

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Cedera pada ligamentum cruciatum anterior (*Anterior Cruciate Ligament/ACL*) merupakan salah satu jenis cedera yang paling sering terjadi pada sendi lutut (*articulatio genu*), baik akibat mekanisme trauma maupun aktivitas olahraga yang melibatkan gerakan cepat seperti berlari, melompat, dan berputar. Di Amerika Serikat, insidensi cedera ACL dilaporkan sekitar 1 dari 3500 orang per tahun, dengan prosedur rekonstruksi ACL dilakukan pada sekitar 400.000 pasien setiap tahunnya (Evans et al., 2025). Secara keseluruhan, cedera ligamen menyumbang sekitar 40% dari seluruh trauma lutut, diikuti oleh cedera patela (25%), robekan meniskus (10%), dan cedera lainnya (25%) (Yasen, 2023). Robekan ACL dapat menyebabkan instabilitas lutut yang signifikan, sering kali memerlukan intervensi bedah, serta proses rehabilitasi yang panjang (Bayer et al., 2020; Evans et al., 2025).

Cedera ACL umumnya berkaitan dengan pergerakan ekstrem sendi lutut yang melibatkan kombinasi rotasi, hiperekstensi, dan gaya translasi anterior tibia (Smith et al., 2012a; Evans et al., 2025). Selain faktor mekanis dan aktivitas fisik, faktor anatomis individu juga berperan penting dalam predisposisi terjadinya cedera ACL. Variasi morfometri *articulatio genu*, seperti lebar fossa intercondylaris (*notch width*), *notch width index* (NWI), kemiringan posterior tibial plateau baik medial maupun lateral (*medial dan lateral tibial posterior slope*), serta jarak *tibial tubercle–trochlear groove* (TT–TG distance), telah dilaporkan berhubungan dengan peningkatan risiko robekan ACL (Smith et al., 2012a; Wetters et al., 2016; Jagadeesh et al., 2021; Loupatty et al., 2023).

Namun demikian, sebagian besar penelitian mengenai faktor anatomi yang berhubungan dengan kejadian cedera ACL masih didominasi oleh studi yang dilakukan pada populasi negara-negara Barat, sehingga penerapannya pada populasi lain perlu dipertimbangkan secara hati-hati. Beberapa penelitian menunjukkan adanya variasi morfometri sendi lutut antar populasi, termasuk pada populasi Asia. Studi sebelumnya melaporkan bahwa individu Asia cenderung memiliki fossa intercondylaris yang relatif lebih sempit dibandingkan populasi Barat, dan karakteristik ini telah diasosiasikan dengan peningkatan risiko cedera ACL (Zeng et al., 2013; Jagadeesh et al., 2021). Temuan ini menunjukkan bahwa faktor morfometri *articulatio genu* dapat berperan secara berbeda pada berbagai populasi.

Di Indonesia, cedera ACL dilaporkan terjadi pada individu yang terlibat dalam berbagai aktivitas fisik, baik olahraga maupun aktivitas sehari-hari. Berbeda dengan literatur dari negara-negara maju yang banyak

melaporkan cedera ACL pada olahraga kompetitif dengan tuntutan biomekanik tinggi, konteks aktivitas fisik di Indonesia cenderung lebih beragam dan tidak selalu melibatkan pergerakan ekstrem. Variasi karakteristik aktivitas fisik ini diduga berkontribusi terhadap perbedaan mekanisme dan pola cedera ACL antar populasi (Yasen, 2023). Selain itu, faktor intrinsik dan ekstrinsik, termasuk stabilitas sendi lutut, juga diperkirakan turut memengaruhi risiko terjadinya cedera ACL.

Di sisi lain, keterbatasan akses terhadap modalitas pencitraan seperti *magnetic resonance imaging* (MRI) di beberapa wilayah dapat memengaruhi ketepatan diagnosis cedera ACL. Oleh karena itu, penelitian yang mengeksplorasi faktor-faktor anatomi spesifik yang berhubungan dengan cedera ACL berbasis MRI menjadi penting untuk mendukung upaya pencegahan, diagnosis, dan penatalaksanaan yang lebih tepat, khususnya dalam konteks populasi Indonesia.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis hubungan variasi morfometri *articulatio genu* yang diukur menggunakan MRI, yang meliputi *notch width*, *notch width index* (NWI), *medial* dan *lateral tibial posterior slope* (MTPS dan LTPS), serta *tibial tubercle–trochlear groove* (TT–TG distance), dengan kejadian cedera ACL. Dengan pendekatan ini, diharapkan dapat diperoleh pemahaman yang lebih komprehensif mengenai peran faktor morfometri *articulatio genu* dalam kejadian cedera ACL pada populasi Indonesia, sehingga dapat berkontribusi dalam pengembangan strategi skrining risiko, pencegahan cedera, dan rehabilitasi yang lebih individual dan berbasis anatomi.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Bagaimana hubungan antara diameter fossa intercondylaris femoris (*notch width*) dengan kejadian cedera ACL?
- b. Bagaimana hubungan antara rasio diameter fossa intercondylaris femoris dan lebar bicondylar femur distal (*notch width index*/NWI) dengan kejadian cedera ACL?
- c. Apakah variasi sudut kemiringan *facies articularis superior tibiae pars medialis* terhadap garis horizontal (*medial tibial posterior slope*/MTPS) memengaruhi insidensi robekan ACL?
- d. Apakah variasi sudut kemiringan *facies articularis superior tibiae pars lateralis* terhadap garis horizontal (*lateral tibial posterior slope*/LTPS) memengaruhi insidensi robekan ACL?
- e. Apakah jarak antara tuberositas tibiae dan sulcus trochlearis femoris pada bidang aksial (*tibial tubercle-trochlear groove distance*/TT-TG distance) memengaruhi stabilitas sendi lutut dan kejadian robekan ACL?

1.3 Tujuan Penelitian

1.3.1 Tujuan Umum

Menganalisis hubungan antara variasi morfometri articulation genu dengan kejadian cedera anterior cruciate ligament (ACL).

1.3.2 Tujuan Khusus

- a. Menganalisis hubungan antara *notch width* dengan kejadian cedera ACL.
- b. Menganalisis hubungan antara *notch width index* (NWI) dengan kejadian cedera ACL.
- c. Menganalisis hubungan antara *medial tibial posterior slope* (MTPS) dengan insidensi cedera ACL.
- d. Menganalisis hubungan antara *lateral tibial posterior slope* (LTPS) dengan insidensi cedera ACL.
- e. Menganalisis hubungan *tibial tubercle-trochlear groove distance* (TT-TG *distance*) dengan stabilitas sendi lutut dan kejadian cedera ACL.

1.4 Manfaat Penelitian

1. Bagi Institusi

Penelitian ini dapat memberikan kontribusi yang signifikan bagi institusi pendidikan, khususnya dalam bidang kedokteran, ilmu keolahragaan, dan fisioterapi. Hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai materi pembelajaran untuk memahami lebih dalam mengenai biomekanika dan morfometri articulation genu serta hubungannya dengan cedera ACL. Selain itu, penelitian ini juga dapat menjadi referensi bagi mahasiswa dan dosen dalam pengembangan penelitian lanjutan terkait pencegahan dan pengobatan cedera ACL, serta memperkaya literatur akademik di bidang kesehatan dan olahraga.

2. Bagi Peneliti

Penelitian ini memberikan kesempatan bagi peneliti untuk memperdalam pemahaman mengenai faktor-faktor anatomi yang mempengaruhi risiko cedera ACL. Selain itu, peneliti juga dapat mengembangkan keterampilan dalam penggunaan teknologi pencitraan modern seperti MRI, serta analisis biomekanik untuk memetakan variasi morfometri individu. Penelitian ini juga dapat membuka peluang untuk kolaborasi antar-disiplin ilmu, seperti biomekanika, kedokteran olahraga, dan teknik biomedis. Hasil penelitian ini dapat menjadi dasar untuk publikasi ilmiah di jurnal bereputasi dan menjadi referensi untuk penelitian lanjutan yang lebih komprehensif.

3. Bagi Masyarakat

Penelitian ini memiliki potensi memberikan dampak positif bagi masyarakat, khususnya individu dengan risiko cedera ACL, karena dapat digunakan sebagai dasar deteksi dini dan upaya pencegahan. Dengan pemahaman yang lebih baik tentang faktor-faktor anatomi yang memengaruhi risiko cedera ACL, individu yang aktif secara fisik, dapat lebih waspada terhadap risiko pribadi mereka. Selain itu, hasil penelitian ini juga dapat berkontribusi pada pengembangan program pencegahan cedera yang lebih efektif dan spesifik, sehingga mengurangi angka cedera ACL dan mempercepat proses rehabilitasi.

1.5 Ruang Lingkup Penelitian

Penelitian ini berfokus pada analisis morfometri articulation genu dan kaitannya dengan kejadian robekan *Anterior Cruciate Ligament (ACL)*, pada individu dengan riwayat trauma lutut yang menjalani pemeriksaan MRI. Lingkup penelitian ini mencakup beberapa aspek sebagai berikut:

- ✓ Subjek Penelitian: Penelitian ini dilakukan pada pasien dengan riwayat trauma lutut yang menjalani pemeriksaan MRI Genu di rumah sakit tempat penelitian dilakukan. Subjek meliputi pasien dewasa (usia ≥ 18 tahun), baik laki-laki maupun perempuan, yang memiliki indikasi klinis suspek cedera ACL berdasarkan anamnesis dan pemeriksaan klinis ortopedi.
- ✓ Variasi Anatomi yang Diteliti:
 - Diameter fossa intercondylaris femoris (*notch width*)
 - Rasio diameter fossa intercondylaris femoris dan lebar bicondylar femur distal (*notch width index/NWI*)
 - Inclination posterior tibialis medialis (*medial tibial posterior slope /MTPS*) atau sudut kemiringan facies articularis superior tibiae pars medialis terhadap garis horizontal
 - Inclination posterior tibialis lateralis (*lateral tibial posterior slope /LTPS*) atau sudut kemiringan facies articularis superior tibiae pars lateralis terhadap garis horizontal
 - Jarak antara tuberositas tibiae dan sulcus trochlearis femoris pada bidang axial (*tibial tubercle – trochlear groove distance/TT-TG distance*).
- ✓ Metode Pengumpulan Data: Data diperoleh melalui pengukuran parameter morfometri dari hasil MRI, tanpa melibatkan wawancara atau intervensi langsung terhadap pasien. Penelitian ini dilakukan di rumah sakit yang memiliki fasilitas PACS (*Picture Archiving and Communication System*) dan layanan radiologi dengan modalitas MRI muskuloskeletal. Seluruh data morfometri diperoleh dari hasil pengukuran MRI sagittal, coronal, dan axial.

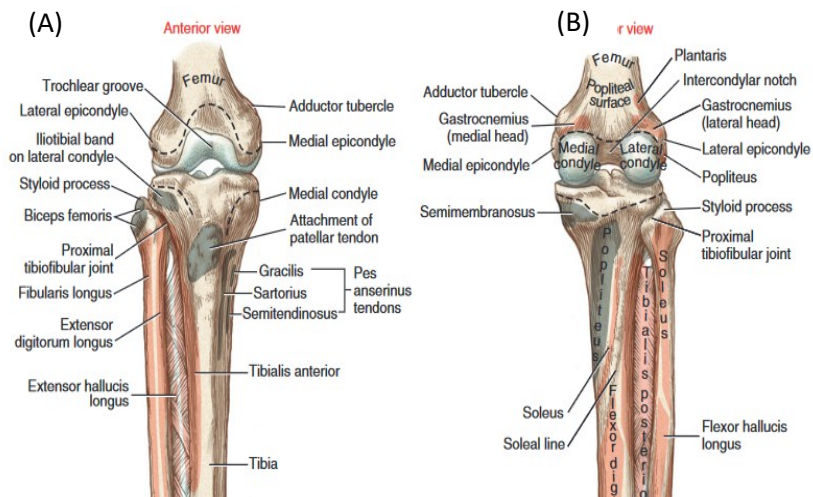
- ✓ Analisis Data: Analisis kuantitatif akan dilakukan untuk mengkaji hubungan antara variasi morfometri articulatio genu dan kejadian cedera ACL. Teknik statistik yang digunakan meliputi analisis regresi logistik untuk menganalisis hubungan antara variabel independen morfometri articulatio genu dengan variabel dependen kejadian cedera ACL.
- ✓ Lingkup Waktu: Penelitian ini direncanakan berlangsung selama 3 bulan, mencakup tahap pengumpulan data, analisis, dan penyusunan laporan akhir. Periode penelitian ini juga mencakup waktu pemantauan yang cukup untuk memastikan hasil yang akurat.
- ✓ Batasan Penelitian: Subjek penelitian hanya mencakup pasien dengan riwayat trauma lutut yang mendapatkan pemeriksaan MRI dengan indikasi suspek cedera ACL, sehingga hasil penelitian tidak dapat digeneralisasikan ke populasi tanpa trauma atau ke populasi sehat. Selain itu, desain yang digunakan adalah cross-sectional, sehingga hubungan yang ditemukan bersifat asosiatif dan tidak dapat disimpulkan sebagai hubungan kausal (sebab-akibat).

