



Modul 5  
FPG 122-Ilmu Perkembangan Gerak

Materi 6  
Perkembangan Sistem Skeletal

Disusun Oleh  
Wahyuddin

UNIVERSITAS ESA UNGGUL  
2019

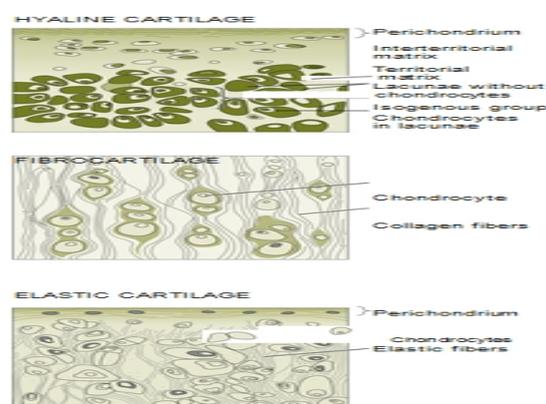
## Pengantar

Kemampuan untuk berjalan, berlari, mengangkat, dan memanipulasi objek dipengaruhi oleh kekuatan dan ketahanan sistem rangka. Anak bayi tidak bisa berjalan, memanjat tangga, mendorong kereta dorong, atau mengikat sepatu. Bukan hanya karena bayi kurang pengalaman dan terlatih dalam hal ini, tetapi tulang kerangka mereka yang belum matang secara struktural belum bisa digunakan untuk pergerakan tersebut. Orang dewasa mungkin untuk tidak merasakan pantulan saat melangkah, kekuatan saat melakukan servis tenis, atau ketangkasan manual yang mereka rasakan ketika mereka masih muda. Perubahan dalam sistem rangka seiring dengan penuaan mungkin merupakan penyebab dalam penurunan efisiensi pergerakan. Sepanjang rentang kehidupan, sistem rangka berkembang dan berevolusi dalam meningkatkan kemampuan kita untuk gerakan tak terbatas.

Kerangka menyediakan struktur yang mana dapat menjadi pelekatan otot bekerja. Ukuran dan bentuk tulang, pergerakan dari sambungan/artikulasi sendi, dan tempat pelekatan otot membentuk sistem yang efisien untuk menjadi pengungkit dan penopang. Sendi memungkinkan terjadinya pergerakan tulang satu sama lain, dan bentuk sendi berpengaruh atas gerakan yang efisien. Tulang rawan berperan sebagai peredam getaran dan melindungi permukaan sendian dari keausan dan kerusakan. Kita akan lebih menghargai kontribusi dari sistem rangka gerak fungsional saat kita memahami peran komponennya dan kemampuan perubahan bentuknya seiring pertumbuhan manusia.

## Komponen sistem skeletal

Tulang rawan, jenis jaringan ikat, dapat mentolerir tekanan mekanik dan bertindak sebagai struktur pendukung dalam tubuh. Menyediakan sebuah mekanisme untuk meredam getaran, berfungsi sebagai permukaan geser sendi, dan berperan dalam perkembangan dan pertumbuhan tulang. Selama perkembangan janin, model tulang rawan ditetapkan berdasarkan tulang panjang mana yang akan berkembang. Ujung pada tulang panjang yang belum matang dan beberapa lokasi pelekatan otot juga berisi piringan tulang rawan, yang mana akan menjadi tempat pertumbuhan tulang.



Gambar 1 Jenis-jenis cartilage

(Gartner LP, Hiatt JL: *Color textbook of histology*, ed 2, Philadelphia, 2001, WB Saunders, p 130.)

Ada tiga jenis tulang rawan, masing-masing memiliki fungsi berbeda (gambar 1). Tulang rawan hialin adalah yang paling banyak dan keras. Biasa ditemukan di

permukaan artikular sendi dan dinding bagian pernapasan, seperti trakea dan bronkus. Tulang rawan hialin juga membuat bentuk tulang panjang janin dan dapat ditemukan di piringan pertumbuhan epiphyseal tulang yang belum matang. Tulang rawan Fibrosa, ditemukan di *acetabulum*, *intervertebral disk*, meniskus, dan insersio tendon. Tulang ini lebih lentur daripada tulang rawan hialin tetapi masih memberikan kekuatan dan dukungan untuk sistem rangka. Serat tulang rawan fibrosa disusun sejajar dengan tekanan yang diterima oleh jaringan. Tulang rawan elastis adalah tulang rawan yang lentur dan dapat ditemukan di laring, telinga, dan epiglottis, dimana dibutuhkan fleksibilitas.

