominis yang berperan penting dalam mendukung stabilitas segmental tulang belakang dengan memberikan dukungan pada setiap bagian vertebra secara individual, dan otot luar seperti erector spinae yang berperan dalam memfasilitasi gerakan besar pada tubuh seperti membungkuk ke depan, membungkuk ke belakang, atau memutar badan. Sumsum tulang belakang yang terletak di dalam

saluran yang dibentuk oleh tulang belakang vertebra merupakan bagian penting dari sistem saraf pusat yang berfungsi sebagai jalur penghubung antara otak dengan seluruh bagian tubuh untuk mengirimkan sinyal sensorik yang memberikan informasi tentang kondisi lingkungan maupun tubuh sendiri, serta sinyal motorik yang mengontrol gerakan setiap bagian tubuh.

MEKANISME BIOMEKANIK KOMPRESI TULANG BELAKANG

Terjadinya kompresi pada tulang belakang merupakan hasil dari gaya tekan aksial yang bekerja sejajar dengan sumbu vertikal tubuh manusia, dimana gaya ini berasal dari berbagai sumber termasuk berat badan tubuh sendiri yang selalu bekerja akibat pengaruh gravitasi bumi, serta berbagai aktivitas fisik yang dilakukan oleh individu sehari-hari yang menambah beban pada tulang belakang. Mekanisme terjadinya kompresi pada tulang belakang dapat dijelaskan secara rinci melalui berbagai tahapan dan faktor yang berkontribusi pada peningkatan tekanan pada struktur tulang belakang. Ketika seseorang berdiri tegak dalam posisi yang benar dan sehat, gaya gravitasi yang bekerja pada bagian kepala, batang tubuh, dan ekstremitas atas seperti lengan dan bahu akan ditransmisikan secara teratur melalui setiap vertebra dan diskus intervertebralis sehingga beban dapat tersebar merata pada seluruh struktur tulang belakang. Namun ketika terdapat perubahan pada posisi tubuh atau adanya penambahan beban eksternal, besarnya gaya kompresi yang bekerja pada tulang belakang dapat meningkat

secara signifikan bahkan hingga sepuluh kali lipat dari kondisi normal seperti yang dijelaskan oleh McGill pada tahun 2016 ketika seseorang mengangkat beban seberat sepuluh kilogram dengan menggunakan posisi tubuh yang salah sehingga gaya momen fleksi yang dihasilkan menjadi sangat besar. Selain itu adanya gaya geser yang bekerja secara mendatar pada permukaan articular vertebra dan gerakan rotasi yang berlebihan juga dapat meningkatkan risiko terjadinya kerusakan pada diskus intervertebralis dan ligamen yang menjaga stabilitas tulang belakang. Besarnya gaya kompresi yang bekerja pada tulang belakang tidak hanya ditentukan oleh satu faktor saja melainkan merupakan hasil dari interaksi berbagai faktor yang saling mempengaruhi satu sama lain. Berat beban yang dikenakan pada tubuh baik dalam bentuk massa tubuh individu sendiri maupun beban eksternal yang dibawa atau diangkat memiliki pengaruh yang sangat besar terhadap besarnya gaya kompresi karena semakin besar massa tubuh seseorang atau semakin berat beban eksternal yang dikenakan, semakin tinggi pula gaya kompresi yang bekerja pada tulang belakang terutama pada segmen lumbal yang menjadi titik tumpu utama berat badan tubuh bagian atas. Selain itu posisi dan postur tubuh yang digunakan dalam melakukan berbagai aktivitas juga memiliki peran yang sangat penting karena postur netral yang menjaga lengkungan fisiologis tulang belakang dapat meminimalkan beban yang bekerja pada setiap struktur tulang belakang, sedangkan posisi tubuh yang tidak benar seperti fleksi berlebihan, ekstensi berlebihan, atau duduk dalam posisi yang tidak ergonomis akan menyebabkan peningkatan tekanan pada struktur

tertentu sehingga meningkatkan risiko terjadinya kerusakan atau nyeri pada tulang belakang.

ANALISIS KINESIOLOGIS TERHADAP KOMPRESI TULANG BELAKANG

Dari perspektif kinesiologi, kompresi pada tulang belakang sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor yang terkait dengan aktivitas otot yang ada di sekitar tulang belakang, koordinasi gerakan yang dilakukan oleh tubuh, serta kemampuan kontrol postural yang dimiliki oleh individu untuk menjaga keseimbangan dan stabilitas tubuh dalam berbagai kondisi. Otot yang berada di sekitar tulang belakang seperti erector spinae yang berperan dalam ekstensi tubuh, multifidus yang berperan dalam stabilitas segmental, transversus abdominis yang berperan dalam memberikan dukungan pada rongga perut dan menjaga stabilitas tulang belakang, serta rectus abdominis yang berperan dalam fleksi tubuh bekerja secara bersama sama untuk menghasilkan gaya penyeimbang terhadap tekanan kompresif yang ditimbulkan oleh pengaruh gravitasi dan berbagai aktivitas fungsional yang dilakukan setiap hari. Meskipun kontraksi otot ini memiliki tujuan utama untuk menjaga stabilitas tulang belakang dan memfasilitasi gerakan tubuh, proses kontraksi otot itu sendiri juga dapat meningkatkan gaya kompresi aksial yang bekerja pada struktur tulang belakang sehingga menambah beban pada vertebra dan diskus intervertebralis. Jenis dan pola gerakan yang dilakukan oleh tubuh juga memiliki pengaruh yang signifikan terhadap besarnya dan distribusi gaya kompresi yang bekerja pada tulang belakang karena

setiap jenis gerakan akan menghasilkan gaya yang berbeda pada struktur tulang belakang. Gerakan fleksi trunkus atau membungkuk ke depan akan menyebabkan peningkatan aktivitas pada otot ekstensor spinal yang bekerja secara eksentrik untuk mengontrol kecepatan gerakan dan menjaga stabilitas tubuh, hal ini secara tidak langsung menambah tekanan pada segmen vertebra L4-L5 dan L5-S1 yang merupakan bagian tulang belakang yang paling sering mengalami masalah akibat beban yang besar. Gerakan ekstensi berlebihan atau membungkuk ke belakang secara berlebihan akan meningkatkan tekanan pada struktur posterior vertebra seperti prosesus artikularis dan ligamen yang berada di bagian belakang tulang belakang sehingga meningkatkan risiko terjadinya ketegangan atau kerusakan pada struktur tersebut. Koordinasi gerakan antara bagian lumbal tulang belakang dan sendi panggul yang dikenal sebagai koordinasi lumbopelvik juga memiliki peran penting karena keterbatasan gerakan pada sendi panggul akan menyebabkan tubuh melakukan fleksi lumbal secara kompensatorik sehingga meningkatkan gaya kompresi pada segmen lumbal tulang belakang. Gerakan rotasi yang dilakukan secara bersamaan dengan gerakan fleksi akan menghasilkan kombinasi gaya kompresi dan gaya geser yang lebih kompleks pada tulang belakang sehingga meningkatkan risiko terjadinya kerusakan pada diskus intervertebralis dan struktur lain yang mendukung stabilitas tulang belakang. Kemampuan kontrol neuromuskular yang dimiliki oleh individu juga mempengaruhi besarnya gaya kompresi yang bekerja pada tulang belakang karena kemampuan tubuh untuk mengaktifkan

otot stabilisator dalam seperti multifidus dengan tepat waktu dan secara efektif akan membantu menjaga stabilitas segmental tulang belakang dengan lebih efisien. Ketika terjadi keterlambatan dalam aktivasi otot stabilisator dalam, tubuh akan menjadi lebih bergantung pada otot superfisial yang bekerja dengan gaya yang lebih besar untuk menjaga stabilitas tubuh, hal ini secara tidak langsung akan meningkatkan gaya kompresi global yang bekerja pada tulang belakang dan menambah beban pada struktur tulang belakang secara keseluruhan.

ANALISIS KOMPRESI BERDASARKAN AKTIVITAS SPESIFIK

Besarnya dan distribusi gaya kompresi yang bekerja pada tulang belakang sangat bervariasi tergantung pada jenis aktivitas yang dilakukan oleh individu dalam kehidupan sehari-hari karena setiap aktivitas akan memberikan beban yang berbeda pada struktur tulang belakang dan membutuhkan respons neuromuskular yang berbeda pula dari tubuh untuk menjaga stabilitas dan fungsi normal. Pada aktivitas berdiri tegak yang merupakan aktivitas dasar yang dilakukan oleh hampir semua orang setiap hari, gaya kompresi yang bekerja pada tulang belakang terutama berasal dari berat badan bagian kepala, batang tubuh, dan ekstremitas atas yang ditransmisikan secara vertikal melalui kolumna vertebralis. Ketika seseorang berdiri dengan postur yang optimal dan benar, pusat gravitasi tubuh akan berada dekat dengan garis tengah tulang belakang sehingga momen fleksi yang dihasilkan menjadi minimal

dan kebutuhan kontraksi otot untuk menjaga stabilitas menjadi relatif rendah, namun ketika postur berdiri tidak benar seperti adanya peningkatan lordosis lumbal atau pergeseran pusat gravitasi ke arah depan akibat penggunaan alas kaki tertentu atau kelemahan pada otot abdominal, gaya kompresi yang bekerja pada tulang belakang akan meningkat terutama pada segmen lumbal bawah yang menjadi titik tumpu utama. Aktivitas duduk yang dilakukan dalam waktu yang lama terutama dalam posisi yang tidak ergonomis memberikan beban kompresi yang lebih besar pada tulang belakang dibandingkan dengan aktivitas berdiri tegak, terutama pada segmen lumbal yang harus menahan berat badan tubuh bagian atas dengan posisi yang kurang mendukung distribusi beban yang merata. Secara biomekanik posisi duduk cenderung mengurangi kurvatura lordosis lumbal yang normal sehingga diskus intervertebralis mengalami peningkatan tekanan intradiskal yang dapat menyebabkan ketidaknyamanan bahkan kerusakan pada jangka panjang. Kondisi ini akan semakin diperburuk ketika posisi duduk dilakukan dalam keadaan membungkuk ke depan atau tanpa adanya dukungan yang memadai pada bagian punggung bawah sehingga tulang belakang harus menahan beban secara tidak merata. Dari perspektif kinesiology aktivitas duduk secara statis dalam waktu yang lama menyebabkan otot postural yang bekerja untuk menjaga stabilitas tulang belakang harus melakukan kontraksi isometrik secara berkepanjangan, hal ini dapat menyebabkan penurunan efisiensi kerja neuromuskular dan meningkatkan kelelahan pada otot sehingga ketika otot mulai kehilangan kemampuan untuk menopang

tulang belakang, struktur pasif seperti diskus intervertebralis dan ligamen akan menanggung beban kompresi yang lebih besar dan meningkatkan risiko timbulnya nyeri pada punggung bawah. Aktivitas membungkuk ke depan baik dalam kondisi statis seperti saat mengambil barang dari lantai dengan posisi membungkuk dalam waktu lama, maupun dalam kondisi dinamis seperti saat melakukan pekerjaan yang membutuhkan gerakan membungkuk berulang kali secara signifikan meningkatkan gaya kompresi dan momen fleksi yang bekerja pada tulang belakang. Pada posisi fleksi trunkus pusat gravitasi tubuh akan bergeser menjauhi poros utama tulang belakang sehingga otot ekstensor punggung harus berkontraksi dengan kekuatan yang lebih besar untuk mempertahankan keseimbangan tubuh dan mencegah terjadinya jatuh atau gerakan yang tidak terkendali. Kontraksi otot ekstensor punggung yang lebih kuat ini akan menghasilkan gaya tekan tambahan pada diskus intervertebralis sehingga meningkatkan tekanan pada struktur tersebut. Dari perspektif biomekanik kombinasi antara gaya kompresi yang bekerja secara vertikal dan gaya geser yang bekerja secara mendatar pada posisi fleksi akan meningkatkan tekanan pada bagian posterior anulus fibrosus yang merupakan bagian diskus intervertebralis yang lebih rentan terhadap kerusakan.

Bab 2: Analisis Biomekanika Postur Duduk Mahasiswa Fisioterapi saat Belajar di Depan Laptop

2.1 Analisis Biomekanika Postur Duduk Mahasiswa Fisioterapi Saat Belajar di Depan Laptop

Perkembangan teknologi digital dalam dunia pendidikan kesehatan telah membawa perubahan signifikan terhadap pola belajar mahasiswa, khususnya mahasiswa fisioterapi. Laptop kini menjadi perangkat utama dalam penyusunan laporan klinis, analisis jurnal ilmiah, pembelajaran anatomi digital, hingga pelaksanaan kuliah daring. Meskipun memberikan efisiensi dan fleksibilitas, penggunaan laptop dalam durasi panjang menimbulkan konsekuensi biomekanik yang tidak dapat diabaikan. Secara desain, laptop menyatukan layar dan keyboard dalam satu struktur tetap. Konfigurasi ini memaksa pengguna untuk melakukan kompromi postural: apabila keyboard ditempatkan pada posisi yang nyaman bagi ekstremitas atas, maka layar cenderung berada terlalu rendah

bagi pandangan mata. Sebaliknya, jika layar disesuaikan dengan tinggi mata, posisi pergelangan tangan dan bahu menjadi tidak ergonomis. Ketidaksesuaian ini memicu adaptasi postural yang dalam jangka panjang dapat berkembang menjadi gangguan muskuloskeletal. Mahasiswa fisioterapi sebagai calon tenaga profesional di bidang gerak seharusnya memiliki kesadaran postural yang baik. Namun, tuntutan akademik, durasi belajar 8–10 jam per hari, serta kebiasaan belajar di lingkungan yang tidak ergonomis (kafe, tempat tidur, lantai, atau meja tanpa sandaran) meningkatkan risiko terjadinya deviasi postur. Kondisi ini berpotensi menimbulkan *Musculoskeletal Disorders* (MSDs) seperti nyeri leher, ketegangan bahu, dan nyeri punggung bawah bahkan sejak semester awal perkuliahan. Oleh karena itu, diperlukan analisis biomekanika yang komprehensif untuk memahami bagaimana perubahan kinematika dan kinetika tubuh selama penggunaan laptop dapat memengaruhi integritas sistem muskuloskeletal mahasiswa fisioterapi. Kinematika Segmental pada Penggunaan Laptop Penggunaan laptop memicu perubahan kurvatura fisiologis yang maladaptif dalam satu rantai kinetik tertutup mulai dari pelvis hingga kranium.

1. Segmen Servikal dan Kraniofasial

Posisi layar yang rendah menginduksi Forward Head Posture (FHP), yang ditandai dengan disosiasi gerak: ekstensi berlebih pada servikal atas (C1-C2) untuk menjaga pandangan horizontal, serta fleksi menetap pada servikal bawah (C4-C7). Secara arthrokinematika, terjadi anterior gliding pada facet joint yang

meningkatkan tegangan regang (tensile stress) pada ligamentum nuchae dan ligamentum longitudinal posterior.

2. Segmen Torakal dan Skapulotorakal

Beban statis kranial yang berpindah ke anterior memicu peningkatan sudut kifosis torakal. Hal ini berdampak pada:

- a. Restriksi Respirasi: Posisi membungkuk menekan kavitas toraks, menghambat ekspansi kostae, dan menurunkan efisiensi otot diafragma.
- b. Mekanika Skapula: Terjadi protraksi dan abduksi skapula akibat pemendekan adaptif m. pectoralis minor dan m. serratus anterior, yang secara klinis dikenal sebagai Round Shoulder Posture.

3. Segmen Lumbal dan Pelvis

Ketiadaan dukungan lumbal memaksa pelvis berotasi ke arah posterior (*posterior pelvic tilt*), yang mengakibatkan pendataran (*flattening*) lordosis lumbal. Hal ini memindahkan aksis pembebanan dari facet joint ke arah kolumna anterior (korpus vertebra dan diskus), meningkatkan tekanan hidrostatik pada nukleus pulposus.

Kinetika: Distribusi Gaya dan Beban Kerja Otot Pergeseran *Line of Gravity* (LoG) ke arah anterior secara signifikan memperpanjang external moment arm pada sendi-sendi tulang belakang.

1. Peningkatan Beban Efektif: Penelitian menunjukkan bahwa pada posisi netral (0°), beban kepala adalah sekitar 4,5-5,4 kg. Namun,

pada fleksi 15° beban meningkat menjadi ± 12 kg, dan pada fleksi ekstrem 60° mencapai ± 27 kg.

2. Torsi Internal: Karena otot ekstensor memiliki lengan momen internal yang pendek, mereka harus menghasilkan gaya kontraksi 3 hingga 5 kali lipat berat kepala untuk menjaga ekuilibrium.
3. Iskemia dan Kelelahan: Kontraksi isometrik terus-menerus meningkatkan tekanan intramuskular yang menghambat mikrosirkulasi, memicu kelelahan pada unit motorik tipe I, dan mempercepat fenomena creep.

Anatomi Terapan dan Prinsip Biomekanika Duduk

Tulang belakang manusia berfungsi sebagai penyangga beban kompleks yang terdiri dari Functional Spinal Unit (FSU) dengan kurvatura sagital normal berupa lordosis servikal (30° - 40°), kifosis torakal (40°), dan lordosis lumbal (45° - 50°). Dalam posisi duduk, keseimbangan tercapai melalui interaksi gaya eksternal (gravitasi) dan gaya internal (kontraksi otot serta tegangan ligamen).

1. Hukum Tuas pada Leher: Sendi atlanto-oksipital beroperasi sebagai tuas kelas I, di mana pusat massa kepala yang jatuh di anterior meatus auditorius eksternus bertindak sebagai beban yang harus diimbangi oleh kontraksi otot ekstensor leher.
2. Dinamika Diskus: Diskus intervertebralis bertindak sebagai peredam kejut viskoelastis; namun, posisi membungkuk menciptakan tekanan asimetris yang mendorong nukleus pulposus ke arah posterior, meningkatkan risiko mikrotrauma.

3. *Base of Support* (BoS): Saat duduk, BoS dibentuk oleh tuberositas ischiadicum dan permukaan paha, di mana postur ideal tercapai jika *Center of Gravity* (CoG) jatuh tepat di tengah BoS.



Gambar 2.1 Postur tubuh seorang wanita saat duduk dan mengetik menggunakan laptop.

Sumber: Shutterstock Stock Photo (2021)

Anatomi Terapan Tulang Belakang dan Segmen Fungsional

Tulang belakang merupakan struktur penopang utama tubuh sekaligus pelindung medula spinalis. Secara biomekanik, tulang belakang tersusun atas unit fungsional yang disebut Functional Spinal Unit (FSU), terdiri dari dua vertebra yang berdekatan, diskus intervertebralis, ligamen, serta sendi faset.

a. **Segmen Servikal dan Craniofasial**

Segmen servikal memiliki mobilitas tinggi dan bertanggung jawab terhadap pergerakan kepala. Kepala manusia memiliki

berat rata-rata 4–6 kg. Dalam posisi netral, gaya gravitasi terdistribusi secara seimbang melalui korpus vertebra. Namun, saat terjadi fleksi servikal (Forward Head Posture), beban kompresi meningkat secara eksponensial seiring bertambahnya sudut fleksi. Perubahan sudut kraniovertebral (Craniovertebral Angle/CV Angle) menjadi indikator objektif dalam menilai derajat deviasi kepala ke anterior. Semakin kecil sudut ini, semakin besar beban yang harus ditahan oleh otot ekstensor leher.

b. Segmen Torakal dan Kompleks Skapulotorakal

Segmen torakal memiliki kecenderungan membentuk kifosis fisiologis. Pada penggunaan laptop yang tidak ergonomis, kifosis torakal meningkat akibat fleksi batang tubuh. Hal ini menyebabkan protraksi skapula serta pemendekan otot pectoralis minor. Kondisi ini memengaruhi mekanika scapulohumeral rhythm dan meningkatkan beban kerja pada upper trapezius serta levator scapulae. Dalam jangka panjang, dapat terjadi pola disfungsi yang dikenal sebagai Upper Crossed Syndrome.

c. Segmen Lumbal dan Pelvis

Segmen lumbal berfungsi sebagai penopang beban tubuh bagian atas. Posisi duduk statis dalam waktu lama menyebabkan posterior pelvic tilt dan hilangnya lordosis lumbal. Tekanan intradiskal meningkat, terutama pada segmen L4-L5 dan L5-S1. Distribusi gaya kompresi yang tidak merata mempercepat

degenerasi diskus intervertebralis dan memicu nyeri punggung bawah.

Analisis Kinematika dan Kinetika Postur Duduk

a. Pergeseran Line of Gravity (LoG)

Dalam posisi duduk ideal, Line of Gravity melewati tragus telinga, bahu, dan panggul. Pada Forward Head Posture, garis gravitasi bergeser ke anterior sehingga meningkatkan external moment arm terhadap sendi servikal. Akibatnya, otot-otot ekstensor leher bekerja lebih keras secara isometrik untuk menahan kepala agar tidak jatuh ke depan. Kondisi ini meningkatkan konsumsi energi dan memicu kelelahan otot.

b. Hukum Tuas dan Beban Servikal

Kepala bertindak sebagai beban pada sistem tuas kelas pertama. Semakin jauh kepala bergerak ke depan, semakin panjang moment arm yang terbentuk. Peningkatan sudut fleksi 15° , 30° , hingga 60° dapat melipatgandakan beban efektif pada segmen servikal. Beban yang berulang menyebabkan mikrotrauma pada ligamen posterior serta meningkatkan risiko degenerasi diskus.

c. Distribusi Tekanan Intradiskal

Penelitian biomekanik menunjukkan bahwa tekanan intradiskal pada posisi duduk lebih tinggi dibandingkan berdiri. Fleksi batang tubuh meningkatkan tekanan hingga lebih dari 150% dibanding posisi netral. Kombinasi fleksi servikal dan torakal memperparah distribusi gaya kompresi serta tegangan geser (shear force) pada segmen lumbal bawah. Fenomena Mechanical Creep dan Adaptasi Viskoelastis. Jaringan ikat seperti ligamen

dan diskus memiliki sifat viskoelastis. Ketika diberi beban statis dalam waktu lama, terjadi fenomena *mechanical creep*, yaitu pemanjangan progresif jaringan akibat deformasi viskoelastis.

Dalam konteks penggunaan laptop:

- a. Ligamen posterior servikal mengalami peregangan kronis
- b. Annulus fibrosus mengalami tekanan tidak merata
- c. Stabilitas pasif tulang belakang menurun

Akibatnya, sistem otot harus bekerja lebih keras untuk menggantikan stabilitas pasif yang berkurang.

Teori Ketidakseimbangan Otot: Upper Crossed Syndrome (UCS)

Berdasarkan konsep Vladimir Janda, penggunaan laptop jangka panjang memicu pola disfungsi UCS yang melibatkan ketidakseimbangan antara kelompok otot tonik dan fasik.

- a. Otot Hipertonus (Tegang/Pendek): Meliputi m. pectoralis major/minor, m. upper trapezius, dan m. levator scapulae.
- b. Otot Terinhibisi (Lemah/Panjang): Meliputi deep neck flexors (longus colli & capitis), m. serratus anterior, dan m. lower trapezius.
- c. Dampak Fungsional: Ketidakseimbangan ini mengubah posisi skapula (protraksi dan winging), mengganggu ritme skapulohumeral, dan meningkatkan risiko spondilosis servikal dini akibat gaya geser (shear force) pada vertebra servikal bawah.

Dampak terhadap Mekanika Respirasi

Kifosis torakal dan protraksi kepala menghambat ekspansi sangkar dada. Diafragma tidak dapat berkontraksi optimal sehingga tubuh beralih ke pola pernapasan dada dangkal (*apical breathing*).

Otot aksesori seperti *sternocleidomastoideus* dan *scalene* bekerja berlebihan, menyebabkan: Peningkatan *work of breathing*, Kelelahan umum, Penurunan konsentrasi, Risiko *Thoracic Outlet Syndrome* Kondisi ini menunjukkan bahwa gangguan postural tidak hanya berdampak pada sistem muskuloskeletal, tetapi juga sistem respirasi.

Penilaian Risiko Ergonomis (RULA dan Parameter Objektif)

Metode *Rapid Upper Limb Assessment (RULA)* digunakan untuk mengevaluasi beban postural pada ekstremitas atas, leher, dan batang tubuh. Skor 5–6 menunjukkan risiko sedang yang memerlukan perbaikan segera. Skor 7 menunjukkan risiko tinggi dan memerlukan intervensi langsung. Parameter lain yang dapat digunakan: Sudut *Craniovertebral*, Derajat fleksi trunk, Durasi paparan statis, Evaluasi fotogrametri postural. Implikasi Jangka Panjang terhadap Kesehatan Mahasiswa apabila deviasi postural dibiarkan, konsekuensi jangka panjang meliputi:

- a. Degenerasi diskus intervertebralis
- b. Nyeri leher kronis
- c. Nyeri punggung bawah mekanik
- d. Penurunan kapasitas vital paru
- e. Gangguan konsentrasi dan produktivitas

Sebagai calon tenaga kesehatan, mahasiswa fisioterapi harus menjadi contoh dalam penerapan prinsip ergonomi.

A. Rekomendasi Intervensi dan Modifikasi Ergonomis

1. Modifikasi Lingkungan Menggunakan laptop stand: Menggunakan dudukan laptop membantu menempatkan layar laptop sejajar dengan mata, yang menjaga postur leher tetap netral dan mengurangi risiko nyeri leher dan bahu akibat menunduk terlalu lama.
2. Menggunakan keyboard dan mouse eksternal: Menggunakan keyboard dan mouse eksternal memungkinkan tangan dan pergelangan tetap berada dalam posisi ergonomis yang nyaman, dengan siku beristirahat di sisi tubuh sekitar sudut 90 derajat, yang membantu mengurangi ketegangan pada pergelangan tangan dan bahu selama sesi kerja yang Panjang.
3. Kursi dengan sandaran lumbal: Kursi dengan dukungan punggung bawah membantu menjaga lengkungan alami tulang belakang bagian bawah, yang menjaga tubuh dalam posisi duduk yang baik dan mencegah nyeri punggung bawah akibat duduk terlalu lama tanpa bergerak.
4. Tinggi meja sejajar siku: Tinggi meja disesuaikan dengan level siku, sehingga saat duduk dan bekerja, lengan bisa tetap dalam posisi nyaman tanpa perlu mengangkat atau menurunkan bahu terlalu banyak, yang dapat membantu mengurangi ketegangan otot di bahu dan leher.

B. Intervensi Fisioterapi

1. Latihan deep cervical flexor: Latihan untuk fleksor serviks dalam bertujuan untuk mengaktifkan dan memperkuat otot fleksor serviks bagian dalam, seperti longus colli dan longus capitis. Latihan ini membantu meningkatkan kontrol postur kepala, mengurangi postur kepala maju, dan menurunkan ketegangan pada otot leher bagian belakang.
2. Strengthening lower trapezius dan serratus anterior: Memperkuat trapezius bagian bawah dan serratus anterior membantu meningkatkan stabilitas tulang belikat, memperbaiki pola gerakan bahu, dan mengurangi penggunaan berlebihan otot trapezius bagian atas, yang pada gilirannya membantu menjaga keseimbangan otot bahu dan bekerja dengan baik.
3. Stretching pectoralis dan upper trapezius: Meregangkan otot pectoralis dan trapezius bagian atas membantu mengurangi kekakuan atau pemendekan otot akibat postur membungkuk dan elevasi bahu berlebihan. Ini meningkatkan keselarasan postur tubuh, meningkatkan fleksibilitas, dan membuat gerakan lebih nyaman.
4. Latihan pernapasan diafragma: Latihan pernapasan diafragma, yang fokus pada penggunaan otot diafragma secara efektif saat bernafas, membantu mengurangi penggunaan berlebihan otot pernapasan tambahan, meningkatkan relaksasi, dan mendukung pernapasan yang lebih baik.

C. Prinsip Break Aktif

1. Istirahat setiap 30–45 menit: Istirahatlah setiap 30 hingga 45 menit dengan berhenti bekerja sejenak, memberi otot dan sendi Anda waktu untuk beristirahat. Ini membantu mengurangi kelelahan otot, meningkatkan sirkulasi darah, dan mencegah ketegangan akibat duduk di posisi yang sama terlalu lama.
2. Peregangan 3–5 menit: Lakukan peregangan lembut dan terkontrol selama 3 hingga 5 menit pada leher, bahu, punggung, dan pergelangan tangan untuk membantu mengurangi kekakuan, menjaga fleksibilitas otot, serta meningkatkan kenyamanan dan kesiapan untuk kembali beraktivitas.
3. Variasi posisi duduk dan berdiri: Mengubah posisi duduk dan berdiri secara teratur, serta sering menyesuaikan postur kerja, membantu menyebarkan berat tubuh secara merata alih-alih menekannya pada satu area saja. Ini dapat membantu menjaga kesehatan tulang belakang, mengurangi tekanan berlebih pada punggung bawah, dan meningkatkan kekuatan keseluruhan saat bekerja.

Penilaian Objektif dan Intervensi Deteksi dini risiko cedera dapat dilakukan melalui beberapa parameter klinis:

1. Sudut Kraniovertebral (CV Angle): Pengukuran sudut antara prosesus spinosus C7 dan tragus telinga. Nilai CV Angle $<50^\circ$

berkorelasi dengan risiko tinggi nyeri leher kronis dan gangguan mekanik otot pernapasan.

2. Metode RULA (*Rapid Upper Limb Assessment*): Digunakan untuk mengevaluasi beban kerja muskuloskeletal. Pada pengguna laptop, skor akhir sering kali mencapai level risiko 3 atau 4 (skor 5-7), yang menunjukkan perlunya investigasi dan perubahan segera.
3. Rekomendasi: Intervensi meliputi edukasi postural awareness, penggunaan laptop stand untuk menyesuaikan tinggi layar, latihan spesifik seperti *Chin Tuck Exercise* untuk memperkuat fleksor leher dalam, dan modifikasi lingkungan belajar yang ergonomis.

Bab 3: Analisis Biomekanik

Pola Jalan Normal dan

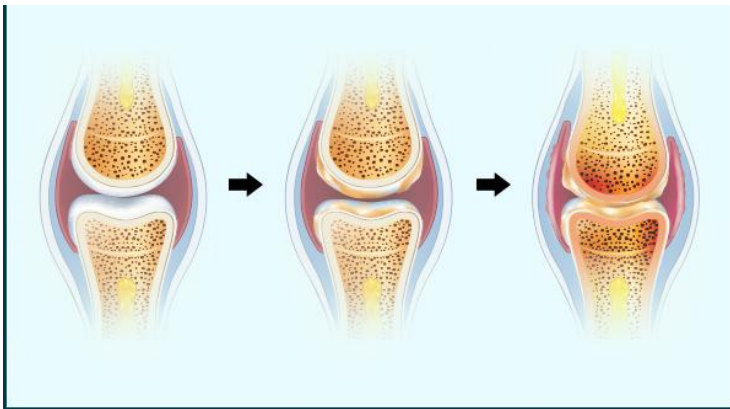
Abnormal pada Pasien OA

Lutut

3.1 Analisis Biomekanik Pola Jalan Normal dan Abnormal pada Pasien OA Lutut

Osteoarthritis (OA) lutut saat ini telah menjadi fenomena kesehatan global yang tidak hanya dipandang sebagai proses penuaan alami, tetapi sebagai penyakit sendi degeneratif kompleks yang menjadi beban utama bagi sistem kesehatan di seluruh dunia. Seiring dengan tren peningkatan populasi lanjut usia dan perubahan gaya hidup sedenter, prevalensi osteoarthritis terus melonjak, membawa dampak signifikan pada disabilitas fisik dan penurunan produktivitas. Penyakit ini melibatkan degradasi progresif pada kartilago artikular, renovasi tulang subkondral, dan inflamasi sinovial derajat rendah. Namun, di balik kerusakan seluler tersebut, terdapat perubahan sistemik yang masif pada seluruh rantai kinetik ekstremitas bawah yang sering kali luput dari perhatian klinis awal. Respons tubuh terhadap nyeri dan ketidakstabilan ini menciptakan fenomena baru dalam bentuk pola jalan kompensatoris. Secara

kinematika, penderita osteoarthritis secara naluriah memodifikasi parameter langkah mereka guna meminimalkan ketidaknyamanan. Modifikasi ini meliputi pemendekan jarak langkah (*stride length*) secara drastis serta peningkatan durasi pada fase double support (waktu di mana kedua kaki menapak di tanah). Meskipun adaptasi ini memberikan rasa aman sementara dan meningkatkan stabilitas statis, ia justru mengurangi efisiensi gerak dinamis. Pasien cenderung berjalan dengan lutut yang lebih kaku, yang secara teknis disebut sebagai penurunan amplitudo fleksi lutut pada fase tumpu. Tubuh melakukan mekanisme kompensasi dengan memperpendek langkah (*stride length*) dan meningkatkan durasi double support untuk menjaga stabilitas. Namun, strategi ini mengakibatkan peningkatan kekakuan sendi (*joint stiffness*) dan penurunan efisiensi energi yang justru menciptakan beban statis lebih tinggi pada permukaan sendi tertentu.