Variasi morfometri lain yang mungkin mempengaruhi risiko cedera ACL namun tidak dapat diukur melalui hasil MRI genu rutin tidak menjadi variabel penelitian. Demikian juga faktor genetik dan hormonal, kekuatan dan fleksibilitas otot, serta faktor ekstrinsik tidak akan menjadi fokus dalam penelitian ini. Dengan ruang lingkup ini, diharapkan penelitian dapat memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai peran variasi morfometri articulatio genu pada kejadian cedera ACL serta menjadi dasar untuk strategi pencegahan dan rehabilitasi yang lebih efektif.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Articulatio Genu

Articulatio genu adalah nama latin untuk sendi lutut, yang merupakan sendi terbesar dan salah satu yang paling kompleks di tubuh manusia, karena memungkinkan gerakan penting seperti fleksi (menekuk) dan ekstensi (meluruskan) kaki. Tulang-tulang penyusun articulatio genu yaitu os femur, os tibia dan os patella. Selain struktur tulang, struktur-struktur yang menyusun articulatio genu juga terdiri dari otot, tendon, ligamen dan jaringan lunak, yang memungkinkan pergerakan yang kompleks tersebut (gambar 1 dan 4) (Neumann, 2017).

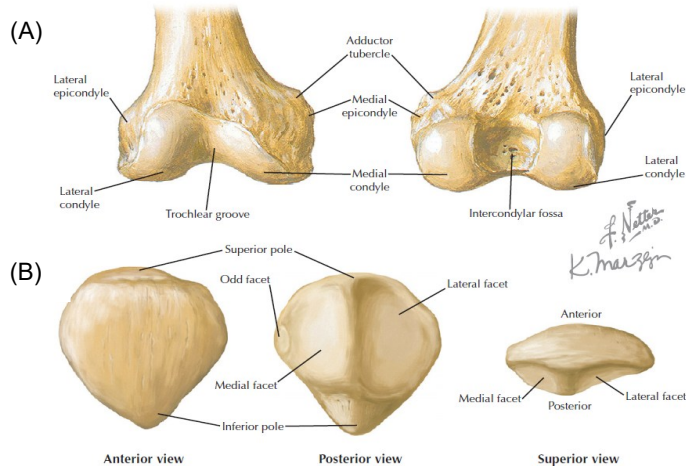


Gambar 1. Struktur-struktur yang membentuk articulatio genu, (A) tampak anterior, (B) tampak posterior (Neumann, 2017)

Os Femur merupakan tulang yang terpanjang, terkuat, dan terberat di dalam tubuh. Bagian distal os femur membentuk bagian superior dari articulatio genu, disebut condylus (condylus lateralis dan medialis). Epicondylus lateral dan medial merupakan bagian yang menonjol dari setiap condyles dan merupakan tempat melekat dari ligamentum collateral. Condylus femoralis bergabung disisi anterior membentuk alur troklearis femur (*trochlear groove*) (gambar 1 dan 2A). Alur troklearis femur berarticulatio dengan bagian posterior dari patella membentuk articulatio patellofemorale (Lippert, 2011; Neumann, 2017).

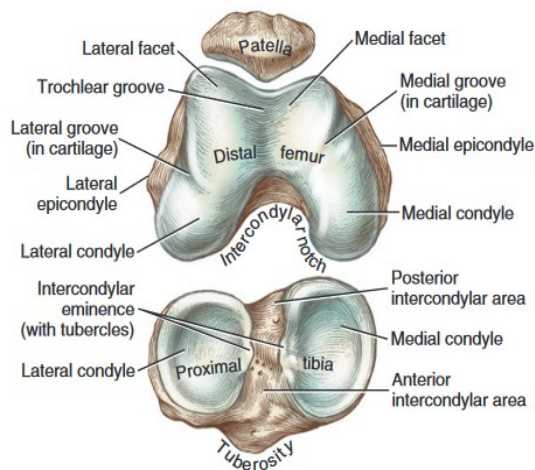
Os Tibia terletak di bagian inferior dari articulatio genu. Ujung proksimal tibia melebar menjadi condylus medial dan lateral, yang membentuk permukaan artikular dengan femur distal (gambar 1). Permukaan superior condylus membentuk daerah yang luas, sering

disebut sebagai *tibia plateau*. *Tibial plateau* ini menopang dua permukaan artikular halus yang menerima condylus femoralis, membentuk kompartemen medial dan lateral articulation tibiofemoral. Ligamen cruciatum dan meniskus menempel di sepanjang daerah interkondilaris tibia (Neumann, 2017).



Gambar 2. (A) Osteologi os femur, (B) os patella (Thompson, 2010)

Os patella adalah tulang yang hampir berbentuk segitiga yang tertanam di dalam tendon quadriceps. Tulang ini merupakan tulang sesamoid terbesar di dalam tubuh. Patela memiliki dasar yang melengkung di bagian atas dan puncak yang runcing di bagian bawah. Permukaan artikular posterior patela ditutupi oleh tulang rawan artikular setebal 4 hingga 5 mm (gambar 2B). (Neumann, 2017)



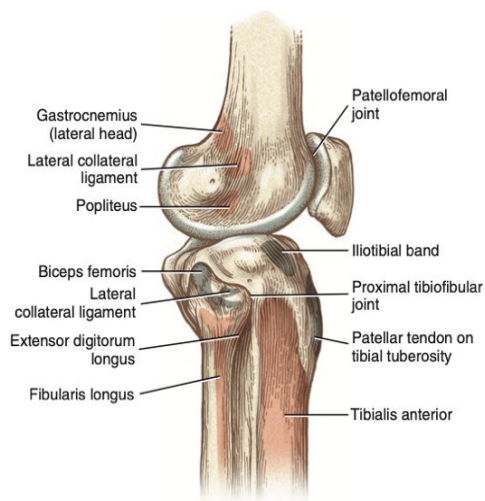
Gambar 3. Osteologi patella dextra, permukaan articular dari femur distal dan tibia proksimal (Neumann, 2017)

Bagian dari permukaan ini berartikulasi dengan alur troklearis femur, membentuk sendi patellofemoral. Tonjolan vertikal bundar membentang membujur dari atas ke bawah melintasi permukaan posterior patela. Di kedua sisi tonjolan pada bagian posterior ini terdapat facet lateral atau medial. Facet lateral yang lebih besar dan sedikit cekung cocok dengan kontur umum facet lateral pada alur troklearis femur (lihat gambar 3). Facet medial menunjukkan variasi anatomi yang signifikan (Neumann, 2017)

2.1.1 Anatomi Articulatio Genu

Pada articulatio genu terdapat tiga facies articularis dan dua tipe sendi yang berbeda yaitu sendi engsel dan sendi luncur. Sendi engsel atau *gynglimus type of synovial joint* pada genus terdiri dari dua sendi yaitu articulatio tibiofemoralis lateralis (gambar 4) dan articulatio tibiofemoralis medialis. Sendi luncur yaitu sendi antara bagian distal os femoris dan patella atau disebut articulatio patellofemoralis (Gemayel & Varacallo, 2025; Neumann, 2017; Raj et al., 2025). Facies articularis yang tidak kongruen secara mekanis menyebabkan stabilitas articulatio genus relatif lemah. Kestabilan sendi bergantung pada kekuatan dan kerja otot, tendo otot dan juga ligamen-ligamen antara os femoris dan tibia (Lippert, 2011).

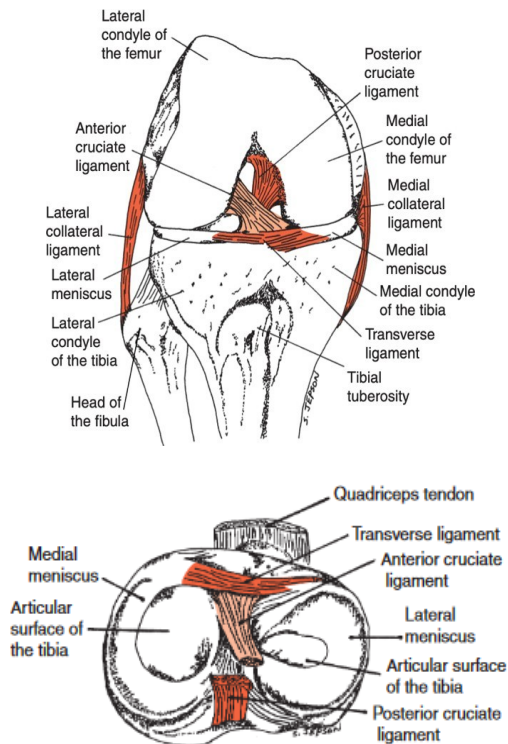
Articulatio tibiofemoral terdiri dari articulatio antara condylus femoralis yang besar dan cembung serta condylus tibialis yang hampir datar dan lebih kecil. Luas permukaan articulatio condylus femoralis yang besar memungkinkan gerakan lutut yang luas pada bidang sagital untuk aktivitas seperti berlari, jongkok, dan memanjat. Articulatio patellofemoral merupakan *interface* antara sisi articular os patela dan alur troklearis femur (lihat gambar 4) (Neumann, 2017).



Gambar 4. Tampakkan lateral genu dextra

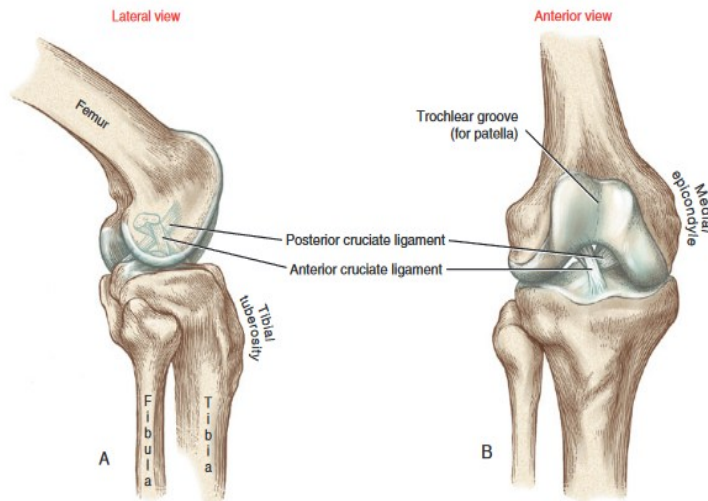
Articulatio pada genu disatukan bukan oleh struktur tulangnya tetapi oleh ligamen dan otot. Ligamentum cruciatum dan ligamentum collateral adalah dua set ligamen yang berperan penting (gambar 5). Ligamen pada articulatio genu dibagi menjadi dua yaitu ligamen ekstrakapsular yang terletak di luar capsula articularis dan ligamen intrakapsular yang terletak di dalam capsula articularis. Kelompok ligamentum yang menjaga stabilitas sendi lutut terdiri dari kelompok ligamentum cruciatum termasuk intrakapsular dan kelompok ligamentum collaterale termasuk ekstrakapsular (Gambar 3) (Cantrell et al., 2025; Gupton et al., 2025; Lippert, 2011).