Tulang rawan hialin membungkus ujung tulang yang membentuk Sendi sinovial, dan dalam hal ini, disebut tulang rawan artikular. Bertanggung jawab dalam memfasilitasi pergerakan di sendi dan dapat menahan beban. Cairan sinovial dan kompresi cairan dari dalam permukaan tulang rawan artikular berfungsi sebagai pelumas sendi. Tulang rawan artikular menyediakan permukaan gesekan rendah dan memungkinkan sendi untuk bergerak bebas pada orang dewasa. Luka kecil menahun, luka sendi tersembunyi yang cukup parah, dan penuaan jaringan tulang rawan dapat mengakibatkan kerusakan dari tulang rawan artikular, yang mana dapat berkembang menjadi *osteoarthritis* pada orang dewasa kebanyakan.

#### Komponen

Tulang rawan terdiri dari air, proteoglikan, serat kolagen dan sel-sel tulang rawan (kondrosit). proteoglikan dan serat kolagen membentuk matriks ekstraseluler kolagen sekitar kondrosit. Perbedaan dalam matriks ekstraseluler dan jumlah air dalam jaringan membantu untuk membedakan tiga jenis tulang rawan. Sebagai contoh, kadar air tulang rawan artikular adalah 60% sampai 80 % tetapi bahwa tulang rawan fibrosa hanya 50%. matriks kolagen lah yang membentuk kekakuan dan ketahanan kolagen dan membantu mengikat air dalam tulang rawan.

Tulang rawan tidak memiliki pasokan saraf dan pembuluh darah sendiri. Oksigen dan nutrisi harus diperoleh dari jaringan sekitarnya. kebanyakan tulang rawan dilapisi oleh lapisan jaringan ikat padat yang disebut perikondrium. perikondrium bervaskularisasi dan memasok nutrisi ke tulang rawan melalui difusi. Tulang rawan artikular tidak ditutupi dengan perichondrium dan bergantung pada difusi nutrisi dari cairan sinovial dan tulang *subchondral*. Dalam tulang rawan artikular, periode kompresi dan dekompresi memfasilitasi pertukaran cairan: selama dekompresi, pasukan osmotik memungkinkan nutrisi untuk menyebar ke tulang rawan, dan selama kompresi, cairan dan zat-zat buangan akan dikeluarkan. Kedua proses diperlukan untuk mempertahankan gizi yang memadai pada tulang rawan.

Kondisi tulang rawan artikular didorong dengan penggunaan, atau pembebanan tulang rawan. Dengan tidak adanya beban mekanis, terhentinya pertumbuhan jaringan artikular dapat dilihat. Tulang rawan yang pertumbuhannya terhenti mungkin kurang mampu menahan beban dan gerakan, sehingga mengarah pada degenerasi tulang rawan lebih lanjut.

#### Formasi / Susunan

Tulang rawan berasal dari mesoderm embrionik, seperti jaringan ikat lainnya. Terjadi pertumbuhan tulang rawan melalui dua proses yang berbeda: interstitial pertumbuhan dan pertumbuhan appositional. Pertumbuhan interstitial dalam tulang rawan terjadi melalui pembelahan mitosis kondrosit yang sudah ada. Terjadi pada

fase awal pengembangan tulang rawan untuk meningkatkan massa jaringan, pada piringan epiphyseal tulang panjang, dan permukaan artikular. Dalam pertumbuhan appositional, tulang rawan yang baru ditempatkan pada permukaan perichondrium. Dalam proses ini, chondroblasts perichondrium, yang merupakan prekursor untuk chondrocytes, membentuk matriks ekstraseluler dan berkembang menjadi kondrosit yang matang. Tulang rawan nonarticular kehilangan kemampuan pertumbuhan interstitial di awal dan kemudian dilanjutkan dengan pertumbuhan appositional.

Dalam pembentukan tulang rawan artikular, serat kolagen dari matriks ekstraseluler membentuk pola simpul berulang hingga ke permukaan sendi. Serat kolagen ini tertanam pada tulang subchondral atau jaringan tulang rawan bagian dalam. Susunan struktural ini membantu tulang rawan untuk menahan air dan mempertahankan bentuknya. Seiring lamanya waktu penggunaan, sel-sel permukaan artikular menjadi usang, tulang rawan menipis, dan akhirnya permukaan mengalami perubahan. Perbaikan tulang rawan tergantung pada interstitial pertumbuhan dan kemampuan kondrosit untuk mensintesis dan mempertahankan matriks ekstraseluler. Tulang rawan artikular memiliki kemampuan untuk memperbaiki diri, melakukan mitosis (terbatas), melakukan metabolisme nutrisi, dan memelihara matriks bahkan saat masa penuaan. Penuaan tulang rawan lebih terbatas daripada tulang rawan muda dalam kemampuannya untuk memperbaiki diri karena penurunan jumlah sel-sel tulang rawan dan berkurangnya kemampuan untuk mensintesis matriks ekstraseluler baru. Misalnya, dengan beristirahat, seorang pemuda dengan *chondromalacia* dapat pulih dari kerusakan tulang rawan artikular. Sedangkan untuk seseorang yang lebih tua, kasus serupa tidak dapat diperbaiki, dan menimbulkan osteoarthritis.