Gambar 3.1 Ilustrasi medis yang menunjukkan tahapan kerusakan sendi pada penyakit osteoarthritis (pengapuran sendi).

Sumber: VectorStock Medical Illustration (2023)

Strategi Kompensasi dan Stabilitas Dinamis

Pasien osteoarthritis sering kali mengompensasi hilangnya panjang langkah dengan meningkatkan frekuensi langkah (cadence) untuk mempertahankan kecepatan berjalan tertentu. Namun, secara fisiologis, berjalan dengan langkah pendek namun cepat sangat tidak efisien. Hal ini meningkatkan frekuensi kontraksi otot secara repetitif yang berujung pada akumulasi laktat dan kelelahan otot dini. Akibatnya, pasien OA cenderung membatasi jarak tempuh aktivitas harian mereka, yang pada jangka panjang memicu atrofi otot disuse. Analisis pada fase *double support* dan kontrol stabilitas postural menemukan suatu hal yang krusial dalam analisis kinematika osteoarthritis yaitu perpanjangan durasi fase *double support* yang berada pada periode di mana kedua kaki menapak pada permukaan secara simultan. Pada individu sehat, fase ini berlangsung singkat untuk menjaga momentum, namun pada pasien OA, fase ini menjadi "jangkar" utama keselamatan. Sedangkan pada saat distribusi beban dan penurunan laju pembebanan (loading rate) terdapat perpanjangan fase *double support* memungkinkan tubuh untuk memindahkan berat badan secara lebih gradual dari satu kaki ke kaki lainnya. Hal ini menurunkan loading rate atau kecepatan hantaman gaya pada lutut yang sakit saat heel strike. Dengan mempertahankan kontak dua titik, tekanan puncak (*peak pressure*) pada satu lutut dapat didistribusikan kembali ke kaki kontralateral, memberikan waktu bagi sistem neuromuskular untuk melakukan penyesuaian posisi sendi yang paling minim nyeri. Kinesiophobia dan Gangguan Proyeksi Center of Pressure (CoP) terjadi

peningkatan durasi double support juga merupakan manifestasi psikofisiologis dari kinesiphobia. Pasien merasa tidak aman saat berada dalam fase single limb stance karena adanya instabilitas lateral. Analisis gerak menunjukkan bahwa pada fase ini, proyeksi Center of Pressure (titik pusat tekanan kaki) penderita OA cenderung berayun secara tidak stabil (sideways swaying). Gangguan pada Fase Ayun (Swing Phase) terjadi keterbatasan dalam kinematika lutut juga berdampak signifikan pada fase ayun karena adanya nyeri, amplitudo fleksi lutut saat mengayun berkurang drastis. Lalu pada mekanisme circumduction terjadi untuk menghindari jari kaki tersangkut di lantai (karena lutut tidak menekuk cukup tinggi), pasien osteoarthritis sering mengayunkan kaki mereka memutar ke arah luar (circumduction). Gerakan ini menciptakan beban puntir (torsional load) dan gaya geser pada sendi panggul. Hal ini menjelaskan korelasi klinis yang tinggi antara penderita OA lutut kronis dengan munculnya radang sendi panggul (hip osteoarthritis) di masa depan akibat overuse mekanis. Beban pada pergelangan kaki membuat kompensasi terjadi peningkatan beban puntir atau torsi pada sendi pergelangan kaki dan panggul, yang memicu erosi pada sendi-sendi tersebut. Hal ini membuktikan bahwa osteoarthritis lutut adalah gangguan sistemik pada seluruh ekstremitas bawah, bukan hanya masalah sendi yang terisolasi.

Analisis Kinematika 3D dan Dinamika Knee Adduction Moment (KAM)

Penerapan teknologi analisis gerak tiga dimensi (3D *Gait Analysis*) sebagaimana diuraikan dalam studi MDPI Diagnostics memberikan dimensi baru yang jauh lebih presisi dalam memahami patofisiologi Osteoarthritis (OA) lutut. Berbeda dengan analisis visual konvensional atau radiografi statis, analisis 3D menggunakan sistem penangkapan gerak optoelektronik yang mampu membedah kinetika dan kinematika pada bidang sagital, frontal, dan transversal secara real-time. Teknologi ini mengungkap bahwa OA bukan sekadar penyakit penipisan sendi, melainkan hasil dari anomali mekanis persisten yang menjadi pemicu utama progresi penyakit, terutama pada kompartemen medial yang menanggung beban paling berat. Salah satu temuan paling krusial adalah reduksi signifikan pada amplitudo fleksi lutut selama fase tumpu (*stance phase*), yang secara klinis diidentifikasi sebagai kekakuan sendi fungsional (*functional stiffness*). Pasien OA memiliki kecenderungan biomekanik untuk berjalan dengan lutut yang relatif lurus atau hanya fleksi minimal. Fenomena ini dipicu oleh strategi sistem saraf pusat yang melakukan *muscle co-contraction*. Dalam kondisi ini, otot *quadriceps* (ekstensor) dan hamstrings (fleksor) diaktivasi secara simultan dengan intensitas tinggi. Tujuannya adalah untuk menciptakan stabilitas internal semu pada sendi yang dirasa tidak stabil secara struktural. Konsekuensi Tekanan Intra-artikular yang Ekstrem memberikan rasa aman psikologis dan mengurangi sensasi lutut yang "lemas" (*giving way*), secara fisik ia menciptakan tekanan

hidrostatik yang destruktif di dalam kapsul sendi. Karena mekanisme "pegas" lutut tidak berfungsi, gaya reaksi tanah (*ground reaction force*) tidak diserap oleh otot melalui kontraksi eksentrik, melainkan ditransmisikan sebagai impak vibrasi frekuensi tinggi. Vibrasi ini secara mikroskopis merusak matriks ekstraseluler kartilago dan memicu degenerasi pada tulang subkondral yang tidak lagi terlindungi. Dinamika *Knee Adduction Moment* (KAM) sebagai Prediktor Erosi pada lutut dimana dapat dijadikan sebagai parameter kinetik "*golden standar*" untuk memprediksi tingkat keparahan *osteoarthritis* medial. *Knee Adduction Moment* mengukur besarnya torsi atau gaya putar yang mendorong lutut ke arah varus (keluar) selama fase berjalan. Peningkatan knee adduction moment sering kali dibarengi dengan rotasi internal tibia yang berlebihan terhadap femur. Hal ini menciptakan gaya geser (*shearing force*) tambahan pada kartilago. Gaya geser ini jauh lebih merusak daripada beban kompresi murni karena ia merobek ikatan lateral antara serat kolagen, mempercepat proses fibrilasi dan pengelupasan permukaan sendi. Pasien *osteoarthritis* terjadi kehilangan presisi dalam merasakan sudut sendi mereka sendiri. Hal ini mengakibatkan kegagalan mekanisme pre-activation atau feed-forward control, di mana seharusnya otot-otot di sekitar lutut melakukan pra-kontraksi sepersekian detik sebelum tumit menyentuh tanah untuk menyiapkan stabilitas. Mekanisme proses saat berjalan, beban tubuh dimulai dari tumit (*heel strike*) yang menciptakan beban impulsif tinggi yang merambat lurus ke sendi lutut. Pada retrowalking, kontak dimulai dari jari kaki menuju tumit (*toe-to-heel strike*). Perubahan

kinematika ini secara drastis menurunkan laju pembebanan (*loading rate*) pada sendi lutut. Selain itu, posisi pergelangan kaki yang lebih plantar-flexed saat kontak awal membantu menyerap energi melalui kerja otot betis sebelum mencapai lutut. Stimulasi neuroplastisitas dan biofeedback pada gangguan pola jalan terjadi karena pada saat jalan mundur bukan merupakan pola gerakan otomatis yang tersimpan dalam *Central Pattern Generator* (CPG) di medula spinalis, otak dipaksa untuk berada dalam kondisi kewaspadaan kognitif tinggi. Proses ini menstimulasi pembentukan jalur saraf baru (*synaptogenesis*) dan memperbaiki sensitivitas mekanoreseptor sendi. Secara neurofisiologis, ini memberikan input sensorik baru yang dapat mengesampingkan sinyal nyeri (berdasarkan *Gate Control Theory*), yang secara efektif memulihkan kesadaran tubuh terhadap posisi sendi lutut secara akurat. Pasien dengan lutut yang kaku dan nyeri cenderung menghindari fleksi lutut saat fase ayun agar kaki tidak tersangkut di lantai. Sebagai gantinya, mereka melakukan gerakan hip hiking (mengangkat panggul tinggi) atau circumduction (mengayun kaki melingkar ke samping). Gerakan asimetris ini menciptakan beban torsi dan gaya geser (*shearing force*) yang ekstrem pada sendi sakroiliaka dan diskus intervertebralis lumbal. Inilah alasan mengapa pasien osteoarthritis lutut kronis hampir selalu berakhir dengan komplikasi berupa herniasi diskus atau *low back pain* (LBP) kompensatoris yang sering kali lebih meningkatkan tingkat disabilitas dari pada hanya nyeri lutut itu sendiri. Pasien melakukan kontraksi berlebihan pada otot quadratus lumborum di sisi ipsilateral untuk mengangkat panggul ke

arah kranial. Secara biomekanik, strategi ini sangat menguras energi karena memaksa otot punggung bawah melakukan tugas yang seharusnya merupakan hasil dari momentum ayunan lutut. Beban asimetris ini adalah penyebab utama mengapa pasien OA lutut sering menderita nyeri punggung bawah (*low back pain*) unilateral. Kekakuan lutut juga dapat memberikan penekanan pada sendi pergelangan kaki sehingga memberikan kompensasi secara berlebihan pada gerakan dorsiflexi untuk menjaga keseimbangan. Hal ini mengubah distribusi tekanan pada telapak kaki, yang seringkali memicu peradangan pada jaringan ikat kaki seperti plantar fasciitis atau tendinopati achilles akibat tarikan yang tidak fisiologis.

Analisis Fase Ayun (*Swing Phase*)

Selain fase tumpu (*stance phase*) yang menjadi fokus utama dalam banyak studi biomekanika, gangguan pada fase ayun (*swing phase*) memberikan kontribusi yang sama besarnya terhadap penurunan kualitas mobilitas penderita osteoarthritis. Analisis kinematika modern menunjukkan bahwa keterbatasan gerak pada osteoarthritis bersifat sirkular; ketidakmampuan sendi lutut untuk bergerak bebas selama fase ayun akan memicu serangkaian kompensasi mekanis. Kegagalan *initial contact* pada pasien osteoarthritis sering kehilangan fase heel strike yang normal. Karena tungkai bawah tidak diekstensi secara penuh di akhir fase ayun, kaki cenderung mendarat dalam posisi datar (*flat foot strike*) atau bahkan *mid-foot strike*. Secara mekanika jalan, ini berarti hilangnya

mekanisme heel rocker, yaitu kemampuan tumit untuk meredam energi tumbukan secara progresif.

Bab 4: Analisis Biomekanik

Gerakan Servis pada Atlet

Bulutangkis; Implikasi bagi

Fisioterapi

4.1 Konsep Dasar Bulutangkis

Bulu tangkis adalah olahraga raket yang membutuhkan kombinasi keterampilan teknis, kondisi fisik, dan biomekanik yang efisien. Setiap teknik bulu tangkis membutuhkan koordinasi kompleks antara sistem saraf dan sistem muskuloskeletal, sehingga gerakan yang sukses tidak hanya bergantung pada penguasaan teknik tetapi juga pada kemampuan fisik atlet untuk menghasilkan dan mengendalikan kekuatan secara efisien. Dalam konteks ini, servis memainkan peran kunci karena memulai permainan dan dapat memberikan keuntungan taktis kepada pemain jika dieksekusi dengan keterampilan teknis yang baik. Servis adalah pukulan dasar dan strategis dalam bulu tangkis yang menandai awal setiap reli. Tidak seperti olahraga raket lainnya seperti tenis atau tenis meja, dalam bulu tangkis, servis harus dilakukan dari bawah, dengan kok berada di bawah pinggang pemain saat bersentuhan dengan raket. Aturan ini memberikan servis bulu tangkis gerakan biomekanik yang

khusus dan unik. Meskipun terlihat sederhana, servis yang efektif membutuhkan koordinasi neuromuskular yang kompleks dan presisi tinggi dalam gerakan. Servis backhand pendek adalah teknik servis yang paling dominan yang digunakan dalam bulu tangkis modern, terutama di nomor ganda dan tingkat lanjut. Tujuan dari servis ini adalah untuk mengarahkan kok agar melewati net dengan sangat dekat dan mendarat di depan lapangan lawan, sehingga menyulitkan lawan untuk meluncurkan serangan langsung. Melakukan servis backhand pendek membutuhkan tingkat akurasi, kontrol, dan stabilitas yang tinggi. Kesalahan kecil dalam kekuatan, sudut, atau waktu dapat menyebabkan kok terbang terlalu tinggi, terlalu jauh, atau gagal melewati net. Oleh karena itu, kualitas teknik servis backhand pendek sangat dipengaruhi oleh kondisi fisik atlet, terutama kekuatan otot dan koordinasi.



Gambar 4.1 Ilustrasi gerakan beruntun yang menunjukkan teknik dasar pukulan raket dalam olahraga bulu tangkis.

Sumber: Kemendikbud RI Buku PJOK (2019)

Penerapan Biomekanika dalam Permainan Bulutangkis

Pasien Biomekanika dalam bulu tangkis adalah studi tentang bagaimana tubuh manusia bergerak dengan menerapkan prinsip-prinsip mekanika. Biomekanika membantu menjelaskan bagaimana otot, tulang, dan persendian bekerja bersama untuk menciptakan gerakan yang efektif dan efisien. Dengan menggunakan biomekanika, teknik bermain dapat dianalisis, memungkinkan atlet untuk melakukan gerakan dengan akurasi dan kontrol yang lebih besar. Selain itu, analisis biomekanik juga mencakup pengkajian gaya, momentum, keseimbangan, serta koordinasi antarsegmen tubuh dalam menghasilkan suatu gerakan olahraga. Dalam bulu tangkis, setiap teknik dasar, seperti servis, smash, clearing, dan drop kok, melibatkan koordinasi berbagai bagian tubuh. Bagaimana posisi tubuh, sudut persendian, dan kecepatan gerakan semuanya memengaruhi kualitas pukulan Anda. Biomekanika menunjukkan bahwa keberhasilan suatu teknik bukan hanya tentang kekuatan, tetapi juga tentang sudut gerakan yang tepat dan urutan bagian tubuh yang benar, yang memastikan transfer daya terbaik ke raket. Prinsip rantai kinetik (kinetic chain) menjelaskan bahwa energi gerak dihasilkan secara berurutan dari bagian tubuh bawah ke atas sehingga menghasilkan pukulan yang lebih efisien dan maksimal. penggunaan biomekanika dalam pelatihan bulu tangkis bukan hanya tentang meningkatkan performa, tetapi juga tentang mencegah cedera. Menggunakan teknik berdasarkan prinsip biomekanika dapat membantu mengurangi tekanan berlebihan pada otot dan persendian. Oleh karena itu, pemahaman tentang biomekanika penting bagi atlet

dan pelatih untuk memastikan gerakan yang lebih aman, efisien, dan berkelanjutan. Biomekanika olahraga adalah perpaduan antara biologi dan mekanika, yang digunakan untuk mempelajari struktur dan fungsi sistem kehidupan melalui pendekatan fisika. Dalam bulu tangkis, biomekanika digunakan sebagai alat untuk meningkatkan teknik dengan menganalisis parameter kinetik dan kinematik. Fokus utamanya adalah untuk meningkatkan efisiensi gerakan dan mengurangi risiko cedera dengan mengidentifikasi tekanan mekanis berlebihan pada persendian. Dengan memahami mekanika, pelatih dapat memberikan koreksi teknik berdasarkan data objektif, bukan hanya intuisi mereka. Pendekatan ini juga mendukung pengembangan program latihan yang lebih terstruktur dan berbasis ilmiah untuk meningkatkan performa atlet secara berkelanjutan.

Hubungan Koordinasi Mata-Tangan terhadap Kemampuan Servis Backhand Pendek

Koordinasi mata-tangan merupakan keterampilan motorik penting yang memainkan peran kunci dalam teknik bulu tangkis, terutama saat melakukan servis backhand pendek. Sebuah studi yang diterbitkan dalam Jurnal Sains STOK Bina Guna Medan (2023) menemukan hubungan yang signifikan antara koordinasi mata-tangan dan kemampuan melakukan servis backhand pendek di kalangan siswa SMA Negeri 10 Makassar. Temuan ini menunjukkan bahwa koordinasi mata-tangan bukan hanya faktor pendukung tetapi merupakan bagian penting dari keberhasilan melakukan servis tersebut. Secara teoritis, koordinasi mata-tangan termasuk dalam

komponen kemampuan motorik dasar yang berhubungan dengan integrasi sistem visual dan sistem neuromuskular dalam menghasilkan respons gerak yang tepat. Dalam konteks servis backhand pendek, koordinasi antara mata dan tangan membantu menggabungkan persepsi visual posisi bola, jarak ke net, dan area target dengan gerakan tangan dan pergelangan tangan yang mengontrol raket. Proses ini membutuhkan koordinasi yang sangat tepat karena servis backhand pendek dieksekusi dengan amplitudo gerakan yang kecil, kecepatan ayunan yang lambat, dan margin kesalahan yang sangat sempit. Kesalahan kecil dalam pengaturan waktu atau arah dapat menyebabkan kok terbang terlalu tinggi, terlalu jauh, atau bahkan meleset dari net sama sekali. Hal ini menunjukkan bahwa kontrol motorik halus (fine motor control) memiliki peran dominan dalam keberhasilan teknik ini dibandingkan kekuatan eksplosif semata. Analisis korelasi dalam jurnal STOK Bina Guna menunjukkan bahwa siswa yang memiliki koordinasi mata-tangan yang lebih baik cenderung memiliki keterampilan yang lebih tinggi dalam servis backhand pendek. Dalam praktiknya, siswa dengan koordinasi yang baik dapat lebih baik mencocokkan waktu ayunan raket mereka dengan posisi kok, memastikan raket melakukan kontak terbaik dengan kok. Hal ini menciptakan lintasan yang rendah, stabil, dan akurat, yang sesuai dengan karakteristik servis backhand pendek yang efektif. Temuan ini didukung oleh analisis biomekanik servis backhand pendek, yang dipresentasikan dalam Journal of Sport Education (2022). Jurnal tersebut menjelaskan bahwa fase kontak antara raket dan kok adalah bagian

terpenting dari servis, karena menentukan arah, kecepatan, dan ketinggian lintasan kok. Keberhasilan dalam fase ini sangat bergantung pada kemampuan atlet untuk mengkoordinasikan informasi visual dengan gerakan tangan dan pergelangan tangan secara bersamaan. Dengan kata lain, koordinasi mata-tangan menghubungkan niat gerakan dengan hasil sebenarnya. Dari perspektif biomekanik, koordinasi mata-tangan membantu atlet mengontrol sudut raket saat mengenai kok. Jika sudut raket terlalu terbuka atau terlalu tertutup, hal itu akan mengubah sudut pukulan kok, menyebabkan servis pendek melenceng. Pemain dengan koordinasi mata-tangan yang baik dapat melakukan penyesuaian kecil pada posisi raket dan gerakan pergelangan tangan berdasarkan umpan balik visual, memungkinkan kontrol yang tepat terhadap lintasan bola. Studi oleh STOK Bina Guna juga menunjukkan bahwa meskipun koordinasi mata-tangan berhubungan signifikan dengan kemampuan untuk melakukan servis backhand pendek, variabel ini memberikan kontribusi yang lebih kecil dibandingkan kekuatan otot lengan. Temuan ini tidak mengurangi pentingnya koordinasi mata-tangan, tetapi lebih menunjukkan bahwa koordinasi mata-tangan bertindak sebagai faktor penuntun dan pengendali dalam gerakan, sementara kekuatan otot lengan berfungsi sebagai penopang untuk stabilitas dan pengendalian kekuatan. Dalam praktiknya, menggunakan koordinasi mata-tangan tanpa kekuatan lengan yang cukup akan menyebabkan servis yang tidak konsisten, sementara memiliki otot lengan yang kuat tanpa koordinasi yang baik akan menghasilkan servis yang tidak akurat. Bagi siswa SMA, temuan ini

sangat penting karena masa remaja merupakan masa perkembangan pesat dalam keterampilan koordinasi. Jurnal STOK Bina Guna menunjukkan bahwa variasi kemampuan siswa dalam melakukan servis backhand pendek sebagian besar dipengaruhi oleh perbedaan tingkat koordinasi mata-tangan mereka. Hal ini menunjukkan bahwa pelatihan yang bertujuan untuk meningkatkan koordinasi mata-tangan memiliki potensi signifikan untuk meningkatkan kualitas servis, terutama selama tahap pembelajaran teknik dasar. Analisis dalam Jurnal Pendidikan Olahraga (2022) juga menyoroti bahwa servis backhand pendek bukanlah gerakan yang mengandalkan kekuatan maksimal, melainkan gerakan yang membutuhkan tingkat kontrol dan presisi yang tinggi. Dalam situasi ini, koordinasi mata-tangan lebih penting daripada dalam teknik pukulan eksplosif. Seorang pemain perlu mengontrol kecepatan ayunan raket, menentukan momen yang tepat untuk memukul bola, dan menjaga gerakan mereka tetap stabil dalam waktu yang sangat singkat. Seluruh proses sangat bergantung pada kualitas koordinasi mata-tangan. Oleh karena itu, hasil penelitian yang Anda sertakan secara konsisten menunjukkan korelasi yang signifikan antara koordinasi mata-tangan dan kemampuan untuk melakukan servis backhand pendek. Hubungan ini dapat dijelaskan secara ilmiah menggunakan pendekatan biomekanik, di mana koordinasi antara mata dan tangan membantu mengontrol sudut raket, waktu pukulan, dan titik kontak dengan kok. Meskipun bukan satu-satunya faktor, koordinasi mata-tangan merupakan bagian penting dari keberhasilan melakukan

servis backhand pendek, terutama saat mengembangkan atlet muda dan keterampilan dasar bulu tangkis.

Prinsip Rantai Kinetik dalam Servis Backhand Pendek

Selama servis, transfer energi mengikuti prinsip rantai kinetik, di mana energi bergerak secara berurutan dari segmen tubuh yang lebih besar ke yang lebih kecil, dimulai dari kaki dan bergerak ke raket. Prinsip ini memastikan bahwa gaya dari gerakan kaki dan stabilitas pinggul ditransfer secara efisien ke lengan dan akhirnya ke raket. Keberhasilan transfer ini sangat bergantung pada koordinasi waktu penundaan atau percepatan di satu bagian pada waktu yang salah dapat mengacaukan aliran energi dan mengurangi akurasi. Gangguan dalam urutan aktivasi otot dapat menyebabkan hilangnya momentum dan meningkatkan risiko cedera akibat gerakan kompensasi. Secara anatomis, otot inti dan gerakan rotasi tubuh memainkan peran kunci dalam menghubungkan kekuatan tubuh bagian bawah dengan gerakan tubuh bagian atas. Stabilitas otot inti membantu menjaga keseimbangan tubuh selama fase persiapan, ayunan, dan kontak, memungkinkan transfer energi secara efisien dan terkendali.

Analisis Prinsip Biomekanik pada Servis Backhand Pendek

Prinsip-prinsip biomekanik menawarkan dasar ilmiah yang kuat untuk memahami bagaimana gerakan olahraga dapat dilakukan dengan cara yang efisien, efektif, dan konsisten. Dalam konteks servis backhand pendek dalam bulu tangkis, menganalisis sudut

tubuh, posisi lengan, dan titik kontak antara raket dan kok sangat penting untuk mencapai gerakan yang hampir sempurna. Hal ini karena servis backhand pendek adalah teknik yang membutuhkan presisi tinggi, kontrol gerakan yang halus, dan kesalahan minimal. Menurut analisis gerakan yang dilaporkan dalam *Journal of Sport Education* (2022), sudut tubuh selama servis backhand pendek memainkan peran penting dalam menjaga keseimbangan dan stabilitas. Posisi tubuh yang stabil dengan pusat gravitasi yang terkontrol membantu atlet menciptakan ayunan raket yang lebih konsisten. Jika tubuh terlalu condong ke depan atau ke belakang, hal itu dapat mengubah arah gaya, yang menyebabkan lintasan bola yang tidak akurat. Oleh karena itu, menjaga tubuh dalam posisi yang relatif tegak dengan distribusi berat yang seimbang adalah kondisi biomekanik yang mendukung servis yang sukses. Selain sudut tubuh, posisi lengan juga memainkan peran penting dalam menentukan kualitas servis backhand pendek. Analisis biomekanik menunjukkan bahwa lengan harus rileks tetapi stabil agar dapat mentransfer gaya dari tubuh ke raket secara efisien. Jika lengan terlalu kaku, hal itu akan memperlambat kontrol gerakan Anda, tetapi jika terlalu longgar, hal itu dapat mengurangi stabilitas ayunan Anda. Dalam servis backhand pendek, fokusnya adalah pada kontrol daripada kekuatan, sehingga posisi lengan yang benar memungkinkan atlet untuk mengontrol kecepatan ayunan raket secara akurat. Pergelangan tangan juga memainkan peran penting dalam servis backhand pendek. *Jurnal Pendidikan Olahraga* (2022) menjelaskan bahwa pergelangan tangan bertindak sebagai

pengendali akhir, menentukan arah dan ketinggian kok. Sudut pergelangan tangan saat menyentuh kok harus disesuaikan dengan hati-hati untuk memastikan kok melewati net dengan lintasan rendah. Jika sudut pergelangan tangan terlalu terbuka, bola akan terbang terlalu tinggi. Jika sudutnya terlalu tertutup, bola mungkin tersangkut di net. Titik di mana raket menyentuh kok adalah bagian terpenting dari servis backhand pendek. Analisis biomekanik menunjukkan bahwa titik kontak ideal terjadi relatif dekat dengan tubuh dan pada ketinggian yang memungkinkan kontrol maksimal terhadap kok. Jika kontak terlalu jauh dari tubuh atau dalam posisi yang tidak stabil, hal itu dapat menyebabkan hilangnya kendali atas sudut dan kecepatan kok. Dengan melakukan kontak yang tepat, atlet dapat menciptakan lintasan bola yang stabil, rendah, dan akurat. Temuan ini juga sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh STOK Bina Guna (2023), yang menunjukkan bahwa kekuatan otot lengan membantu menjaga stabilitas lengan dan pergelangan tangan selama fase kontak. Otot yang kuat membantu atlet menjaga sudut lengan dan pergelangan tangan tetap stabil, sehingga mereka dapat mempertahankan titik kontak yang baik. Hal ini menunjukkan bahwa prinsip-prinsip biomekanik sangat berkaitan dengan kondisi fisik atlet, terutama kekuatan otot lengan. Oleh karena itu, berdasarkan prinsip-prinsip biomekanik dan temuan penelitian yang telah Anda sertakan, dapat disimpulkan bahwa servis backhand pendek yang hampir sempurna dicapai melalui kombinasi sudut tubuh yang stabil, posisi lengan yang tepat, dan kontak raket-gabus yang terkontrol. Ketiga aspek ini saling terkait dan tidak dapat

dipisahkan. Memahami prinsip-prinsip dasar biomekanik penting untuk mempelajari teknik servis backhand pendek, baik Anda seorang pemula maupun pemain tingkat lanjut.

Faktor Mekanis yang Menentukan Keberhasilan Lintasan Shuttlecock sehingga Mendarat Tepat di Atas Net

Keberhasilan jalur servis backhand pendek berasal dari interaksi beberapa faktor mekanis yang bekerja bersama. Servis backhand pendek tidak membutuhkan kekuatan maksimal, tetapi membutuhkan presisi dalam mengontrol pukulan, sudut, dan waktu kontak. Dalam pendekatan biomekanik, presisi tersebut merupakan hasil dari koordinasi sistem neuromuskular yang mampu mengatur besar gaya, arah gaya, serta timing aktivasi otot secara terintegrasi. Menurut analisis biomekanik yang disajikan dalam *Journal of Sport Education* (2022), beberapa faktor mekanis kunci menentukan apakah kok dapat terbang langsung melewati net dan mendarat secara akurat di area servis depan lawan. Faktor-faktor ini tidak bekerja secara terpisah, melainkan saling memengaruhi dalam satu rangkaian gerakan yang sangat singkat.