Ligamentum cruciatum terdiri dari dua ligamentum dan penamaannya sesuai dengan tempat perlekatan ligamentum pada os femoris dan tibia (gambar 4). Ligamentum cruciatum anterior (*Anterior Cruciate Ligament; ACL*) merupakan ligamentum cruciatum yang lemah dengan vaskularisasi yang buruk. ACL melekat pada area intercondylaris anterior tibiae ke posteromedial condylus lateralis os femoralis (lihat gambar 6), berfungsi untuk mencegah hiperekstensi articulatio genu, pergeseran os femoris ke posterior, dan pergeseran tibia ke anterior saat fleksi articulatio genu. (Cantrell et al., 2025; Gemayel & Varacallo, 2025; Gupton et al., 2025).



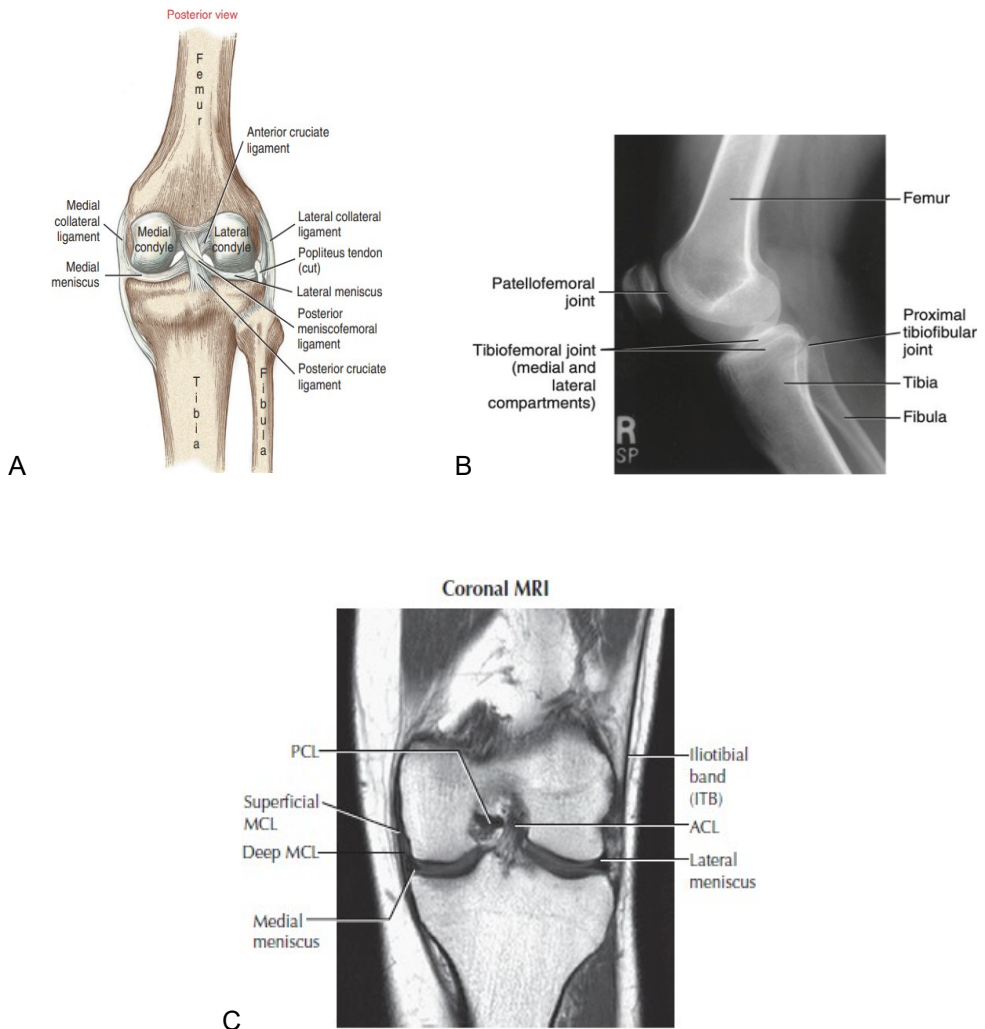
Gambar 5. Ligamen-ligamen pada articulatio genu dextra (Lippert, 2011).

Ligamentum Cruciatum Posterior (*Posterior Cruciate Ligament*; PCL) melekat pada area intercondylaris posterior tibiae ke anterolateral condylus medialis os femoralis, dengan fungsi berlawanan dengan ACL. Singkatnya, ligamentum cruciatum anterior membentang dari tibia anterior ke femur posterior, dan ligamentum cruciatum posterior membentang dari tibia posterior ke femur anterior. Kedua ligamen ini berfungsi menjaga stabilitas articulatio genus pada bidang sagittal (Cantrell et al., 2025; Gemayel & Varacallo, 2025; Gupton et al., 2025).



Gambar 6. Ligamentum cruciatum anterior dan posterior genu dextra. (A) Tampak lateral. (B) Tampak anterior (Neumann, 2017)

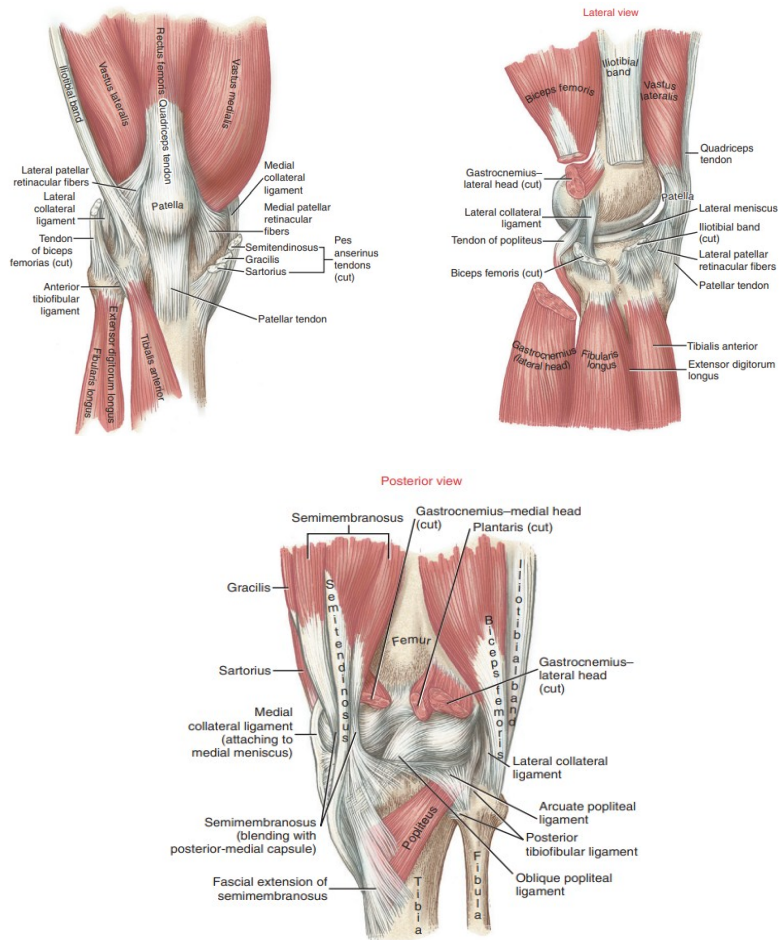
Kelompok ligamentum collaterale terletak pada sisi lateral dan medial articulatio genu (lihat gambar 5). Kelompok ligamentum ini menjaga stabilitas articulatio genus pada bidang frontal. Ligamentum collaterale tibiale (*Medial Collateral Ligament*; MCL) merupakan ligamen pipih dan lebar, melekat pada condylus medialis os femoris dan tibia, berfungsi mencegah gerakan berlebih dari articulatio genus saat terdapat gaya dari sisi lateral. Ligamentum collaterale Fibulare (*Lateral Collateral Ligament*; LCL), melekat pada condylus lateralis os femoris dan fibula, untuk menjaga stabilitas articulatio genus dengan bekerja berlawanan dari MCL (Gupton et al., 2025; Lippert, 2011).



Gambar 7. Ligamen pada genu (A) tampak posterior, (B) Foto X-Rays, (C)MRI coronal (Neumann, 2017; Thompson, 2010)

Ligamen ekstraartikular lain yang terdapat pada articulatio genus (Gupton et al., 2025), yaitu:

1. Ligamentum popliteum arcuatum merupakan terusan dari tendo musculus semimembranosus, berfungsi untuk memperkuat capsula posterolateral.
2. Ligamentum popliteum obliquum, berasal dari tepi posterior caput fibulae dan memanjang ke arah superior medial di atas tendo musculus popliteus. Ligamentum ini menempati aspek posterior articulatio genus.
3. Ligamentum patella, menjaga stabilisasi Patella terhadap Tibia.



Gambar 8. (A) Tampak anterior genu dextra, yang menonjolkan banyak otot dan jaringan ikat. Tendon pes anserinus dipotong untuk memperlihatkan ligamen kolateral medial dan retinakulum patela medial, (B) Tampak lateral genu dextra memperlihatkan banyak otot dan jaringan ikat. Iliotibial band, lateral gastrocnemius, dan bisep femoris dipotong untuk memperlihatkan ligamen collateral lateral, ligamen popliteofibular, tendon popliteus, dan meniskus lateral dengan lebih baik. (C) tampak posterior genu dextra yang menekankan bagian utama kapsul posterior: ligamen poplitea obliq dan ligamen poplitea arkuata. Kepala lateral dan medial otot gastrocnemius dan plantaris dipotong untuk memperlihatkan kapsul posterior. Perhatikan otot popliteus yang dalam di fossa poplitea, yang sebagian tertutup oleh perluasan fascia semimembranosus.

2.1.2 Kinesiologi Articulatio Genu

Kinesiologi pada articulatio genu melibatkan beberapa persendian, meliputi articulatio tibiofemoralis dan articulatio patellofemoralis. Namun,

pada kejadian cedera ACL, articulation yang berperan adalah articulation tibiofemoralis.

Articulatio tibiofemoralis

Articulatio tibiofemoral memiliki dua derajat gerakan: Fleksi dan ekstensi pada bidang sagittal dan, jika genu sedikit tertekuk, rotasi internal dan eksternal. Gerakan bidang frontal pada genu hanya terjadi secara pasif, terbatas pada sekitar 6 hingga 7 derajat.

1. Fleksi dan Ekstensi

Gerakan utama pada articulatio genus adalah fleksi dan ekstensi. Gerakan fleksi dan ekstensi terjadi pada bidang sagittal dengan aksis frontalis (Lippert, 2011). Hanya sedikit gerakan rotasi yang dapat terjadi saat articulatio genus dalam keadaan fleksi atau saat kaki pada posisi tidak menahan beban tubuh. Fleksi dan ekstensi pada genu terjadi pada aksis rotasi medial-lateral untuk tibial-pada-femoral dan femoral-pada-tibial (gambar 9). Rentang gerak bervariasi menurut usia dan jenis kelamin, tetapi secara umum lutut yang sehat bergerak dari 130 hingga 150 derajat fleksi hingga sekitar 5 hingga 10 derajat melampaui posisi 0 derajat (lurus). Aksis rotasi medial-lateral untuk fleksi dan ekstensi tidak tetap, tetapi bermigrasi dalam condylus femoralis. Lintasan sumbu yang melengkung dikenal sebagai "evolute" (gambar 10). Lintasan sumbu rotasi dipengaruhi oleh kelengkungan condylus femoralis yang eksentrik (tidak bulat) (Neumann, 2017).