Faktor-faktor yang membatasi penyembuhan dalam tulang rawan adalah terbatasnya kemampuan kondrosit dewasa untuk membelah dan tidak adanya pembuluh darah (avaskularisasi) pada tulang rawan. Beberapa perbaikan dapat terjadi hanya pada tulang rawan dengan perichondrium dimana sel-sel baru tulang rawan diproduksi. Tulang rawan artikular yang rusak digantikan oleh jaringan ikat padat atau tulang rawan fibrosa, yang mana sifat mekanik tidak optimal untuk mendukung gesekan rendah di bawah beban mekanik yang tinggi.

#### Aging/penuaan

Komposisi tulang rawan artikular berubah seiring waktu. Perubahan utama yang terlihat di tulang rawan dengan penuaan adalah perubahan dalam komposisi matriks selular kondrosit, kurang efektifnya kemampuan perbaikan kondrosit, protein dan kolagen yang saling menyilang, meningkat pengapuran tulang rawan, kehilangan konsentrasi air, dan peningkatan fibrilasi (gangguan). Perubahan matriks selular termasuk perubahan dalam konsentrasi air dan berkurangnya beberapa molekul protein yang berkontribusi terhadap kekakuan dan ketahanan tulang rawan artikular. Jika tulang rawan kehilangan kekakuan dan kekuatannya, maka akan rentan untuk cedera.

Saling menyilangnya serat kolagen, serat elastin dan protein menyebabkan matriks ekstraseluler menjadi lebih kaku dan akhirnya mengapur, membuat difusi nutrisi lebih sulit. Jika tulang rawan gizi tidak dapat dipertahankan, kondrosit akan mati. Pengapuran dilihat ketika kristal kalsium fosfat masuk ke matriks tulang rawan. ketika tulang rawan rusak pada orang dewasa, pembuluh darah juga mengembang pada titik cedera untuk membantu penyembuhan, tapi suplai darah ini justru mengarah pada pengapuran bukan memperbaiki tulang rawan. berkurangnya jumlah sel-sel terlihat sepanjang tulang rawan, terutama pada permukaan yang terpapar beban. Paparan berulang gerakan mekanik membuat tulang rawan menjadi

aus dan mengurangi kemampuannya untuk melindungi permukaan tulang. Matriks ekstraseluler dari tulang rawan artikular menjadi keras dan rapuh, mengakibatkan penurunan fleksibilitas, kekuatan dan efisiensi. Gesekan meningkat seiring pergerakan sendi bersama dengan penipisan, dan keretakan tulang rawan artikular.

Seiring penuaan, tulang rawan menjadi dehidrasi, kekurangan nutrisi dan jadi lebih tipis. Kurang mampu menahan tekanan yang diberikan, dan ketika kerusakan terjadi, tulang rawan tidak dapat memperbaiki dirinya sendiri secara efektif. Dari waktu ke waktu ini adalah salah satu mekanisme yang diperkirakan mengakibatkan *osteoarthritis*. Teori lain yang berhubungan dengan penyebab *osteoarthritis* untuk keausan pada tulang rawan artikular akibat tekanan.

## Tulang

Kerangka tulang terhitung untuk 14% dari berat orang dewasa yang lebih tua, 15% dari berat bayi dan 17% dari berat dewasa muda. Juga merupakan 97% sampai 98% dari total tinggi badan. Diskus intervertebralis berkontribusi untuk sisa ketinggian. Pada manusia, tulang memiliki beberapa fungsi, termasuk perlindungan organ-organ vital, menopang berat badan, tempat penyimpanan mineral, untuk pergerakan, dan penyimpanan sumsum tulang.

Tulang pelindung sistem saraf pusat adalah tengkorak, yang membentuk kubah di sekitar otak, dan tulang vertebral yang melindungi sumsum tulang belakang. Rusuk melindungi paru-paru dan hati. Tulang-tulang dari tulang belakang, bahu, panggul, ekstremitas atas, dan ekstremitas bawah disusun secara efektif untuk mendukung berat badan dalam postur tegak. Sendi berfungsi untuk menghubungkan tulang, meningkatkan fungsinya dan untuk efisiensi artikulasi. Otot secara strategis melekat pada kerangka tulang, dan memungkinkan gerakan yang efisien terjadi dengan kontraksi otot.

Selain menyediakan perlindungan dan dukungan, tulang adalah tempat penyimpanan bahan-bahan yang digunakan oleh tubuh. Sumsum tulang, yang penting dalam pembentukan sel-sel darah, disimpan dalam tulang. Kalsium, fosfat dan ion-ion lainnya disimpan dalam tulang sebagai kristal garam. Garam ini berkontribusi pada kekuatan tulang dan kemampuannya untuk menahan tekanan. Mineral disimpan juga digunakan untuk mempertahankan kadar mineral darah ketika terjadi perubahan dalam diet atau permintaan metabolik. Jika kadar darah kalsium dan fosfat drop, mineral ini dapat diakses dari tulang. Demikian juga, setelah makan, kalsium disimpan di tulang atau dikeluarkan untuk menghindari peningkatan pada kadar darah.