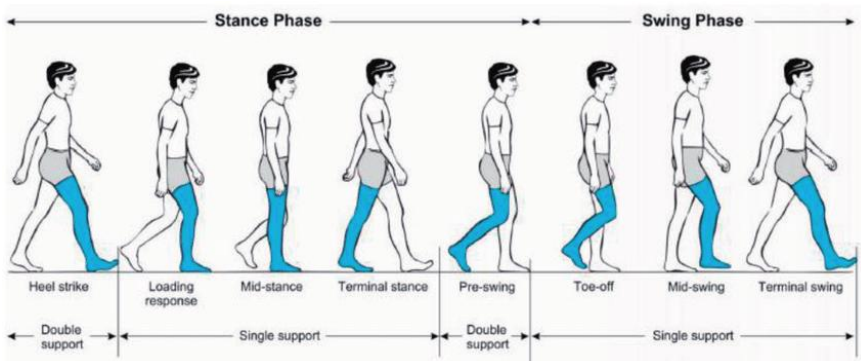
Faktor mekanis penting pertama adalah sudut pelepasan bola. Sudut pelepasan adalah sudut antara arah pergerakan kok dan bidang horizontal saat meninggalkan raket. Analisis biomekanik menunjukkan bahwa sudut pelepasan yang sangat besar menyebabkan kok terbang tinggi, memberi lawan kesempatan untuk memulai serangan mereka lebih awal. Jika sudut pelepasan terlalu kecil, kok lebih mungkin tersangkut di net. Oleh karena itu, sudut

pelepasan terbaik adalah kunci keberhasilan jalur servis backhand pendek. Faktor mekanis kedua adalah kecepatan awal kok. Kecepatan awal ditentukan oleh jumlah gaya yang diberikan raket pada kok saat terjadi kontak. Dalam servis backhand pendek, kecepatan awal harus dijaga pada tingkat yang relatif rendah namun konsisten. Jurnal Pendidikan Olahraga (2022) menjelaskan bahwa memukul kok terlalu cepat dapat menyebabkan kok keluar dari area target, sementara memukulnya terlalu lambat dapat mencegahnya melewati penghalang net. Oleh karena itu, kemampuan untuk mengontrol kecepatan awal merupakan faktor mekanis penting dalam menentukan keberhasilan lintasan kok bulu tangkis. Faktor mekanis ketiga yang berperan penting adalah kontrol pergelangan tangan. Pergelangan tangan bertindak sebagai pengendali akhir, menentukan sudut raket dan kecepatan pukulan pada saat kontak dengan kok. Analisis biomekanik menunjukkan bahwa gerakan pergelangan tangan yang terkontrol dan stabil memungkinkan atlet untuk mengontrol sudut dan kecepatan pelepasan kok secara tepat. Jika seseorang memiliki pergelangan tangan yang lemah atau tidak stabil, gerakan lemparannya tidak akan konsisten. Temuan ini sejalan dengan penelitian dari STOK Bina Guna (2023), yang menunjukkan bahwa kekuatan otot lengan, termasuk otot lengan bawah dan pergelangan tangan, berkontribusi pada kualitas servis backhand pendek. Selain itu, titik di mana raket menyentuh kok juga merupakan faktor mekanis yang krusial. Jurnal Pendidikan Olahraga (2022) menjelaskan bahwa titik kontak ideal terjadi ketika kok dipukul pada posisi yang memungkinkan kontrol maksimal atas arah

dan kecepatannya. Jika Anda menyentuh bola terlalu cepat atau terlalu lambat, itu akan mengubah sudut pelepasan kok, yang dapat mengacaukan servis pendek yang ingin Anda lakukan. Dengan titik kontak yang tepat, atlet dapat mencapai lintasan rendah dan stabil yang aman melewati net. Faktor mekanis lain yang memengaruhi lintasan bola adalah stabilitas tubuh dan lengan. Meskipun pukulan backhand pendek menggunakan gerakan yang relatif kecil, stabilitas tubuh penting untuk menjaga konsistensi gerakan. Tubuh yang tidak stabil menyebabkan perubahan arah yang tidak diinginkan, sehingga sulit untuk mengontrol lintasan bola. Otot lengan yang kuat dan postur tubuh yang baik membantu atlet mempertahankan stabilitas ini sepanjang gerakan servis. Jadi, berdasarkan hasil penelitian yang Anda sertakan, dapat disimpulkan bahwa lintasan kok yang berhasil, yang mendarat tepat di net, ditentukan oleh kombinasi beberapa faktor mekanis: sudut pelepasan, kecepatan awal, kontrol pergelangan tangan, titik kontak antara raket dan kok, dan stabilitas tubuh. Semua faktor ini saling terkait dan perlu dikontrol secara bersamaan untuk menghasilkan pukulan backhand pendek yang efektif. Memahami faktor-faktor mekanis ini penting saat mempelajari dan berlatih servis bulu tangkis, terutama untuk atlet usia sekolah, untuk mengurangi kesalahan teknis dan meningkatkan kualitas servis.

Bab 5: Analisis Biomekanik pada Flat Foot

5.1 Analisi Biomekanik pada Flat Foot



Gambar 5.1 Diagram fase-fase dalam siklus gaya berjalan manusia (*human gait cycle*).

Sumber: Jacquelin Perry Gait Cycle Diagram (1992)

Kaki merupakan salah satu struktur tubuh yang memiliki peran penting dalam menunjang aktivitas fungsional manusia, terutama dalam aktivitas berdiri, berjalan, dan berlari (Kirby, 2017). Secara biomekanik, kaki berfungsi sebagai struktur penopang berat badan, peredam kejutan (*shock absorber*), serta pengatur keseimbangan dan stabilitas selama pergerakan. Fungsi tersebut sangat bergantung pada integritas struktur anatomi kaki, khususnya arkus atau lengkungan kaki. Flatfoot atau kaki datar merupakan

suatu kondisi di mana arkus longitudinal medial kaki mengalami penurunan atau bahkan menghilang saat posisi berdiri (Tong, Kong, & Lau, 2016). Kondisi ini dapat menyebabkan distribusi beban yang tidak merata pada telapak kaki serta memengaruhi mekanisme gerak anggota gerak bawah. Flatfoot tidak hanya berdampak pada struktur lokal kaki, tetapi juga dapat memengaruhi sendi-sendi proksimal seperti pergelangan kaki, lutut, panggul, hingga tulang belakang. Secara umum, flatfoot dapat diklasifikasikan berdasarkan penyebabnya, di antaranya flatfoot yang dipengaruhi oleh faktor genetik dan flatfoot yang disebabkan oleh faktor postural (Chen et al., 2019). Flatfoot genetik umumnya berkaitan dengan kelainan bawaan pada struktur tulang, ligamen, atau jaringan ikat kaki yang menyebabkan kegagalan pembentukan arkus secara optimal. Sementara itu, flatfoot postural lebih sering terjadi akibat kebiasaan postur yang buruk, penggunaan alas kaki yang tidak sesuai, kelelahan otot, serta aktivitas berdiri atau berjalan dalam waktu lama yang memicu adaptasi biomekanik yang tidak fisiologis. Perbedaan penyebab tersebut berpotensi menimbulkan perbedaan karakteristik biomekanik dan kinesiologi kaki (Neumann, 2017). Pada flatfoot genetik, perubahan struktur kaki cenderung bersifat menetap, sedangkan pada flatfoot postural, perubahan yang terjadi sering kali bersifat adaptif dan dapat berkembang seiring waktu. Perbedaan ini berpengaruh terhadap pola aktivasi otot, pergerakan sendi, serta efisiensi gerak saat melakukan aktivitas fungsional. Salah satu aspek penting yang terdampak oleh kondisi flatfoot adalah pola gait atau pola berjalan (Nourbakhsh et al., 2021). Gait normal membutuhkan

koordinasi yang baik antara sistem muskuloskeletal dan neuromuskular. Adanya flatfoot dapat menyebabkan peningkatan pronasi kaki, perubahan sudut sendi subtalar, serta gangguan fase stance dan swing selama berjalan. Perubahan pola gait ini berpotensi meningkatkan risiko kelelahan, nyeri muskuloskeletal, serta cedera akibat penggunaan berlebih (*overuse injury*).

Oleh karena itu, analisis biomekanik dan kinesiologi pada flatfoot, khususnya yang ditinjau dari faktor genetik dan postural, menjadi penting untuk dipahami. Pemahaman yang mendalam mengenai perbedaan karakteristik kedua jenis flatfoot tersebut diharapkan dapat memberikan gambaran yang lebih komprehensif terkait mekanisme terjadinya gangguan gerak serta implikasinya terhadap fungsi tubuh secara keseluruhan.

Anatomi dan Biomekanik Arkus Kaki

Kaki manusia tersusun atas 26 tulang yang membentuk struktur kompleks dan berfungsi sebagai penopang utama berat badan serta fasilitator pergerakan. Struktur lengkungan kaki atau arkus berperan penting dalam mendistribusikan beban, menyerap gaya benturan, dan menjaga efisiensi gerak selama aktivitas fungsional. Secara anatomi, arkus kaki dibagi menjadi arkus longitudinal medial, arkus longitudinal lateral, dan arkus transversal (Kirby, 2017). Arkus longitudinal medial merupakan lengkungan utama yang paling berperan dalam mekanisme *shock absorption*. Struktur ini dibentuk oleh tulang calcaneus, talus, navicular, cuneiform, dan metatarsal pertama hingga ketiga, serta didukung

oleh ligamen plantar, fascia plantar, dan otot-otot intrinsik maupun ekstrinsik kaki. Secara biomekanik, arkus ini berfungsi untuk menyimpan dan melepaskan energi elastik selama siklus berjalan (Neumann, 2017). Pada kondisi normal, arkus longitudinal medial mampu mempertahankan ketinggiannya saat fase stance berjalan. Namun, pada kondisi flatfoot terjadi penurunan atau kolaps arkus yang menyebabkan perubahan distribusi beban plantar dan peningkatan pronasi kaki. Hal ini berdampak pada perubahan mekanisme kerja sendi subtalar dan midtarsal sehingga menurunkan efisiensi biomekanik kaki (Tong et al., 2016).

Biomekanik Flatfoot

Flatfoot merupakan kondisi yang ditandai dengan menurunnya arkus longitudinal medial, baik dalam keadaan statis maupun dinamis. Secara biomekanik, flatfoot menyebabkan perubahan alignment kaki, khususnya peningkatan eversion calcaneus dan pronasi subtalar yang berlebihan. Kondisi ini memengaruhi distribusi gaya reaksi tanah (*ground reaction force*) dan meningkatkan tekanan pada bagian medial telapak kaki (Kirby, 2017). Pada individu dengan flatfoot, pusat tekanan (*center of pressure*) cenderung bergeser ke arah medial selama fase stance berjalan. Pergeseran ini menyebabkan peningkatan beban pada jaringan lunak seperti fascia plantar dan ligamen plantar, yang dalam jangka panjang dapat memicu nyeri dan kelelahan muskuloskeletal. Selain itu, perubahan biomekanik ini juga dapat memengaruhi sendi-sendi proksimal seperti pergelangan kaki, lutut, dan panggul

(Nourbakhsh et al., 2021). Flatfoot dapat dibedakan berdasarkan etiologinya, yaitu flatfoot genetik dan flatfoot postural. Perbedaan etiologi ini memengaruhi karakteristik biomekanik yang muncul, baik dari segi struktur maupun respons adaptif terhadap beban.

Perubahan Pola Gait Pada Individu Dengan Flat Foot

Gait atau pola berjalan merupakan hasil interaksi kompleks antara sistem muskuloskeletal, neuromuskular, dan biomekanik tubuh dalam merespons gaya internal maupun eksternal selama pergerakan. Kaki berperan sebagai struktur awal yang menerima kontak dengan permukaan tanah dan berfungsi sebagai peredam gaya, penopang berat badan, serta pengungkit untuk menghasilkan gerakan maju. Pada individu dengan flat foot (pes planus), penurunan atau kolaps lengkungan medial longitudinal menyebabkan gangguan fungsi kaki tersebut, yang pada akhirnya memengaruhi pola gait secara keseluruhan. Perubahan pola berjalan ini dapat diamati pada berbagai fase siklus gait, baik fase stance maupun fase swing, dan berdampak pada efisiensi serta stabilitas gerak. Siklus gait secara normal terdiri dari fase stance dan fase swing, dengan fase stance mencakup sekitar 60% dari keseluruhan siklus. Pada individu dengan flat foot, perubahan paling signifikan terjadi selama fase stance, khususnya pada fase loading response hingga midstance. Saat kaki pertama kali menyentuh tanah (initial contact), individu dengan flat foot cenderung mengalami kontak tumit yang kurang stabil akibat posisi hindfoot yang lebih eversi. Kondisi ini menyebabkan adaptasi awal berupa peningkatan pronasi

subtalar untuk memperluas area kontak kaki dengan tanah, yang secara biomekanik bertujuan meningkatkan stabilitas, namun berpotensi meningkatkan stres mekanik. Pada fase loading response, pronasi subtalar yang berlebihan dan berlangsung lebih lama merupakan ciri khas gait pada flat foot. Pronation yang seharusnya bersifat sementara dan berfungsi sebagai mekanisme peredam gaya menjadi berlebihan dan berkepanjangan. Akibatnya, midfoot kehilangan perannya sebagai struktur semi-rigid dan menjadi terlalu mobile. Mobilitas berlebih ini mengganggu kemampuan kaki dalam menahan beban tubuh secara efisien, sehingga meningkatkan kerja kompensatorik otot-otot pergelangan kaki, khususnya tibialis posterior dan otot intrinsik kaki. Perubahan pola gait semakin jelas pada fase midstance, yaitu fase di mana berat badan sepenuhnya ditopang oleh satu kaki. Pada individu dengan flat foot, lengkungan medial cenderung mengalami kolaps maksimal pada fase ini, menyebabkan peningkatan tekanan plantar di area midfoot dan medial forefoot. Hilangnya stabilitas midfoot mengganggu mekanisme windlass, yaitu mekanisme penegangan plantar fascia yang berperan penting dalam mempertahankan lengkungan medial dan mempersiapkan kaki untuk fase push-off. Akibat gangguan mekanisme ini, kaki tidak mampu berfungsi secara optimal sebagai pengungkit yang efisien. Pada fase terminal stance dan pre-swing, individu dengan flat foot sering menunjukkan penurunan efektivitas push-off. Hal ini disebabkan oleh kegagalan kaki untuk bertransisi dari struktur yang fleksibel menjadi struktur yang rigid. Pada gait normal, kaki akan mengalami supinasi ringan pada fase ini untuk

menciptakan tuas yang stabil. Namun, pada flat foot, pronasi yang persisten menghambat terjadinya supinasi, sehingga gaya dorong yang dihasilkan oleh otot-otot plantarflexor menjadi kurang efektif. Konsekuensinya, panjang langkah dapat berkurang dan konsumsi energi selama berjalan meningkat. Selain perubahan pada fase stance, flat foot juga memengaruhi fase swing secara tidak langsung. Ketidakefisienan pada fase stance sering dikompensasi dengan penyesuaian pada fase swing, seperti peningkatan fleksion lutut atau perubahan timing ayunan tungkai untuk mempertahankan keseimbangan dan kontinuitas gait. Adaptasi ini menunjukkan bahwa gangguan biomekanik pada kaki dapat memicu erubahan pola gerak pada segmen proksimal sebagai bagian dari rantai kinetik tertutup.

Perubahan pola gait pada flat foot tidak hanya terbatas pada gerakan kaki, tetapi juga memengaruhi kinematika ekstremitas bawah secara keseluruhan. Overpronation yang terjadi selama stance berkaitan dengan rotasi internal tibia, yang selanjutnya memengaruhi alignment lutut. Peningkatan rotasi internal ini sering dikaitkan dengan peningkatan valgus lutut selama berjalan. Pada tingkat hip, perubahan ini dapat memicu rotasi internal femur dan peningkatan aduksi hip, yang berdampak pada stabilitas pelvis dan postur tubuh selama gait.

Dari sudut pandang kinetika, individu dengan flat foot menunjukkan perubahan distribusi gaya reaksi tanah selama berjalan. Tekanan plantar meningkat di area midfoot dan medial forefoot cenderung menurun. Distribusi gaya yang tidak merata ini

menyebabkan peningkatan stres mekanik pada jaringan lunak kaki dan berpotensi memicu kelelahan otot serta nyeri. Selain itu, perubahan vektor gaya reaksi tanah juga dapat meningkatkan momen eversi pada ankle dan momen valgus pada lutut, yang berkontribusi terhadap risiko cedera muskuloskeletal jangka panjang. Perubahan pola gait pada flat foot juga berdampak pada efisiensi energi. Beberapa studi menunjukkan bahwa individu dengan flat foot memerlukan energi yang lebih besar untuk berjalan dibandingkan individu dengan lengkungan kaki normal. Hal ini disebabkan oleh peningkatan kerja otot untuk menstabilkan kaki dan ekstremitas bawah, serta berkurangnya kemampuan kaki dalam menyimpan dan melepaskan energi elastik. Peningkatan konsumsi energi ini dapat menyebabkan kelelahan lebih cepat, terutama pada aktivitas berjalan atau berdiri dalam waktu lama. Secara klinis, perubahan pola gait pada individu dengan flat foot sering dikaitkan dengan keluhan nyeri dan ketidaknyamanan, baik di kaki maupun di segmen proksimal seperti lutut dan pinggul. Pola berjalan yang tidak efisien dan tidak stabil meningkatkan risiko terjadinya cedera akibat stres berulang, seperti plantar fasciitis, medial tibial stress syndrome, nyeri lutut anterior, dan tendinopati Achilles. Oleh karena itu, analisis gait menjadi komponen penting dalam evaluasi biomekanik individu dengan flat foot.

Dengan memahami perubahan pola gait pada flat foot, intervensi yang diberikan dapat lebih terarah dan berbasis bukti. Pendekatan seperti penggunaan orthosis, latihan penguatan otot intrinsik kaki dan tibialis posterior, serta latihan koreksi gait

bertujuan untuk mengembalikan pola berjalan mendekati kondisi fisiologis. Intervensi ini tidak hanya berfokus pada perbaikan struktur lengkungan medial, tetapi juga pada peningkatan efisiensi dan stabilitas gait secara keseluruhan.

Memberi Rekomendasi Assessment Dan Menejemen Berbasis Bukti

Assessment flat foot berbasis bukti klinis bertujuan mengevaluasi struktur lengkungan medial, fungsi dinamis kaki, serta dampak biomekanik terhadap ekstremitas bawah. Pemeriksaan yang direkomendasikan mencakup evaluasi postural dan pengukuran lengkungan menggunakan Foot Posture Index-6 (FPI-6) yang terbukti reliabel dan valid untuk menilai derajat pronasi dan posisi hindfoot. Pemeriksaan statis dapat dilengkapi dengan Navicular Drop Test untuk mengukur penurunan tulang navicular sebagai indikator kolapsnya lengkungan medial. Pemeriksaan jejak kaki seperti Feiss Line dan Arch Height Index juga direkomendasikan sebagai metode non-invasif untuk mendeteksi perubahan struktur arch. Sementara itu, assessment dinamis berupa analisis gait, pengamatan fase pronasi, serta penggunaan video slow-motion memberikan gambaran kompensasi biomekanik selama berjalan. Pada kasus dicurigai adanya disfungsi tibialis posterior, tes ketahanan seperti Single Leg Heel Raise Test menjadi indikator penting kekuatan dan fungsi tendon. Pada kondisi berat atau rigid, pemeriksaan lanjutan seperti ultrasonografi, MRI, atau X-ray dapat membantu mengidentifikasi kerusakan struktur ligament dan tendon.

Manajemen berbasis bukti pada flat foot berfokus pada pendekatan konservatif sebelum mempertimbangkan intervensi bedah. Latihan penguatan otot intrinsik dan ekstrinsik kaki sangat direkomendasikan, terutama short foot exercise, yang terbukti meningkatkan stabilitas lengkungan dan mengurangi pronasi berlebih. Latihan untuk tibialis posterior seperti resisted inversion, heel raise terkontrol, serta arch doming secara signifikan meningkatkan fungsi dinamis medial arch. Pemberian orthotic berbasis bukti ilmiah efektif mengurangi nyeri dan memperbaiki alignment, terutama pada pasien dengan gejala sedang hingga berat. Orthotic bertujuan mengurangi beban pada spring ligament, mendistribusi tekanan plantar, serta menstabilkan posisi calcaneus. Program fisioterapi juga dapat melibatkan proprioceptive training, koreksi pola gait, serta edukasi penggunaan sepatu yang sesuai dengan kebutuhan arch dan aktivitas pasien. Pendekatan multimodal direkomendasikan untuk hasil optimal. Pada fase nyeri akut, modalitas seperti manual therapy, taping, dan teknik mobilisasi sendi midfoot dapat mengurangi ketegangan plantar fascia dan meningkatkan mobilitas. Pendekatan ini perlu diintegrasikan dengan latihan jangka panjang untuk mencegah progresi deformitas. Berdasarkan bukti penelitian terbaru, program latihan dan orthotic menunjukkan hasil yang sangat baik pada anak dan dewasa dengan flat foot fleksibel. Namun, pada kasus dengan disfungsi tendon tibialis posterior tahap lanjut atau deformitas rigid yang tidak responsif terhadap terapi konservatif selama 3–6 bulan, rujukan ke ortopedi untuk evaluasi bedah menjadi langkah

selanjutnya. Prosedur seperti rekonstruksi tendon, osteotomi calcaneus, atau stabilisasi sendi dipertimbangkan berdasarkan tingkat keparahan deformitas.

Kinematika dan Kinetika pada Flat Foot (Pes Planus)

Flat foot atau pes planus merupakan kelainan struktur kaki yang ditandai dengan penurunan atau hilangnya lengkung medial longitudinal, yang berdampak signifikan terhadap mekanika gerak ekstremitas bawah. Dalam analisis biomekanik, pemahaman mengenai kinematika dan kinetika sangat penting untuk menjelaskan bagaimana perubahan struktur kaki memengaruhi pola gerak, distribusi gaya, serta beban mekanik yang diterima oleh sendi dan jaringan lunak selama aktivitas fungsional, terutama berjalan dan berlari. Kinematika berkaitan dengan deskripsi gerakan segmen tubuh tanpa memperhatikan gaya penyebabnya. Pada individu dengan flat foot, perubahan kinematika paling nyata terjadi pada kompleks sendi subtalar dan midfoot. Kondisi flat foot ditandai oleh pronasi subtalar yang berlebihan dan berlangsung lebih lama selama fase stance pada siklus gait. Pronation ini mencakup eversi calcaneus, abduksi talus, serta penurunan lengkung medial. Secara normal, pronasi berfungsi sebagai mekanisme adaptasi kaki terhadap permukaan tanah dan sebagai peredam gaya. Namun, pada flat foot, pronasi yang berlebihan menyebabkan midfoot menjadi terlalu mobile sehingga kehilangan fungsi stabilitasnya sebagai struktur penopang. Perubahan kinematika juga terjadi pada sendi ankle. Overpronation menyebabkan peningkatan gerakan dorsifleksi dan

eversasi ankle selama mid-stance. Kondisi ini mengganggu mekanisme ankle rocker yang normal, sehingga transisi dari fase loading response ke terminal stance menjadi kurang efisien. Akibatnya, kemampuan kaki untuk menghasilkan gaya dorong (push-off) pada fase toe-off menurun. Gangguan pada mekanisme ini menyebabkan efisiensi berjalan berkurang dan meningkatkan konsumsi energi selama aktivitas locomotion. Dampak kinematika flat foot tidak terbatas pada kaki dan ankle, tetapi menjalar ke segmen proksimal melalui rantai kinetik tertutup. Pronasi subtalar yang berlebihan berkaitan erat dengan rotasi internal tibia. Rotasi ini berlanjut ke sendi lutut dan dapat memicu peningkatan sudut valgus knee selama fase stance. Kondisi tersebut meningkatkan stres pada struktur penunjang lutut, termasuk ligamen kolateral medial dan mekanisme patellofemoral. Dalam jangka panjang, perubahan kinematika ini berpotensi menyebabkan gangguan tracking patella dan nyeri lutut anterior. Pada tingkat hip, kompensasi akibat flat foot dapat berupa peningkatan rotasi internal dan aduksi femur. Perubahan ini memengaruhi stabilitas pelvis dan pola postur tubuh secara keseluruhan. Ketidakseimbangan gerak pada hip juga dapat meningkatkan beban pada otot-otot stabilisator pelvis, sehingga berkontribusi terhadap kelelahan otot dan gangguan biomekanik saat aktivitas fisik berulang. Selain aspek kinematika, analisis kinetika memberikan gambaran mengenai gaya dan momen yang bekerja pada ekstremitas bawah. Pada individu dengan flat foot, distribusi gaya reaksi tanah (ground reaction force/GRF) mengalami perubahan signifikan. Penurunan lengkung medial menyebabkan

area midfoot menerima beban yang lebih besar dibandingkan kaki normal. Vektor gaya reaksi tanah cenderung bergeser ke arah medial, sehingga meningkatkan stres mekanik pada struktur medial kaki dan ankle. Kondisi ini menunjukkan bahwa fungsi lengkung medial sebagai peredam dan pendistribusi beban tidak berjalan secara optimal.

Perubahan kinetika juga terlihat pada momen sendi ankle. Overpronation meningkatkan momen eversi yang harus dikontrol oleh otot-otot invertor, khususnya tibialis posterior. Otot ini berperan penting dalam mempertahankan stabilitas lengkung medial. Pada kondisi flat foot, beban kerja tibialis posterior meningkat secara signifikan, sehingga berisiko mengalami kelelahan dan disfungsi. Kegagalan kompensasi otot ini dapat memperburuk deformitas dan meningkatkan progresivitas flat foot. Pada sendi lutut, rotasi internal tibia yang berlebihan menyebabkan peningkatan momen valgus. Peningkatan momen ini berkontribusi terhadap distribusi beban yang tidak seimbang pada kompartemen lutut, khususnya pada sisi medial. Beban mekanik yang meningkat secara kronis dapat meningkatkan risiko terjadinya gangguan degeneratif seperti osteoarthritis lutut. Selain itu, peningkatan momen pada lutut juga berpengaruh terhadap efisiensi gerak dan stabilitas selama aktivitas dinamis. Analisis kinetika melalui distribusi tekanan plantar menunjukkan bahwa individu dengan flat foot mengalami peningkatan tekanan yang signifikan pada area midfoot dan medial forefoot. Sebaliknya, tekanan pada lateral heel dan forefoot cenderung menurun. Distribusi tekanan yang tidak merata ini

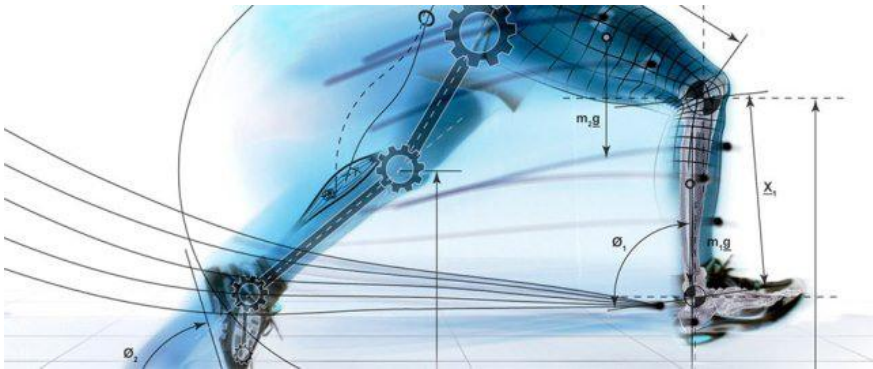
menyebabkan peningkatan stres pada jaringan lunak, termasuk plantar fascia, ligamen, dan kapsul sendi. Kondisi ini menjelaskan tingginya insidensi keluhan nyeri kaki, plantar fasciitis, dan kelelahan kaki pada individu dengan flat foot. Secara keseluruhan, perubahan kinematika dan kinetika pada flat foot menunjukkan bahwa kelainan ini tidak hanya bersifat lokal pada kaki, tetapi memiliki dampak sistemik terhadap seluruh rantai kinetik ekstremitas bawah. Gangguan pada fungsi lengkung medial mengakibatkan hilangnya mekanisme elastik kaki, termasuk mekanisme windlass, yang berperan penting dalam efisiensi locomotion. Akibatnya, individu dengan flat foot membutuhkan energi yang lebih besar untuk melakukan aktivitas berjalan atau berlari dan memiliki risiko cedera muskuloskeletal yang lebih tinggi. Pemahaman mendalam mengenai kinematika dan kinetika flat foot sangat penting dalam konteks klinis dan rehabilitasi. Analisis biomekanik ini menjadi dasar dalam menentukan strategi intervensi yang tepat, baik melalui latihan penguatan, koreksi postur, penggunaan orthosis, maupun modifikasi aktivitas fisik. Dengan pendekatan berbasis biomekanik, diharapkan intervensi yang diberikan dapat meningkatkan efisiensi gerak, mengurangi beban mekanik berlebih, serta mencegah komplikasi jangka panjang akibat flat foot

Bab 6: Analisis Komprehensif Biomekanika Pola Jalan dan Stabilitas Keseimbangan Tubuh

6.1 Analisis Komprehensif Biomekanik Pola Jalan dan Stabilitas Keseimbangan Tubuh

Terjadinya perpindahan tubuh secara mandiri dan efisien di berbagai medan kehidupan. Secara biomekanika, aktivitas ini melibatkan pergerakan pusat massa tubuh atau Center of Mass secara ritmis dalam pola yang berulang dan berkelanjutan. Meskipun tampak sebagai aktivitas otomatis yang sederhana, proses berjalan sesungguhnya merupakan hasil koordinasi tingkat tinggi antara sistem saraf pusat sebagai pengatur strategi gerak, sistem muskuloskeletal sebagai penghasil gaya mekanis, serta sistem sensorik yang secara konstan memberikan umpan balik untuk menjaga orientasi tubuh terhadap gravitasi. Dalam disiplin ilmu fisioterapi, analisis pola jalan atau gait analysis bukan sekadar observasi visual biasa, melainkan alat diagnostik fungsional yang sangat krusial. Pola jalan yang normal mencerminkan integritas fungsi neuromuskular yang optimal. Sebaliknya, setiap deviasi atau

penyimpangan kecil dalam pola jalan sering kali merupakan manifestasi klinis awal dari adanya gangguan pada sendi, kelemahan spesifik pada otot, hingga gangguan neurologis yang kompleks. Pemahaman mendalam mengenai hubungan antara parameter jalan dan kontrol keseimbangan menjadi fondasi utama dalam merancang program rehabilitasi yang efektif, mencegah risiko jatuh yang fatal, serta meminimalkan potensi disabilitas fungsional jangka panjang.



Gambar 6.1 Diagram analisis fisika dan biomekanika pada persendian kaki manusia saat berlari.

Sumber: Science Photo Library Biomechanics Image (2018)

Mekanisme Detail Siklus Berjalan

Siklus berjalan didefinisikan sebagai periode waktu atau rangkaian gerakan antara kontak awal satu kaki dengan tanah hingga kaki yang sama kembali menyentuh tanah. Secara teknis, siklus ini dibagi menjadi dua fase utama yang saling berkesinambungan, yaitu fase tumpuan dan fase ayunan. Setiap fase memiliki sub-komponen yang sangat spesifik dalam menentukan efisiensi energi dan stabilitas tubuh secara keseluruhan. Fase tumpuan atau stance phase

mencakup sekitar enam puluh persen dari keseluruhan siklus berjalan. Ini adalah periode di mana kaki menanggung beban berat badan dan berinteraksi langsung dengan permukaan tanah. Tahap pertama adalah Initial Contact, momen di mana tumit pertama kali menyentuh permukaan. Di sini, sendi pergelangan kaki berada pada posisi netral, dan otot tibialis anterior bekerja secara eksentrik untuk mengontrol penurunan kaki agar tidak terjadi hentakan yang kasar. Selanjutnya adalah Loading Response, fase penyerapan beban di mana seluruh telapak kaki menempel pada tanah. Pada tahap ini, lutut akan mengalami fleksi ringan sekitar lima belas derajat yang berfungsi sebagai mekanisme penyerap kejutan untuk melindungi sendi-sendi yang lebih tinggi. Masuk ke tahap Mid-Stance, pusat berat badan berada tepat secara vertikal di atas satu kaki tumpu. Ini adalah momen yang paling tidak stabil secara lateral dalam seluruh siklus, sehingga membutuhkan kontraksi kuat dari otot-otot penstabil panggul agar postur tetap tegak. Setelah itu, tubuh memasuki Terminal Stance yang dimulai ketika tumit terangkat dari lantai dan energi mekanis disimpan dalam struktur tendon Achilles untuk persiapan dorongan. Fase tumpuan diakhiri dengan Pre-Swing atau Toe Off, di mana jari kaki memberikan dorongan terakhir. Otot gastrocnemius dan soleus bekerja secara maksimal pada tahap ini untuk menghasilkan tenaga maju yang diperlukan guna memulai fase ayunan. Fase ayunan atau swing phase mencakup sekitar empat puluh persen dari siklus berjalan dan terjadi saat tungkai tidak menumpu beban. Fase ini dimulai dengan Initial Swing, saat kaki mulai meninggalkan tanah dan mengalami akselerasi maju melalui

aktivitas otot fleksor panggul. Selanjutnya adalah Mid-Swing, yaitu fase di mana tungkai yang berayun melewati tungkai tumpu yang berada di tanah. Keberhasilan fase ini bergantung pada kemampuan pergelangan kaki untuk mengangkat kaki guna memastikan jari kaki tidak tersangkut di lantai. Siklus ditutup dengan Terminal Swing, yaitu fase perlambatan di mana otot hamstring bekerja mengerem gerakan tungkai bawah agar kaki mendarat dengan lembut pada posisi kontak tumit berikutnya.