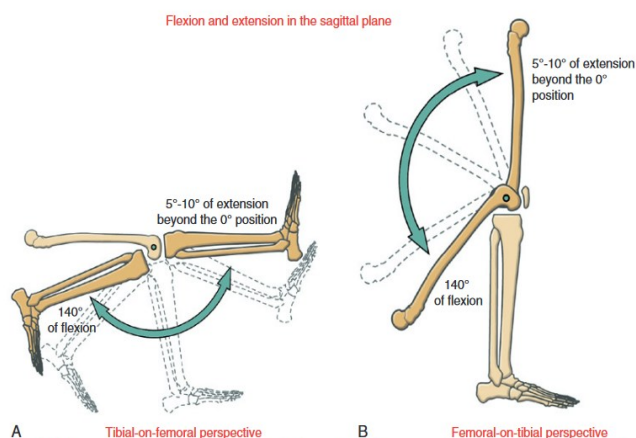
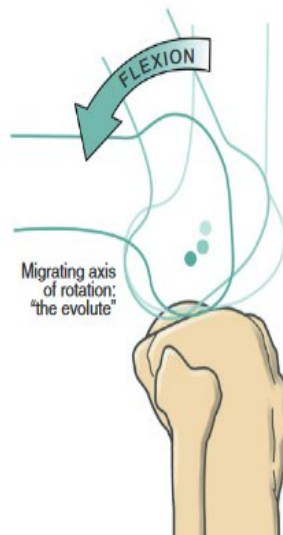


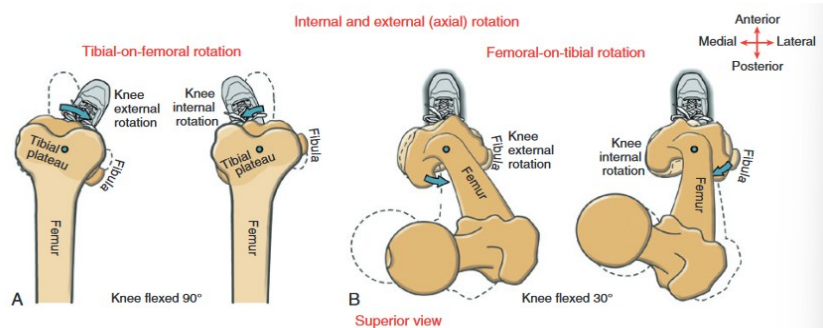
FIG. 13.13 Sagittal plane motion at the knee. (A) Tibial-on-femoral perspective (femur is stationary). (B) Femoral-on-tibial perspective (tibia is stationary). In each case, the axis of rotation is shown as a small circle through the femoral condyle.

Gambar 9. Gerakan bidang sagittal pada lutut. (A) Perspektif tibial-pada-femoral (femur diam). (B) Perspektif femoral-tibial (tibia diam). Dalam setiap kasus, sumbu rotasi ditunjukkan sebagai lingkaran kecil melalui condylus femoralis.



Gambar 10. Lutut yang ditekuk menghasilkan sumbu rotasi medial-lateral yang bermigrasi (ditunjukkan sebagai tiga lingkaran kecil). Migrasi ini digambarkan sebagai "the evolute".

Adanya perbedaan ukuran dan posisi yang tidak paralel antara kedua condylus femoris menyebabkan gerakan rotasi sedikit terjadi pada fase inisiasi fleksi dan fase akhir ekstensi. Gerakan ini dapat diamati saat articulatatio genu dalam keadaan setengah fleksi kemudian diekstensikan dan Patella bergerak ke medial. Kemudian terjadi rotasi internal os femoris terhadap tibia, disebut "screw home mechanism" (gambar 11) articulatatio genus. Adanya mekanisme ini, articulatatio genus menjadi sendi yang stabil secara mekanis. Sebaliknya, saat kaki dalam keadaan tidak menyangga beban tubuh, gerakan yang terjadi adalah rotasi eksternal tibia terhadap os femoris. Rotasi internal dan eksternal yang terjadi pada mekanisme ini berkisar 10° (Lippert, 2011; Moore et al., 2013).



Gambar 11. Rotasi internal dan eksternal (aksial) lutut kanan. Sumbu rotasi ditunjukkan sebagai lingkaran kecil di dekat bagian tengah sendi. (A) Rotasi tibia-pada-femoral (lutut). Dalam kasus ini arah rotasi lutut (internal atau eksternal) sama dengan gerakan tibia; femur diam. (B) Rotasi femoral-pada-tibia. Dalam kasus ini tibia diam dan femur berputar (di atas lutut yang sebagian tertekuk). Arah rotasi lutut (eksternal atau internal) adalah kebalikan dari gerakan femur yang bergerak: rotasi eksternal lutut terjadi oleh rotasi internal femur; rotasi internal lutut terjadi oleh rotasi eksternal femur (Neumann, 2017)

2. Rotasi internal dan eksternal

Kinematika rotasi eksternal dan internal pada articulatio tibiofemoral terjadi sebagai rotasi pada bidang yang terletak perpendikular terhadap sumbu longitudinal yang sejajar dengan tibia. Lokasi tepat sumbu rotasi saat sejajar dengan tibia tidak jelas, meskipun tampaknya dipengaruhi oleh rotasi bidang sagital genu yang menyertainya. Istilah "rotasi aksial" sering digunakan untuk menggambarkan osteokinematika yang diilustrasikan pada gambar 11. Sedikit, jika ada, rotasi aksial yang signifikan benar-benar terjadi antara tibia dan femur dengan lutut terentang penuh. Rotasi ditahan oleh ketegangan pasif pada ligamen dan jaringan kapsul yang kencang, dan oleh peningkatan kongruensi tulang di dalam sendi. Namun, kebebasan rotasi aksial meningkat secara signifikan, saat lutut secara progresif ditekuk. Lutut yang ditekuk hingga 90 derajat, misalnya, dapat melakukan sekitar 40 hingga 45 derajat rotasi aksial total. Rentang gerak rotasi eksternal umumnya melebihi rotasi internal dengan rasio hampir 2 : 1 (Neumann, 2017).

Seperti yang digambarkan pada gambar 11, rotasi aksial lutut terjadi baik melalui rotasi tibial-pada-femoral atau femoral-pada-tibial. Rotasi aksial lutut memberikan elemen fungsional penting berupa mobilitas pada ekstremitas bawah secara keseluruhan. Sebagai aturan, penamaan rotasi aksial lutut didasarkan pada posisi tuberositas tibialis relatif terhadap femur distal anterior. Rotasi eksternal lutut, misalnya, terjadi ketika tuberositas tibialis terletak lateral terhadap femur anterior distal. Namun, aturan ini tidak menetapkan apakah femur atau tibia adalah tulang yang bergerak; aturan ini hanya menetapkan orientasi artikular relatif dari lutut yang diputar. Untuk menunjukkannya, bandingkan rotasi eksternal lutut di bagian A dan B pada gambar 11. Rotasi eksternal tibia-femoral pada lutut terjadi saat tibia berputar ke arah luar relatif terhadap femur yang statis. Di sisi lain, rotasi eksternal femoral-tibia pada lutut terjadi saat femur berputar ke arah dalam relatif terhadap tibia (dan kaki) yang statis (Neumann, 2017).

2.2. Cedera ACL

Meskipun cedera ACL dapat didiagnosis secara klinis, pencitraan dengan *magnetic resonance imaging* (MRI) sering digunakan untuk memastikan diagnosis. MRI merupakan modalitas utama untuk mendiagnosis patologi ACL, dengan sensitivitas 86% dan spesifisitas 95%. MRI tampakan sagital: akan menunjukkan perubahan yang berhubungan langsung dengan cedera ligamen, sedangkan tanda sekunder adalah perubahan yang berhubungan erat dengan cedera ACL. Tanda primer meliputi edema, peningkatan sinyal ligamen anterior cruciatum pada gambar T2 weighted atau proton density, diskontinuitas atau tidak adanya serat sama sekali, dan perubahan pada jalur ACL yang diharapkan; serat terlalu datar dibandingkan dengan intercondylaris *roof* atau garis Blumensaat. Penampakan serat ACL yang datar lebih umum terjadi pada kasus kronis di mana ACL meninggalkan bekas luka di PCL. Robekan biasanya terjadi di bagian tengah ligamen, dan perubahan sinyal paling sering terlihat di sini dan tampak hiperintens (Evans et al., 2025).

Diagnosis juga dapat dilakukan dengan artroskopi lutut untuk membedakan robekan total dari robekan parsial dan robekan kronis. Artrografi dianggap sebagai *gold standart* karena sensitifitasnya 92% hingga 100% dan spesifiknya 95% hingga 100%; namun, jarang digunakan sebagai langkah awal diagnosis karena bersifat invasif dan memerlukan anestesi (Evans et al., 2025).

Foto polos (tampak AP, lateral, *skyline/merchant*, atau *sunrise*) secara umum tidak membantu dalam mendiagnosis cedera ACL tetapi membantu menyingkirkan kemungkinan fraktur atau cedera tulang terkait lainnya atau dapat menunjukkan bukti efusi. Selain itu dapat juga ditemukan fraktur segond (avulsi dari os tibia proximal lateral) yang patognomonis untuk robekan ACL. Selain itu juga dapat ditemukan *deep sulcus (terminalis) sign*, yaitu depresi pada condyles femoralis lateral, hubungan antara permukaan articular tibialis yang menahan beban dan permukaan articular patela dari condylus femoralis (Evans et al., 2025).

Computed tomography (CT) umumnya tidak digunakan dalam mengevaluasi ACL dan hanya akurat dalam mendeteksi ACL yang intak. Namun, CT berperan dalam mengevaluasi tulang yang tersedia saat merencanakan revisi ACL. CT merupakan tes yang paling sensitif dan spesifik untuk menilai *bone loss* dalam kasus *tunnel widening* dan osteolysis (Evans et al., 2025).

Derajat robekan ACL diklasifikasikan menjadi derajat I, II, dan III dengan melihat pencitraan MRI multiplanar pada urutan T2w. Penilaian MRI pada derajat I robekan ACL menunjukkan penebalan ACL dan tidak ada ruptur ligamen; derajat II robekan ACL menunjukkan diskontinuitas parsial ligamen ACL, dengan ruptur anteromedial bundle (AMB) dan/atau posterolateral bundle (PLB); dan derajat III robekan ACL menunjukkan

diskontinuitas lengkap dengan kelainan pada intensitas sinyal fokal atau difus (Loupatty et al., 2023).

Selain penilaian derajat robekan ACL, lokasi cedera ACL juga dinilai berdasarkan klasifikasi Van der List et al. Dalam sistem klasifikasi ini, lima lokasi ruptur ditentukan: tipe I (ruptur avulsi proksimal, terletak >90% dari panjang distal-proksimal); tipe II (ruptur proksimal, terletak 75–90% dari panjang distal-proksimal); tipe III (ruptur mid-substansi, terletak 25–75% dari panjang distal-proksimal); tipe IV (ruptur distal, terletak 10–25% dari panjang distal-proksimal); dan tipe V (ruptur avulsi distal, terletak <10% dari panjang distal-proksimal). Untuk tipe I dan V, ruptur diklasifikasikan sebagai ruptur avulsi jaringan lunak atau tulang difus (Loupatty et al., 2023).

2.3 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Kejadian Cedera ACL

Faktor risiko cedera ACL dapat dibagi menjadi dua kategori utama yaitu intrinsik dan ekstrinsik. Faktor intrinsik meliputi faktor yang merupakan bawaan individu dan biasanya tidak dapat dimodifikasi. Faktor ini meliputi faktor anatomi (parameter *notch*, kemiringan tibialis posterior (*posterior tibial slope*), aligment ekstremitas bawah, dll.), faktor neuromuskular, faktor genetik, dan hormonal. Faktor ekstrinsik adalah faktor yang ada di sekitar atlet dan dapat meliputi tingkat dan intensitas permainan atau aktivitas, permukaan permainan dan kondisi lingkungan, serta peralatan yang digunakan (Jagadeesh et al., 2021).

2.3.1 Karakteristik Individu

Atlet wanita memiliki kemungkinan dua hingga delapan kali lebih besar untuk mengalami cedera ACL dibandingkan atlet pria. Faktor risiko penyebab peningkatan cedera ACL di kalangan wanita dapat dijelaskan sebagai faktor ekstrinsik (yang dapat dimodifikasi) dan faktor intrinsik (yang tidak dapat dimodifikasi). Faktor ekstrinsik meliputi kekuatan, pengondisian (misalnya, kelincahan, propriosepsi), jenis sepatu, dan permukaan tempat bermain. Ciri-ciri unik yang ada pada wanita, seperti sudut quadriceps yang lebih besar, ukuran ACL yang lebih kecil, takik femoralis berbentuk A, peningkatan kemiringan tibialis posterior, dan konsentrasi estrogen yang lebih tinggi adalah beberapa faktor intrinsik yang tidak dapat dimodifikasi yang dapat berkontribusi terhadap peningkatan frekuensi cedera ACL pada wanita (Piotrowski, 2014).