Struktur tulang, serta kekakuan dan kekuatannya, memungkinkan untuk memenuhi tuntutan fungsional kegiatan sehari-hari. Seluruh pengembangan, tulang harus dihasilkan dan dipelihara dalam quantities cukup untuk menahan tekanan, berat, pergerakan dan aktivitas fungsional selama masa hidup.

## Struktur dan bentuk secara umum

Tulang adalah jaringan ikat yang terdiri dari sel-sel tulang dan matriks. Elemen-elemen ini diikat bersama oleh zat dasar. Matriks tulang adalah zat keras, terkalsifikasi yang terdiri dari serat kolagen dan garam mineral, mengelilingi sel tulang utama, osteocyte, yang berfungsi untuk mempertahankan kandungan nutrisi dan mineral matriks tulang. Dua jenis sel tulang lainnya adalah osteoblast, yang aktif dalam pembentukan tulang baru, dan osteoclast, yang dikaitkan dengan resorpsi tulang. Osteoblas ditemukan pada permukaan tulang dan mensintesis matriks tulang baru. Mereka yang terbungkus banyak matriks tulang, menjadi osteocytes.

Osteoklas ditemui di kawasan resorpsi tulang, dimana mereka memecah matriks tulang dan melepaskan mineral ke peredaran darah.

Permukaan eksternal dari tulang (kecuali permukaan artikular), dilapisi dengan periosteum. Periosteum terdiri serat kolagen dan sel pembentuk tulang, yang menyediakan sumber osteoblas. Permukaan dalam tulang (endosteum), lebih tipis dari periosteum tetapi juga memasok osteoblas untuk pertumbuhan tulang dan perbaikan. Kedua permukaan bervaskularisasi dan memainkan peran dalam pemberian nutrisi pada tulang.

Semua tulang terdiri dari dua jenis jaringan tulang padat (juga disebut tulang lamellar atau tulang kortikal) dan tulang *cancellous* (juga disebut trabecular atau tulang berspons). Tulang padat, yang keras dan padat, adalah mayoritas tulang dalam kerangka manusia. Tulang ini membentuk poros tulang panjang dan menyediakan penutup luaran yang tipis untuk area tulang *cancellous*. Tulang padat dan kaku, yang memungkinkan untuk menahan pembengkokan dan gerakan torsional. Tulang *cancellous*, terdiri dari tenunan helai jaringan tulang (*trabeculae*), dan hanya sekitar 20% dari tulang dalam kerangka manusia. Tulang ini ditemukan di ujung-ujung tulang panjang dan mengisi rongga dalam sumsum tulang poros. Sisa ruang terbuka dari tulang *cancellous* melindungi sumsum tulang, mineral, dan pembuluh yang menutrisi tulang. Struktur dari *trabeculae* tulang *cancellous* menyediakan lebih banyak fleksibilitas daripada tulang padat, membuat tulang *cancellous* (trabecular) lebih responsif terhadap tekanan.

Tulang padat ini terbentuk ketika pelat tipis tulang (lamellae) disusun secara konsentris di sekitar saluran yang mengandung pembuluh darah dan saraf (Kanal Haversian). Saluran ini terbentuk ketika matriks tulang mengelilingi pembuluh darah yang sudah ada. Empat sampai dua puluh Lamellae mengelilingi kanal haversian, membentuk osteon (sistem haversian). Osteons menyediakan sebuah mekanisme untuk mempertahankan nutrisi tulang. Mereka terus-menerus dihancurkan dan dibangun kembali selama masa hidup.

Poros dari tulang panjang berisi rongga sumsum. Struktur ini memungkinkan tulang padat untuk membentuk lapisan luar dari tulang dan berfungsi melindungi pusat tulang dari tekanan. Karena struktur ini, tulang panjang memberikan struktur yang secara efektif dapat menghindari kebengkokan, gerakan torsional, dan tekanan. Pada orang dewasa, melalui kegiatan osteoblas, dan osteoklas ukuran kanal meningkat yang secara mekanis meningkatkan kemampuan tulang menahan tekanan yang diberikan.

Tulang belakang, pergelangan tangan, dan pinggul terdiri atas proporsi yang tinggi dari tulang *cancellous*. Seiring bertambahnya usia, hilangnya tulang *cancellous* terjadi lebih dulu daripada tulang kortikal. Maka tidak mengherankan jika pergelangan tangan, tulang belakang, dan pinggul adalah bagian yang rawan mengalami fraktur akibat osteoporosis.