Integrasi Sistem Sensorimotor Dalam Keseimbangan

Keseimbangan dinamis saat berjalan merupakan kemampuan tubuh untuk menjaga proyeksi vertikal pusat gravitasi tetap berada dalam bidang tumpu yang terus bergerak. Pengontrolan stabilitas ini melibatkan integrasi data dari tiga sumber informasi sensorik utama yang bekerja secara simultan di bawah kendali otak. Sistem visual memberikan referensi mengenai garis horizon dan membantu tubuh mendeteksi rintangan. Gangguan pada penglihatan akan menurunkan kecepatan berjalan karena tubuh membutuhkan waktu lebih lama untuk memproses informasi spasial demi keamanan. Sistem kedua adalah sistem vestibular yang terletak di telinga bagian dalam. Sistem ini berfungsi mendeteksi perubahan posisi kepala serta percepatan gerak. Perannya sangat krusial saat manusia berjalan di permukaan yang tidak rata. Sistem ketiga adalah sistem proprioseptif yang melibatkan mekanoreseptor di otot, tendon, dan sendi. Sistem ini memberikan data instan mengenai posisi anggota gerak tanpa perlu kontrol visual secara sadar. Ketika terjadi

gangguan keseimbangan, tubuh secara otomatis mengaktifkan strategi motorik. Strategi pergelangan kaki digunakan untuk gangguan kecil dengan mengaktifkan otot-otot betis. Jika gangguan lebih besar, tubuh akan menggunakan strategi pinggul yang melibatkan gerakan panggul meluas untuk menggeser kembali pusat massa ke titik tengah. Apabila gangguan terlalu kuat, otak akan memerintahkan strategi melangkah sebagai upaya terakhir untuk memperluas dasar tumpuan dan mencegah kontak tubuh dengan tanah secara paksa.

Analisis Kinematika dan Aktivitas Otot

Analisis kinematika berfokus pada deskripsi pergerakan sudut sendi utama. Sendi panggul bergerak dari posisi fleksi maksimal saat kontak awal menuju posisi ekstensi maksimal saat akhir fase tumpuan. Stabilitas panggul sangat bergantung pada kekuatan otot abduktor. Jika terjadi kelemahan, maka akan tampak kemiringan panggul yang tidak normal atau pincang. Sendi lutut berfungsi sebagai peredam kejutan utama dengan fleksi terbesar terjadi pada fase ayunan untuk memastikan kaki tidak tersandung. Sementara itu, pergelangan kaki berfungsi sebagai pengungkit dorongan. Gerakan mengangkat kaki dan menekan kaki harus terjadi dengan urutan waktu yang sangat presisi. Otot tibialis anterior aktif kuat pada awal tumpuan untuk mencegah kaki menampar lantai secara tiba-tiba. Otot gluteus medius bertindak sebagai penstabil kunci yang mencegah panggul jatuh ke sisi samping saat kaki lain

sedang melayang. Kelancaran gerakan ini sangat bergantung pada sinkronisasi saraf dan kekuatan otot yang adekuat.

Parameter Jalan sebagai Indikator Stabilitas

Kualitas pola jalan dapat dinilai secara objektif melalui parameter ruang dan waktu. Panjang langkah merupakan indikator simetrisitas; adanya perbedaan antara langkah kanan dan kiri sering menunjukkan rasa nyeri atau keterbatasan gerak pada sendi. Lebar langkah juga menjadi parameter penting; melebarnya jarak antara kedua kaki merupakan tanda klasik instabilitas di mana individu berusaha memperluas dasar tumpuannya untuk merasa lebih aman, hal ini sering ditemukan pada pasien dengan gangguan koordinasi. Kecepatan berjalan dianggap sebagai tanda vital fungsional secara keseluruhan. Penurunan kecepatan merupakan strategi protektif otomatis tubuh untuk meminimalkan waktu di mana tubuh hanya bertumpu pada satu kaki. Irama langkah atau frekuensi langkah juga memberikan gambaran mengenai seberapa besar efisiensi energi yang dikeluarkan selama berjalan. Parameter-parameter ini menjadi data kuantitatif penting dalam proses evaluasi medis dan fisioterapi.

Faktor yang Memengaruhi Dan Implikasi Klinis

Berbagai faktor memengaruhi stabilitas gerak manusia. Proses penuaan menyebabkan penurunan massa otot dan kecepatan transmisi sinyal saraf. Lansia cenderung memiliki waktu kontak ganda di tanah yang lebih lama sebagai bentuk kompensasi keamanan. Faktor psikologis seperti ketakutan akan jatuh juga memicu pola jalan yang kaku dan hati-hati, yang ironisnya justru

meningkatkan risiko jatuh karena berkurangnya fleksibilitas reaksi otot. Faktor lingkungan dan alas kaki juga berpengaruh signifikan. Permukaan yang licin atau alas kaki yang tidak stabil memaksa otot penstabil bekerja lebih keras, menyebabkan kelelahan lebih cepat. Evaluasi klinis menggunakan tes fungsional seperti berjalan sambil berbelok atau melangkahi rintangan membantu praktisi menentukan strategi intervensi. Program fisioterapi biasanya mencakup latihan re-edukasi jalan, penguatan otot inti, serta latihan keseimbangan pada permukaan yang tidak stabil untuk mempertajam respon sensorik tubuh dalam menghadapi tantangan fisik di dunia nyata.

Analisis kinematika mempelajari geometri gerakan segmen tubuh selama berjalan tanpa memperhatikan gaya yang menyebabkannya. Fokus utama analisis ini adalah perubahan sudut pada tiga sendi utama ekstremitas bawah yang bekerja secara sinkron untuk memastikan efisiensi energi dan keamanan melangkah. Pada sendi panggul atau hip joint, gerakan kinematika yang terjadi sangat krusial dalam menentukan panjang langkah. Saat fase kontak awal, panggul berada pada posisi fleksi sekitar tiga puluh derajat. Seiring tubuh bergerak maju melewati kaki tumpu, panggul secara bertahap bergerak ke posisi netral dan mencapai ekstensi maksimal sekitar sepuluh hingga dua puluh derajat pada fase tumpuan akhir. Kegagalan mencapai ekstensi panggul yang adekuat, yang sering disebabkan oleh pemendekan otot fleksor panggul, akan mengakibatkan kompensasi berupa peningkatan kelengkungan tulang belakang bawah atau lordosis lumbal untuk menjaga tubuh tetap tegak saat melangkah. Pada sendi lutut atau knee joint,

kinematika berjalan ditandai dengan dua kali fase fleksi yang berbeda. Fleksi pertama terjadi segera setelah tumit menyentuh tanah sebagai bagian dari mekanisme penyerapan beban. Fleksi kedua yang lebih besar, mencapai sudut enam puluh hingga tujuh puluh derajat, terjadi pada fase ayunan awal. Gerakan fleksi lutut pada fase ayunan ini sangat vital untuk fungsionalitas jalan; jika lutut tidak mampu melipat dengan cukup, kaki akan cenderung terseret atau menabrak rintangan kecil di permukaan tanah. Oleh karena itu, kemampuan mengontrol derajat fleksi dan ekstensi lutut secara presisi merupakan indikator utama dari kualitas kontrol motorik seseorang. Pada sendi pergelangan kaki atau ankle joint, gerakan kinematika mengikuti pola yang dikenal sebagai mekanisme rocker. Terdapat tiga tahap rocker yang terjadi selama fase tumpuan. Heel rocker terjadi saat tumit menyentuh tanah dan kaki bergerak ke arah bawah menuju permukaan. Ankle rocker terjadi saat tulang kering bergerak maju di atas kaki yang menapak diam. Terakhir, forefoot rocker terjadi saat berat badan berpindah ke bagian depan kaki sebelum dorongan dilakukan. Ketepatan sudut pergelangan kaki sangat menentukan kemampuan tubuh dalam melakukan pembersihan langkah terhadap lantai serta efektivitas tenaga dorong ke depan.

Mekanisme Kompensasi Dan Dampak Jangka Panjang

Ketika terjadi gangguan biomekanika primer, seperti kelemahan otot kronis atau keterbatasan gerak sendi yang permanen, tubuh manusia secara instingtif akan mengembangkan mekanisme

kompensasi jangka panjang. Mekanisme ini bertujuan untuk menjaga kemampuan berjalan dan mencegah jatuh, namun sering kali menimbulkan konsekuensi patologis pada area tubuh lainnya akibat distribusi beban yang tidak seimbang. Salah satu mekanisme kompensasi yang paling umum ditemukan adalah strategi sirkumduksi. Mekanisme ini biasanya dikembangkan oleh individu yang memiliki keterbatasan fleksi lutut atau kelemahan otot pengangkat kaki (drop foot). Sebagai ganti mengangkat kaki secara lurus, individu tersebut akan mengayunkan kaki ke arah samping secara melingkar selama fase ayunan. Secara jangka panjang, kompensasi ini akan menyebabkan beban berlebih pada sendi panggul sisi yang berlawanan dan memicu nyeri punggung bawah akibat rotasi panggul yang berlebihan dan tidak simetris pada setiap langkah. Mekanisme kompensasi lainnya adalah penggunaan dasar tumpuan yang lebar atau wide base of support. Strategi ini sering diadopsi oleh individu dengan gangguan keseimbangan kronis, seperti pada populasi lansia atau penderita gangguan sistem vestibular. Dengan melebarkan jarak antara kedua kaki, stabilitas lateral memang meningkat, namun efisiensi energi akan menurun drastis. Kompensasi jangka panjang berupa pelebaran langkah ini akan mengubah sudut kerja otot abduktor panggul, yang jika dibiarkan akan menyebabkan atrofi otot tersebut dan justru memperburuk instabilitas di masa depan. Kompensasi jangka panjang juga sering melibatkan perubahan pada postur batang tubuh atau trunk. Sebagai contoh, pada kasus kelemahan otot gluteus medius yang kronis, tubuh akan cenderung melakukan kompensasi

dengan mencondongkan batang tubuh ke sisi kaki yang menumpu beban. Gerakan ini, yang dikenal sebagai Trendelenburg gait compensation, bertujuan untuk menjaga pusat massa tetap berada di atas kaki tumpu meskipun otot penstabil panggul tidak bekerja optimal. Konsekuensi jangka panjang dari pola ini adalah terjadinya ketidakseimbangan ketegangan otot di sepanjang tulang belakang, yang dapat memicu degenerasi diskus intervertebralis dan nyeri kronis.

Pola jalan kompensatoris lainnya adalah vaulting, di mana individu berjinjit pada kaki yang sehat untuk memberikan ruang lebih bagi kaki yang bermasalah agar bisa berayun maju tanpa menyentuh tanah. Meskipun strategi ini efektif untuk mencegah tersandung dalam jangka pendek, beban repetitif pada struktur ligamen pergelangan kaki dan peningkatan konsumsi oksigen yang sangat tinggi akan mengakibatkan kelelahan dini dan potensi cedera pada kaki yang semula sehat

Bab 7: Genu Valgus Tinjauan Biomekanik pada Ekstremitas Bawah

7.1 Genu Valgus Tinjauan Biomekanik Pada Ekstremitas Bawah

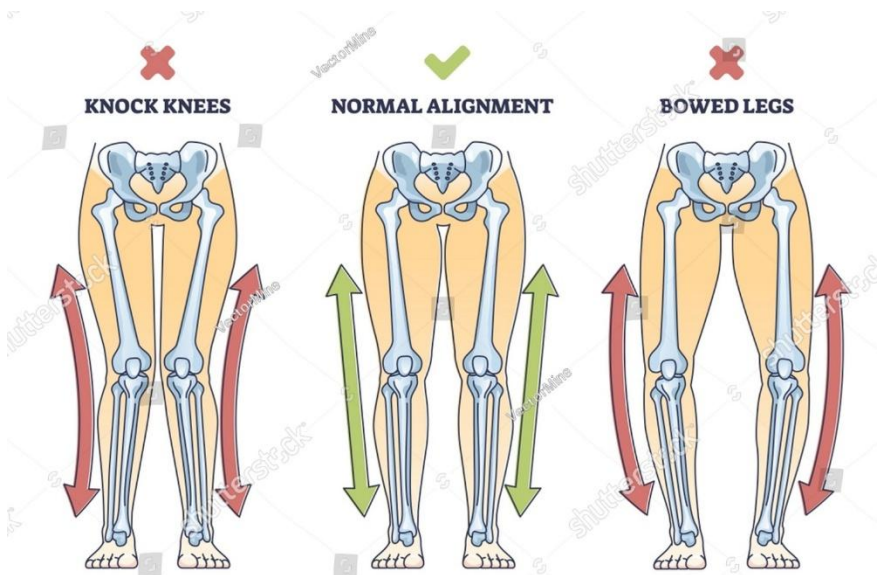
Lutut, sebagai sendi intermediet antara panggul dan pergelangan kaki, berfungsi sebagai penyerap kejutan sekaligus penerus gaya. Genu valgus, secara klinis dikenal sebagai knock-knee, bukan sekadar variasi anatomis, melainkan sebuah kondisi mekanis di mana aksis beban bergeser secara signifikan. Dalam perspektif biomekanik, setiap derajat deviasi dari aksis netral akan melipatgandakan stres pada jaringan lunak. Pemahaman mendalam mengenai kondisi ini sangat penting bagi praktisi kesehatan, terutama fisioterapis, untuk mencegah komplikasi degeneratif seperti osteoarthritis dini yang sering kali menjadi konsekuensi logis dari beban kerja sendi yang abnormal. Secara normal, aksis mekanik tungkai bawah adalah garis lurus yang ditarik dari pusat kepala femur melalui tengah sendi lutut hingga ke tengah sendi pergelangan kaki. Pada kondisi normal, garis ini jatuh sedikit ke arah medial dari pusat lutut. Namun, pada genu valgus, lutut berada di medial dari garis beban ini, sehingga menciptakan momen valgus eksternal yang

besar. Biomekanika lutut juga dipengaruhi oleh Hukum Wolff, yang menyatakan bahwa tulang akan beradaptasi sesuai dengan beban yang diterimanya. Pada penderita genu valgus kronis, terjadi remodeling tulang di mana bagian lateral kondilus femoralis menerima kompresi berlebih, yang dalam jangka panjang dapat menghambat pertumbuhan epifisis pada anak-anak atau menyebabkan sklerosis subkondral pada orang dewasa.

Anatomi Fungsional Dan Artikulasi Kompleks

Lutut terdiri dari dua artikulasi utama. Sendi tibiofemoral adalah sendi penyangga beban utama. Permukaan sendi lateral lebih datar dibandingkan medial, yang membuatnya lebih rentan terhadap ketidakstabilan jika terjadi pergeseran beban ke arah luar (lateral) seperti pada kasus valgus. Patella (tempurung lutut) berfungsi sebagai tuas mekanik yang meningkatkan efisiensi otot kuadrisep sebesar 30-50%. Pada genu valgus, jalur tracking patella berubah. Karena femur cenderung berotasi ke dalam (internal rotasi) dan tibia ke luar, patella akan tertarik secara lateral (lateral maltracking), yang memicu gesekan abnormal pada tulang rawan di belakang patella. Kompleksitas Sendi Tibiofemoral dalam Kondisi Valgus Sendi tibiofemoral adalah artikulasi penyangga beban utama yang melibatkan kondilus femoralis dan plateau tibia. Dalam kondisi biomekanik normal, beban didistribusikan secara relatif merata, dengan sedikit dominasi pada kompartemen medial. Namun, pada genu valgus, terjadi perubahan drastis pada titik kontak artikular:

Kompresi Lateral: Karena lutut berdeviasi ke arah medial, pusat massa tubuh jatuh di sisi lateral aksis sendi. Hal ini menyebabkan kondilus lateral femur menekan plateau tibia lateral dengan gaya yang berlipat ganda. Secara fungsional, ini mempercepat degradasi tulang rawan hialin dan penyempitan celah sendi lateral. Tegangan Medial (Tensile Stress): Kebalikan dari sisi lateral, struktur medial (seperti MCL dan kapsul sendi medial) mengalami peregangan kronis. Secara fungsional, ini menyebabkan "laxity" atau kekenduran ligamen, yang membuat lutut kehilangan stabilitas pasifnya. Arthrokinematika: Rolling dan Gliding yang Terganggu Gerakan sendi lutut melibatkan kombinasi antara rolling (menggulung) dan gliding (meluncur). Pada kondisi genu valgus, mekanisme "Screw-Home" (rotasi eksternal tibia pada akhir ekstensi) sering kali mengalami gangguan. Rotasi internal femur yang sering menyertai valgus (sering disebut dynamic valgus) mengubah sumbu rotasi fungsional. Akibatnya, meniskus tidak lagi berfungsi sebagai peredam kejutan yang efisien karena posisinya yang terdistorsi oleh gaya geser (*shear force*) yang meningkat secara abnormal.



Gambar 7.1 Ilustrasi anatomis yang membandingkan tiga jenis keselarasan bentuk tulang kaki manusia, yaitu *knock knees* (kaki berbentuk X), kesejajaran postur lutut yang normal, dan *bowed legs* (kaki berbentuk O).

Sumber: VectorMine Shutterstock Image (2022)

Analisis Sudut Q (Q-Angle) Dan Konsekuensi Mekaniknya

Sudut Q adalah sudut yang terbentuk antara garis yang ditarik dari Anterior Superior Iliac Spine (ASIS) ke pusat patella, dan garis dari pusat patella ke tuberositas tibia. Secara mekanik, sudut ini merepresentasikan arah gaya tarik otot kuadrisep. Pada individu dengan genu valgus, sudut Q secara otomatis meningkat (biasanya >15 derajat pada pria dan >20 derajat pada wanita). Peningkatan sudut Q ini menciptakan gaya resultan lateral pada patella setiap kali otot kuadrisep berkontraksi. Hal ini menjelaskan mengapa penderita genu valgus sering kali mengeluhkan nyeri di bagian depan lutut (Anterior Knee Pain). Distribusi Beban

Kompartemen Lateral Pada posisi berdiri normal, sekitar 60-70% beban tubuh melewati kompartemen medial lutut. Namun, pada genu valgus, pusat tekanan bergeser ke lateral. Kompresi yang terus-menerus pada meniskus lateral menyebabkan penipisan tulang rawan artikular, sementara struktur medial mengalami gaya tarik (tensile stress) yang kronis. Selama fase berjalan (gait cycle), terutama saat initial contact hingga mid-stance, terjadi momen valgus eksternal yang mencoba mendorong lutut lebih jauh ke dalam. Tubuh berusaha mengompensasi ini dengan kontraksi otot-otot lateral (seperti Tensor Fasciae Latae dan Gluteus Medius), namun jika gaya eksternal terlalu besar, otot-otot ini akan mengalami kelelahan kronis.

6.1 Ketegangan Ligamen Kolateral Medial (MCL)

MCL berfungsi sebagai penahan utama terhadap stres valgus. Pada penderita genu valgus, MCL berada dalam posisi teregang secara konstan. Hal ini menyebabkan mikrotrauma pada serat ligamen, yang mengakibatkan kelemahan pasif dan membuat sendi lutut menjadi semakin tidak stabil secara medial. Meniskus lateral berfungsi sebagai peredam kejutan di bagian luar lutut. Akibat kompresi tinggi pada posisi valgus, meniskus ini terjepit di antara kondilus lateral femur dan plateau tibia lateral. Hal ini sering menyebabkan robekan meniskus tipe degeneratif meskipun tanpa adanya trauma akut yang berat.

Rantai Kinetik: Dampak Pada Panggul Dan Kaki

Genu valgus jarang terjadi secara terisolasi. Seringkali ini adalah bagian dari rantai kinetik yang melibatkan: Adduksi panggul

dan rotasi internal femur yang berlebihan. Pronasi kaki berlebihan (flat foot). Ketika kaki mengalami pronasi, tibia akan berotasi ke dalam, yang kemudian mendorong lutut ke arah valgus. Ini adalah hubungan mekanis dua arah yang harus diperiksa secara totalitas. Otot Gluteus Medius bertanggung jawab menjaga stabilitas panggul di bidang frontal. Kelemahan otot ini menyebabkan panggul sisi yang tidak menumpu "jatuh" (Trendelenburg sign), yang secara mekanis memaksa lutut pada kaki yang menumpu untuk masuk ke posisi valgus guna menjaga keseimbangan pusat massa tubuh. Dalam sistem gerak manusia, ekstremitas bawah bekerja sebagai rantai kinematik tertutup ketika kaki menyentuh tanah, seperti pada posisi berdiri dan berjalan. Dalam kondisi ini, setiap perubahan posisi atau sudut pada satu segmen akan memengaruhi segmen lainnya. Pada genu valgus, terjadi peningkatan sudut antara femur dan tibia yang menyebabkan lutut bergerak ke arah medial. Posisi ini sering dikombinasikan dengan adduksi dan rotasi internal femur serta rotasi eksternal tibia. Kombinasi gerakan tersebut menciptakan pola yang dikenal sebagai dynamic knee valgus ketika terjadi dalam aktivitas fungsional seperti berjalan, berlari, atau melompat.

Perubahan pertama yang signifikan dalam rantai kinematik terjadi pada femur dan sendi panggul. Ketika lutut bergerak ke dalam, femur cenderung mengalami adduksi dan rotasi internal. Gerakan ini tidak berdiri sendiri, melainkan merupakan hasil dari ketidakseimbangan otot di sekitar panggul. Otot gluteus medius dan gluteus maximus, yang berfungsi sebagai stabilisator utama panggul dan pengontrol rotasi femur, sering ditemukan dalam keadaan lemah

atau kurang aktif. Sebaliknya, otot-otot seperti tensor fascia lata dan kelompok adduktor dapat menjadi dominan atau mengalami peningkatan tonus. Ketidakseimbangan ini menyebabkan kontrol lateral panggul menurun sehingga saat fase satu kaki menopang berat badan, pelvis sisi kontralateral dapat turun, fenomena yang dikenal sebagai tanda Trendelenburg. Ketika stabilitas panggul terganggu, pusat massa tubuh bergeser dan distribusi gaya reaksi tanah berubah. Dalam kondisi normal, gluteus medius mempertahankan posisi pelvis tetap netral selama fase stance pada gait cycle. Namun pada individu dengan genu valgus, kelemahan otot ini menyebabkan femur semakin masuk ke dalam, memperburuk sudut valgus lutut. Akibatnya, terjadi peningkatan momen abduksi lutut yang meningkatkan tekanan pada kompartemen lateral sendi lutut dan meregangkan struktur medial seperti ligamentum kolateral mediale. Dalam jangka panjang, distribusi beban yang tidak seimbang ini dapat mempercepat degenerasi kartilago pada sisi lateral dan meningkatkan risiko osteoarthritis kompartemen lateral. Selain itu, peningkatan sudut Q merupakan konsekuensi penting dari genu valgus. Sudut Q yang meningkat mengubah arah tarikan otot quadriceps terhadap patella sehingga patella terdorong lebih lateral selama fleksi dan ekstensi lutut. Kondisi ini mengganggu mekanika patellofemoral dan dapat memicu patellofemoral pain syndrome. Gesekan yang tidak simetris pada sendi patellofemoral meningkatkan stres kompresif lateral dan dapat menimbulkan nyeri anterior lutut, terutama saat menaiki tangga, jongkok, atau duduk lama dengan lutut fleksi. Dampak rantai

kinematik tidak berhenti pada lutut. Di bawahnya, tibia sering mengalami rotasi eksternal sebagai kompensasi dari rotasi internal femur. Ketidaksesuaian rotasi ini menciptakan torsi abnormal pada sendi lutut dan meningkatkan stres pada ligamen krusiatum anterior. Kombinasi valgus dan rotasi internal femur telah diidentifikasi sebagai mekanisme risiko tinggi cedera ligamentum krusiatum anterior, terutama pada aktivitas atletik yang melibatkan perubahan arah mendadak atau pendaratan dari lompatan. Pada tingkat pergelangan kaki dan kaki, kompensasi yang umum terjadi adalah peningkatan pronasi. Ketika lutut bergerak medial, garis beban tubuh ikut bergeser sehingga kaki beradaptasi dengan memperbesar kontak medial plantar. Pronasi berlebihan menyebabkan lengkung longitudinal medial menurun dan dapat berkembang menjadi pes planus fungsional. Perubahan ini mengubah pola distribusi tekanan plantar dan meningkatkan ketegangan pada fascia plantar, tendon tibialis posterior, dan struktur medial kaki lainnya. Akibatnya, individu dapat mengalami nyeri tumit, plantar fasciitis, atau kelelahan otot kaki yang lebih cepat. Gangguan alignment pada ekstremitas bawah juga memengaruhi postur keseluruhan tubuh. Rotasi internal femur yang persisten dapat mendorong panggul ke arah anterior tilt karena ketidakseimbangan antara fleksor dan ekstensor panggul. Ketika panggul mengalami anterior tilt, kurva lordosis lumbal dapat meningkat sebagai kompensasi untuk menjaga keseimbangan pusat gravitasi. Hal ini menunjukkan bahwa genu valgus, meskipun tampak sebagai deformitas lokal pada lutut, sebenarnya memiliki implikasi global terhadap sistem

muskuloskeletal. Dalam analisis gait, individu dengan genu valgus sering menunjukkan pola medial collapse saat fase stance. Lutut bergerak ke dalam, panggul sisi berlawanan turun, dan kaki mengalami pronasi. Pola ini meningkatkan beban pada jaringan lunak dan mengurangi efisiensi mekanik gerakan. Energi yang seharusnya disalurkan secara optimal melalui rantai kinematik menjadi terdisipasi akibat instabilitas segmen proksimal. Dalam jangka panjang, pola gerak kompensatorik ini meningkatkan risiko cedera overuse seperti iliotibial band syndrome, shin splint, dan nyeri pinggul lateral. Secara klinis, penting untuk memahami bahwa genu valgus bukan hanya masalah struktural tetapi juga masalah kontrol neuromuskular. Banyak kasus dynamic knee valgus terjadi bukan karena deformitas tulang yang berat, melainkan karena kegagalan sistem saraf dan otot dalam mengontrol alignment selama aktivitas fungsional. Oleh karena itu, intervensi terapeutik harus mencakup penguatan otot panggul, peningkatan kontrol rotasi femur, stabilisasi inti, serta koreksi pola gerak fungsional. Pendekatan yang hanya berfokus pada lutut tanpa memperhatikan panggul dan kaki tidak akan memberikan hasil optimal karena sumber gangguan sering kali berasal dari segmen proksimal. Secara keseluruhan, genu valgus merupakan gangguan alignment yang memicu serangkaian perubahan biomekanik sepanjang rantai kinematik ekstremitas bawah. Lutut yang bergerak ke dalam memengaruhi rotasi femur, stabilitas panggul, distribusi beban sendi, hingga fungsi kaki. Dampaknya meliputi gangguan stabilitas panggul, peningkatan stres sendi lutut, perubahan tekanan plantar,

dan risiko cedera ligamen maupun degeneratif. Memahami hubungan sebab-akibat dalam rantai kinematik ini sangat penting dalam evaluasi klinis, perencanaan rehabilitasi, serta pencegahan cedera jangka panjang.

Intervensi Biomekanik Dan Rehabilitasi

Pada penderita genu valgus, terjadi peningkatan gaya adduksi pada panggul selama fase menumpu beban. Kaki cenderung melakukan kompensasi dengan melakukan toe-out (ujung jari menghadap ke luar) untuk menstabilkan dasar tumpuan. Karena mekanika sendi yang tidak efisien, otot-otot di sekitar lutut harus bekerja lebih keras untuk menstabilkan sendi. Hal ini menyebabkan peningkatan konsumsi oksigen dan kelelahan yang lebih cepat saat berjalan jarak jauh dibandingkan individu dengan alignment normal. Fokus utama rehabilitasi adalah memperkuat otot-otot yang melawan gaya valgus:

Abduktor Panggul: Untuk mencegah kolaps medial panggul.
Eksternal Rotator Panggul: Untuk mengoreksi rotasi internal femur.
Vastus Medialis Oblique (VMO): Untuk menyeimbangkan tarikan lateral patella. Pemberian medial wedge atau penyangga lengkungan kaki (arch support) dapat membantu mengurangi pronasi kaki berlebihan, yang secara mekanis akan mengurangi stres valgus pada lutut dari arah bawah (bottom-up approach). Genu valgus adalah gangguan biomekanik kompleks yang melibatkan perubahan distribusi beban pada kompartemen lateral lutut dan peningkatan tegangan pada struktur medial. Melalui analisis sudut Q, kontrol

neuromuskular panggul, dan mekanika kaki, kita dapat memahami bahwa penanganan lutut tidak bisa dilepaskan dari sendi di atas dan di bawahnya. Intervensi yang efektif harus didasarkan pada upaya mengembalikan aksis mekanik menuju kondisi seimbang guna melindungi integritas sendi jangka panjang.