Terjadinya cedera ACL telah ditemukan memiliki hubungan dengan fase siklus menstruasi. Alasan untuk ini mungkin karena adanya reseptor progesteron dan estrogen pada ACL. Namun, semua penelitian tentang ini telah dilakukan secara *in vitro* atau pada model hewan dan keberadaan reseptor ini pada ACL manusia belum terbukti. Hipotesisnya adalah bahwa estrogen memiliki efek pada sintesis dan pemecahan komponen matriks ACL. Tingkat terjadinya cedera ACL lebih banyak selama fase ovulasi dari

siklus menstruasi, yang ditandai dengan konsentrasi estrogen serum yang tinggi. Yang membingungkan tentang cedera ini pada wanita adalah bahwa ditemukan pada cedera non-kontak karena deselerasi atau perubahan arah manuver daripada cedera benturan langsung. Estrogen menurunkan laju proliferasi fibroblas dan sintesis prokolagen tipe I sementara progesteron mendorong hal yang sama. Oleh karena itu, variasi konsentrasi estrogen dan progesteron dalam berbagai fase menstruasi memengaruhi sifat materi ACL. Dengan demikian, cedera ACL pada wanita lebih umum terjadi selama fase pra-ovulasi menstruasi, ketika kadar estrogen serum tinggi (Jagadeesh et al., 2021).

ACL rentan mengalami degenerasi berdasarkan peningkatan usia. Hasegawa et al melaporkan pola perubahan spontan terkait usia di ACL dalam studi histologis kadaver; skor substansi ACL dan skor peradangan selubung ligamen meningkat seiring bertambahnya usia (Hasegawa et al., 2012). Disorientasi serat kolagen merupakan perubahan yang paling umum terjadi paling awal. Sendi lutut manusia yang telah meninggal dievaluasi secara histologis dengan penekanan khusus pada ACL, PCL, dan tulang rawan. Perubahan histologis yang paling signifikan adalah disorientasi serat, dengan hanya 6% ligamen intraartikular yang diklasifikasikan sebagai normal dan 76% menunjukkan degenerasi ringan. Ada korelasi antara usia dan skor PCL histologis total dan korelasi yang lebih kuat antara usia dan skor ACL histologis total. Metabolisme sel ACL telah dipelajari sebelumnya; proliferasi dan migrasi sel lebih tinggi pada hewan dengan skeletal imatur dan respons biomekanik yang lebih baik terhadap penyembuhan ditemukan pada hewan dengan skeletal imatur, kemungkinan karena penurunan jumlah reseptor faktor pertumbuhan seiring bertambahnya usia. Selain itu, dengan maturitas ACL, penurunan aktivitas metabolisme, produksi kolagen, dan respons terhadap *platelet-rich-plasma* terjadi bersamaan dengan peningkatan apoptosis (McCarthy & Hannafin, 2014).

Penelitian sebelumnya mempelajari perubahan yang bergantung pada usia dalam matriks dan organisasi ligamen ke insersi tulang dan menemukan bahwa ada perubahan struktural dan komposisi yang bergantung pada usia di lokasi insersi, dengan kelompok yang skeletal imatur menyerupai tulang rawan artikular sementara pada orang dewasa menyerupai jaringan fibrokartilaginosa. Ada perbedaan yang nyata dalam orientasi serat kolagen yang menjadi lebih jelas seiring bertambahnya usia. Komposisi matriks ekstraseluler dan seluleritas juga ditemukan bergantung pada usia. Penuaan normal menyebabkan penurunan jumlah dan perubahan morfologi mekanoreseptor di ACL, yang berkorelasi positif dengan defisit propriosepsi yang terkait dengan penuaan (McCarthy & Hannafin, 2014).

Biomekanika ligamen juga bergantung pada usia. Murray et al mengevaluasi hasil biomekanika penyembuhan ACL pada babi mini

dewasa dan babi muda yang kerangkanya belum matang dan menemukan bahwa hewan yang belum matang menyembuhkan ligamen lebih baik daripada hewan dewasa. Selain itu, mereka menemukan bahwa sifat struktural ligamen yang kerangkanya belum matang secara signifikan lebih baik daripada hewan dewasa (Murray et al., 2010). Woo et al mengevaluasi sifat struktural kompleks femur-ACL-tibia pada lutut yang lebih muda (22-35 tahun), setengah baya (40-50 tahun), dan lebih tua (60-97 tahun) dan menemukan bahwa kekakuan linier, beban akhir, dan energi yang diserap menurun secara signifikan seiring bertambahnya usia spesimen (McCarthy & Hannafin, 2014; Woo et al., 1991).

Untuk menilai hubungan genetic dan kejadian cedera ACL, sebuah menggunakan desain *case-control* dan menggunakan kuesioner riwayat medis untuk menentukan cedera ligamen lutut pada anggota keluarga utama pasien. Ada tingkat kejadian cedera ACL yang lebih tinggi pada keluarga dekat dari kelompok yang cedera (35%) dibandingkan dengan kelompok kontrol (4%). Dalam studi *case-control* yang cocok oleh Flynn et al, pasien dengan robekan ACL dua kali lebih mungkin memiliki kerabat (derajat pertama, kedua, atau ketiga) dengan robekan ACL dibandingkan dengan kontrol tanpa robekan ACL (Smith et al., 2012b).

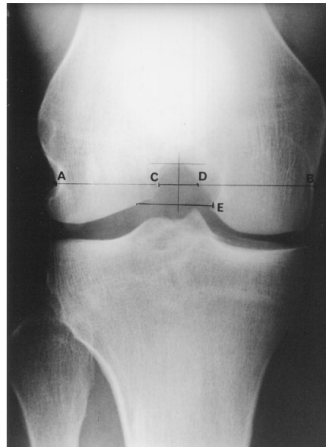
BMI sebagai faktor risiko cedera ACL juga kontroversial. Secara teori, BMI akan memberikan beban aksial yang besar pada sendi tibiofemoral yang meningkatkan ketegangan ACL dalam ekstensi relatif. Ada beberapa penelitian yang saling bertentangan dengan beberapa menunjukkan peningkatan signifikan dalam BMI yang terkait dengan robekan ACL melalui perbandingan retrospektif sementara yang lain tidak menunjukkan signifikansi (Wetters et al., 2016). Sebuah penelitian baru-baru ini oleh Alsayed et al. melaporkan bahwa individu dengan BMI ≥ 25 kg/m² secara signifikan lebih mungkin mengalami cedera ACL terkait olahraga dan lebih mungkin mengalami robekan ACL gabungan dibandingkan individu dengan BMI lebih rendah (Fang & Liu, 2024).

2.3.2 Morfometri Articulatio Genu

Variasi dalam fitur anatomi ini didokumentasikan dengan baik pada individu terutama antara pria dan wanita yang dapat menjelaskan mengapa wanita mungkin lebih berisiko cedera ACL daripada pria. Berbagai faktor anatomi yang umum dipelajari termasuk yang terkait dengan geometri lutut, aligmen ekstremitas bawah, *laxity* lutut, dan indeks massa tubuh. Faktor-faktor yang terkait dengan geometri lutut dapat dibagi menjadi a) parameter tibialis seperti *posterior tibial slope*, kedalaman plateau tibia medial b) parameter femoralis/takik (*notch*) seperti lebar takik, lebar bicondylar, indeks lebar takik (Jagadeesh et al., 2021).

Notch Width menjadi salah satu faktor risiko yang banyak diteliti terkait dengan cedera ACL tetapi ada perbedaan besar dalam cara parameter ini diukur. Perlekatan femoralis ACL berada pada aspek medial

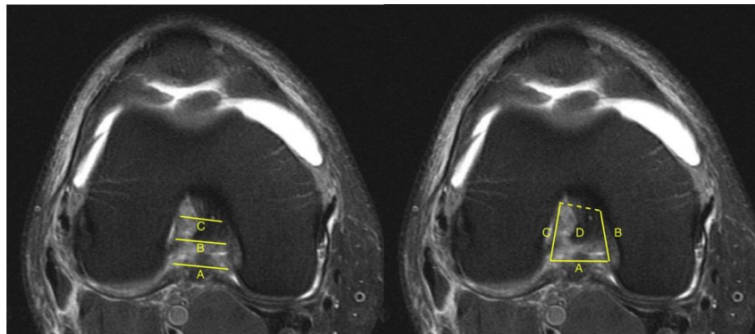
kondilus femoralis lateral di atas punggungan interkondilaris lateral. Diamati bahwa jepitan (*impingement*) ACL pada berbagai posisi lutut terdokumentasi dengan baik terutama pada mereka yang memiliki lebar notch sempit. Tetapi ada kontroversi apakah itu karena geometri dan ukuran notch itu sendiri, atau karena volume ACL atau penggabungan karakteristik ini. Terbukti bahwa wanita diketahui memiliki notch yang lebih kecil jika dibandingkan dengan pria dan orang dengan notch yang lebih kecil cenderung memiliki ACL yang lebih tipis dan lebih lemah dibandingkan dengan mereka yang memiliki notch yang lebih lebar. Stenotik *notch* menyebabkan jepitan ACL pada kondilus femoralis lateral dan jika lutut mengalami gaya geser anterior atau gaya rotasi tibialis menyebabkan ruptur ligamen ACL. Penelitian yang dilakukan oleh Shelborne et al dari pasien ACL dengan pemeriksaan radiografi didapatkan rata-rata ukuran *notch width* pada wanita $13,9 \pm 2,2\text{mm}$ (rentang 2 – 22mm) sedangkan pada pria $15,9 \pm 2,5\text{mm}$ (rentang 8 – 23 mm). Rata-rata ukuran *width femoral bycondilar* pada wanita $80,9 \pm 4,5\text{mm}$ dan $92,7 \pm 5,1$ pada pria. Pada penelitian Vaswani et al, dengan pemeriksaan MRI didapatkan rata-rata *notch width* $16,5 \text{ mm} \pm 2,7\text{mm}$, sedangkan dengan menggunakan pemeriksaan radiografi didapatkan *notch width* $19\text{mm} \pm 3,4\text{mm}$ (Jagadeesh et al., 2021; Shelbourne et al., 1998; Vaswani et al., 2020).



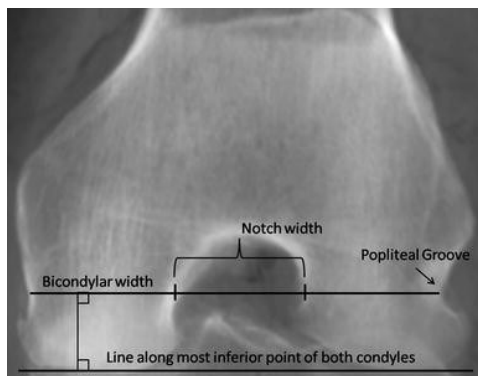
Gambar 12. Pengukuran notch width. Sebuah garis ditarik melintasi titik "E," yang sesuai dengan tepi meniscus medial pada condylus femoralis medial. Garis lain ditarik pada tingkat apex intercondylar notch. Notch width (jarak dari titik "C" ke titik "D") diukur pada setengah dari tinggi notch. Lebar condylus femoralis juga diukur pada setengah dari tinggi notch (jarak dari titik "A" ke titik "B") (Shelbourne et al., 1998)

LaPrade et al menunjukkan bahwa ada peningkatan risiko cedera ACL pada orang dengan *notch* intercondylaris yang sempit (LaPrade and Burnett, 1994). Souryal et al dalam penelitian mereka tentang cedera ACL

bilateral menemukan *notch width* yang sempit memiliki hubungan, tetapi mereka hanya menggunakan radiografi polos untuk menghitung *notch width*. Kelemahan utama dari penelitian ini adalah bahwa penelitian tersebut dilakukan pada radiografi polos di mana kesalahan karena pembesaran sering terjadi. Dengan demikian, *notch width index* (indeks lebar takik) digunakan untuk mengatasi masalah ini. *Notch width index* (NWI) dapat diukur menggunakan *tunnel* radiografi atau MRI penampang koronal. NWI diidentifikasi sebagai rasio *notch width* intercondylaris dengan lebar femur distal pada *popliteal groove* (Jagadeesh et al., 2021).