Table 6-1

Developmental Changes in Lower Extremity Alignment

	Birth	3 Yr	Adult
Acetabular roof	7 degrees from vertical	17 degrees from vertical	
<b>Femur</b>			
Angle of inclination	135-145 degrees		125 degrees
Angle of torsion	25- to 30-degree anteversion		10- to 15-degree anteversion
Tibial torsion	5- to 10-degree internal tibial torsion		20- to 25-degree external tibial torsion
Calcaneus	22-degree varus		0- to 3-degree varus

Bernhardt DB: Pertumbuhan dan perkembangan kaki serta pergelangan kaki pada saat kehamilan dan setelah melahirkan, *Phys Ther* 68:1831-1839, 1988

Tulang tumbuh tidak hanya panjang, tetapi juga dengan diameter. Tulang baru ditetapkan pada permukaan luar tulang dan diserap dari permukaan dalam, menentukan ketebalan tulang dan ukuran rongga sumsum dalam tulang. Proses ini disebut pertumbuhan appositional dan terus sepanjang hidup, namun proporsi pembentukan tulang untuk resorpsi bervariasi. Di masa kanak-kanak dan adolescence, pembentukan lebih besar dari resorpsi, semakin meningkatnya diameter dan ketebalan tulang. Sepanjang awal dan menengah dewasa, keseimbangan antara dua proses mempertahankan ukuran tulang. Dalam kehidupan dewasa nanti, resorpsi melebihi pembentukan, mengakibatkan hilangnya massa tulang. Karena resorpsi terjadi pada permukaan bagian dalam tulang, sumsum rongga menjadi lebih besar, dan selubung tulang sekitarnya menjadi lebih tipis. Kelemahan otot juga dapat mempengaruhi pertumbuhan tulang appositional.

Tulang adalah jaringan beradaptasi, menanggapi tuntutan hormon dan stres mekanik yang terjadi di. Untuk menjaga massa dan arsitektur tulang, keseimbangan harus dicapai antara dua proses ini. Nutrisi yang baik dan latihan yang penting dalam seluruh rentang hidup untuk membangun dan mempertahankan kompetensi maksimal massa dan struktural tulang. Banyak penelitian mengenai efek latihan menyarankan bahwa aktifitas fungsional mengakibatkan peningkatan massa tulang.

#### Penuaan

Adaptasi dari tulang melalui renovasi terus sepanjang hidup. Kerangka kedewasaan yang diukur dengan penutupan lempeng epiphyseal, terjadi dalam 2 dekade pertama kehidupan. Massa tulang maksimal, yaitu total pertumbuhan panjang dan ketebalan tulang, diperkirakan diperoleh selama akhir puncak massa tulang sulit untuk ditentukan karena faktor-faktor seperti seks dan ras yang mempengaruhi ketika puncak massa tulang telah tercapai dan puncak massa tulang dicapai pada situs dan waktu yang berbeda. Usia di mana tulang resorpsi mulai melebihi tulang untuk koordinasi juga tidak konsisten dilaporkan dalam literatur. Beberapa penulis menyatakan bahwa massa tulang mulai menurun dalam dekade ketiga hingga keempat.

Perubahan lain yang terlibat dalam penuaan tulang termasuk hubungan silang, arsitektur penataan ulang serat kolagen, dan mineralisasi berlebihan trabecular tulang. Fibril teratur secara lebih longitudinal. Osteons menjadi lebih

pendek dan sempit sebagaimana kanal Haversian menjadi lebih luas. Mineralisasi tulang yang berlebihan terjadi sewaktu matriks tulang memburuk, Perubahan ini meningkatkan rapuhnya tulang dan penurunan kemampuan untuk menahan beban mekanis.

Sepanjang hidup, tubuh harus menjaga kadar kalsium serum yang diperlukan. Penyerapan kalsium pada usus menurun sesuai usia, meningkatkan jumlah kalsium yang harus diperoleh dari tulang untuk memenuhi kebutuhan tubuh. Akibatnya, massa tulang perlahan-lahan menghilang karena resorpsi tulang sering terjadi lebih cepat daripada terbentuknya tulang baru. Hilangnya jaringan tulang selama renovasi mengakibatkan tulang lebih tipis dan lebih rentan terhadap cedera. Kerapuhan meningkat karena perubahan-perubahan dalam struktur tulang juga meningkatkan risiko fraktur.

## Sendi

Sendi menyediakan hubungan fungsional antara tulang. Tujuan utama dari sendi sebagian adalah untuk memungkinkan berbagai gerakan. Dalam sendi, tulang dapat dihubungkan oleh ligamen, tendon, otot, struktur jaringan ikat lainnya, dan kapsul sendi. Dua jenis sendi yang ditemukan di sistem rangka dewasa: *synarthroses* dan *diarthroses*.