Bab 8: Analisis Biomekanika pada Genu Varus

8.1 Analisis Biomekanik pada Genu Varus

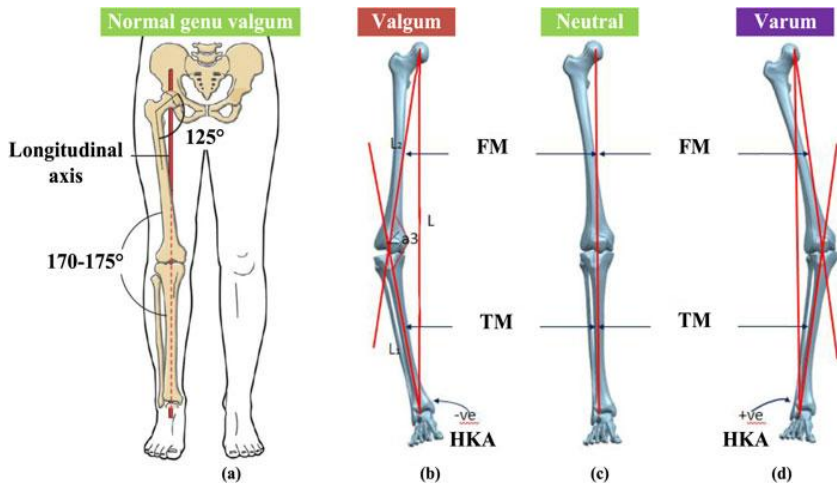
Genu varus merupakan suatu kondisi malalignment pada ekstremitas bawah yang secara visual ditandai dengan deviasi sendi lutut ke arah lateral. Dalam analisis kinesiologi, kondisi ini menyebabkan kedua lutut tidak dapat bersentuhan ketika kedua pergelangan kaki atau maleolus medial dirapatkan, sehingga menciptakan konfigurasi tungkai yang menyerupai busur panah. Secara struktural, sendi lutut adalah kompleks sinovial yang mengandalkan integrasi antara femur distal, tibia proksimal, dan patela. Pada kondisi normal, beban tubuh didistribusikan secara proporsional melalui pusat sendi, namun pada genu varus, terjadi pergeseran aksis mekanik yang signifikan. Patomekanika utama pada genu varus melibatkan perubahan Q-angle yang cenderung mengecil atau bahkan bernilai negatif, disertai dengan peningkatan jarak interkondilar. Perubahan sudut ini menyebabkan garis beban tubuh atau mechanical axis bergeser ke arah medial sendi lutut. Akibatnya, muncul lengan momen beban yang lebih panjang terhadap pusat lutut, yang secara otomatis meningkatkan momen adduksi lutut atau knee adduction moment. Gaya ini menciptakan tekanan kompresi yang sangat tinggi pada kompartemen medial

lutut, sementara struktur di sisi lateral seperti ligamen kolateral lateral (LCL) mengalami stres regangan yang berlebihan. Analisis gerak pada individu dengan genu varus seringkali menunjukkan fenomena yang disebut sebagai lateral knee thrust. Gerakan ini adalah pergeseran lutut ke arah luar secara mendadak yang terjadi pada saat fase menumpu atau stance phase dalam siklus berjalan. Hal ini terjadi karena ketidakmampuan struktur penstabil pasif dan aktif untuk menyeimbangkan momen varus eksternal yang besar. Jika kondisi ini berlangsung secara kronis, distribusi beban yang tidak merata akan mempercepat kerusakan kartilago pada sisi medial, yang menjadi faktor risiko utama terjadinya osteoarthritis lutut dini. Selain dampak pada sendi lutut itu sendiri, deformitas ini memengaruhi seluruh rantai kinetik ekstremitas bawah. Sebagai kompensasi atas posisi varus di lutut, seringkali terjadi perubahan posisi pada sendi panggul dan pergelangan kaki untuk menjaga keseimbangan tubuh saat berdiri dan berjalan. Meniskus medial, yang berfungsi sebagai peredam kejutan, akan menerima beban mekanik di luar kapasitas fisiologisnya, yang sering kali berujung pada cedera degeneratif. Pemahaman mendalam mengenai biomekanika ini menjadi dasar penting bagi fisioterapi dalam menentukan intervensi, baik melalui penguatan otot-otot abduktor pinggul untuk mengurangi momen varus maupun penggunaan alat bantu korektif. Ketidakseimbangan beban pada genu varus juga berdampak langsung pada integritas struktur jaringan lunak di sekitar sendi. Secara kinesiology, ligamen kolateral lateral atau LCL akan mengalami ketegangan yang konstan karena tarikan gaya ke

arah luar, sementara ligamen kolateral medial atau MCL justru cenderung mengalami pemendekan atau adaptasi jaringan yang kurang fungsional. Kondisi ini menciptakan instabilitas pasif yang memaksa otot-otot di sekitar panggul dan lutut, terutama kompleks otot tensor fasciae latae dan iliotibial band, untuk bekerja lebih keras dalam menahan gaya varus tersebut. Ketegangan kronis pada iliotibial band sering kali menimbulkan nyeri sekunder di sisi lateral lutut akibat gesekan yang berlebihan pada epikondilus lateral femur. Analisis pada sendi patelofemoral menunjukkan bahwa malalignment varus mengubah jalur penarikan otot kuadrisep. Meskipun Q-angle mengecil, distribusi tekanan pada permukaan sendi patela menjadi tidak merata, yang sering kali menyebabkan degenerasi kartilago pada sisi medial patela. Hal ini diperburuk oleh perubahan torsi pada tulang tibia yang sering menyertai kondisi genu varus, di mana tibia cenderung mengalami rotasi internal yang berlebihan. Sinkronisasi antara gerakan fleksi-ekstensi lutut dan rotasi tibia atau screw-home mechanism menjadi terganggu, sehingga efisiensi mekanik saat berjalan menurun secara signifikan dan meningkatkan konsumsi energi metabolik pasien.

Ditinjau dari perspektif distribusi tekanan plantar, individu dengan genu varus cenderung menunjukkan peningkatan tekanan pada sisi lateral kaki selama fase mid-stance hingga push-off. Kompensasi ini dilakukan oleh tubuh untuk menjaga pusat gravitasi tetap berada di dalam basis penumpu, namun dalam jangka panjang dapat memicu terjadinya nyeri pada pergelangan kaki dan kelelahan otot-otot evertor. Oleh karena itu, penanganan fisioterapi tidak hanya

terbatas pada area lutut, melainkan harus menyasar pada perbaikan kontrol neuromuskular di seluruh rantai kinetik, mulai dari stabilisasi panggul hingga koreksi distribusi beban pada kaki, guna meminimalisir progresivitas deformitas dan menjaga kualitas hidup pasien.



Gambar 8.1 Diagram ortopedi yang menunjukkan variasi keselarasan sumbu tulang kaki bagian bawah, membandingkan postur lutut normal, *valgum* (lutut berbentuk X), dan *varum* (lutut berbentuk O).

Sumber: Springer Ortopedi Journal Figure (2020)

Mekanika Jaringan Dan Adaptasi Fungsional

Ditinjau dari aspek biomekanika jaringan, genu varus menyebabkan terjadinya redistribusi tegangan yang tidak merata pada kartilago artikular. Dalam kondisi normal, beban tubuh melewati garis tengah sendi lutut, namun pada deformitas varus, beban tersebut terkonsentrasi secara ekstrem pada dataran tibia medial. Hal ini mengakibatkan peningkatan tekanan kontak yang melampaui batas ambang fisiologis jaringan tulang rawan. Tekanan

yang berlebihan dan terus-menerus ini memicu proses degradasi matriks ekstraseluler pada kartilago, yang secara klinis bermanifestasi sebagai penyempitan celah sendi medial. Secara bersamaan, tulang subkondral di bawahnya akan mengalami sklerosis atau pengerasan sebagai respons adaptif terhadap beban kompresi yang tinggi, yang pada akhirnya mengubah sifat penyerapan kejutan dari sendi lutut tersebut. Selain dampak pada tulang rawan, struktur meniskus medial juga memikul beban mekanik yang sangat berat. Meniskus medial pada lutut varus berfungsi sebagai penyangga utama yang menahan gaya kompresi dari kondilus medial femur yang bergeser. Tekanan sirkumferensial yang tinggi ini sering kali menyebabkan robekan degeneratif pada kornu posterior meniskus medial. Ketidakhadiran fungsi distribusi beban yang efektif dari meniskus akan semakin memperparah konsentrasi stres pada tulang rawan di sekitarnya. Di sisi berlawanan, yaitu kompartemen lateral, terjadi fenomena "gapping" atau pembukaan celah sendi. Meskipun hal ini mengurangi tekanan kompresi di sisi lateral, namun ia menciptakan stres regangan pada kapsul sendi lateral dan memperlemah stabilitas dinamis lutut saat melakukan gerakan rotasi atau perubahan arah yang mendadak. Secara kinesiology, otot-otot di sekitar panggul harus melakukan kompensasi yang signifikan untuk menstabilkan pelvis selama fase berjalan satu kaki (single limb stance). Kelemahan pada otot abduktor panggul, terutama gluteus medius, akan memperparah knee adduction moment (KAM) karena panggul cenderung jatuh ke sisi yang tidak menumpu beban, yang secara mekanik mendorong lutut

lebih jauh ke arah varus. Oleh karena itu, efisiensi berjalan pada individu dengan genu varus menurun drastis karena tubuh harus mengeluarkan energi ekstra untuk mengontrol posisi tungkai agar tetap stabil. Pemahaman mengenai interaksi antara sendi panggul, lutut, dan pergelangan kaki dalam satu kesatuan rantai kinetik ini sangat krusial, karena koreksi pada satu segmen sering kali memerlukan penyesuaian fungsional pada segmen lainnya untuk mencapai pola gerak yang optimal dan mencegah disabilitas fungsional jangka panjang.

Dinamika Otot Dan Implikasi Jangka Panjang Pada Rantai Kinetik

Eksistensi genu varus secara fundamental mengubah efisiensi kerja otot-otot penggerak utama di sekitar sendi lutut dan panggul. Dalam kondisi normal, otot kuadrisep bekerja untuk menstabilkan lutut melalui jalur tarikan yang sejajar dengan aksis mekanik. Namun, pada kondisi varus, terjadi perubahan vektor gaya di mana otot vatus lateralis cenderung bekerja lebih dominan untuk mengimbangi pergeseran beban ke arah medial. Hal ini menciptakan ketidakseimbangan gaya tarik pada patela, yang memicu munculnya sindrom nyeri patelofemoral. Selain itu, otot-otot fleksor lutut seperti hamstring, khususnya bagian medial, sering kali mengalami ketegangan kompensatoris dalam upaya menjaga stabilitas sendi yang terganggu akibat beban varus yang konstan. Perubahan biomekanik ini tidak hanya berhenti di sendi lutut, melainkan merambat ke atas hingga ke tulang belakang thoracolumbar melalui

mekanisme kompensasi pelvis. Untuk menjaga agar pusat massa tubuh tetap berada di atas basis penumpu, individu dengan genu varus sering kali menunjukkan posisi pelvis yang cenderung miring ke satu sisi atau mengalami rotasi yang berlebihan saat fase berjalan. Ketidaksejajaran pelvis ini dalam jangka panjang dapat memicu terjadinya scoliosis fungsional atau nyeri punggung bawah kronis akibat distribusi beban yang asimetris pada faset sendi tulang belakang. Dengan demikian, beban mekanik yang semula berpusat di lutut akhirnya menciptakan stres biomekanik pada struktur yang letaknya jauh dari lokasi deformitas primer. Ditinjau dari perspektif kesehatan jaringan jangka panjang, persistensi gaya varus memicu siklus degeneratif yang sulit diputus tanpa intervensi yang tepat. Peningkatan tekanan pada tulang subkondral medial memicu pelepasan mediator inflamasi yang mempercepat kerusakan matriks kolagen. Seiring berjalannya waktu, osteofit atau taji tulang mulai terbentuk di tepian sendi sebagai upaya gagal tubuh untuk memperluas permukaan sendi guna menurunkan tekanan. Kondisi ini menyebabkan keterbatasan lingkup gerak sendi yang progresif, terutama pada gerakan ekstensi penuh. Oleh karena itu, pendekatan fisioterapi yang holistik sangat diperlukan, yang tidak hanya berfokus pada penguatan otot lokal, tetapi juga pada edukasi pola gerak dan modifikasi beban untuk memperlambat laju degenerasi sendi secara keseluruhan.

Integrasi neuromuskular Dan Analisis Beban Dinamis Pada Deformitas Varus

Dampak dari genu varus tidak hanya terbatas pada jaringan ikat dan tulang, tetapi juga merambat pada sistem kontrol neuromuskular. Pergeseran aksis mekanik ke arah medial memaksa sistem saraf pusat untuk memodifikasi strategi aktivasi otot guna menjaga stabilitas postural. Pada individu dengan variasi varus yang signifikan, sering kali ditemukan adanya keterlambatan waktu aktivasi atau onset latency pada otot vastus medialis obliquus. Ketidaksinkronan ini menyebabkan patela tidak meluncur dengan benar pada alur troklear femur, yang dalam jangka panjang meningkatkan risiko atrofi otot akibat inhibisi artrogenik. Selain itu, regangan kronis pada sisi lateral lutut dapat memberikan tekanan mekanik pada saraf fibularis komunis yang melintasi leher fibula, yang jika berat, dapat mengganggu transmisi sinyal saraf menuju otot-otot pretibial. Dalam kondisi dinamis, seperti saat berlari atau melompat, beban mekanik yang diterima oleh lutut varus meningkat berlipat ganda dibandingkan saat berdiri statis. Gaya reaksi tanah atau ground reaction force yang diterima oleh tumit akan menciptakan lengan momen yang sangat besar terhadap pusat lutut karena posisi lutut yang sudah berada jauh di lateral dari garis beban. Hal ini menuntut kerja eksentrik yang luar biasa dari otot-otot stabilisator lateral untuk mencegah kolapsnya sendi. Kegagalan otot dalam menyerap energi kinetik ini menyebabkan getaran atau shockwave merambat langsung ke struktur tulang tanpa redaman yang memadai, yang menjelaskan mengapa individu dengan genu

varus lebih rentan mengalami fraktur stres pada tibia atau cedera ligamen saat beraktivitas dengan intensitas tinggi. Penting untuk memahami bahwa biomekanika genu varus bersifat siklik dan progresif. Beban berlebih pada kompartemen medial menyebabkan penipisan kartilago, yang kemudian membuat sudut varus semakin bertambah, dan sudut yang bertambah tersebut kembali meningkatkan beban kompresi medial. Siklus umpan balik positif ini hanya dapat diintervensi melalui pendekatan yang komprehensif, mulai dari modifikasi aktivitas, penggunaan ortosis seperti lateral wedge insoles untuk menggeser pusat tekanan ke arah lateral, hingga latihan penguatan rantai tertutup yang spesifik. Pemahaman yang mendalam mengenai mekanotransduksi, yaitu bagaimana sel-sel tulang dan tulang rawan merespons beban mekanik ini, menjadi kunci bagi fisioterapis dalam merancang program rehabilitasi yang tidak hanya mengurangi gejala nyeri, tetapi juga mampu memperlambat laju deformitas struktural pada pasien.

Mekanotransduksi Dan Adaptasi Struktural Jaringan Keras

Efek jangka panjang dari genu varus tidak hanya terbatas pada perubahan bentuk makroskopis, tetapi juga merambah hingga ke level seluler melalui proses mekanotransduksi. Mekanotransduksi adalah kemampuan sel-sel tulang dan tulang rawan untuk mengubah beban mekanik eksternal menjadi sinyal biokimia. Pada kompartemen medial yang mengalami beban kompresi berlebih, osteosit di dalam tulang subkondral memberikan respons terhadap stres mekanik dengan meningkatkan aktivitas osteoblastik. Hal ini

menyebabkan terjadinya sklerosis subkondral atau pengerasan tulang di bawah tulang rawan, yang bertujuan untuk memperkuat struktur dalam menahan beban, namun justru mengurangi elastisitas sendi secara keseluruhan. Sebaliknya, pada sisi lateral yang mengalami gaya regangan atau tension, terjadi penurunan densitas tulang relatif yang dapat memperburuk ketidakseimbangan struktural seiring berjalannya waktu. Kompensasi fungsional juga terlihat pada sistem sensorimotor dan propriosepsi. Karena posisi sendi yang menyimpang dari aksis normal, reseptor mekanik atau mekanoreseptor yang terletak pada ligamen dan kapsul sendi mengirimkan sinyal posisi sendi yang berbeda ke sistem saraf pusat. Distorsi informasi proprioseptif ini menyebabkan penurunan kemampuan kontrol neuromuskular secara dinamis. Akibatnya, individu dengan genu varus sering kali mengalami penurunan stabilitas postural, terutama saat melakukan aktivitas di permukaan yang tidak rata atau saat kelelahan otot mulai muncul. Ketidakmampuan sistem saraf untuk memprediksi dan merespons beban kejut secara akurat akan semakin mempercepat laju kerusakan jaringan lunak pelindung sendi. Selain itu, penting untuk memperhatikan aspek biomekanika pada sendi pergelangan kaki sebagai kompensasi dari posisi varus di lutut. Untuk mempertahankan telapak kaki tetap menapak rata di tanah (plantar grade), sendi subtalar sering kali melakukan kompensasi berupa gerakan eversi atau pronasi yang berlebihan. Kompensasi ini menciptakan tegangan tambahan pada tendon tibial posterior dan fascia plantar. Fenomena ini menunjukkan bahwa genu varus bukan

sekadar masalah lokal pada lutut, melainkan sebuah gangguan sistemik pada seluruh rantai kinetik anggota gerak bawah. Oleh karena itu, pendekatan rehabilitasi yang komprehensif harus mempertimbangkan koreksi pada kaki dan penguatan kontrol motorik panggul guna menciptakan distribusi beban yang lebih fisiologis dan mencegah disabilitas yang lebih berat di masa depan.

Integrasi neuromuskular Dan Analisis Beban Dinamis Pada Deformitas Varus

Dampak dari genu varus tidak hanya terbatas pada jaringan ikat dan tulang, tetapi juga merambat pada sistem kontrol neuromuskular. Pergeseran aksis mekanik ke arah medial memaksa sistem saraf pusat untuk memodifikasi strategi aktivasi otot guna menjaga stabilitas postural. Pada individu dengan variasi varus yang signifikan, sering kali ditemukan adanya keterlambatan waktu aktivasi atau onset latency pada otot vastus medialis obliquus. Ketidaksinkronan ini menyebabkan patela tidak meluncur dengan benar pada alur troklear femur, yang dalam jangka panjang meningkatkan risiko atrofi otot akibat inhibisi artrogenik. Selain itu, regangan kronis pada sisi lateral lutut dapat memberikan tekanan mekanik pada saraf fibularis komunis yang melintasi leher fibula, yang jika berat, dapat mengganggu transmisi sinyal saraf menuju otot-otot pretibial. Dalam kondisi dinamis, seperti saat berlari atau melompat, beban mekanik yang diterima oleh lutut varus meningkat berlipat ganda dibandingkan saat berdiri statis. Gaya reaksi tanah atau ground reaction force yang diterima oleh tumit akan

menciptakan lengan momen yang sangat besar terhadap pusat lutut karena posisi lutut yang sudah berada jauh di lateral dari garis beban. Hal ini menuntut kerja eksentrik yang luar biasa dari otot-otot stabilisator lateral untuk mencegah kolapsnya sendi. Kegagalan otot dalam menyerap energi kinetik ini menyebabkan getaran atau shockwave merambat langsung ke struktur tulang tanpa redaman yang memadai, yang menjelaskan mengapa individu dengan genu varus lebih rentan mengalami fraktur stres pada tibia atau cedera ligamen saat beraktivitas dengan intensitas tinggi. Penting untuk memahami bahwa biomekanika genu varus bersifat siklik dan progresif. Beban berlebih pada kompartemen medial menyebabkan penipisan kartilago, yang kemudian membuat sudut varus semakin bertambah, dan sudut yang bertambah tersebut kembali meningkatkan beban kompresi medial. Siklus umpan balik positif ini hanya dapat diintervensi melalui pendekatan yang komprehensif, mulai dari modifikasi aktivitas, penggunaan ortosis seperti lateral wedge insoles untuk menggeser pusat tekanan ke arah lateral, hingga latihan penguatan rantai tertutup yang spesifik. Pemahaman yang mendalam mengenai mekanotransduksi, yaitu bagaimana sel-sel tulang dan tulang rawan merespons beban mekanik ini, menjadi kunci bagi fisioterapis dalam merancang program rehabilitasi yang tidak hanya mengurangi gejala nyeri, tetapi juga mampu memperlambat laju deformitas struktural pada pasien.

Strategi Modifikasi Biomekanik Dan Analisis Kompensasi Fungsional

Ditinjau dari perspektif penatalaksanaan klinis, pemahaman mendalam mengenai arah gaya resultan pada lutut varus memungkinkan fisioterapis untuk merancang strategi intervensi yang bersifat preventif maupun korektif. Salah satu pendekatan biomekanik yang sering digunakan adalah penggunaan lateral wedge insole atau ganjalan pada sisi luar alas kaki. Secara mekanik, ganjalan ini berfungsi untuk menggeser pusat tekanan atau center of pressure ke arah lateral selama fase berdiri. Pergeseran ini secara otomatis akan memperpendek lengan momen beban terhadap pusat sendi lutut, yang pada akhirnya secara signifikan menurunkan nilai knee adduction moment dan mengurangi stres kompresi pada tulang rawan medial yang sudah mengalami degenerasi. Selain modifikasi eksternal, adaptasi pola jalan atau gait retraining menjadi fokus utama dalam analisis kinesiologi dinamis. Individu dengan genu varus sering disarankan untuk mengadopsi pola jalan dengan sudut kaki yang sedikit keluar atau toe-out gait. Secara biomekanik, posisi kaki yang berotasi ke luar ini akan mengubah orientasi aksis sendi lutut terhadap garis gaya reaksi tanah, sehingga beban tidak lagi terkonsentrasi sepenuhnya pada sisi medial. Meskipun hal ini merupakan mekanisme kompensasi, jika dilatih dengan benar, strategi ini dapat berfungsi sebagai pelindung sendi yang efektif untuk memperlambat laju kerusakan jaringan tanpa harus segera melakukan tindakan operatif yang invasif. Integrasi latihan beban pada rantai kinetik tertutup harus memperhatikan prinsip alignment

yang ketat untuk menghindari cedera sekunder. Karena adanya kecenderungan lutut untuk bergerak semakin ke lateral saat menerima beban berat, penguatan otot-otot adduktor panggul dan stabilisator medial menjadi sangat krusial. Otot-otot ini harus dilatih untuk bekerja secara sinergis dalam mempertahankan posisi netral sendi lutut selama aktivitas fungsional seperti berjongkok atau menaiki tangga. Tanpa kontrol motorik yang memadai, peningkatan kekuatan otot saja tidak akan cukup untuk mengubah distribusi beban yang merusak. Oleh karena itu, pendekatan rehabilitasi pada kasus genu varus harus menggabungkan aspek penguatan otot dengan reedukasi proprioseptif guna menciptakan pola gerak yang lebih efisien dan berkelanjutan secara biomekanik. Penting juga untuk menyadari bahwa keberhasilan intervensi biomekanik sangat bergantung pada tingkat kepatuhan jaringan terhadap beban atau tissue compliance. Pada tahap awal deformitas di mana jaringan ikat masih memiliki fleksibilitas, koreksi mekanik dapat memberikan hasil yang sangat optimal. Namun, pada tahap lanjut di mana telah terjadi perubahan struktural permanen pada tulang dan ligamen, tujuan utama biomekanika bergeser dari koreksi total menjadi manajemen beban untuk menjaga sisa fungsi gerak yang ada.

Analisis Radiologi Biomekanik Dan Korelasi Distal Pada Deformitas Varus

Dalam melakukan analisis yang komprehensif, pemahaman mengenai alignment tidak dapat dipisahkan dari parameter radiologi yang mengukur derajat keparahan secara mekanik. Salah satu

indikator utama dalam biomekanika adalah pengukuran Mikulicz Line atau garis aksis mekanik yang ditarik dari pusat kaput femur hingga pusat sendi pergelangan kaki. Pada kondisi genu varus, garis ini tidak lagi melewati pusat sendi lutut melainkan bergeser jauh ke sisi medial, yang secara kuantitatif menunjukkan besarnya beban eksentrik yang harus ditanggung oleh kompartemen medial. Deviasi ini sering kali diiringi dengan perubahan pada Medial Proximal Tibial Angle (MPTA), di mana sudut yang terbentuk antara garis sendi tibia dan aksis longitudinal tibia mengecil, mencerminkan adanya kemiringan struktural pada dataran tibia yang memperparah kecenderungan varus selama fase menumpu beban. Eksistensi deformitas varus juga memicu perubahan kompensatoris yang signifikan pada kompleks kaki dan pergelangan kaki. Secara biomekanik, lutut yang melengkung ke luar akan memaksa kaki untuk melakukan adaptasi agar telapak kaki tetap dapat menapak secara fungsional di atas permukaan tanah. Hal ini sering kali bermanifestasi sebagai supinasi kaki yang berlebihan pada tahap awal, di mana beban terkonsentrasi pada tepi luar kaki atau lateral border. Namun, sebagai upaya kompensasi jangka panjang untuk menjaga keseimbangan, sendi subtalar dapat mengalami pronasi paksa yang justru menciptakan ketegangan abnormal pada jaringan lunak di sisi medial kaki, seperti tendon tibial posterior. Ketidaksejajaran rantai kinetik dari bawah ini menciptakan efek "domino" yang jika tidak dikoreksi, akan terus memberikan umpan balik negatif yang mempercepat kegagalan mekanik pada sendi lutut di atasnya. Selain itu, penting untuk meninjau aspek distribusi massa

otot dan pengaruhnya terhadap stabilitas dinamis. Pada individu dengan genu varus, sering ditemukan adanya atrofi fungsional pada otot-otot evertor kaki dan abduktor panggul. Ketidakmampuan otot-otot ini dalam menyediakan momen stabilisasi yang cukup menyebabkan lutut semakin terpapar pada gaya geser lateral yang merusak. Dalam konteks ini, biomekanika tidak hanya melihat tulang sebagai batang kaku, tetapi juga mempertimbangkan peran jaringan lunak sebagai elemen penyeimbang gaya. Kegagalan sistem kendali motorik dalam mengantisipasi beban kejut saat berjalan atau berlari akan mengakibatkan energi kinetik terserap langsung oleh kartilago dan meniskus, yang pada akhirnya memicu peradangan kronis dan osteofitosis. Sebagai penutup dalam perspektif kinesiologi, penanganan genu varus harus dipandang sebagai upaya restorasi harmoni mekanik di seluruh anggota gerak bawah. Intervensi yang hanya terfokus pada satu sendi tanpa mempertimbangkan hubungan fungsional antara panggul, lutut, dan kaki sering kali gagal memberikan hasil yang permanen. Oleh karena itu, melalui analisis yang telah dipaparkan, terlihat jelas bahwa sinkronisasi antara koreksi posisi, penguatan otot spesifik, dan edukasi pola gerak adalah kunci utama dalam memutus siklus degeneratif yang disebabkan oleh malalignment varus, guna mengembalikan efisiensi gerak dan kualitas hidup pasien secara optimal.

Dinamika Aktivitas Fisik Dan Manajemen Beban Jangka Panjang

Dalam perspektif biomekanika terapan, pengaruh aktivitas fisik terhadap progresi genu varus sangat bergantung pada besaran dan frekuensi beban yang diterima oleh sendi. Pada individu dengan malalignment varus, aktivitas dengan dampak tinggi seperti berlari atau melompat akan melipatgandakan Peak Knee Adduction Moment (PKAM). Gaya ini tidak hanya menekan kartilago medial, tetapi juga menciptakan stres geser yang dapat merusak mikrostuktur kolagen. Oleh karena itu, modifikasi aktivitas menjadi komponen krusial dalam kinesiology preventif. Mengalihkan beban dari aktivitas high-impact ke latihan rantai kinetik tertutup yang terkontrol, seperti bersepeda atau berenang, memungkinkan sendi lutut untuk tetap mendapatkan stimulasi mekanik yang diperlukan untuk metabolisme tulang rawan tanpa harus terpapar pada puncak beban yang merusak. Seiring bertambahnya usia, elastisitas jaringan lunak dan kemampuan regenerasi kartilago menurun, sehingga deviasi varus yang awalnya bersifat kompensatoris dapat dengan cepat berubah menjadi patologis. Pada tahap lanjut, sering terjadi fenomena varus thrust yang lebih berat, di mana lutut benar-benar terlihat "goyang" ke lateral setiap kali tumit menyentuh tanah. Secara biomekanik, hal ini mengindikasikan bahwa struktur penahan lateral, terutama kompleks ligamen kolateral lateral dan kapsul sendi posterolateral, telah mengalami kegagalan mekanik atau pemanjangan permanen. Kondisi ini menuntut penggunaan unloader brace yang bekerja dengan prinsip gaya tiga titik (three-point

pressure system). Penyangga ini memberikan tekanan ke arah medial pada sendi lutut sambil memberikan tumpuan di panggul dan pergelangan kaki, yang secara mekanik "membuka" kompartemen medial dan mendistribusikan kembali beban ke kompartemen lateral yang masih sehat. efektivitas intervensi fisioterapi pada genu varus sangat ditentukan oleh kemampuan pasien dalam mengintegrasikan kontrol neuromuskular ke dalam aktivitas sehari-hari. Pelatihan biofeedback menggunakan analisis video atau sensor tekanan dapat membantu pasien menyadari posisi lutut mereka saat bergerak. Melalui latihan yang berfokus pada penguatan otot gluteus medius dan kontrol rotasi femur, beban varus dapat diminimalisir melalui koreksi proksimal. Dengan demikian, penanganan genu varus adalah upaya multidimensional yang menggabungkan koreksi struktural, penguatan fungsional, dan modifikasi gaya hidup. Pemahaman kinesiology yang tepat memungkinkan transisi dari pola gerak yang merusak menuju pola gerak yang protektif, sehingga memperpanjang usia fungsional sendi lutut dan mencegah kecacatan permanen di masa depan

Stabilitas Dinamis Dan Peran Jaringan Lunak Periartikular

Analisis biomekanika yang lebih kompleks pada genu varus melibatkan evaluasi terhadap stabilitas dinamis yang diberikan oleh struktur jaringan lunak di sekitar sendi lutut. Ketika aksis mekanik bergeser ke medial, beban tarik pada sisi lateral lutut meningkat secara drastis, yang secara khusus membebani kompleks ligamen kolateral lateral dan tendon otot popliteus. Struktur-struktur ini

berfungsi sebagai penahan utama terhadap gaya varus, namun ketika beban tersebut melampaui ambang batas elastisitasnya, akan terjadi fenomena mikrotrauma yang bersifat akumulatif. Ketidakmampuan jaringan lunak lateral dalam menahan momen adduksi lutut yang tinggi menyebabkan munculnya celah atau perenggangan sendi pada sisi lateral, yang secara kinesiologi memperburuk instabilitas rotasi pada tibia. Perubahan orientasi mekanik ini juga memaksa otot-otot pes anserinus, yaitu sartorius, gracilis, dan semitendinosus, untuk bekerja lebih aktif sebagai stabilisator dinamis di sisi medial. Meskipun otot-otot ini berada di sisi yang mengalami kompresi, mereka berusaha menahan pergeseran lateral dari femur terhadap tibia. Namun, efisiensi kontraktil otot-otot ini sering kali terganggu karena perubahan lengan momen fungsionalnya. Akibatnya, terjadi kelelahan otot yang lebih cepat saat individu melakukan aktivitas menumpu beban dalam waktu lama. Ketidakseimbangan antara kekuatan otot fleksor dan ekstensor lutut ini menciptakan pola kokontraksi yang tidak efisien, yang justru meningkatkan tekanan intra-artikular secara keseluruhan dan mempercepat proses atrisi pada meniskus medial. Dalam konteks kontrol motorik, otak melakukan adaptasi dengan mengubah strategi feed-forward untuk mengantisipasi beban pada lutut yang tidak stabil. Individu dengan genu varus sering kali menunjukkan pola aktivasi otot yang lebih kaku sebagai bentuk perlindungan terhadap sendi, yang dikenal dengan istilah stiffening strategy. Meskipun strategi ini bertujuan untuk melindungi sendi dari cedera akut, kekakuan sendi yang meningkat justru menghambat kemampuan lutut dalam menyerap

gaya kejut secara alami melalui gerakan fleksi saat berjalan. Kegagalan fungsi peredam kejut alami ini menyebabkan energi dampak merambat lebih jauh ke proksimal hingga mencapai sendi panggul dan tulang belakang, yang menjelaskan mengapa gangguan pada lutut sering kali diikuti oleh munculnya keluhan pada area lumbal.

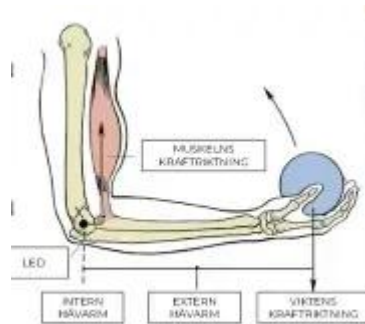
Dengan mengintegrasikan prinsip mekanotransduksi dan analisis kinesiologi rantai tertutup, intervensi tidak hanya diarahkan pada pengurangan deformitas secara visual, tetapi lebih pada optimasi distribusi gaya internal agar jaringan biologis dapat bertahan terhadap beban fungsional tanpa mengalami kerusakan degeneratif yang progresif.