Gambar 13. MRI pengukuran notch pada aksial T2 lutut kiri yang dipilih. Kiri: (A) lebar notch di dasar, (B) tinggi tengah, (C) apex. Kanan: (A) lebar notch di dasar, (B) tinggi dinding medial dan (C) lateral, dan (D) luas (Vaswani et al., 2020)



Gambar 14. Metode untuk mengukur NWI dengan radiografi. Sebuah garis ditarik antara titik paling bawah dari kedua condylus. Lebar bicondylus diukur sepanjang garis ini, pada *popliteal groove*. Terakhir, NW diukur pada level yang sama (Van Eck et al., 2010)

Souryal et al. menggunakan tampilan *tunnel* radiografi dan membandingkan pasien dengan cedera ACL unilateral dan bilateral dan menemukan bahwa pasien dengan ruptur ACL bilateral memiliki *notch width* dan NWI yang secara signifikan lebih kecil jika dibandingkan dengan

mereka yang mengalami ruptur ACL unilateral. Selain itu, mereka tidak menemukan perbedaan dalam NWI dari ruptur ACL unilateral jika dibandingkan dengan mereka yang memiliki lutut normal. Lebih jauh, mereka melakukan studi kohort dan melaporkan bahwa atlet pria memiliki NWI yang lebih tinggi dibandingkan dengan atlet wanita yang menderita cedera ACL jika dibandingkan dengan mereka yang tidak cedera (Souryal & Freeman, 1993). Ashwini et al., dalam studi perbandingan berbasis MRI mereka, menunjukkan bahwa orang dengan cedera ACL memiliki NWI $0,29 \pm 0,02$ atau lebih rendah dibandingkan dengan mereka yang tidak mengalami cedera ACL (Ashwini T et al., 2018). Sedangkan Bhasukala et al., mendalilkan batas NWI menjadi $0,28 \pm 0,06.21$ (Basukala et al., 2020). Namun, Gormeli CA et al. dalam penelitiannya pada lutut bilateral dengan cedera ACL menunjukkan nilai batas NWI sebesar $0,22 \pm 0,008$ pada lutut yang cedera bilateral dan $0,24 \pm 0,01$ pada lutut yang cedera unilateral (Görmeli et al., 2015). Jadi batasnya bervariasi tergantung pada etnis dan nilai batas yang tepat masih kontroversial tetapi sebagian besar penulis telah menyimpulkan nilai kritis NWI berkisar antara 0,19 hingga 0,26 (Jagadeesh et al., 2021).

Posterior tibial slope/kemiringan tibialis posterior, beberapa penelitian terkait telah membuktikan kemiringan tibialis posterior dapat menjadi faktor utama yang berkontribusi terhadap stabilitas sendi lutut. Penelitian kadaverik telah menunjukkan bahwa peningkatan kemiringan tibialis posterior telah mengakibatkan peningkatan translasi anterior tibia di atas femur, sehingga meningkatkan tekanan pada ligamen ACL terutama selama gaya berjalan aktif. Kemiringan tibialis posterior secara tradisional diukur pada radiografi lutut lateral, sumbu tibialis harus digambar dengan menghubungkan titik tengah garis yang menghubungkan korteks anterior dan posterior dengan jarak 4-5 cm sejauh mungkin ke kaudal dari garis sendi. Sudut antara garis singgung yang menghubungkan korteks anterior dan posterior pada sendi dan garis tegak lurus terhadap sumbu tibialis sesuai dengan kemiringan tibialis posterior pada radiografi lutut lateral. Namun sekali lagi kontroversi mengenai kesalahan karena pembesaran atau keterbatasan radiografi lateral dan ketidakmampuan untuk mengukur kemiringan tibialis posterior lateral/*lateral posterior tibialis slope* (LPTS) dan kemiringan tibialis posterior medial/*medial posterior tibialis slope* (MPTS) telah mengakibatkan perhitungan parameter ini dalam MRI (Jagadeesh et al., 2021).

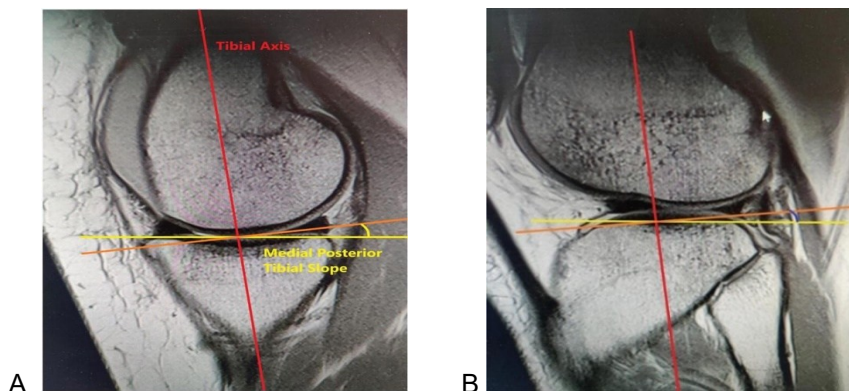
Untuk mengukur MTPS dan LTPS pada MRI, pertama-tama tentukan axis tibialis. Untuk ini, irisan sagital di bagian tengah lutut yang berisi eminentia interkondilaris dan perlekatan PCL dipilih. Dua garis yang menghubungkan korteks anterior dan posterior digambar dengan jarak sekitar 4-5 cm se-kaudal mungkin dari garis sendi, garis yang

menghubungkan titik tengah dari dua garis di atas sesuai dengan sumbu tibialis (Gambar 15) (Jagadeesh et al., 2021).



Gambar 15. MRI yang menggambarkan perhitungan axis Tibialis.

Kemudian irisan sagital dari bagian tengah dari plateau tibialis lateral diidentifikasi, garis singgung yang menghubungkan korteks anterosuperior ke korteks posteroinferior digambar. Sudut antara garis singgung di atas dan garis tegak lurus terhadap sumbu tibialis sesuai dengan MTPS. Teknik serupa akan digunakan untuk mengukur LTPS dengan menggambar garis singgung di bagian tengah plateau tibialis lateral (Gambar 16) (Jagadeesh et al., 2021).



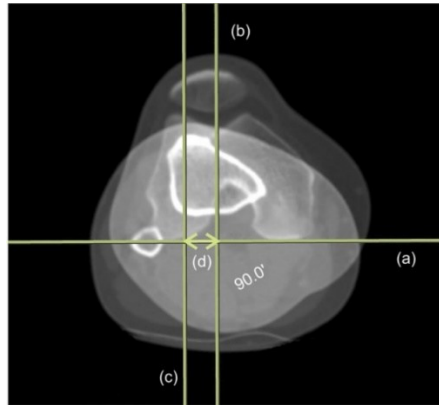
Gambar 16. Gambar MRI yang menggambarkan perhitungan (A) MTPS, (B) LTPS (Jagadeesh et al., 2021)

Pada penelitian Fares et al, rata-rata kemiringan tibialis posterior adalah sekitar 7 derajat. Persentase pasien dengan $PTS \geq 10^\circ$ yang

berlebihan lebih tinggi pada kelompok ACL dibandingkan dengan kelompok kontrol sehingga disimpulkan bahwa pasien dengan $PTS \geq 10^\circ$ yang meningkat tajam dikaitkan dengan risiko cedera ACL berikutnya 5,7 kali lebih tinggi. Hal ini disebabkan oleh peningkatan translasi tibialis anterior yang memberikan tekanan lebih tinggi pada ACL. Banyak publikasi menemukan bahwa $PTS > 12^\circ$ dikaitkan dengan risiko revisi yang lebih tinggi. Hal ini digambarkan sebagai "*12 degrees rules*," yang berdampak negatif pada kelangsungan rekonstruksi ACL (Fares et al., 2023).

Pandangan rinci MRI telah menemukan LPTS lebih terlibat dengan cedera ACL daripada MPTS tetapi meta-analisis telah menunjukkan bahwa cedera ACL dikaitkan dengan PTS medial dan lateral (Jagadeesh et al., 2021). Hashemi et al., dalam penelitian mereka terhadap 104 pasien, baik MPTS dan LPTS meningkat, pada kelompok yang cedera. Meskipun perempuan memiliki LPTS lebih tinggi daripada laki-laki, mereka menyimpulkan bahwa peningkatan LPTS adalah salah satu faktor risiko utama terlepas dari jenis kelamin. Sedangkan MPTS meningkat secara signifikan hanya pada pria (Hashemi et al., 2008). Stijak et al., dalam penelitian mereka menggunakan radiografi lutut dan MRI, untuk menentukan korelasi antara PTS dan plateau tibial lateral dan menyimpulkan bahwa peningkatan LPTS terlihat di antara kelompok cedera ACL dibandingkan dengan kelompok ACL utuh tetapi mereka menemukan peningkatan MPTS pada kelompok yang tidak cedera jika dibandingkan dengan kelompok yang cedera. Peneliti menyampaikan bahwa peningkatan LPTS akan memengaruhi rotasi sendi lutut yang menyebabkan lutut berputar (Stijak et al., 2008). Dalam penelitian Jagadeesh et al., MPTS dan LPTS memiliki korelasi positif dengan cedera ACL, keduanya meningkat secara signifikan pada kelompok robekan ACL jika dibandingkan dengan kelompok yang tidak cedera tanpa memandang jenis kelamin. Perempuan memiliki MPTS dan LPTS yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan laki-laki di kedua kelompok, tetapi perbedaannya signifikan secara statistik pada kedua jenis kelamin (Jagadeesh et al., 2021).

Tibial tubercle-trochlear groove (TT-TG) distance, adalah jarak lateral antara titik terdalam *trochlear groove* dan titik tengah insersi tendon patela pada tuberositas tibialis. Selama aktivitas olahraga, lateralisasi tuberculum tibialis, yang ditunjukkan oleh jarak TT-TG, meningkatkan pergeseran rotasional tibia yang ditimbulkan oleh kontraksi otot quadriceps saat tungkai diposisikan secara provokatif. Perubahan kinematik tibiofemoral ini dapat meningkatkan ketegangan ACL, sehingga membuatnya lebih rentan terhadap cedera (Loupatty et al., 2023).



Gambar 17. Pengukuran jarak TT-TG, Garis singgung ke epicondylus posterior (a) dan garis tegak lurus melalui titik terdalam trochlea (b) ditarik. Garis lain yang sejajar dengan garis trochlea melalui bagian paling anterior tuberositas tibia (c) ditarik. Jarak tuberositas tibia-alur troklearis (d) diukur antara garis (b) dan (c) (Song et al., 2016)

Jarak TT-TG dinilai menurut metode Schoettle, gambaran craniocaudal transversal pertama yang menggambarkan trochlea cartilaginosa lengkap digunakan untuk menentukan titik terdalam dalam *trochlear groove*. Sebuah garis ditarik melalui titik terdalam *trochlear groove*, tegak lurus terhadap tangen kondilus posterior. Garis kedua ditarik sejajar dengan garis trochlear melalui bagian paling anterior tuberculum tibialis. Jarak antara 2 garis tersebut mewakili jarak TT-TG. Jarak TT-TG > 20 mm dilaporkan berhubungan dengan ketidakstabilan patella yang patologis (Song et al., 2016).

Penelitian Song et al, mendapatkan rata-rata jarak TT-TG yaitu $10,19 \pm 0,8$ mm, dengan rata-rata pada wanita $10,36 \pm 0,5$ dan pada pria $10,19 \pm 0,5$ mm (Song et al., 2016). Pada penelitian Dejour et al, jarak TT-TG rata-rata untuk kelompok kontrol adalah $12,7 \pm 3,4$ mm dan jarak TT-TG rata-rata untuk kelompok ketidakstabilan patela adalah $19,8 \pm 1,6$ mm (Dejour et al., 1994). Kisaran normal nilai jarak TT-TG bervariasi di antara berbagai penelitian, dari $9,4 \pm 0,6$ mm hingga $13,6 \pm 8,8$ mm; dan sebagian besar penelitian ini dilakukan pada orang Eropa atau Amerika Utara. Kesimpulannya adalah bahwa pasien dengan ketidakstabilan patela memiliki jarak TT-TG yang lebih tinggi (Song et al., 2016).