*Sendi synarthrosis* memungkinkan meminimalkan agar tidak ada gerakan dan menyediakan area stabilitas untuk kerangka. Jahitan dari tengkorak dan sendi tibiofibular adalah contoh dari jenis sendi. Artikulasi antara tulang terdiri dari jaringan ikat, yang mungkin akan digantikan dengan tulang saat penuaan.

## Perkembangan Rangka

Pengembangan sistem rangka mengikuti pola pematangan yang dimulai sebelum kelahiran dan terus melalui dekade terakhir kehidupan.

### Periode Prenatal

Seperti telah dibahas sebelumnya, tulang dan tulang rawan yang dibedakan dari lapisan mesoderm di awal periode kehamilan. Perkembangan tulang, melalui baik intramembranous atau osifikasi endochondral, dimulai pada periode embrio (ketiga sampai kedelapan kehamilan minggu). Pada minggu kelima kehamilan, model tulang yang mesenchymal muncul di ekstremitas, dengan ujung atas dan menisci. Depresi kemudian mulai terbentuk di mesenkim, mengakibatkan lingkungan intrauterin yang terbatas dalam minggu kemudian pembentukan sendi cavity dan bursae. Setelah sendi membatasi pilihan posisi janin dan berlaku kekuatan untuk sistem kerangka terbentuk, gerakan intrauterin penting untuk pengembangan janin.

## Bayi dan Anak

Masa bayi dan masa kanak-kanak adalah masa pertumbuhan tulang, pemodelan, dan renovasi. Dua periode pertumbuhan yang cepat di kepadatan mineral tulang terlihat pada anak-hood, pertama dari 1 sampai 4 tahun dan lagi pada masa pubertas, didahului dengan ledakan pertumbuhan serupa dalam massa tubuh. Mineral tulang meningkat lebih banyak konten dalam 2 sampai 3 tahun yang mengelilingi kecepatan tinggi puncak dari pada waktu lainnya dalam kehidupan, dengan 20% sampai 30% dari kepadatan tulang puncak dan kandungan mineral tulang. Anak-anak mencapai 50-60% dari puncak massa tulang mereka dengan pubertas dan hingga 90% (anak laki-laki) dan 95% (pada anak perempuan) sebelum usia 20. Sebelum pubertas, anak laki-laki dan perempuan menunjukkan serupa, tetapi setelah kecepatan puncak tinggi tercapai, kenaikan yang lebih besar untuk anak laki-laki dibandingkan anak perempuan. Peningkatan kadar testosteron pada laki-laki memberikan kontribusi ke tingkat peningkatan tulang untuk-mation. Kedua kepadatan mineral tulang dan kandungan mineral tulang dipengaruhi oleh tinggi dan berat badan di masa kecil, dengan kandungan mineral tulang yang paling dipengaruhi oleh faktor-faktor ini. Faktor-faktor yang dapat berkontribusi pada perbedaan jenis kelamin dalam kandungan mineral tulang dan kepadatan terkait dengan perbedaan dalam bentuk tulang dan geometri, asupan kalsium dan penyerapan, produksi hormon, dan tingkat aktivitas fisik.

## Childhood

Banyak perubahan terlihat pada ukuran, bentuk, angulasi, rotasi, dan bagian-bagian kerangka. Kepala dan panggul bayi yang baru lahir merupakan bagian yang lebih besar dari total kerangka daripada pada orang dewasa. Selama masa kecil, pertumbuhan kerangka aksial tidak berkontribusi banyak terhadap peningkatan tinggi anak seperti halnya pertumbuhan ekstremitas bawah.

Ekstremitas bawah dan panggul mengalami perubahan sudut, rotasi, dan panjang saat bayi belajar bergerak. Saat lahir, ilia dan sakrum lebih tegak daripada pada orang dewasa. Begitu bayi mulai berjalan, lengkungan sakrum meningkat, ilia menebal, dan kedalaman asetabular meningkat. Acetabular bagian atas berputar dari posisi yang relatif vertikal ke salah satu kemiringan yang lebih maju. Kerangka ekstremitas bawah tidak hanya mengalami transformasi saat bayi mengembangkan keterampilan gerak fungsional, tetapi juga terlihat perubahan pada tulang belakang. Pada bayi baru lahir, kurva tulang belakang anteroposterior relatif cekung. Lordosis serviks saat lahir, mungkin karena osifikasi dini tulang oksipital, tetapi menjadi lebih jelas pada usia 3 bulan, ketika bayi telah mengembangkan kontrol kepala.

Lordosis lumbar berkembang saat bayi belajar duduk. Keketatan otot iliopsoas dari posisi janin dikombinasikan dengan kerja antigravitasi pada posisi tengkurap, empat titik, dan berlutut dapat berkontribusi pada pengembangan lordosis lumbar.

Ketika kelainan bentuk tulang belakang terjadi, seperti skoliosis dan kyphosis, menguatkan kerangka kerangka yang belum matang, mekanik kekuatan pada tulang belakang yang tumbuh untuk membantu memperbaiki atau meminimalkan masalah.