Bab 9: Analisis Biomekanik pada Atlet Tenis

9.1 Analisis Biomekanik Pada Atlet Tenis

Pemain tenis dituntut memiliki keseimbangan optimal antara kemampuan fisik, teknik, taktik, serta ketahanan mental. Tenis termasuk dalam jenis olahraga intermiten berintensitas tinggi, di mana gerakan eksplosif seperti sprint singkat, lompatan, rotasi tubuh, dan pukulan cepat terjadi berulang kali selama pertandingan yang cukup lama. Oleh karena itu, fokus pelatihan bukan hanya pada pukulan bola, melainkan juga pada kesiapan sistem neuromuskular dan muskuloskeletal untuk menanggapi beban mekanik yang dinamis dan berulang. Secara fisiologis, pemain tenis memerlukan ketahanan anaerobik untuk aksi eksplosif singkat dan ketahanan aerobik untuk mempertahankan performa selama pertandingan. Dari sisi neuromotor, koordinasi, waktu reaksi, dan proprioepsi sangat penting karena pemain harus merespons arah serta kecepatan bola dalam hitungan detik. Adaptasi saraf pusat dan perifer meningkatkan kecepatan rekrutmen unit motorik serta efisiensi gerakan. Dalam biomekanika, kinerja pemain tenis dipengaruhi oleh rantai kinetik, yakni aliran gaya yang dimulai dari kaki, lewat panggul dan torso, hingga ke lengan dan raket. Efektivitas transfer energi ini menentukan kekuatan dan akurasi pukulan. Dengan demikian,

bagian bawah tubuh terutama sendi lutut berperan sebagai fondasi stabilitas dan sumber gaya awal (*ground reaction force*). Lutut pada pemain tenis berfungsi sebagai penopang utama dan pengatur stabilitas dinamis saat berbelok, mempercepat, memperlambat, serta melakukan gerakan lateral. Sendi ini harus menahan kombinasi gaya kompresi, shear force, dan momen rotasi tinggi. Beban ini meningkat karena permainan menuntut gerakan eksplosif dan berulang. Dasar pemain tenis juga mencakup prinsip kesejajaran struktural. Keselarasan ekstremitas bawah sangat menentukan distribusi beban pada lutut. Penyimpangan alignment, seperti genu varus, dapat meningkatkan tekanan pada bagian medial lutut, yang lama kelamaan dapat menyebabkan cedera overuse, kerusakan jaringan lunak, bahkan perubahan degeneratif dini bila tidak diimbangi dengan kontrol neuromuskular serta program latihan korektif. Maka, pemahaman tentang dasar pemain tenis harus meliputi integrasi antara aspek fisiologis, biomekanik, dan kontrol neuromuskular. Pendekatan holistik ini penting untuk mencapai performa optimal sekaligus mengurangi risiko cedera, khususnya pada struktur penopang utama seperti sendi lutut.



Gambar 9.1 Ilustrasi biomekanika pada lengan manusia yang mendemonstrasikan prinsip kerja sistem tuas (pengungkit), arah gaya otot, dan titik tumpu saat sedang mengangkat beban.

Sumber: Träningslära Biomekanik Diagram (2015)

Karakteristik Biomekanik Gerakan Tennis

Gerakan dalam tenis lapangan menampilkan sifat biomekanik yang rumit karena mengharuskan koordinasi serentak antara kaki, tulang belakang, serta lengan dalam satu rangkaian gerak terpadu. Pola ini terjadi melalui rantai kinetik terbuka dan tertutup secara bergantian, tergantung pada tahapan gerakan. Pada saat melakukan dorongan serta perubahan arah, kaki beroperasi dalam rangkaian closed kinetic chain, sedangkan pada tahap percepatan pukulan, lengan mendominasi pola open kinetic chain. Dari sisi kinematik, gerak tenis bersifat multiplanar karena melibatkan tiga bidang sekaligus. Pada bidang sagital terjadi fleksi-ekstensi pada lutut dan panggul saat berlari cepat atau melakukan split step. Pada bidang frontal muncul gerakan abduksi-aduksi panggul yang penting untuk manuver lateral.

Sementara pada bidang transversal terjadi rotasi batang tubuh dan panggul, yang menjadi unsur utama dalam menghasilkan kecepatan pukulan. Penggabungan ketiga bidang tersebut menuntut kontrol postur serta stabilitas dinamis yang tinggi, khususnya pada transisi antara percepatan dan perlambatan. Jika dilihat dari sudut kinetika, tenis merupakan olahraga stop-and-go yang dominan. Atlet terus-menerus melakukan percepatan cepat diikuti oleh perlambatan mendadak untuk menanggapi arah bola. Pada fase perlambatan, beban mekanik pada sendi lutut meningkat secara signifikan. Gaya reaksi tanah (GRF) yang besar, bersamaan dengan gaya geser dan momen rotasi, menimbulkan stres kompresif tinggi pada struktur intraartikular, termasuk meniskus dan ligamen. Selain itu, pola gerak tenis cenderung unilateral karena satu sisi tubuh mendominasi servis, forehand, maupun backhand satu tangan. Dominasi ini dapat menimbulkan asimetri kekuatan otot, variasi fleksibilitas, serta ketidakseimbangan kontrol neuromuskular antara sisi dominan dan non-dominannya. Dalam jangka panjang, kondisi tersebut meningkatkan risiko cedera akibat overuse, terutama pada lutut, panggul, dan bahu. Secara khusus, lutut pada pemain tenis tidak hanya berfungsi dalam fleksi-ekstensi sederhana, melainkan juga sebagai penstabil terhadap gaya rotasi tibia dan femur saat melakukan pivot atau cutting. Kombinasi valgus-varus dinamis dengan rotasi internal-eksternal tibia menambah beban pada kompartemen medial maupun lateral lutut. Bila terjadi penyelarasan yang kurang optimal, seperti genu varus atau genu valgus, beban menjadi tidak merata, sehingga tekanan pada salah satu

kompartemen sendi meningkat. Tahap servis memiliki karakteristik biomekanik tersendiri. Pada fase loading, lutut melakukan fleksi dalam untuk menyimpan energi elastis, kemudian diikuti oleh ekstensi eksplosif yang mentransfer energi ke batang tubuh dan lengan. Keberhasilan fase ini sangat bergantung pada kekuatan otot quadriceps, hamstring, serta koordinasi neuromuskular yang akurat. Dengan demikian, karakteristik biomekanik gerakan tenis menggambarkan kombinasi kompleks antara tuntutan multiplanar, beban aksial tinggi, gaya rotasi besar, serta dominasi unilateral. Kompleksitas tersebut menjadikan lutut sebagai struktur yang paling rentan terhadap stres mekanik berulang, sehingga pemahaman mendalam tentang kontrol gerak dan stabilitas dinamis sangat penting untuk mencegah cedera dan mempertahankan performa atlet.

Analisis Genu Varus Serta Distribusi Beban Pada Lutut

Genu varus adalah kelainan penataan pada tungkai bawah yang menimbulkan deviasi sumbu mekanik tungkai ke arah dalam, sehingga kaki tampak menyerupai huruf “O”. Dari sudut biomekanik, kondisi ini menggeser garis mekanik (mechanical axis) yang semestinya melintasi titik tengah sendi lutut ke sisi medial. Pergeseran tersebut meningkatkan momen adduksi lutut (knee adduction moment), yang menjadi penanda utama besarnya beban kompresif pada kompartemen medial sendi. Pada orang dengan penataan normal, beban yang terbagi antara kompartemen medial dan lateral cukup seimbang, meskipun secara fisiologis

kompartemen medial menerima beban sedikit lebih tinggi. Pada genu varus, proporsi beban pada kompartemen medial naik secara signifikan, sehingga tekanan pada tulang rawan artikular medial serta meniskus medial menjadi lebih besar, baik pada kondisi statis (berdiri) maupun dinamis (berjalan, berlari, melompat). Bagi atlet tenis, peningkatan beban ini menjadi lebih rumit karena olahraga tersebut melibatkan aktivitas intensitas tinggi. Pada fase pendaratan setelah lompatan – misalnya saat servis atau smash overhead – gaya reaksi tanah (ground reaction force) dapat mencapai dua hingga empat kali berat badan. Pada lutut dengan genu varus, gaya ini tidak hanya memperkuat kompresi medial, tetapi juga menambah momen varus eksternal. Momen tersebut menimbulkan tekanan tambahan pada struktur medial lutut, terutama ketika lutut berada dalam posisi fleksi. Selain fase pendaratan, gerakan perubahan arah yang cepat (cutting) serta deselerasi tiba-tiba (stop-and-go) juga menambah beban mekanik. Pada kondisi ini, lutut terpapar kombinasi gaya kompresi, geser (shear), dan rotasional. Interaksi antara momen varus dan rotasi tibia—khususnya rotasi internal—menambah stres pada meniskus medial dan ligamen kolateral medial (MCL). Jika terjadi berulang tanpa kontrol neuromuskular yang optimal, hal ini dapat menimbulkan mikrotrauma kumulatif pada jaringan. Untuk menjaga stabilitas dinamis, otot-otot di sekitar lutut harus bekerja lebih keras. Quadriceps berperan mengendalikan fleksi lutut serta menyerap gaya saat pendaratan, sementara hamstring membantu mengatur translasi anterior tibia dan stabilitas rotasional. Otot-otot panggul seperti gluteus medius juga penting dalam mengontrol

stabilitas frontal agar lutut tidak mengalami deviasi berlebih ke arah varus atau valgus secara dinamis. Namun, beban kerja otot yang terus-menerus dapat menyebabkan kelelahan neuromuskular. Ketika otot lelah, kemampuan mereka mengontrol posisi sendi menurun, sehingga beban mekanik lebih banyak dialihkan ke struktur pasif seperti kapsul, ligamen, dan meniskus. Dalam jangka panjang, kondisi ini berpotensi memicu cedera overuse, nyeri lutut kronis, sindrom kompartemen medial, hingga perubahan degeneratif seperti osteoarthritis dini pada kompartemen medial. Secara keseluruhan, genu varus pada pemain tenis bukan sekadar variasi bentuk tungkai, melainkan faktor biomekanik penting yang memengaruhi distribusi beban, pola aktivasi otot, serta risiko cedera lutut. Penilaian alignment serta intervensi korektif yang berfokus pada penguatan dan kontrol neuromuskular menjadi krusial untuk mengurangi dampak negatif peningkatan momen varus tersebut.

Perbandingan Pola Gerak Dan Stabilitas

Berbeda-bedanya alignment pada ekstremitas bawah antara atlet dengan alignment normal dan atlet yang mengalami genu varus menimbulkan variasi signifikan pada pola gerakan serta stabilitas dinamis, terutama pada fase satu-kaki, fase deselerasi, dan saat melakukan perubahan arah yang cepat. Dalam tenis, yang menuntut reaksi cepat dan kontrol tubuh yang tepat, stabilitas dinamis menjadi faktor kunci untuk mempertahankan efisiensi gerakan sekaligus mengurangi risiko cedera. Pada atlet yang memiliki genu varus, garis mekanik tubuh bergeser ke arah medial sehingga momen adduksi

pada lutut meningkat selama fase beban. Pada fase satu-kaki, pusat gravitasi tubuh berada lebih medial dari sendi lutut, sehingga pengendalian stabilitas di bidang frontal menjadi lebih sulit. Kondisi ini biasanya menghasilkan pola gerakan yang lebih asimetris antara sisi dominan dan non-dominannya. Untuk menjaga keseimbangan, tubuh mengadopsi beberapa strategi kompensasi, misalnya meningkatkan rotasi eksternal pada panggul, mengubah sudut kaki saat menyentuh tanah, atau meningkatkan aktivasi otot penstabil panggul seperti gluteus medius. Selain itu, ketika harus melakukan deselerasi mendadak atau manuver lateral, atlet dengan genu varus cenderung memperpanjang waktu kontak kaki dengan tanah sebagai upaya meningkatkan stabilitas. Meskipun strategi ini membantu mengontrol tubuh, ia dapat menurunkan efisiensi gerakan dan menambah beban pada kompartemen medial lutut. Pada kondisi kelelahan, kontrol neuromuskular menurun, sehingga risiko deviasi varus dinamis meningkat dan beban lebih banyak dialihkan ke struktur pasif seperti meniskus medial dan ligamen kolateral medial. Sebaliknya, atlet dengan alignment normal memiliki garis mekanik pada ekstremitas bawah yang lebih melewati pusat lutut secara fisiologis, sehingga beban tersebar lebih merata antara kompartemen medial dan lateral. Pada fase satu-kaki, stabilitas dinamis dapat dipertahankan dengan kontrol otot yang lebih efisien tanpa memerlukan kompensasi berlebih. Aktivasi otot terjadi secara seimbang untuk menyerap gaya reaksi tanah dan mengatur posisi sendi, sehingga aliran energi dalam rantai kinetik berjalan lebih optimal. Saat melakukan perubahan arah yang cepat, atlet dengan

alignment normal biasanya menunjukkan kontrol postur yang lebih baik dan waktu kontak tanah yang lebih singkat. Hal ini memungkinkan energi yang dihasilkan oleh ekstremitas bawah ditransfer secara efektif ke batang tubuh dan anggota atas saat memukul bola. Dengan demikian, kebutuhan energi untuk menjaga stabilitas lebih rendah dibandingkan dengan atlet yang memiliki genu varus. Secara keseluruhan, perbedaan alignment tidak hanya memengaruhi distribusi beban pada sendi lutut, tetapi juga menentukan strategi stabilisasi neuromuskular dan efisiensi biomekanik dalam gerakan tenis. Atlet dengan genu varus cenderung mengandalkan mekanisme kompensasi untuk mempertahankan keseimbangan, sementara atlet dengan alignment normal dapat menjaga stabilitas lewat pola aktivasi otot yang lebih ekonomis dan terkoordinasi. Perbedaan ini berdampak langsung pada performa serta risiko cedera jangka panjang pada lutut.

Perbandingan Pola Gerak Dan Stabilitas

Berdasarkan kajian biomekanik, risiko cedera muskuloskeletal pada pemain tenis dapat dijelaskan lewat dua mekanisme utama, yaitu cedera akut dan cedera akibat penggunaan berulang (overuse). Kedua kategori ini berakar pada interaksi antara beban mekanik, kualitas kontrol neuromuskular, serta efisiensi rantai kinetik saat bermain. Cedera akut biasanya muncul ketika sistem muskuloskeletal tidak mampu meredam atau mengendalikan gaya yang muncul secara tiba-tiba dengan intensitas tinggi. Pada tenis, hal ini kerap terjadi saat mendarat setelah melompat, melakukan

perubahan arah yang sangat cepat, atau melakukan pivot dengan rotasi lutut dalam posisi fleksi. Jika gaya reaksi tanah yang besar tidak diimbangi oleh kontrol eksentrik otot yang cukup, struktur pasif seperti ligamen dan meniskus akan menerima beban langsung, yang dapat mengakibatkan robekan ACL, cedera ligamen kolateral, atau robekan meniskus. Risiko semakin tinggi bila terdapat deviasi alignment, kelelahan otot, atau gangguan propiosepsi yang mengurangi stabilitas dinamis tubuh. Sebaliknya, cedera overuse berkembang perlahan akibat akumulasi stres mekanik berulang dalam jangka panjang. Tennis merupakan olahraga dengan repetisi tinggi pada bagian atas maupun bawah tubuh. Pada anggota atas, servis dan forehand yang dilakukan berkali-kali dengan kecepatan tinggi meningkatkan tegangan pada tendon ekstensor pergelangan tangan, yang pada akhirnya dapat menimbulkan lateral epicondylalgia atau tennis elbow. Pada anggota bawah, pola lari lateral, lompat, dan deselerasi berulang dapat memicu tendinopati patela, nyeri lutut kronis, serta kerusakan kartilago akibat tekanan kompresif terus-menerus. Dari sudut pandang rantai kinetik, tiap segmen tubuh berperan dalam mentransfer dan mendistribusikan energi secara optimal. Gaya yang dihasilkan dari tolakan kaki seharusnya mengalir secara progresif melalui panggul, batang tubuh, hingga ke anggota atas. Namun, bila otot inti (core) atau otot panggul lemah, transfer energi menjadi tidak efisien. Energi yang seharusnya tersebar merata justru “bocor” dan memaksa sendi distal seperti bahu, siku, atau lutut menanggung beban berlebih, sehingga meningkatkan stres lokal dan risiko cedera. Selain kekuatan otot,

koordinasi neuromuskular dan timing aktivasi otot juga sangat penting. Keterlambatan aktivasi otot penstabil, khususnya pada fase deselerasi, dapat menambah gaya geser dan momen rotasi yang tidak terkendali. Dalam jangka panjang, kombinasi stres mekanik berulang, ketidakseimbangan otot, dan kontrol postural yang kurang baik akan mempercepat mikrotrauma jaringan serta menurunkan kemampuan adaptasi struktur muskuloskeletal. Dengan demikian, risiko cedera pada pemain tenis tidak semata-mata dipengaruhi oleh intensitas permainan, melainkan juga oleh kualitas biomekanik gerakan dan integritas rantai kinetik. Upaya pencegahan sebaiknya memusatkan pada perbaikan alignment, penguatan otot inti dan panggul, peningkatan kontrol neuromuskular, serta pengelolaan beban latihan agar distribusi gaya tetap merata dan tidak berpusat pada satu struktur sendi tertentu.

Strategi Pencegahan dan Peningkatan Performa

Studi biomekanika pada tenis tidak sekadar mengidentifikasi penyebab cedera, melainkan juga menjadi pijakan untuk menyusun program intervensi yang meningkatkan efisiensi gerak serta performa pemain. Pendekatan ini menekankan penyempurnaan rantai kinetik, keseimbangan neuromuskular, dan pengaturan beban latihan sehingga tubuh dapat menyesuaikan diri dengan tuntutan kompetisi yang intens. Salah satu taktik utama ialah perbaikan teknik. Gerakan footwork yang tepat memungkinkan atlet menempatkan tubuh pada posisi optimal sebelum memukul, sehingga gaya reaksi tanah dapat mengalir secara lancar dari anggota

bawah ke batang tubuh dan akhirnya ke raket. Eksekusi pukulan yang benar, khususnya pada fase loading dan follow-through, mendistribusikan beban secara seimbang dan menurunkan stres pada sendi seperti bahu, siku, atau lutut. Penyempurnaan teknik juga mencakup pengendalian posisi lutut agar tidak terjadi deviasi varus atau valgus dinamis yang menambah tekanan pada sendi. Di luar teknik, penguatan neuromuskular sangat penting untuk menjaga stabilitas dinamis. Latihan yang menargetkan otot inti (core) memperbaiki kontrol trunk selama rotasi dan deselerasi, mengurangi kebocoran energi dalam rantai kinetik. Penguatan quadriceps dan hamstring membantu mengatur fleksi lutut serta menyerap beban saat pendaratan, sementara otot panggul—terutama gluteus medius dan gluteus maximus—menjaga stabilitas frontal dan rotasional. Latihan proprioseptif serta keseimbangan meningkatkan respons refleks terhadap perubahan arah tiba-tiba, sehingga risiko cedera berkurang. Fleksibilitas dan mobilitas sendi juga berperan penting dalam pencegahan cedera dan peningkatan performa. Rentang gerak yang cukup pada bahu memudahkan fase cocking dan akselerasi servis tanpa memberi tekanan berlebih pada kapsul sendi. Mobilitas panggul yang baik mendukung rotasi trunk yang efisien, sementara fleksibilitas pergelangan kaki membantu penyebaran gaya optimal saat pendaratan dan perubahan arah. Keterbatasan mobilitas pada satu segmen dapat memaksa kompensasi pada segmen lain, meningkatkan potensi cedera. Pengaturan beban latihan (load management) menjadi strategi tambahan yang esensial. Intensitas, frekuensi, dan volume harus diatur sesuai kapasitas adaptasi jaringan

agar tidak terjadi akumulasi mikrotrauma. Program periodisasi terstruktur memberi fase pemulihan yang cukup, memungkinkan jaringan muskuloskeletal memperbaiki dan beradaptasi. Dengan pendekatan menyeluruh—yang mencakup koreksi teknik, penguatan neuromuskular, peningkatan fleksibilitas serta mobilitas, dan manajemen beban—analisis biomekanika dapat menjadi landasan strategis untuk menurunkan risiko cedera sekaligus memaksimalkan kinerja pemain tenis secara berkelanjutan.

Bab 10: Analisis Biomekanik pada Atlet Sepak Bola

10.1 Analisis Biomekanik Pada Atlet Sepak Bola

Sepak bola termasuk cabang olahraga yang paling diminati di seluruh dunia, termasuk di Indonesia. Olahraga ini tidak hanya dipraktikkan secara rekreasi, melainkan juga dalam kompetisi mulai dari level amatir hingga profesional. Karena popularitasnya, sepak bola menjadi media untuk mengasah prestasi, membentuk karakter, serta meningkatkan kesehatan dan kebugaran fisik. Namun, di samping manfaat tersebut, sepak bola menuntut gerakan fisik yang intens, seperti sprint, berhenti tiba-tiba, berputar, melompat, menendang, menyundul bola, serta seringnya perubahan arah yang cepat. Gerakan-gerakan ini dilakukan dalam jangka waktu yang cukup lama oleh para atlet, sehingga menghasilkan pola gerak yang efisien dan terkontrol. Sayangnya, tidak semua pemain dapat melaksanakannya secara optimal. Banyak yang menjalankan permainan dengan teknik dan pola gerak yang kurang tepat, yang pada akhirnya menurunkan efisiensi gerakan serta performa mereka.

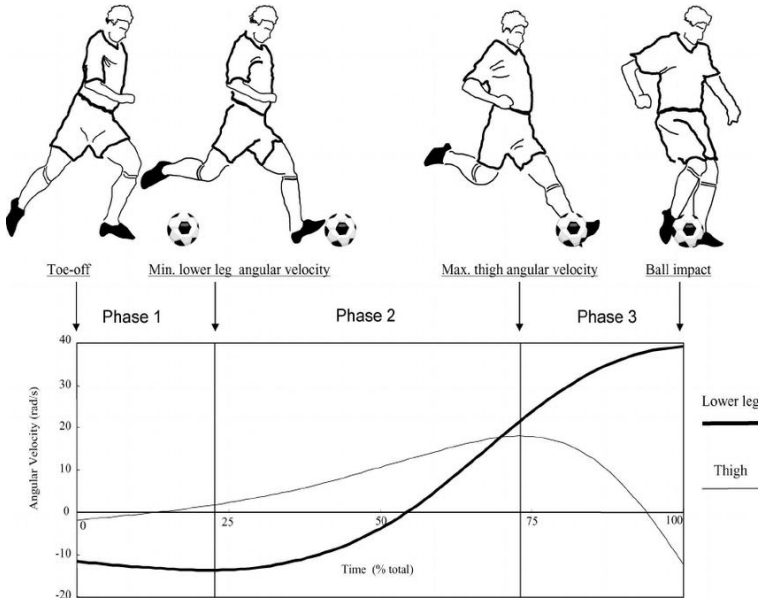
Analisis Biomekanika dalam Teknik Dasar Sepak Bola

Dalam sepak bola, setiap teknik dasar tidak sekadar dipandang sebagai gerakan fungsional untuk mencapai tujuan

permainan, melainkan juga sebagai serangkaian aktivitas biomekanik yang melibatkan interaksi rumit antara sistem muskuloskeletal dan gaya eksternal. Analisis biomekanik pada teknik dasar bertujuan untuk mengungkap cara gaya dihasilkan, ditransmisikan, dan dikendalikan oleh tubuh sehingga menghasilkan gerakan yang efisien, tepat, serta berisiko rendah terhadap cedera. Pendekatan ini memungkinkan evaluasi ilmiah teknik-teknik seperti menendang, berlari, melompat, dan perubahan arah berdasarkan prinsip-prinsip kinematika dan kinetika. Gerakan tendangan dalam sepak bola merupakan salah satu keterampilan teknik yang paling vital dan kompleks karena memerlukan koordinasi berurutan antar segmen tubuh. Secara biomekanik, tendangan beroperasi melalui prinsip rantai kinetik, yaitu perpindahan gaya dan energi dari bagian tubuh yang lebih besar dan stabil ke bagian yang lebih kecil dan bergerak cepat, dimulai dari batang tubuh hingga ekstremitas bawah. Keberhasilan rantai kinetik ini sangat memengaruhi kecepatan bola, akurasi tendangan, performa atlet, serta risiko cedera. Biomekanik biasanya membagi tendangan menjadi beberapa fase utama: fase persiapan (approach), fase penumpuan (support), fase ayunan (swing), fase kontak dengan bola (ball contact), dan fase lanjutan atau pemulihan (follow-through). Pembagian ini memudahkan analisis peran masing-masing segmen tubuh serta gaya yang dihasilkan selama tendangan. Pada fase awal, pemain melakukan langkah pendekatan untuk menciptakan keseimbangan dan posisi tubuh yang optimal. Fase ayunan kaki melibatkan kontraksi otot fleksor dan ekstensor pada sendi panggul dan lutut. Pada fase kontak,

gaya berpindah dari kaki ke bola, di mana kecepatan ayunan kaki dan sudut kontak sangat menentukan kecepatan serta arah bola. Fase lanjutan berfungsi menjaga keseimbangan tubuh dan mengurangi risiko cedera akibat gaya sisa tendangan. Lari dan sprint merupakan komponen gerak dasar dalam sepak bola yang sangat menentukan performa atlet, baik dalam serangan maupun pertahanan. Dari perspektif biomekanik, lari dan sprint menuntut efisiensi gaya reaksi tanah, koordinasi antar segmen tubuh, dan stabilitas sendi untuk menghasilkan kecepatan maksimal dengan risiko cedera minimal. Perbedaan utama antara lari dan sprint terletak pada intensitas gaya, kecepatan gerakan, serta tuntutan neuromuskular yang lebih tinggi pada sprint. Secara biomekanik, gerakan lari dan sprint dapat dianalisis melalui beberapa fase utama: fase kontak awal (initial contact), fase tumpuan (stance), fase tolakan (propulsion), dan fase ayunan (swing). Setiap fase memiliki peran khusus dalam menghasilkan dan mempertahankan kecepatan atlet. Pada fase tumpuan, kaki berfungsi sebagai penopang berat badan sekaligus menghasilkan gaya dorong ke depan. Sudut pijakan yang tepat penting untuk mengurangi beban berlebih pada lutut dan pergelangan kaki. Pada fase ayun, kaki bergerak ke depan untuk menyiapkan langkah berikutnya dengan efisiensi energi optimal. Teknik melompat sering diperlukan dalam duel udara, heading, dan pertahanan. Melompat melibatkan kontraksi otot tungkai secara eksplosif untuk menghasilkan gaya vertikal. Biomekanik memandang gerakan melompat terbagi menjadi fase persiapan, fase tolakan, fase melayang, dan fase pendaratan. Pada

fase persiapan, lutut dan pinggul ditekuk untuk menyimpan energi elastis pada otot dan tendon. Selama fase tolakan, otot-otot ekstensor tungkai bekerja secara sinergis untuk mendorong tubuh ke atas.



Gambar 10.1 Diagram analisis kinematika yang memadukan ilustrasi fase gerakan menendang bola sepak dengan grafik kecepatan sudut (*angular velocity*) pada paha dan tungkai kaki bawah seiring berjalannya waktu.

Sumber: Träningslära Biomekanik Diagram (2015)

Kinematika dan Kinetika pada Atlet Sepak Bola

Analisis biomekanik dalam sepak bola dapat dilakukan dengan dua pendekatan utama, yaitu analisis kinematika dan analisis kinetika. Kedua metode ini saling melengkapi dalam memahami pola gerakan pemain serta gaya-gaya yang bekerja pada tubuh selama aktivitas. Pengetahuan tentang kinematika dan kinetika

sangat penting untuk meningkatkan performa serta mengurangi risiko cedera. Kinematika mempelajari gerakan tanpa memperhatikan penyebabnya. Analisis kinematika menitikberatkan pada parameter-parameter seperti posisi, jarak, kecepatan, percepatan, sudut sendi, serta lintasan gerakan tubuh. Dalam sepak bola, pendekatan ini sering dipakai untuk menilai teknik dasar pemain, terutama pada gerakan menendang, berlari, melompat, dan mendarat. Pada teknik menendang bola, analisis kinematika mengamati sudut fleksi-ekstensi pada panggul, lutut, dan pergelangan kaki. Urutan gerakan yang optimal dimulai dari rotasi panggul, dilanjutkan dengan ekstensi lutut, dan diakhiri dengan aksi pergelangan kaki. Sudut sendi yang tepat menghasilkan kecepatan kaki maksimal, sehingga meningkatkan kecepatan dan akurasi bola. Sebaliknya, sudut yang tidak optimal dapat menurunkan efektivitas tendangan dan menambah beban pada lutut. Dalam kegiatan berlari dan sprint, analisis kinematika menilai panjang langkah, frekuensi langkah, sudut pijakan kaki, serta ayunan lengan. Gaya lari yang baik ditandai oleh posisi tubuh yang condong ke depan, sudut lutut yang efisien pada fase ayunan, dan kontak kaki yang sesuai dengan tanah. Kesalahan kinematika seperti overstriding atau sudut pijakan yang tidak tepat dapat menyebabkan pemborosan energi serta meningkatkan risiko cedera otot. Untuk gerakan melompat dan mendarat, analisis kinematika menilai sudut fleksi pada lutut dan pinggul saat pendaratan. Pendaratan dengan lutut terfleksi cukup membantu meredam gaya benturan, sehingga mengurangi tekanan pada lutut dan pergelangan kaki. Pendaratan dengan lutut lurus atau

posisi valgus dapat meningkatkan kemungkinan cedera ligamen, terutama ligamen cruciatum anterior (ACL).

Kinetika, di sisi lain, mempelajari gaya yang bekerja pada tubuh selama gerakan. Dalam sepak bola, gaya eksternal utama yang memengaruhi ekstremitas bawah adalah ground reaction force (GRF) yang muncul saat berlari, berakselerasi, melakukan pivot, atau mendarat setelah melompat. Distribusi gaya yang tidak merata atau berlebih pada lutut dapat meningkatkan risiko cedera non-kontak, khususnya robekan ACL. Selain itu, momen gaya pada sendi lutut, panggul, dan pergelangan kaki menjadi parameter penting untuk menilai stabilitas sendi pada gerakan dinamis. Tendangan misalnya melibatkan rotasi panggul, ekstensi lutut, dan plantar-fleksi pergelangan kaki secara bersamaan. Biomekanika tendangan menganalisis lintasan kaki, kecepatan, percepatan, serta transfer momentum dari panggul ke kaki, yang memengaruhi kekuatan dan akurasi tendangan. Gerakan sprint dan perubahan arah menuntut perpindahan gaya horizontal dan vertikal yang cepat, serta kemampuan lutut dan panggul menahan gaya geser dan rotasi. Biomekanika juga menekankan interaksi antar segmen tubuh. Contohnya, saat melakukan cutting ke kanan, rotasi panggul, fleksi lutut, dan distribusi beban harus terkoordinasi agar gaya lateral tidak berlebihan pada lutut. Ketidakseimbangan atau koordinasi yang buruk dapat menimbulkan stres berlebih pada ligamen, terutama ACL, sehingga meningkatkan risiko cedera non-kontak. Penelitian Plakias et al. (2024) menegaskan bahwa pengukuran sudut sendi, kecepatan, percepatan, dan GRF merupakan parameter utama untuk

menilai performa serta keamanan gerakan pemain sepak bola. Dengan demikian, analisis biomekanik pada sepak bola membantu memahami cara gaya bekerja pada tubuh atlet, respons sendi dan otot terhadap gaya tersebut, serta bagaimana pola gerakan dapat dioptimalkan untuk meningkatkan performa sekaligus meminimalkan risiko cedera. Pengetahuan ini menjadi landasan ilmiah bagi pengembangan teknik, evaluasi performa, dan identifikasi faktor-faktor risiko cedera dalam olahraga sepak bola.