2.3.3 Kekuatan dan Fleksibilitas Otot

Ada beberapa faktor neuromuskular yang dilaporkan meningkatkan risiko cedera ACL pada atlet: kelelahan otot, penurunan kekuatan inti, penurunan propriosepsi inti dan lutut, penurunan kekuatan dan perekrutan hamstring relatif (terhadap quadriceps), perubahan kontraksi otot hamstring quadriceps, aktivitas gluteus maximus yang lebih rendah selama drop

landing, aktivasi quadriceps-ke-hamstring yang lebih besar selama stop jump, cutting, dan jump landing, dan rasio aktivasi medial-ke-lateral yang lebih kecil untuk quadriceps dan hamstring dalam pendaratan satu kaki dan melompat (Alentorn-Geli et al., 2015).

Kekuatan otot dan koordinasi merupakan faktor biomekanik penting yang memengaruhi risiko cedera ACL. Quadriceps dan hamstring memainkan peran penting dalam menstabilkan sendi lutut dan mengendalikan gerakannya. Ketidakseimbangan kekuatan atau pengaturan waktu otot-otot ini dapat menyebabkan mekanika sendi yang tidak tepat dan peningkatan ketegangan ACL. Misalnya, dominasi berlebihan quadriceps relatif terhadap hamstring selama aktivitas berdampak tinggi dapat menyebabkan translasi tibialis anterior yang berlebihan, sehingga menempatkan ACL pada risiko yang lebih besar. Kontrol neuromuskular, yang melibatkan koordinasi pola aktivasi otot untuk menstabilkan sendi, sama pentingnya. Defisit dalam kontrol neuromuskular, yang sering diamati pada atlet yang lelah atau tidak terlatih, dapat mengakibatkan stabilitas lutut yang terganggu dan kemungkinan cedera yang lebih tinggi (Kacprzak et al., 2024).

Fleksibilitas dan mobilitas tidak boleh diabaikan. Otot yang tegang dapat mengubah mekanisme sendi dan menyebabkan pola gerakan yang tidak tepat. Rutinitas peregangan yang menargetkan otot quadriceps, hamstring, dan fleksor pinggul dapat membantu mempertahankan panjang otot dan rentang gerak sendi yang optimal, yang penting untuk fungsi lutut yang tepat.

Berbeda dengan faktor risiko anatomi yang tidak dapat dimodifikasi tanpa intervensi bedah, defisit neuromuskular sering kali merupakan faktor risiko yang dapat dimodifikasi. Intervensi dapat mengurangi risiko cedera ACL. Kontrol yang lebih baik atas tubuh inti dan kontrol proprioseptif yang lebih baik atas ekstremitas bawah dikatakan terkait dengan penurunan risiko cedera ACL. Performa proprioseptif dapat ditingkatkan dengan latihan yang meningkatkan kekuatan otot, koordinasi sinergis, dll yang dapat membantu mengurangi risiko cedera ACL. Mekanisme cedera ACL terjadi saat atlet lepas landas dari lutut yang diposisikan valgus, saat lutut biasanya dalam fleksi 10–30° dan mencoba memutar ke dalam kaki yang diputar ke luar dengan tujuan untuk mengubah arah secara tiba-tiba (Jagadeesh et al., 2021).

Terdapat risiko cedera ACL yang lebih besar ketika lutut dalam posisi abduksi, terdapat gerakan abduksi intersegmental dan peningkatan gaya reaksi tanah dengan penurunan waktu berdiri. Sudut fleksi lutut yang kecil ditambah dengan kontraksi quadriceps yang kuat selama aktivitas olahraga akan menyebabkan peningkatan beban posterior pada lutut. Akibatnya, hal ini meningkatkan risiko cedera ACL (Jagadeesh et al., 2021).

Pada atlet wanita, ketika mendarat dari ketinggian saat melompat, mereka melakukan manuver memotong dan memutar dengan lebih sedikit fleksi lutut dan fleksi pinggul, peningkatan valgus pada lutut, peningkatan rotasi internal pinggul yang disertai dengan peningkatan rotasi eksternal tibia dan peningkatan aktivasi otot quadriceps yang menyebabkan peningkatan cedera ACL karena peningkatan ketegangan pada lutut. Wanita memiliki kontrol neuromuskular yang buruk pada otot hamstring dan kekuatan gluteus medius yang lebih lemah, abduktor pinggul yang lebih lemah yang ditambah dengan mekanisme pendaratan yang buruk meningkatkan risiko cedera ACL (Jagadeesh et al., 2021).

Ketika lutut dalam posisi valgus, ligamen kolateral medial menjadi tegang dan terjadi kompresi lateral. Hal ini serta vektor gaya anterior yang disebabkan oleh kontraksi quadriceps menyebabkan kondilus femoralis lateral bergeser ke posterior dan tibia bergeser ke anterior dan berputar ke dalam, yang mengakibatkan ruptur ACL (Jagadeesh et al., 2021).

Kelelahan berdampak besar pada fungsi otot dan stabilitas sendi. Saat otot lelah, kemampuannya untuk menopang dan menstabilkan lutut berkurang, yang menyebabkan perubahan pola gerakan dan peningkatan ketegangan pada ACL. Saat otot lelah, otot tidak dapat lagi menghasilkan tingkat kekuatan yang sama atau merespons perubahan gerakan dengan cepat, sehingga mengakibatkan gangguan stabilitas sendi. Pengurangan produksi kekuatan dan waktu respons yang tertunda ini berarti otot kurang efektif dalam mengendalikan gerakan lutut, terutama selama aktivitas intensitas tinggi yang melibatkan perubahan arah, lompatan, dan pendaratan yang cepat. Otot yang lelah juga menunjukkan perubahan propriosepsi, yang dapat mengganggu kemampuan tubuh untuk merasakan posisi dan gerakan sendi. Gangguan ini dapat menyebabkan posisi sendi yang salah dan peningkatan kerentanan terhadap cedera. Misalnya, perubahan biomekanik yang disebabkan oleh kelelahan, seperti peningkatan valgus lutut (lutut kolaps ke dalam) dan rotasi internal, dikaitkan dengan risiko cedera ACL yang lebih tinggi (Kacprzak et al., 2024).

2.3.4 Kondisi yang Meningkatkan Beban Mekanis yang Diterima oleh *Articulatio Genu*

Sebagian besar robekan ACL terjadi pada atlet melalui mekanisme non-kontak, cedera pivot non-kontak di mana tibia bergeser ke anterior sementara lutut sedikit tertekuk dan dalam posisi valgus. Pukulan langsung ke lutut sisi lateral juga ditemukan sebagai mekanisme cedera. Atlet yang paling berisiko mengalami cedera non-kontak termasuk pemain ski, pemain sepak bola, dan pemain basket. Atlet yang paling berisiko mengalami cedera kontak adalah pemain sepak bola (Evans et al., 2025).

Gerakan-gerakan yang biasanya menyebabkan cedera ACL nonkontak adalah gerakan memotong, gerakan memutar, dan mendarat setelah melompat, terutama jika pendaratan dilakukan dengan posisi berdiri dengan satu kaki. Namun, banyak kasus ruptur ACL disebabkan oleh gangguan keseimbangan yang disebabkan oleh lawan (misalnya dorongan atau gangguan pada fase pendaratan setelah melompat) (Volpi et al., 2018).

Penelitian menemukan bahwa *joint laxity*, goyangan postural kaki yang rendah, hiperekstensi sendi lutut, dan rasio hamstring-ke-quadiceps yang rendah selama gerakan konsentris merupakan faktor yang berhubungan dengan tingkat cedera ACL yang lebih tinggi pada pemain sepak bola. Peneliti menyelidiki risiko cedera ACL pada pemain sepak bola wanita U-23 Afrika Selatan, melakukan studi kasus-kontrol, dan menemukan bahwa faktor anatomi seperti sudut Q, lebar panggul, dan takik interkondilaris bukan merupakan prediktor cedera ACL. Penelitian lain dengan studi kasus-kontrol, merekrut 64 pemain sepak bola elit dan 45 kontrol yang tidak banyak bergerak, dan menemukan bahwa tibialis posterior *slope* merupakan faktor risiko cedera ACL. Faude et al menemukan bahwa insiden cedera lebih tinggi pada pemain bertahan (9,4 cedera per 1.000 jam paparan) dan penyerang (8,4/1000 jam) dibandingkan penjaga gawang (4,8/1000 jam) dan gelandang (4,6/1000 jam) (Faude et al., 2006; Volpi et al., 2018).

Di Amerika Serikat, olahraga yang menyebabkan tabrakan, seperti sepak bola, rugby, dan gulat, didominasi oleh pria. Wanita memainkan olahraga tabrakan seperti hoki es dan rugby, tetapi olahraga kontak seperti sepak bola dan bola basket lebih sering disebutkan ketika membandingkan risiko cedera ACL berdasarkan jenis kelamin. Sementara tingkat cedera ACL pada wanita yang bermain sepak bola termasuk yang tertinggi, tingkat tersebut juga tinggi dalam olahraga kontak terbatas dan nonkontak, termasuk ski alpine dan senam. Penelitian menemukan beberapa tingkat cedera ACL tertinggi di antara pria dalam olahraga tabrakan (sepak bola musim semi dan musim gugur dan gulat). Sebaliknya, pada wanita, senam (nonkontak), diikuti oleh sepak bola dan bola basket, menghasilkan tingkat cedera ACL tertinggi (Montalvo et al., 2019).

Beban kerja (*workload*), sebagaimana didefinisikan dalam tinjauan adalah jumlah stres kumulatif yang diberikan pada seorang individu dari beberapa sesi pelatihan dan pertandingan selama periode waktu tertentu. Beban kerja pada atlet adalah kombinasi dari intensitas, durasi, dan frekuensi [pelatihan dan kompetisi]. Beban kerja tidak memberikan kontribusi yang sama terhadap semua cedera, berdasarkan karakteristik jaringan dan mekanisme cedera yang berbeda. Jaringan yang berbeda dapat merespons beban secara berbeda, seperti yang dicontohkan pada pemain kriket cepat, di mana beban kerja jangka menengah yang tinggi (3 bulan) bersifat protektif terhadap cedera tendon, tetapi merupakan faktor

risiko untuk cedera stres tulang. Lebih jauh, beban kerja mungkin berkontribusi lebih sedikit terhadap cedera kontak daripada cedera non-kontak. Cedera non-kontak seperti ruptur ACL pemain sepak bola saat mengubah arah kemungkinan besar disebabkan oleh sejumlah besar faktor beban kerja. Dalam hal ini, beban kerja berkontribusi lagi dalam skenario ini melalui paparan, tetapi beban pada minggu-minggu sebelum cedera mungkin juga telah mengubah faktor risiko internal tertentu (ketahanan jaringan, kontrol neuromuskular, dll) yang selanjutnya membuat atlet rentan terhadap cedera (Windt & Gabbett, 2017).