## Adolescence

Selama masa remaja, tulang terus tumbuh dan berubah bentuk sebagai respons terhadap tekanan pemuatan mekanis. Aktivitas fisik, berat badan, dan asupan kalori dan kalsium berkontribusi pada pertumbuhan tulang, pembentukan matriks tulang, dan mineralisasi yang rendah. Penyerapan kalsium juga lebih efisien

selama masa pubertas, terutama pada remaja kulit hitam. Remaja mengalami peningkatan tinggi dan berat badan secara tiba-tiba, dengan pertumbuhan batang melebihi ekstremitas bawah.

Percepatan pertumbuhan remaja perempuan dimulai pada usia rata-rata 12 tahun, mendahului usia anak laki-laki sekitar 2 tahun. Lonjakan pertumbuhan dalam lebar tulang terlihat melalui masa remaja pada anak laki-laki dan hingga usia 14 tahun pada anak perempuan. Pada umumnya, anak laki-laki memasuki pubertas lebih lambat daripada anak perempuan, dan percepatan pertumbuhan pubertas mereka berlangsung lebih lama daripada anak perempuan, berkontribusi pada tinggi badan yang lebih besar, massa tulang dan ukuran tulang pada anak laki-laki dibandingkan dengan anak perempuan.

Massa tubuh yang ramping terkait dengan peningkatan massa tulang kortikal pada anak laki-laki dan perempuan, sedangkan massa lemak hanya terkait dengan peningkatan massa tulang kortikal pada anak perempuan. Pertumbuhan seringkali melebihi peningkatan panjang otot, menghasilkan fleksibilitas yang menurun. Cedera dapat terjadi jika remaja tidak memodifikasi aktivitas mereka untuk mengakomodasi perubahan fleksibilitas ini.

### Kematangan Skeletal

Kematangan kerangka dicapai ketika pelat epifisis menutup. Penutupan epifisis dimulai pada masa kanak-kanak dan biasanya selesai pada usia 25 tahun. Fusi lengkung tulang belakang terlihat di tulang belakang leher pada tahun pertama dan tulang belakang lumbar pada usia 6 tahun. Perpaduan lengkung vertebral dan centrum terjadi antara usia 5 dan 8 tahun.

Pusat osifikasi sekunder pada vertebra tidak bersatu sampai tahun ke 25. Penggabungan epifisis terjadi pada telinga perempuan pada anak laki-laki daripada pada anak laki-laki dan telah dikaitkan dengan fakta bahwa kadar estrogen lebih tinggi pada anak perempuan daripada pada anak laki-laki. Ketika kematangan kerangka tercapai, 95% massa tulang puncak. Sisa 5% massa tulang puncak dicapai melalui pertumbuhan tulang appositional dan penebalan trabekula yang berkelanjutan.

Program-program bearing exercise dan strength training exercise, terutama yang mencakup kegiatan berdampak tinggi. Perubahan tulang rawan berserat juga menjadi jelas di masa dewasa. Disk intervertebralis mulai mengalami perubahan sekitar 30 tahun. Nukleus pulposus kehilangan kemampuan untuk menyerap air dan menjadi dehidrasi, berdampak pada kemampuan untuk berfungsi secara efektif dalam shock absorber. Secara struktural, air mata kecil juga muncul di sekitar annulus fibrosis, dan integritas struktural disk intervertebralis terganggu. Kehilangan air berlanjut secara perlahan di usia dewasa, di mana annulus fibrosus juga mengalami perubahan fibrotik lebih lanjut.

### Adulthood

Setelah epifisis tertutup, tulang tidak lagi memanjang. Sepanjang masa dewasa, hanya remodeling tulang yang terjadi. Bantalan berat dan kontraksi otot terus menstimulasi remodeling tulang dan meningkatkan kepadatan tulang. Asupan nutrisi dan kalsium yang adekuat juga mendukung mineralisasi tulang remodeled yang tepat Baik pria maupun wanita mencapai massa tulang maksimal pada usia 20-an atau awal 30-an. Sehingga pembentukan dan resorpsi tulang tetap seimbang sampai usia 30 hingga 50 tahun pada pria dan 38 hingga 48 tahun pada wanita, dengan variasi yang dilaporkan berdasarkan etnis.

Setelah waktu itu, dalam kerangka dewasa, kehilangan tulang kortikal telah dilaporkan mulai pada dekade keempat dan kehilangan tulang kancellus dimulai pada dekade ketiga kehidupan. Beberapa perkiraan yang berbeda tentang jumlah kehilangan tulang dengan penuaan dilaporkan dalam literatur. Wanita kehilangan 1% dari massa tulang per tahun sebelum menopause. Untuk 4 sampai 8 tahun setelah menopause, kehilangan tulang dipercepat pada wanita, tetapi setelah waktu ini, tingkat kehilangan kembali menjadi 0,5% hingga 1% per tahun. Pria dilaporkan kehilangan 0,5% massa tulang per tahun.