Analisis Biomekanik Resiko Cedera Pada Atlet Sepak Bola

Tingkat tuntutan fisik yang tinggi serta kompleksitas gerakan dalam sepak bola meningkatkan kemungkinan atlet mengalami cedera. Beberapa cedera yang sering ditemui meliputi cedera ligamen lutut seperti anterior cruciate ligament (ACL), keseleo pergelangan kaki, robekan otot hamstring, serta cedera otot paha dan betis. Dampak cedera tidak hanya menurunkan performa, melainkan juga dapat mengganggu karier jangka panjang. Banyak kasus tidak disebabkan oleh kontak dengan lawan, melainkan oleh teknik gerakan yang keliru, ketidakseimbangan otot, dan pola gerak yang tidak efisien. Robekan ACL merupakan cedera yang paling serius dan umum pada pemain sepak bola. ACL berfungsi menstabilkan lutut terhadap rotasi dan translasi tibia ke depan. Cedera biasanya terjadi pada gerakan non-kontak seperti pivot, cutting, atau pendaratan setelah lompat, terutama bila lutut mengalami sudut valgus berlebih atau rotasi internal yang cepat. Studi biomekanik mengindikasikan bahwa distribusi gaya yang tidak optimal,

dominasi otot quadriceps atas hamstring, serta kontrol neuromuskular yang lemah dapat meningkatkan risiko robekan ACL. Contohnya, ketika pemain mengubah arah secara tiba-tiba dengan lutut tertekuk terlalu dalam atau panggul tidak stabil, gaya lateral dan rotasi pada lutut meningkat, memberi tekanan besar pada ACL. Sudut valgus lutut menjadi faktor biomekanik utama yang berhubungan dengan risiko cedera ACL. Valgus berlebih terjadi saat lutut bergerak ke dalam secara tidak terkontrol selama fase penumpuan. Posisi ini meningkatkan momen abduksi dan rotasi pada sendi lutut, menambah beban pada ACL. Pada sepak bola, valgus sering muncul saat pemain mendarat setelah lompatan, melakukan cutting, atau mendeselerasi secara mendadak. Teknik yang kurang tepat pada situasi tersebut dapat memperbesar tekanan pada ligamen, terutama bila terjadi berulang-ulang. Cedera otot hamstring juga sangat umum dalam sepak bola, khususnya selama sprint atau akselerasi cepat. Hamstring berperan menahan ekstensi lutut dan fleksi panggul. Cedera biasanya dipicu oleh kontraksi eksentrik berlebih ketika kaki menyentuh tanah atau saat langkah panjang pada sprint. Analisis biomekanik menunjukkan bahwa ketidakseimbangan antara quadriceps dan hamstring, kelelahan otot, serta teknik lari yang tidak optimal meningkatkan risiko strain hamstring. Sprint cepat dengan kontrol neuromuskular yang kurang memaksa hamstring menahan beban melebihi kapasitas elastisnya, sehingga terjadi cedera. Keseleo pergelangan kaki (ankle sprain) juga sering terjadi akibat inversi atau eversi tiba-tiba, terutama saat melakukan cutting, pivot, atau berbenturan dengan pemain lain. Dari

sisi biomekanik, pergelangan kaki yang lemah atau tidak stabil, distribusi beban tubuh yang tidak merata, serta pendaratan yang tidak tepat meningkatkan peluang terjadinya keseleo. Studi gerak fungsional menekankan pentingnya koordinasi otot pergelangan kaki, kekuatan otot stabilisator, dan kontrol proprioseptif untuk mencegah cedera ini. Secara keseluruhan, cedera-cedera yang lazim dalam sepak bola tidak semata-mata dipicu oleh faktor eksternal seperti kontak fisik atau kondisi lapangan, melainkan juga oleh faktor internal yang berkaitan dengan biomekanik dan kinesiologi gerak atlet. Memahami sudut sendi, distribusi gaya, ketidakseimbangan otot, serta kontrol neuromuskular menjadi dasar dalam menilai risiko cedera dan menyusun strategi pencegahan. Analisis biomekanik cedera membantu fisioterapis dan pelatih mengidentifikasi pola gerak berisiko, merancang program penguatan dan stabilisasi, serta memperbaiki teknik sehingga atlet dapat bergerak dengan aman, efisien, dan optimal di lapangan.

Bab 11: Analisis Biomekanik pada Atlet Basket

Permainan bola basket merupakan salah satu cabang olahraga yang bersifat dinamis dan menuntut kemampuan fisik, penguasaan teknik, serta pengendalian biomekanika gerak yang kompleks. Dalam aktivitas permainan, atlet dituntut untuk melakukan berbagai gerakan seperti perubahan arah secara cepat, lompatan berulang, sprint jarak pendek, serta pelaksanaan teknik menembak dan menggiring bola dengan tingkat ketepatan yang tinggi, sembari mempertahankan keseimbangan dan stabilitas tubuh. Kondisi tersebut menyebabkan bola basket memiliki tuntutan beban mekanis yang besar terhadap sistem muskuloskeletal dan mekanisme neuromuskular atlet. Desto et al. (2025) menyatakan bahwa biomekanika olahraga memiliki peranan penting dalam memahami karakteristik gerakan, termasuk perubahan arah, aktivitas melompat, serta penempatan posisi tubuh yang optimal guna meningkatkan performa sekaligus menekan risiko terjadinya cedera.

Biomekanika dan kinesiologi merupakan dua cabang ilmu yang saling berhubungan dalam menganalisis gerakan tubuh manusia. Biomekanika menitikberatkan pada penerapan prinsip-prinsip mekanika yang bekerja pada tubuh selama melakukan aktivitas fisik, sedangkan kinesiologi lebih berfokus pada fungsi

otot, sendi, serta peran sistem neuromuskular dalam menghasilkan dan mengendalikan gerakan. Sinergi antara kedua disiplin ilmu tersebut memungkinkan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai bagaimana gaya dan momen gaya bekerja pada sendi dan otot saat atlet melakukan gerakan kompleks seperti pivot, cutting, dan landing. Pendekatan terpadu ini berkontribusi terhadap peningkatan efisiensi gerak serta pengurangan risiko cedera yang disebabkan oleh teknik yang tidak tepat.

Cedera merupakan permasalahan utama yang sering dihadapi dalam olahraga bola basket. Berbagai kajian literatur terkini menunjukkan bahwa cedera pada pergelangan kaki dan lutut merupakan jenis cedera yang paling sering dialami oleh atlet bola basket. Cedera tersebut umumnya disebabkan oleh teknik pendaratan yang kurang optimal, perubahan arah yang dilakukan secara agresif, serta adanya kontak fisik antar pemain. Dampak cedera tidak hanya menyebabkan atlet harus menjalani masa pemulihan, tetapi juga berpotensi menurunkan kualitas performa dalam jangka panjang apabila tidak ditangani secara tepat. Selain aspek risiko cedera, efektivitas gerak atlet juga sangat dipengaruhi oleh kualitas teknik biomekanik dan pola aktivasi otot. Gerakan yang dilakukan secara efisien memungkinkan atlet menghasilkan performa fisik yang optimal dengan konsumsi energi yang lebih rendah. Sebagai contoh, penerapan latihan proprioseptif pada atlet bola basket terbukti mampu meningkatkan stabilitas postural, distribusi beban tubuh, serta kontrol motorik yang lebih baik, sehingga tekanan pada sendi-sendi utama seperti lutut dan

pergelangan kaki dapat diminimalkan. Lebih lanjut, hasil penelitian mengenai karakteristik biomekanik cedera pada atlet bola basket menunjukkan pentingnya penerapan strategi pencegahan cedera yang berbasis pada bukti ilmiah. Pemahaman mengenai faktor-faktor mekanis yang memengaruhi risiko cedera dapat menjadi dasar bagi pelatih dan tenaga kesehatan olahraga dalam menyusun program latihan yang lebih aman, efektif, dan berorientasi pada keberlanjutan performa atlet. Berdasarkan pemaparan tersebut, kajian mengenai biomekanika dan kinesiologi gerak atlet bola basket menjadi sangat relevan untuk ditelaah secara ilmiah. Kajian ini bertujuan untuk memahami keterkaitan antara biomekanika dan kinesiologi dalam menghasilkan gerak yang efektif sekaligus meminimalkan risiko cedera. Seiring dengan perkembangan temuan ilmiah terkini, analisis ini diharapkan mampu memberikan perspektif integratif yang dapat diaplikasikan dalam proses pembinaan dan pelatihan atlet bola basket.

Biomekanik dan Kinesiologi dalam Olahraga Bola Basket

Biomekanika merupakan cabang ilmu yang mengintegrasikan prinsip-prinsip mekanika dengan anatomi tubuh manusia untuk menganalisis gerakan. Dalam olahraga bola basket, biomekanika digunakan untuk memahami cara kerja gaya dan momen gaya yang memengaruhi tubuh atlet saat melakukan teknik seperti shooting, passing, dribbling, dan jump shot. Hasil kajian sistematis menunjukkan bahwa analisis biomekanika berperan penting dalam memahami proses transfer energi antar segmen tubuh

guna menghasilkan gerakan yang optimal serta mencegah cedera akibat pola gerak yang tidak efisien atau tidak sesuai secara mekanis. Penerapan teknologi biomekanika, seperti motion capture system, force plate, dan electromyography (EMG), telah memberikan gambaran objektif mengenai pola gerak atlet bola basket. Analisis kinematika tiga dimensi melalui motion capture, misalnya, memungkinkan pengukuran sudut sendi serta percepatan gerak anggota tubuh, sehingga pelatih dan peneliti dapat mengidentifikasi teknik yang paling efisien dan aman bagi atlet. Sejumlah penelitian juga menunjukkan bahwa gerakan dasar seperti passing dan shooting memiliki karakteristik biomekanika yang berbeda antar variasi teknik. Analisis tersebut menjadi penting dalam upaya peningkatan performa atlet melalui koreksi teknik dan penerapan latihan berbasis data ilmiah. Kinesiologi berfokus pada fungsi otot, sendi, serta sistem neuromuskular dalam menghasilkan gerakan tubuh. Dalam permainan bola basket, pola aktivasi otot yang tepat sangat menentukan keberhasilan gerak atlet, baik saat melakukan sprint, melompat, maupun mengeksekusi tembakan ke arah ring. Pendekatan kinesiologi juga banyak digunakan dalam proses rehabilitasi cedera, terutama melalui pelatihan ulang pola gerak dan peningkatan aktivasi neuromuskular. Tinjauan literatur menunjukkan bahwa penerapan prinsip kinesiologi mampu meningkatkan stabilitas sendi, proprioseptis, serta efisiensi pola gerak selama proses pemulihan cedera olahraga. Koordinasi neuromuskular memegang peranan penting dalam pelaksanaan gerakan kompleks pada bola basket, karena memengaruhi ketepatan

waktu dan kekuatan kontraksi otot. Faktor ini secara langsung berdampak pada kualitas output gerak serta tingkat risiko cedera yang dialami atlet.

Karakteristik Gerakan Dasar dalam Bola Basket

Gerakan dasar dalam bola basket, seperti shooting, dribbling, passing, cutting, serta jumping dan landing, merupakan teknik fundamental yang dilakukan secara berulang oleh atlet. Hasil kajian literatur biomekanika menunjukkan bahwa faktor-faktor seperti sudut pelepasan bola, stabilitas tubuh, serta peran otot inti memiliki kontribusi yang signifikan terhadap efektivitas teknik shooting dan passing. Sebagai contoh, penelitian mengenai teknik shooting mengungkapkan bahwa sudut pelepasan bola yang optimal berada pada rentang tertentu yang dapat meningkatkan akurasi tembakan, sementara peran otot ekstremitas atas dan otot inti berpengaruh terhadap kestabilan tubuh selama proses eksekusi tembakan. Selain itu, pola gerak dribbling melibatkan koordinasi antara anggota tubuh bagian atas dan bawah, serta kemampuan menjaga stabilitas postural. Kecepatan dan ritme dribbling sangat dipengaruhi oleh kemampuan biomekanik atlet dalam memanfaatkan gaya dorong serta mengontrol bola secara efektif. Efektivitas gerak atlet mencerminkan kemampuan dalam menghasilkan performa optimal melalui gerakan yang efisien secara energi. Pendekatan biomekanika dan kinesiologi memberikan dasar pemahaman mengenai upaya peningkatan efisiensi gerak, antara lain melalui: Penentuan sudut sendi yang optimal saat melakukan shooting atau perubahan arah,

identifikasi pola aktivasi otot yang mampu menghasilkan output maksimal dengan tingkat stress minimal pada sendi, pemanfaatan sistem umpan balik untuk koreksi gerak secara real-time. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa latihan yang berbasis biomekanika, seperti penggunaan motion capture dan teknologi inertial measurement unit (IMU), serta adaptasi teknik berdasarkan umpan balik tersebut, mampu meningkatkan presisi gerak dan performa teknis atlet bola basket.

Efektivitas Gerak Atlet Bola Basket Ditinjau dari Biomekanika dan Kinesiologi

Efektivitas gerak atlet bola basket tercermin dari kemampuan mengeksekusi teknik secara akurat, cepat, dan stabil. Dari sudut pandang biomekanika, efektivitas gerak dipengaruhi oleh sudut sendi, kecepatan gerakan, serta koordinasi antar segmen tubuh. Pada teknik jump shot, misalnya, sudut pelepasan bola, tinggi lompatan, serta sinkronisasi antara gerakan lengan dan tungkai menjadi faktor penentu keberhasilan tembakan. Secara kinesiologis, efektivitas gerak berkaitan erat dengan pola aktivasi otot yang efisien. Aktivasi otot yang tepat waktu dan proporsional memungkinkan atlet menghasilkan gaya yang optimal tanpa memberikan beban berlebih pada sendi. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa atlet bola basket dengan pola aktivasi otot yang baik memiliki tingkat akurasi tembakan yang lebih tinggi serta tingkat kelelahan otot yang lebih rendah. Integrasi pendekatan biomekanika dan kinesiologi memberikan dasar bagi pelatih untuk melakukan evaluasi teknik

secara menyeluruh. Melalui analisis berbasis data, koreksi gerak dapat dilakukan secara spesifik guna mencapai peningkatan performa atlet yang optimal.

Hubungan Teknik Gerak dengan Efektivitas Performa Atlet Bola Basket

Efektivitas performa atlet bola basket sangat dipengaruhi oleh kualitas teknik gerak yang diterapkan. Teknik gerak yang baik secara biomekanika memungkinkan atlet menghasilkan gaya yang optimal dengan penggunaan energi yang lebih efisien. Dalam teknik shooting, misalnya, sudut fleksi siku, posisi bahu, serta koordinasi antara tungkai dan lengan memiliki pengaruh besar terhadap akurasi dan konsistensi tembakan. Dari sudut pandang kinesiology, efektivitas teknik gerak juga ditentukan oleh pola aktivasi otot yang tepat. Aktivasi otot yang sinkron dan proporsional memungkinkan terjadinya transfer energi yang efisien dari ekstremitas bawah ke ekstremitas atas. Penelitian terkini menunjukkan bahwa atlet dengan koordinasi neuromuskular yang baik memiliki tingkat keberhasilan shooting yang lebih tinggi dibandingkan atlet dengan pola aktivasi otot yang kurang optimal. Pada gerakan melompat, efektivitas performa dipengaruhi oleh kemampuan atlet dalam memanfaatkan siklus regang-pendek (stretch-shortening cycle). Mekanisme ini memungkinkan otot menghasilkan gaya yang lebih besar dalam waktu singkat, sehingga meningkatkan tinggi lompatan dan kecepatan gerak. Pemahaman terhadap prinsip biomekanika dan

kinesiologi terkait mekanisme ini sangat penting dalam peningkatan performa atlet bola basket.

Risiko Cedera pada Atlet Bola Basket Berdasarkan Kajian Biomekanika

Cedera lutut, khususnya cedera anterior cruciate ligament (ACL), merupakan salah satu jenis cedera yang paling sering dialami oleh atlet bola basket. Dari sudut pandang biomekanika, cedera ini sering dikaitkan dengan teknik pendaratan yang kurang tepat, seperti sudut fleksi lutut yang terlalu kecil, posisi lutut valgus, serta distribusi beban tubuh yang tidak seimbang. Penelitian biomekanika terbaru menunjukkan bahwa gaya reaksi tanah yang tinggi saat pendaratan, jika tidak diimbangi dengan kontrol neuromuskular yang baik, dapat meningkatkan tekanan pada ligament lutut secara signifikan. Selain cedera lutut, cedera pergelangan kaki juga banyak ditemukan pada atlet bola basket. Aktivitas seperti mendarat setelah rebound atau melakukan perubahan arah secara tiba-tiba sering memicu terjadinya inversi atau eversi berlebih pada pergelangan kaki. Analisis biomekanika mengungkapkan bahwa kurangnya stabilitas sendi serta keterlambatan aktivasi otot pergelangan kaki menjadi faktor utama penyebab cedera tersebut. Oleh karena itu, pemahaman biomekanika sangat penting dalam upaya pencegahan cedera.

Strategi Pencegahan Cedera Berbasis Biomekanika dan Kinesiologi

Upaya pencegahan cedera dalam olahraga bola basket tidak terlepas dari penerapan prinsip biomekanika dan kinesiologi. Strategi pencegahan harus difokuskan pada perbaikan teknik gerak, peningkatan kekuatan otot penunjang sendi, serta pengembangan kontrol neuromuskular yang optimal. Latihan pendaratan yang benar, seperti meningkatkan fleksi lutut dan pinggul saat mendarat, dapat membantu mengurangi gaya reaksi tanah yang diterima oleh sendi. Selain itu, Latihan keseimbangan dan proprioepsi terbukti efektif dalam meningkatkan stabilitas sendi lutut dan pergelangan kaki, sehingga risiko cedera dapat diminimalkan. Pendekatan berbasis biomekanika juga memungkinkan identifikasi dini terhadap faktor risiko cedera melalui analisis pola gerak atlet.

Bab 12: Analisis Biomekanik

Pola Jalan Normal dan Abnormal pada Pasien Osteoarthritis (OA) HIP

12.1 Analisis Biomekanik Pola Jalan Normal dan Abnormal pada Pasien Osteoarthritis (OA) HIP

Berjalan merupakan aktivitas fungsional dasar yang memungkinkan manusia untuk berpindah tempat secara mandiri dan efisien. Aktivitas ini melibatkan koordinasi kompleks antara sistem muskuloskeletal, sistem saraf pusat, dan sistem kardiovaskular untuk menghasilkan gerakan yang stabil dengan konsumsi energi minimal. Pola jalan (gait) yang normal dicirikan oleh ritme yang sinkron, keseimbangan yang terjaga, serta distribusi beban yang merata pada persendian ekstremitas bawah. Namun, efisiensi biomekanik ini sering kali terganggu oleh kondisi patologis, salah satunya adalah Osteoarthritis (OA) pada sendi pinggul (hip). OA hip merupakan penyakit degeneratif kronis yang menyerang kartilago artikular, menyebabkan penyempitan celah sendi, pembentukan osteofit, dan sklerosis tulang subkondral. Kondisi ini tidak hanya menimbulkan

nyeri yang melemahkan, tetapi juga mengubah kinematika dan kinetika berjalan secara signifikan. Analisis biomekanik menjadi instrumen krusial bagi fisioterapis dan praktisi kesehatan untuk memahami strategi kompensasi yang dilakukan pasien. Dengan mengidentifikasi deviasi pola jalan, intervensi rehabilitasi dapat dirancang lebih spesifik untuk mengembalikan fungsi optimal dan mencegah kerusakan sendi lebih lanjut pada sisi kontralateral maupun sendi proksimal lainnya.

Anatomi Dan Biomekanik Sendi Hip

Sendi hip (*articulatio coxae*) adalah sendi sinovial tipe ball and socket yang dibentuk oleh kepala tulang paha (*caput femoris*) dan mangkuk sendi pada panggul (*acetabulum*). Struktur ini dirancang untuk stabilitas maksimal saat menumpu berat badan sekaligus memberikan mobilitas luas untuk berbagai arah gerakan: fleksi-ekstensi, abduksi-adduksi, serta rotasi internal-eksternal. Secara biomekanik, sendi hip berfungsi sebagai poros pengungkit selama berjalan. Otot-otot di sekitar panggul, terutama kelompok abduktor (*gluteus medius* dan *minimus*), memainkan peran vital dalam menjaga stabilitas pelvis pada bidang frontal. Saat seseorang berdiri dengan satu kaki (*single limb stance*), otot abduktor harus menghasilkan gaya yang cukup besar untuk mencegah pelvis jatuh ke sisi yang tidak menumpu. Pada kondisi OA, degenerasi jaringan menyebabkan perubahan distribusi gaya tekan (*joint reaction force*), yang memicu peradangan dan nyeri hebat saat fase menumpu beban.

Konsep Dasar Gait dan Siklus Berjalan Normal

Siklus berjalan (*gait cycle*) merupakan rangkaian gerakan yang dimulai sejak satu kaki menyentuh tanah hingga kaki yang sama kembali menyentuh tanah pada langkah berikutnya. Dalam satu siklus penuh, terdapat dua fase utama, yaitu fase stance dan fase swing, yang berlangsung secara berkesinambungan dan terkoordinasi untuk menghasilkan pola jalan yang efisien dan stabil. Fase stance mencakup sekitar 60% dari keseluruhan siklus berjalan dan terjadi ketika kaki berada dalam kontak dengan lantai. Fase ini diawali dengan initial contact atau heel strike, yaitu saat tumit pertama kali menyentuh permukaan tanah. Pada kondisi normal, sendi hip berada dalam posisi fleksi sekitar 20–30 derajat untuk mempersiapkan penerimaan beban. Setelah itu memasuki fase loading response, di mana berat badan mulai ditransfer ke ekstremitas yang menopang dan terjadi proses penyerapan beban melalui aktivitas otot serta kontrol sendi. Selanjutnya adalah mid stance, ketika berat badan berada tepat di atas kaki tumpu dan tubuh bergerak maju melewati tungkai tersebut. Fase ini berlanjut ke terminal stance, ditandai dengan terangkatnya tumit (heel off) sebagai persiapan dorongan ke depan. Fase stance diakhiri dengan pre-swing atau toe off, yaitu saat jari kaki meninggalkan tanah dan beban tubuh sepenuhnya berpindah ke tungkai kontralateral. Sementara itu, fase swing mencakup sekitar 40% dari siklus berjalan dan terjadi ketika kaki tidak lagi bersentuhan dengan tanah. Fase ini dimulai dengan initial swing, yaitu saat tungkai mulai terangkat dan mengalami akselerasi ke depan. Kemudian memasuki mid swing, ketika tungkai yang mengayun melewati tungkai tumpu dan

bergerak menuju posisi depan tubuh. Fase terakhir adalah terminal swing, yang ditandai dengan deselerasi tungkai sebagai persiapan untuk kembali melakukan kontak tumit pada langkah berikutnya. Secara keseluruhan, pola jalan normal melibatkan koordinasi kinematik dan kinetik yang sangat presisi. Kinematik mencakup perubahan sudut sendi seperti fleksi dan ekstensi pada hip, knee, dan ankle, sedangkan kinetik berkaitan dengan gaya serta momen yang bekerja pada sendi selama proses berjalan. Kombinasi keduanya memungkinkan tubuh mempertahankan keseimbangan, efisiensi energi, serta stabilitas selama aktivitas berjalan.

Patofisiologi Dan Karakteristik Oa Hip

Osteoarthritis pada sendi panggul atau Osteoarthritis merupakan kondisi degeneratif yang ditandai oleh kerusakan progresif pada tulang rawan artikular. Tulang rawan ini berfungsi sebagai bantalan dan peredam kejutan yang memungkinkan pergerakan sendi berlangsung secara halus tanpa gesekan berlebih. Seiring waktu, degradasi tulang rawan menyebabkan penyempitan celah sendi, peningkatan gesekan antarpermukaan tulang, serta perubahan struktur seperti pembentukan osteofit dan sklerosis subkondral. Faktor risiko yang berperan antara lain usia lanjut akibat proses degeneratif alami, obesitas yang meningkatkan beban mekanis pada sendi, riwayat trauma sebelumnya, serta kelainan anatomi seperti displasia panggul yang mengganggu distribusi beban secara normal. Secara klinis, gejala utama yang sering dilaporkan adalah nyeri pada area selangkangan atau inguinal yang dapat

menjalar ke paha bagian depan bahkan hingga lutut. Pola nyeri ini sering kali membingungkan pasien karena sumber masalah berada di panggul, tetapi keluhan dirasakan hingga distal. Selain nyeri, pasien juga mengalami kekakuan sendi, terutama pada pagi hari atau setelah duduk dalam waktu lama, yang berkaitan dengan penurunan elastisitas jaringan dan peningkatan cairan sinovial yang mengental. Krepitasi atau sensasi gemeretak saat sendi digerakkan juga dapat ditemukan akibat permukaan sendi yang tidak lagi halus. Pada pemeriksaan gerak, biasanya tampak penurunan lingkup gerak sendi (*range of motion*), terutama pada gerakan rotasi internal dan ekstensi, yang sering menjadi tanda awal keterlibatan sendi panggul secara signifikan.

Analisis Pola Jalan Abnormal Pada Pasien Oa Hip

Pada pasien dengan Osteoarthritis pada sendi panggul, perubahan pola jalan terjadi sebagai bentuk adaptasi tubuh terhadap nyeri dan keterbatasan gerak. Perubahan ini bersifat tidak sadar dan bertujuan utama untuk meminimalkan beban mekanis serta mengurangi tekanan pada sendi yang mengalami degenerasi. Secara spasial-temporal, pasien umumnya menunjukkan penurunan kecepatan berjalan dan frekuensi langkah. Panjang langkah juga menjadi lebih pendek untuk mengurangi durasi gaya kompresi yang bekerja pada sendi panggul yang nyeri. Waktu fase stance pada sisi yang sakit cenderung lebih singkat karena pasien tidak nyaman menahan beban terlalu lama pada tungkai tersebut. Sebaliknya, durasi fase double support meningkat sebagai strategi untuk

meningkatkan stabilitas dan rasa aman saat berjalan. Pola ini mencerminkan upaya tubuh dalam menyeimbangkan kebutuhan mobilitas dengan kontrol nyeri. Salah satu pola yang paling sering terlihat adalah antalgic gait, yaitu pola jalan akibat nyeri. Pada kondisi ini, pasien mempercepat fase tumpu pada sisi yang sakit dan segera memindahkan beban ke sisi yang sehat. Strategi ini secara efektif mengurangi waktu sendi panggul menerima gaya gravitasi dan kontraksi otot penopang, sehingga nyeri dapat diminimalkan meskipun efisiensi berjalan menjadi berkurang. Selain itu, kelemahan otot abduktor panggul, khususnya gluteus medius, yang sering menyertai kondisi ini dapat menimbulkan pola Trendelenburg gait. Saat fase tumpu tunggal, pelvis akan cenderung turun ke sisi kontralateral akibat ketidakmampuan otot menstabilkan panggul. Untuk mengompensasi hal tersebut, pasien sering memiringkan batang tubuh ke arah sisi yang sakit (compensated Trendelenburg gait). Dengan memindahkan pusat massa tubuh lebih dekat ke sendi panggul yang menopang, momen abduktor yang dibutuhkan menjadi lebih kecil sehingga tekanan kompresif pada sendi dapat dikurangi. Strategi ini memang menurunkan beban sendi, tetapi dalam jangka panjang dapat menimbulkan masalah sekunder pada tulang belakang lumbal dan struktur sekitarnya. Pada bidang sagital, perubahan kinematik juga terlihat jelas. Pasien sering tidak mampu mencapai ekstensi hip secara penuh pada fase terminal stance karena nyeri atau keterbatasan kapsular. Sebagai kompensasi, dapat terjadi peningkatan rotasi anterior pelvis atau peningkatan lordosis lumbal untuk membantu mengayunkan tungkai ke depan. Adaptasi ini

memungkinkan langkah tetap berlanjut, tetapi berpotensi meningkatkan stres pada segmen lumbopelvik apabila berlangsung kronis. Secara keseluruhan, deviasi biomekanik pada OA hip merupakan kombinasi antara respons terhadap nyeri, kelemahan otot, dan keterbatasan mobilitas, yang semuanya berkontribusi terhadap perubahan efisiensi dan stabilitas pola jalan.

Mekanisme Kompensasi Dan Dampak Jangka Panjang

Pada pasien dengan Osteoarthritis, mekanisme kompensasi berupa pemiringan batang tubuh ke sisi yang sakit (lateral trunk lean) memang terbukti efektif dalam menurunkan nyeri dalam jangka pendek. Dengan mendekatkan pusat massa tubuh ke sendi panggul yang menopang, kebutuhan momen abduktor berkurang sehingga gaya kompresi pada sendi ikut menurun. Strategi ini membantu pasien tetap mampu berjalan dengan rasa nyeri yang lebih terkendali. Namun, dalam jangka panjang, pola kompensasi ini menimbulkan konsekuensi biomekanik yang merugikan. Distribusi beban tubuh menjadi tidak simetris, sehingga meningkatkan tekanan pada ekstremitas kontralateral maupun struktur sendi di bawahnya. Salah satu dampak yang sering muncul adalah peningkatan risiko Osteoarthritis sekunder pada sendi lutut, khususnya kompartemen medial, akibat peningkatan momen varus dan beban kompresif yang berulang. Ketidakseimbangan ini dapat mempercepat proses degeneratif pada lutut yang awalnya tidak bermasalah. Selain itu, perubahan alignment dan pusat gravitasi tubuh menyebabkan peningkatan aktivitas otot-otot paraspinal untuk menjaga stabilitas

batang tubuh. Aktivasi yang berlebihan dan berlangsung kronis dapat memicu kelelahan otot, spasme, serta berkontribusi terhadap nyeri punggung bawah kronis. Peningkatan lordosis lumbal dan rotasi pelvis yang menyertai trunk lean juga menambah stres pada segmen lumbosakral. Dengan demikian, meskipun trunk lean merupakan strategi adaptif yang rasional untuk mengurangi nyeri pada fase awal, intervensi fisioterapi tetap diperlukan untuk memperbaiki kekuatan otot abduktor, kontrol neuromuskular, serta pola jalan, agar komplikasi sekunder pada lutut dan tulang belakang dapat dicegah.

Implikasi Klinis Dan Intervensi Fisioterapi

Evaluasi biomekanik melalui analisis gait, baik secara manual maupun menggunakan teknologi digital seperti motion capture dan force plate, memiliki peran penting dalam menentukan diagnosis fungsional pada pasien dengan Osteoarthritis. Pemeriksaan ini membantu mengidentifikasi deviasi pola jalan, distribusi gaya reaksi tanah, momen sendi, serta kompensasi yang terjadi pada segmen proksimal maupun distal. Dengan analisis yang objektif, fisioterapis dapat menyusun program intervensi yang lebih spesifik dan terarah sesuai gangguan biomekanik yang ditemukan. Intervensi utama berfokus pada terapi latihan yang bertujuan meningkatkan kekuatan otot abduktor dan ekstensor hip, terutama gluteus medius dan gluteus maximus, untuk memperbaiki stabilitas pelvis saat fase tumpu tunggal. Peningkatan kekuatan kelompok otot ini akan membantu menurunkan kecenderungan terjadinya

Trendelenburg gait serta mengurangi kebutuhan kompensasi trunk lean. Selain penguatan, latihan fleksibilitas juga penting, terutama peregangan kapsul sendi dan otot iliopsoas, guna memperbaiki keterbatasan lingkup gerak sendi yang sering terjadi pada rotasi internal dan ekstensi hip. Gait retraining menjadi bagian integral dalam rehabilitasi. Pasien dilatih untuk berjalan dengan postur yang lebih tegak dan distribusi beban yang lebih simetris melalui instruksi verbal, umpan balik visual menggunakan cermin, atau bahkan biofeedback digital. Tujuannya adalah mengurangi pola kompensasi maladaptif yang berpotensi menimbulkan masalah sekunder pada lutut maupun tulang belakang lumbal. Selain itu, penggunaan alat bantu jalan seperti tongkat (cane) pada sisi kontralateral dari hip yang sakit terbukti efektif dalam menurunkan beban kompresif pada sendi panggul hingga sekitar 40%. Mekanisme ini bekerja dengan mengurangi momen abduktor yang harus dihasilkan oleh otot panggul saat fase stance. Dengan kombinasi evaluasi biomekanik yang akurat dan intervensi yang komprehensif, diharapkan fungsi berjalan pasien dapat membaik sekaligus memperlambat progresivitas degenerasi sendi.