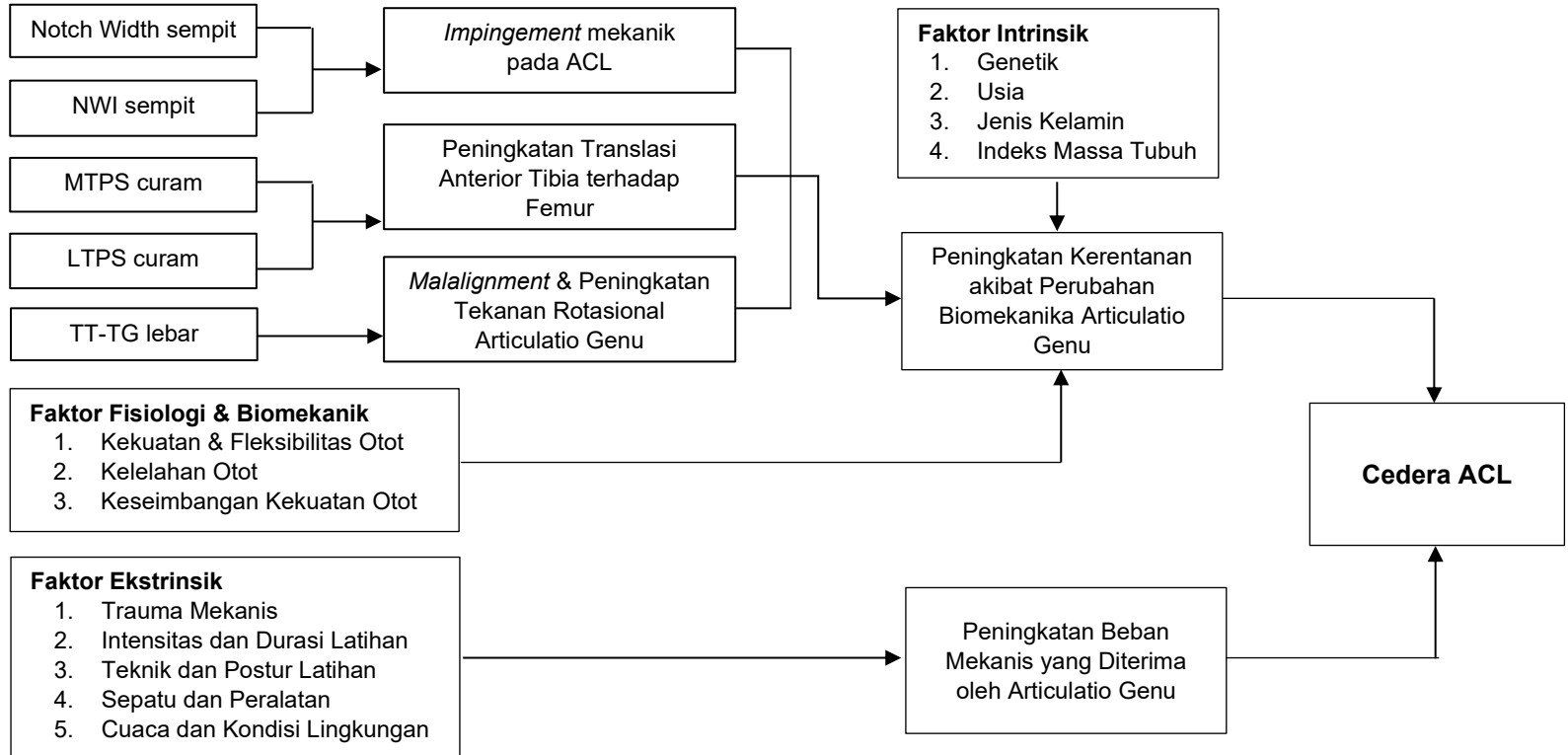
Cuaca hujan dan basah memiliki risiko cedera ligamen anterior cruciatum yang meningkat karena mengurangi gesekan antara sepatu dan lapangan. Akibatnya, ada risiko cedera ACL yang lebih besar. Selain itu, ada risiko cedera ACL yang lebih tinggi dalam cuaca panas karena panas meningkatkan ekstensibilitas ligamen yang membuat orang rentan terhadap cedera ACL. Studi prospektif Orchard et al. menunjukkan peningkatan risiko cedera ACL dengan iklim panas (Jagadeesh et al., 2021).

Jenis *cleat* (*tonjolan pada sol*) pada sepatu berperan dalam cedera ACL. *Cleat* yang memiliki torsi lebih tinggi seperti *cleat* tepi memiliki resistensi lebih tinggi dan akan meningkatkan risiko cedera ACL. Studi prospektif Lampson et al. menunjukkan bahwa *cleat* dengan resistensi torsi lebih tinggi memiliki risiko cedera ACL yang signifikan. Studi mereka dilakukan pada 3119 atlet yang menunjukkan bahwa 42 Atlet dengan *cleat* tepi memiliki cedera ACL yang menunjukkan predisposisi lebih tinggi terhadap cedera ACL dengan *cleat* tepi. Desain *cleat* seperti *cleat* datar, *cleat* kecil dan *cleat* yang lebih sedikit memiliki lebih sedikit cedera ACL.

Faktor lain yang dapat berkontribusi terhadap risiko cedera ACL adalah permukaan lapangan. Lapangan yang memiliki rumput bermuda memiliki risiko cedera ACL yang lebih tinggi dibandingkan dengan lapangan dengan ryegrass karena sepatu bola terperangkap di rumput bermuda. Studi prospektif Orchard et al. menunjukkan peningkatan risiko terperangkap di rumput bermuda dibandingkan dengan lapangan dengan ryegrass, tetapi studi ini tidak memperhitungkan sepatu bola yang berbeda yang digunakan oleh para pemain (Jagadeesh et al., 2021; Orchard et al., 2001). Studi lain oleh Olsen et al, membandingkan cedera ACL pada pemain bola tangan di lapangan sintetis dan kayu. Mereka menemukan bahwa insiden cedera ACL 2,35 kali lebih tinggi di lapangan sintetis dibandingkan dengan lapangan kayu. Biasanya ada interaksi antara alas kaki dan permukaan tempat permainan dalam ruangan berlangsung yang meningkatkan risiko cedera ACL dan interaksi serupa dapat terjadi dalam aktivitas luar ruangan juga dikombinasikan dengan kondisi cuaca (Olsen et al., 2003).

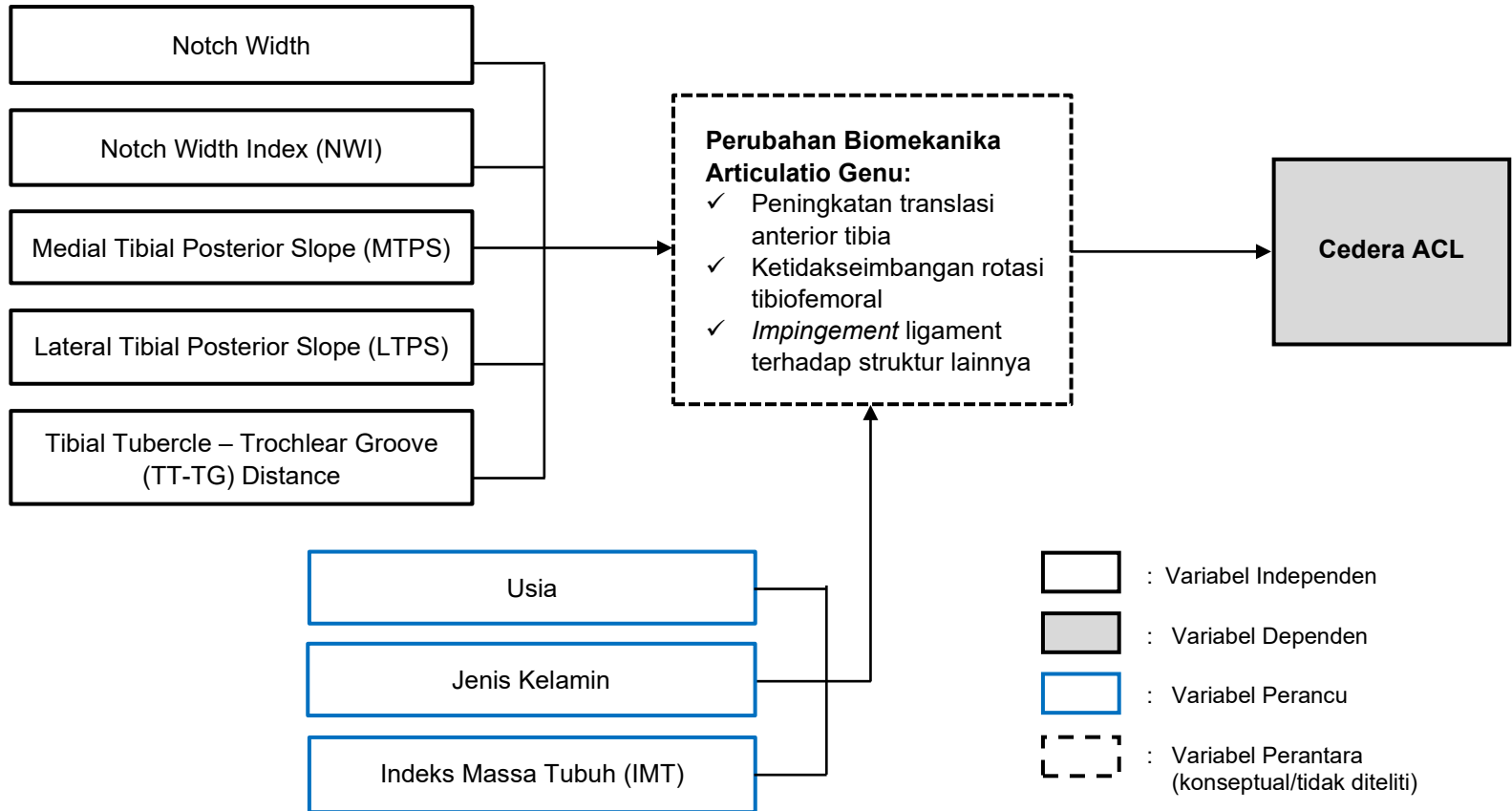
BAB III KERANGKA TEORI, KERANGKA KONSEP DAN DEFINISI OPERASIONAL

3.1. Kerangka Teori



Gambar 18. Kerangka Teori

3.2. Kerangka Konsep



Gambar 19. Kerangka Konsep

3.3. Definisi Operasional

Tabel 1. Definisi Operasional

Variabel	Definisi Operasional	Alat Ukur	Cara Ukur	Hasil Ukur	Skala Ukur
Usia	Jumlah tahun kehidupan responden yang dihitung sejak dilahirkan sampai pada saat responden menjalani pemeriksaan MRI Genu dan tertulis di rekam medis.	Rekam Medis	Menghitung jumlah tahun sejak responden dilahirkan sampai pada saat responden menjalani pemeriksaan MRI Genu sesuai yang tertulis di rekam medis.	Dewasa muda (18-35 tahun) Dewasa pertengahan (36-55 tahun) Dewasa lanjut (≥56 tahun)	Ordinal
Jenis Kelamin	Karakteristik biologis yang dikenali dari penampilan fisik, sesuai dengan yang tertera di kartu tanda pengenal resmi dan tertulis di rekam medis.	Rekam Medis	Mengenali penampilan fisik, sesuai dengan yang tertera di kartu tanda pengenal resmi dan tertulis di rekam medis.	Laki-laki Perempuan	Nominal
Indeks Massa Tubuh	Ukuran status gizi responden berdasarkan data berat badan dan tinggi badan yang tertulis di berkas rekam medis pada saat menjalani pemeriksaan MRI Genu.	Rekam Medis	$IMT = \frac{BB \text{ (Kg)}}{TB \text{ (m)} \times TB \text{ (m)}}$ <p>< 18,5 : Berat badan kurang 18,5 - 24,9 : Berat normal 25 - 29,9 : Berat badan berlebih ≥ 30 : Obesitas</p>	Berat badan kurang Berat normal Berat badan berlebih Obesitas	Ordinal

Variabel	Definisi Operasional	Alat Ukur	Cara Ukur	Hasil Ukur	Skala Ukur
<i>Notch Width</i>	Diameter (lebar) absolut dari fossa intercondylaris femoris, yang diukur pada hasil MRI Genu dalam potongan coronal.	Rekam Medis / PACS / Hasil Analisis MRI Genu	Ukur diameter fossa intercondylaris femoris pada tingkat sulcus popliteus, sejajar dengan linea articularis. <ul style="list-style-type: none"> • Sempit : < 17 mm • Normal : 17 – 21 mm • Lebar : > 21 mm 	Sempit Normal Lebar	Ordinal
<i>Notch Width Index (NWI)</i>	Rasio dari diameter fossa intercondylaris femoris (<i>notch width</i>) dan lebar bicondylar femur distal (lebar total femur distal) di titik pengukuran yang sama, yang diukur pada hasil MRI Genu dalam potongan coronal.	Rekam Medis / PACS / Hasil Analisis MRI Genu	1. Ukur diameter fossa intercondylaris femoris pada tingkat sulcus popliteus, sejajar dengan linea articularis. 2. Ukur diameter bicondylar femur distal (lebar total femur distal) pada tingkat yang sama, dari sisi medial ke lateral condylus femoralis. $NWI = \frac{\text{Notch Width (mm)}}{\text{Femoral Condyle Width (mm)}}$ <ul style="list-style-type: none"> • Sempit : < 0.20 • Normal : 0.20 – 0.27 • Lebar : > 0.27 	Sempit Normal Lebar	Ordinal