Profil Penulis



Catherine Hermawan Salim adalah seorang dosen dan praktisi fisioterapi dengan pengalaman di bidang fisioterapi muskuloskeletal. Beliau memperoleh gelar Sarjana Fisioterapi dari Universitas Esa Unggul dan melanjutkan studi magister di bidang Ilmu Manajemen di PPM *School of Management*. Sebagai fisioterapis, beliau telah menangani berbagai kasus gangguan muskuloskeletal sejak tahun 2017 di klinik-klinik fisioterapi dan rumah sakit Tzu Chi *Hospital* Jakarta. Keahlian utama beliau terletak pada penanganan gangguan tulang belakang lumbopelvic, osteoarthritis, *dry needling* dan fisioterapi cedera olahraga. Beliau juga telah menulis beberapa artikel ilmiah serta sering menjadi pembicara dalam seminar fisioterapi. Dengan dedikasi tinggi pada peningkatan kualitas hidup pasien, beliau terus berkomitmen dalam pengembangan fisioterapi berbasis bukti di Indonesia. Email Penulis: cathysalim8@gmail.com



Jerry Maratis adalah Dosen Tetap Program Studi Fisioterapi Fakultas Fisioterapi Universitas Esa Unggul dibawah naungan Yayasan Pendidikan Kemala Bangsa (YPKB). Penulis lahir di Kota Palembang tanggal 17 Agustus 1977, menyelesaikan jenjang S1 dari Program Studi Fisioterapi Fakultas Fisioterapi Universitas Esa Unggul Jakarta tahun 2013, jenjang S2 Program Studi Fisioterapi Fakultas Fisioterapi Universitas Udayana Jakarta tahun 2015, dan tahun 1989 dan melanjutkan Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik (dh. Program Studi Pascasarjana) Universitas Indonesia Jakarta menyelesaikan studi tahun 1995. Riwayat singkat penulis berkarir sebagai pendidik (dosen) dalam melaksanakan dan mengabdikan Tri Dharma Perguruan Tinggi 33 tahun, Alhamdulillah telah menghasilkan beberapa karya ilmiah publikasi pada tingkat nasional dan internasional bereputasi serta ter-indeks (focus area literature: Internet of Things, Kriptografi, Bibliometric dan Data Science). Hingga saat ini tercatat aktif dalam beberapa organisasi profesi (IAII, ADI, ACM, PII, APTIKOM, IAENG), assessor BKD dan sebagai reviewer pada jurnal terakreditasi Arjuna, Komite Ilmiah (Nasional/Internasional).



Syakilah Aldiansyah lahir pada tanggal 18 April 2006 di Depok. Penulis menempuh pendidikan di Sekolah Dasar Negeri Jatisampurna 08 (2012- 2018), SMP 15 Bekasi (2018- 2021), dan SMK Bina Husada Mandiri (2021-2024). Penulis melanjutkan studinya di Stikes Rs Husada, Fakultas Fisioterapi. Penulis dapat dihubungi melalui surat elektronik syakilahaldiansyah04@gmail.com



Siti Hannah lahir pada tanggal 25 Februari 2006 di Tangerang . Penulis menempuh pendidikan di Sekolah Dasar Mi Tarbiatus Sa'adah (2012- 2018), PonPes Siraaajul Ummah (2018- 2021), dan SMA Annida Al-Islamy (2021-2024). Penulis melanjutkan studinya di Stikes Rs Husada, Fakultas Fisioterapi. Penulis dapat dihubungi melalui surat elektronik hannahsiti20@gmail.com.



Grace Lexa Dinanti lahir pada tanggal 29 januari 2006, penulis menempuh pendidikan di (2012-2018) SD STELLA MARIS (2018-2021) SMPN 122 (2021-2024) SMA STELLA MARIS Penulis melanjutkan studinya di Stikes Rs Husada, Fakultas Fisioterapi. Penulis dapat dihubungi melalui surat elektronik gracelexadinanti@gmail.com



Ririn Agustin lahir pada tanggal 4 Januari 2006 di Jakarta. Penulis menempuh pendidikan di SDN Petojo Utara 03 Pagi (2012–2018), SMPN 54 Jakarta Barat (2018–2021), dan SMAN 17 Jakarta Barat (2021–2024).



Vania Salsabila lahir pada tanggal 18 Juni 2006 di Jakarta. Penulis menempuh pendidikan di SD Muhammadiyah 17 Jakarta (2012–2018), SMP Al-Khotibiya (2018–2021), dan SMA Puspa Mekar (2021–2024).



Sayyidati Sariah Salsabula lahir pada tanggal 18 Februari 2006 di Jakarta Barat. Penulis menempuh pendidikan di Sekolah Dasar Negeri 14 Cengkareng (2012- 2018), SMPIT Al- Qomar (2018-2021), dan SMK Telkom Jakarta (2021-2024). Penulis melanjutkan studinya di Stikes Rs Husada, Fakultas Fisioterapi. Penulis dapat dihubungi melalui surat elektronik salsabilasayyidati@gmail.com



Annisa Nadila Ramadhani Lahir Pada 18 Oktober 2005 di Jakarta Penulis menempuh pendidikan 2012-2016 MI alkhairiyah, 2016-2018 MI Ma'had Al Zaytun, 2018-2021 MTS Ma'had Al Zaytun, 2021-2024 MA Ma'had Al Zaytun, Penulis melanjutkan studinya di Stikes Rs Husada, Fakultas Fisioterapi. Penulis dapat dihubungi melalui surat elektronik nadilaannisa18@gmail.com



Sabrina Ramadhanti lahir pada tanggal 29 September 2006 di Jakarta Pusat . Penulis menempuh pendidikan di Sekolah Dasar Negeri Pasar Baru 07 (2012- 2018), MTsS Al Amanah (2018- 2021), dan SMA SMA (2021-2024). Penulis dapat dihubungi melalui surat elektronik sabrinaramadhan06@gmail.com



Muhammad Galih Pratama lahir pada tanggal 13 April 2006 di Jakarta. Penulis menempuh pendidikan di Sekolah Dasar Kedung Waringin 05 (2012- 2018), SMP Daarutaqwa (2018- 2021), dan SMA Daarutaqwa (2021-2024). Penulis melanjutkan studinya di Stikes Rs Husada, Fakultas Fisioterapi. Penulis dapat dihubungi melalui surat elektronik galihpratama1346@gmail.com



Radit Juliyanto lahir pada tanggal 16 Juli 2006 di Jakarta . Penulis menempuh pendidikan di Sekolah Dasar Negeri Setia Mekar 06 (2012- 2018), SMPN 3 Tambun Utara (2018- 2021), dan SMAN 2 Tambun Utara - (2021-2024). Penulis melanjutkan studi di Stikes Rs Husada, Fakultas Fisioterapi. Penulis dapat dihubungi melalui surat elektronik raditjuli59@gmail.com



Haris Rizky Fajar Abadi lahir pada tanggal 10 oktober 2004 di kendal. Penulis menempuh pendidikan di SD N 3 BLEDER (2011 - 2016), SMP N 1 PATEBON (2017- 2019), dan SMK NU 01 KENDAL (2019-2022). Penulis melanjutkan studinya di Stikes Rs Husada, Fakultas Fisioterapi. Penulis dapat dihubungi melalui surat elektronik abadifajar75@gmail.com



Penulis lahir pada tanggal 21 Mei 2004 di Tangerang. Penulis menempuh pendidikan di Sekolah Dasar Tamansari 08 Pagi (2011– 2017), SMPN 64 Jakarta (2017–2020), dan SMAN 17 Jakarta (2020–2023). Selanjutnya, penulis melanjutkan pendidikan di STIKes RS Husada, Fakultas Fisioterapi.

Penulis dapat dihubungi melalui surat elektronik di kaylasalina8@gmail.com.



Bastian Jonathan lahir pada tanggal 26 Juli 2004 di Jakarta Penulis menempuh pendidikan di Sekolah Dasar Strada Pejompongan (2011- 2016), SMP Strada Pejompongan (2017- 2019), dan SMK Yadika 2 Jakarta Barat - (2020-2022).



Nasnia Lilam lahir pada tanggal 14 september 2004 di jakarta. Penulis menempuh pendidikan di Sekolah Dasar negeri 01 pejagalan (2010- 2017), smpn 112 jakarta (2017- 2020), dan SMAN 17 jakarta (2020-2023). Penulis melanjutkan studinya di Stikes Rs Husada, Fakultas Fisioterapi. Penulis dapat dihubungi melalui surat elektronik nasnialilam7@gmail.com.



Nailah Ayu Irma Sanjaya lahir pada tanggal 12 September 2005. Penulis menempuh pendidikan di SD Negeri Pasar Baru Satu Kota Tangerang (2012–2017), SMP Al-Ijtihad Kota Tangerang (2018–2020), dan SMK Lab Business School Kota Tangerang (2022–2024). Penulis melanjutkan studinya di Stikes RS Husada, Fakultas Fisioterapi. Penulis dapat dihubungi melalui surat elektronik nayyla912@gmail.com.



Penulis lahir pada tanggal 22 Februari 2006 di Bekasi. Penulis menempuh pendidikan di Sekolah Dasar Mekarsari 06 (2012–2018), lalu SMP di SMPN Negeri 06 Tambun Selatan (2018–2021), dan SMA di SMK Kesehatan Tambun Islamic School (2021–2024). Penulis melanjutkan studinya di STIKes RS Husada, Fakultas Fisioterapi.

Penulis dapat dihubungi melalui surat elektronik di auroranasywa02@gmail.com.



Firda Ayu lahir pada tanggal 19 April 2005, penulis menempuh pendidikan di SD Negeri Pengampon 1 Kota Cirebon (2011-2017), SMP Negeri 14 Kota Cirebon (2017-2020), dan SMA Nusantara Jakarta Utara (2021-2024). Penulis melanjutkan studinya di Stikes Rs Husada, Fakultas Fisioterapi. Penulis dapat dihubungi melalui surat elektronik firdayumy@gmail.com



Crhistoper Coran Deo lahir pada tanggal 14 april 2006 di bogor. Penulis menempuh pendidikan di Sekolah Dasar Negeri Pegadungan 03 Pagi (2012- 2018), SMPN 204 Jakarta (2018- 2021), dan SMK Yadika 3 (2021-2024). Penulis melanjutkan studi di Stikes Rs Husada, Fakultas Fisioterapi. Penulis dapat dihubungi melalui surat elektronik cristofer14deon@gmail.com



Luthvya Ramadhani lahir pada tanggal 28 Oktober 2005 di Jakarta. Penulis menempuh pendidikan di MI Tarbiyatussa'adah (2012-2018), SMPN 105 Jakarta (2018-2019), dan SMK Al-ihsan meruya (2022-2024)



Jazzy Angela Alwyn lahir pada tanggal 19 September 2004 di Jakarta Utara . Penulis menempuh pendidikan di Sekolah Dasar Marie Joseph (2010- 2016), Don Bosco 1 (2017- 2021), dan SMA Homeschooling Tunas Karya Bangsa (2021-2023). Penulis melanjutkan studinya di Stikes Rs Husada, Fakultas Fisioterapi. Penulis dapat dihubungi melalui surat elektronik jaysalwn@gmail.com



Bohal Septianus Naftali Siregar lahir tanggal 28 September 2006 di Jakarta. Penulis menempuh pendidikan Di sekolah dasar Kristen SatuBakti Bogor (2012-2018), SMP Budimulia Bogor (2018-2021), dan SMAN 1 Bojonggede (2021-2024). Penulis melanjutkan studi di Stikes Rs Husada, Fakultas Fisioterapu. Penulis dapat dihubungi melalui surat elektronik siregarbohal@gmail.com



Rafi Alfathaya lahir pada tanggal 25 April 2005 ,penulis menempuh pendidikan di SDS muhammadiyah (2010-2016), SMP alminhaj shahabah (2016-2019),dan SMA al minhaj shahabah daarus sunnah (2020-2023). Penulis melanjutkan studinya di Stikes Rs Husada, Fakultas Fisioterapi. Penulis dapat dihubungi melalui surat elektronik ate.alfaquen@gmail.com

Daftar Pustaka

- Baker, R. (2013). *Measuring walking: A handbook of clinical gait analysis*. London: Mac Keith Press.
- Cavagna, G. A., et al. (2002). Pendular energy transduction within the step in human walking. *Journal of Experimental Biology*, 205(21), 3413–3422.
- Hassiddiq, M., et al. (2025). *Biomekanika Gerak dan Stabilitas Tubuh*. Jakarta: STIKES Husada Press.
- Houdijk, H., et al. (2009). The energy cost for balance control during walking. *Gait & Posture*, 29(4), 631–635.
- Kirtley, C. (2006). *Clinical gait analysis: Theory and practice*. Edinburgh: Elsevier Churchill Livingstone.
- Maratis, J., & Nisa, K. (2021). Hubungan Kecepatan Jalan dengan Keseimbangan Dinamis. *Jurnal Fisioterapi Indonesia*.
- Menant, J. C., et al. (2008). Effects of walking surfaces and footwear on gait parameters. *Gait & Posture*, 29(3), 392–397.
- Neumann, D. A. (2017). *Kinesiology of the Musculoskeletal System: Foundations for Rehabilitation*. Elsevier.
- Novitasari, D., et al. (2024). Pengaruh Latihan Gait Training terhadap Keseimbangan Pasien Stroke. *Jurnal Rehabilitasi Medik*.

Paretta Bertus, A., & Somalinggi Cristian, B. (2021). Analisis Biomekanika Fase Stance pada Berjalan Normal. Jurnal Ilmiah Kedokteran.

(Stride Length) dan Durasi Double Support terhadap Stabilitas Dinamis Pasien Osteoarthritis

303-309. <https://doi.org/10.1016/j.knee.2008.12.007>

Adiatmika, I.P.G., & Santika, I.G.P.N.A. (2016). Bahan Ajar untuk Tes dan Pengukuran Olahraga. Denpasar: Penerbit Universitas Udayana.

Andriacchi, T. P., & Mündermann, A. (2006). The role of gait dynamics in the etiology and progression of knee osteoarthritis. *Journal of Biomechanics*, 39(8), 1437-1445.

Ardyanto, S. (2018). Meningkatkan Teknik Servis Pendek dalam Bulu Tangkis Melalui Media Audio-Visual. *Jurnal Ilmiah Pendidikan Jasmani (Penelitian, Pendidikan, dan Pengajaran)*, 4(3). Retrieved

Ariana, R. (2016). Pengaruh Koordinasi Mata-Tangan, Fleksibilitas Pergelangan Tangan, dan Motivasi Berprestasi terhadap Kemampuan Smash pada Mahasiswa Bulu Tangkis di Fakultas Olahraga dan Pariwisata, Universitas Muhammadiyah Malang (FK UNM). 5, 1–23.

Aryanti, S., Victorian, A. dan Yusfi, H.(2018) “Pengembangan Teknik Servis

Asosiasi Dokter Spesialis Orthopedi Indonesia (ADSOI). (2022). *Laporan Prevalensi Nyeri Punggung di Indonesia*. Jakarta: ADSOI.

- Azizah, N., et al. (2025). Analisis Keseimbangan Postural pada Lansia. Jurnal Kesehatan Terpadu.
- Badan Kesehatan Dunia (WHO). (2021). *Global Burden of Musculoskeletal Disorders*. Jenewa: WHO Press.
- Bennell, K. L., Bowles, K. A., Payne, C., Cicuttini, F., Williamson, E., Forbes, A., & Hinman, R. S. (2011).
- Bioengineering (Basel). (2021). Lower Limb Kinematics in Individuals with Hip Osteoarthritis during Gait: A Focus on Adaptative Strategies and Interlimb Symmetry. Vol 8(4), 47.
- BMC Musculoskeletal Disorders. (2012). Sagittal plane gait characteristics in hip osteoarthritis patients with mild to moderate symptoms compared to healthy controls. Vol 13, 258.
- Buldt, A. K., & Menz, H. B. (2018)
<https://jfootankleres.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13047-018-0269-9>
- Buldt, A. K., & Menz, H. B. (2018). *Foot posture and lower limb biomechanics*. Journal of Foot and Ankle Research.
<https://jfootankleres.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13047-018-0269-9>
- Buldt, A. K., & Menz, H. B. (2018). *Foot posture and lower limb biomechanics*. Journal of Foot and Ankle Research.
<https://jfootankleres.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13047-018-0269-9>

- Chen, Y. C., Lou, S. Z., Huang, C. Y., & Su, F. C. (2019).
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0966636219300946>
- Dan, H. K. M. (2020). Hasil Servis Pendek dalam Bulu Tangkis untuk Siswa SMP Negeri 18 Palembang 06061381621065.
- Desto, M. K., Hakim, A. A., & Widodo, A. (2025). Systematic Literature Review: Research on Basketball Sports Biomechanics Using VOSviewer in the Scopus Database from 2015 to 2025. *COMPETITOR: Jurnal Pendidikan Kepelatihan Olahraga*, 17(2), 749-761.
- Dutton, M. (2012). *Dutton's Orthopaedic Examination, Evaluation, and Intervention* (3rd ed.). New York: McGraw-Hill Medical.
- Fitri, A., & Herawati, N. (2020). Hubungan Indeks Massa Tubuh (IMT) dan Usia dengan Kerusakan
- Foot and Lower Extremity Biomechanics: A Ten-Year Collection of Precision Intricast Newsletters.<https://www.kirbybiomechanics.com/books>
- Foroughi, N., Smith, R., & Vanwanseele, B. (2009). The association of external knee adduction moment
- Gait & Posture. (2018). Hip movement pathomechanics of patients with hip osteoarthritis aim at reducing hip joint loading on the osteoarthritic side.
- Guilak, F. (2011). Biomechanical factors in osteoarthritis. *Best Practice & Research Clinical*

- Gustaman, G. P. (2019). Hubungan Antara Gerakan Kaki, Kekuatan Otot Kaki, dan Tinggi Lompatan dengan Kemampuan Smash Bulu Tangkis.
- Hadi, S., & Kusuma, W. (2021). Analisis Parameter Kinematika Jalan: Korelasi Panjang Langkah
- Hall, S. J. (2018). Basic Biomechanics (8th ed.). New York: McGraw-Hill Education.
- Hamill, J., & Knutzen, K. M. (2009). Biomechanical Basis of Human Movement. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins. (Membahas gaya dan momen pada ekstremitas bawah).
- Hamill, J., Knutzen, K. M., & Derrick, T. R. (2015). Biomechanical Basis of Human Movement (4th ed.). Philadelphia: Wolters Kluwer.
- Hao, Z., et al. (2025). *Stability characteristics of medial meniscus tear in mild varus knee: a finite element analysis.*
- Hasanuddin, M. I. (2019). Kontribusi Panjang Lengan, Kekuatan Otot Lengan, dan Koordinasi Mata-Tangan terhadap Kemampuan Servis Bawah Tangan Bola Voli pada Siswa SMA Garuda Kotabaru. Jurnal Ilmu Pendidikan.
- Hay, J. G. (1993). The Biomechanics of Sports Techniques. New Jersey: Prentice-Hall.
- He, Zhanyang, Bin Zhang, Binyong Ye, Zhanbing Song, Qiang Mei, Jiahao Xu, dan Houwei Zhu. (2025). "Effects of Neutral Postures on Mechanical Properties of Cervical Spine Under

- Different Gravitational Environments: A Musculoskeletal Model Study," 1–16.
- Hodges, P. W., & Tucker, K. (2011). Moving differently in pain: A new theory to explain the adaptation to pain. *Pain*, 152(3), S90-S98. (Membahas perubahan kontrol motorik akibat nyeri)
- Homeostasis, 3(1), 45-52. Universitas Lambung Mangkurat.
- Houglum, J. K., & Bertoti, D. B. (2012). *Brunnstrom's Clinical Kinesiology* (6th ed.). Philadelphia: F.A. Davis Company. (Membahas dasar gerakan manusia dan mekanika otot).
- Houglum, J. K., & Bertoti, D. B. (2012). *Brunnstrom's Clinical Kinesiology* (6th ed.). Philadelphia: F.A. Davis Company.
<https://doi.org/10.1002/art.30348>
- Journal of Medicine in Scientific Research. (2024). Characteristics of gait in patients with early hip osteoarthritis. Vol 8(1), Article 8.
- Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy. (2019). Abnormal Joint Loading During Gait in Persons With Hip Osteoarthritis Is Associated With Symptoms and Cartilage Lesions.
- Jurnal Kesmas Asclepius. (2024). "Efektivitas Kompres Hangat dalam Mengurangi Nyeri Punggung pada Ibu Hamil Trimester III." Vol. 12, No. 2, hal. 45–52.
- Jurnal Wellness and Healthy Magazine. (2024). "Kombinasi Kompres Hangat dan Olahraga Pelvic Rocking untuk

- Mengatasi Nyeri Punggung Bawah pada Ibu Hamil Trimester III." Vol. 8, No. 3, hal. 112–119.
- Kamel, M. M., Dahesh, S. M. A., Gamil, A. M., & Elatreby, A. A. (2024). Characteristics of gait in patients with early hip osteoarthritis. *Journal of Medicine in Scientific Research*.
- Kapandji, A. I. (2010). *The Physiology of the Joints: The Lower Limb* (Vol. 2). Edinburgh: Churchill Livingstone/Elsevier.
- Kartilago serta Penurunan Kekuatan Otot Quadriceps pada Pasien Osteoarthritis Lutut. *Jurnal*
- Kirby, K. A. (2017).
- Kirby, K. A. (2017). *Foot and Lower Extremity Biomechanics*. <https://www.kirbybiomechanics.com/books>
- Knudson, D. (2007). *Fundamentals of Biomechanics* (2nd ed.). New York: Springer.
- Knudson, D. (2007). *Fundamentals of Biomechanics*. California: Springer Science & Business Media.
- Kutz, M. (2019). *Biomedical Engineering and Design Handbook*. New York: McGraw-Hill.
- Lateral wedge insoles for medial knee osteoarthritis: Effects on dynamic constraints and
- Levangie, P. K., & Norkin, C. C. (2011). *Joint Structure and Function*. <https://www.fadavis.com/product/physical-therapy-joint-structure-function-levangie-5>
- Levangie, P. K., & Norkin, C. C. (2011). *Joint Structure and Function: A Comprehensive Analysis*. Philadelphia: F.A.

- Davis Company. (Analisis mendalam mengenai struktur tulang dan jaringan lunak).
- Levangie, P. K., & Norkin, C. C. (2011). *Joint Structure and Function: A Comprehensive Analysis* (5th ed.). Philadelphia: F.A. Davis Company.
- Li, S., & Wang, H. (2020). Kinematic Analysis of Short Serve Techniques in Professional Badminton Players. *Journal of Sports Science and Medicine*, 19(2), 345-352.
- Li, S., & Wang, H. (2020). Kinematic Analysis of Short Serve Techniques in Professional Badminton Players. *Journal of Sports Science and Medicine*, 19(2), 345-352.
- Li, X. (2024). Research on the biomechanical characteristics of basketball player injuries and their application in sports rehabilitation. *Molecular & Cellular Biomechanics*, 21(3).
- Lutut Grade II. *Jurnal Ilmiah Fisioterapi*, 4(2), 112-118. Universitas Esa Unggul.
- Magee, D. J. (2014). *Orthopedic Physical Assessment* (6th ed.). Philadelphia: Elsevier Health Sciences. (Membahas evaluasi klinis dan pengukuran sudut Q).
- Magee, D. J. (2014). *Orthopedic Physical Assessment* (6th ed.). St. Louis: Elsevier/Saunders.
- Magee, D. J. (2014). *Orthopedic Physical Assessment*. <https://www.elsevier.com/books/orthopedic-physical-assessment/magee/9781455709779>

- Magee, D. J. (2014). *Orthopedic Physical Assessment*.
<https://www.elsevier.com/books/orthopedic-physical-assessment/magee/978145570977>
- Mansfield, P. J., & Neumann, D. A. (2018). *Essentials of Kinesiology for the Physical Therapist Assistant*. St. Louis: Elsevier.
- Mansfield, P. J., & Neumann, D. A. (2018). *Essentials of Kinesiology for the Physical Therapist Assistant* (3rd ed.). St. Louis: Elsevier.
- Mawston, Grant A., dan Mark G. Boocock. (2015). "Lumbar Posture Biomechanics and Its Influence on the Functional Anatomy of the Erector Spinae and Multifidus."
<https://doi.org/10.1179/1743288X15Y.0000000014>.
- McGill, S.M. (2016). *Low Back Disorders: Evidence-Based Prevention and Rehabilitation*. Champaign, IL: Human Kinetics.
- Neumann, D. A. (2016). *Kinesiology of the Musculoskeletal System: Foundations for Rehabilitation* (3rd ed.). St. Louis: Mosby/Elsevier. (Referensi utama untuk biomekanika sendi lutut).
- Neumann, D. A. (2018).
<https://www.elsevier.com/books/kinesiology-of-the-musculoskeletal-system/neumann/9780323287531>
- Neumann, D. A. (2018). *Kinesiology of the Musculoskeletal System*.
<https://www.elsevier.com/books/kinesiology-of-the-musculoskeletal-system/neumann/9780323287531>

- Neumann, D. A. (2018). *Kinesiology of the Musculoskeletal System*.
<https://www.elsevier.com/books/kinesiology-of-the-musculoskeletal-system/neumann/9780323287531>
- Nugroho, U. (2015). Analisis biomekanika forehand groundstroke atlet junior daerah istimewa yogyakarta. *Jurnal Ilmiah PENJAS*, 1(1), 49–62.
- Oatis, C. A. (2017). *Kinesiology: The Mechanics and Pathomechanics of Human Movement* (3rd ed.). Baltimore: Wolters Kluwer. (Fokus pada analisis patomekanika jalan).
- Pendekatan Proprioepsi dan Retrowalking dalam Koreksi Pola Jalan Pasien Osteoarthritis.
- Perry, J., & Burnfield, J. M. (2010). *Gait Analysis: Normal and Pathological Function*.
<https://www.slackbooks.com/gait-analysis>
- Perry, J., & Burnfield, J. M. (2010). *Gait Analysis: Normal and Pathological Function*.
<https://www.slackbooks.com/gait-analysis>
- Perry, J., & Burnfield, J. M. (2010). *Gait Analysis: Normal and Pathological Function* (2nd ed.). California: SLACK Incorporated. (Referensi standar untuk analisis pola jalan).
- Phase. Diagnostics, 13(4), 567. MDPI.
<https://doi.org/10.3390/diagnostics13040567>
- Poltekkes Kemenkes Semarang. (2025). *Literatur Review: Efektivitas Kompres Hangat dan Dingin untuk Mengelola Nyeri Punggung*. Laporan Penelitian Internal, hal. 1–25.

- Porta, M., Pau, M., Leban, B., et al. (2021). Lower limb kinematics in individuals with hip osteoarthritis during gait. *Bioengineering*.
- Pratama, Handayani, W. (2018). Hubungan antara Koordinasi Mata-Tangan dan Kekuatan Otot Lengan dengan Akurasi Servis Forehand pada Olahraga Bulu Tangkis bagi Peserta Ekstrakurikuler di SMA Negeri 2 Kayuagung.
- Pratama, R., & Santoso, B. (2022). Modul Ajar Terapi Latihan dan Rehabilitasi Neuromuskular:
- Qin, L., Li, J., & Wu, L. (2025). Risk assessment of competitive injuries in college basketball from a biomechanical perspective. *Molecular & Cellular Biomechanics*, 22(1).
- Mappanyukki, A. A. (2025). The Influence of Biomechanics on Sports radiographic progression. *Arthritis & Rheumatism*, 63(6), 1644-1653.
- Rheumatology, 25(6), 815-823. (Membahas mekanotransduksi seluler).
- Siregar, B. S. N. (2025). *Analisis Biomekanik Genu Varus pada Atlet Tennis*. Makalah Biomekanik dan Kinesiologi. Sekolah Tinggi Ilmu Kesehatan RS Husada.
- Smith, A. J., & Richards, J. (2023). 3D Gait Analysis in Medial Compartment Knee Osteoarthritis:
- Steffen, F., et al. (2024/2025). *Analysis of Genu Varum in Young Male Professional Soccer Players*.
- Surabaya: UM Surabaya Publishing.

- Susanto, A. P., Wijaya, A. D., Gultom, A. S., & Muhazir, A. (2025). Systematic Literature Review: Implementasi Teknologi Analisis Biomekanika pada Gerakan Passing dan Shooting Bola Basket. *Journal Physical Health Recreation (JPHR)*, 5(4), 237-254.
- Tangan Depan Bulu Tangkis untuk Siswa SMA Putra,” *Sebatik*, 22(2), pp. 181- 187.
- Technical Insights into Knee Adduction Moment (KAM) and Joint Stiffness during Stance
- Tong, J. W. K., & Kong, P. W. (2013). Association between foot type and plantar pressure distribution. *Clinical Biomechanics*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0268003313000444>
- Universitas Muhammadiyah Surakarta (UMS). (2024). *Eprints UMS: Efektivitas Kompres Hangat Bersama Olahraga Punggung pada Tukang Becak dengan Nyeri Punggung Bawah*. Surakarta: UMS Press.
- Whiting, W. C., & Zernicke, R. F. (2008). *Biomechanics of Musculoskeletal Injury*. Illinois: Human Kinetics. (Membahas mekanisme cedera akibat beban abnormal).
- Widodo, S., & Sari, D. (2023). *Anatomi dan Fisiologi Tulang Belakang*. Jakarta: Penerbit Buku Kedokteran Indonesia.
- with biomechanical variables in knee osteoarthritis: A systematic review. *The Knee*, 16(5),

Yanto, R. J. (2025). *Analisis Risiko Cedera dan Pencegahannya pada Atlet Tennis*. Makalah Biomekanik dan Kinesiologi. Sekolah Tinggi Ilmu Kesehatan RS Husada.

Buku Membaca Gerak Tubuh: Analisis Biomekanik dalam Fisioterapi menghadirkan pemahaman komprehensif tentang bagaimana gerak tubuh manusia dapat dianalisis secara ilmiah melalui pendekatan biomekanik untuk mendukung praktik fisioterapi yang berbasis bukti (evidence-based practice).

Buku ini mengulas dua belas tema utama yang mencakup analisis biomekanik pada aktivitas sehari-hari, postur kerja, pola jalan normal dan abnormal, serta berbagai kondisi muskuloskeletal seperti flat foot, genu valgus, genu varus, osteoarthritis lutut dan panggul. Selain itu, buku ini juga membahas analisis biomekanik pada gerakan olahraga spesifik, termasuk atlet bulutangkis, tenis, sepak bola, dan basket, dengan penekanan pada implikasinya terhadap pencegahan cedera dan intervensi fisioterapi.

Setiap bab disusun secara sistematis dengan mengaitkan konsep biomekanik, analisis gerak, serta penerapannya dalam asesmen dan perencanaan program fisioterapi. Buku ini diharapkan dapat menjadi referensi praktis bagi mahasiswa fisioterapi, dosen, serta tenaga kesehatan dalam memahami hubungan antara struktur tubuh, fungsi gerak, dan gangguan biomekanik yang memengaruhi kualitas hidup individu.

Dengan bahasa yang jelas dan ilustrasi kasus yang relevan, buku ini mengajak pembaca untuk “membaca” gerak tubuh sebagai dasar dalam menentukan strategi rehabilitasi yang tepat, aman, dan efektif.