Kehilangan massa tulang berlanjut pada usia dewasa yang lebih tua dan dapat dikaitkan dengan osteopenia, osteomalacia, atau osteoporosis. Osteopenia terjadi ketika komponen tulang organik atau anorganik gagal berkembang. Osteomalacia mengacu pada mineralisasi tulang matriks yang abnormal karena defisiensi kalsium dan fosfat. Ini mempengaruhi tulang yang baru terbentuk dan mapan, mengurangi jumlah mineral per unit matriks tulang. Osteoporosis mengacu pada pengurangan massa tulang karena penurunan pembentukan tulang baru atau peningkatan resorpsi sementara kimia tulang normal. Tulang terkait usia, yang membatasi pemuatan tulang dan sirkulasi secara mekanis, kehilangan mungkin terkait dengan perubahan hormon, perubahan pola makan, dan penurunan tingkat aktivitas orang dewasa yang lebih tua. Penurunan kadar estrogen pada wanita dan pria terutama bertanggung jawab atas hilangnya kepadatan mineral tulang pada orang dewasa yang lebih tua.

Estrogen dan testosteron juga tampaknya meningkatkan penyerapan kalsium dari pensinyalan resorpsi tulang minimalisasi dari resorpsi tulang sebagai respons terhadap kadar kalsium serum.

### Osteoporosis

Osteoporosis didefinisikan sebagai memiliki kepadatan tulang lebih dari 2,5 standar deviasi di bawah kisaran referensi untuk wanita muda dan membuat orang dewasa yang lebih tua berisiko mengalami patah tulang. Baik pria yang lebih tua maupun wanita yang lebih tua dapat mengembangkan osteoporosis, tetapi lebih perempuan. Pencegahan utama terhadap perkembangan osteoporosis dan patah tulang pada usia dewasa yang lebih tua dianggap sebagai pengembangan dari massa tulang puncak maksimum yang mungkin melalui masa kanak-kanak dan dewasa muda.

Partisipasi dalam aktivitas fisik menahan beban dan nutrisi yang baik berkontribusi Osteoporosis Osteoporosis didefinisikan sebagai memiliki kepadatan tulang lebih dari 2,5 standar deviasi di bawah kisaran referensi untuk wanita muda dan membuat orang dewasa yang lebih tua berisiko mengalami patah tulang. Baik pria yang lebih tua maupun wanita yang lebih tua dapat mengembangkan osteoporosis, tetapi lebih sering perempuan.

Seperti yang telah dibahas sebelumnya pencegahan utama terhadap perkembangan osteoporosis dan patah tulang pada usia dewasa yang lebih tua dianggap sebagai pengembangan dari massa tulang puncak maksimum yang mungkin melalui masa kanak-kanak dan dewasa muda.

### Osteoarthritis

Osteoarthritis adalah kondisi terkait usia yang ditandai dengan nyeri sendi selama gerakan dan berat badan, rentang gerak sendi terbatas, dan hilangnya fungsi fisik, yang pada akhirnya membatasi partisipasi dalam aktivitas kehidupan yang penting. Pengembangan osteoarthritis terkait dengan degenerasi articular tulang

rawan, yang terjadi seiring bertambahnya usia. Ini mempengaruhi 70% orang di beberapa titik dalam kehidupan mereka dan sebagian besar orang dewasa berusia lebih dari 70 tahun. Tulang rawan menipis, dan celah dan retakan terbentuk, meninggalkan permukaan tidak rata dan tidak dapat secara efisien memberikan gerakan bersama tanpa gesekan. Kalsifikasi tulang rawan juga terlihat seiring bertambahnya usia dan sebagai respons terhadap cedera.

Tulang menjadi terpapar oleh stres mekanik, yang mengakibatkan rasa sakit. Taji atau pertumbuhan tulang yang ditutupi dengan tulang rawan hialin juga dapat berkembang di persendian. Individu dengan osteoarthritis mengalami rasa sakit dengan gerakan dan rentang gerak terbatas.

#### Referensi:

Berenson AB, Rahman M, Wilkinson G: Racial difference in the correlates of bone mineral density and age at peak among reproductive-aged women, *Osteoporos Int* 20:1439–1449, 2009.

Pollock NK, Laing EM, Taylor RG, et al: Comparisons of trabecular and cortical bone in late adolescent black and white females, *J Bone Miner Metab* 22(2):655–665, 2011.

Wetzsteon RJ, Hughes JM, Kaufman BC, et al: Ethnic differences in bone geometry and strength are apparent in childhood, *Bone* 44:970–975, 2009

Hughes JM, Petit MA: Biological underpinnings of Frost's mechanostat thresholds: the important role of osteocytes, *J Musculoskelet Neuronal Interact* 10(3):128–135, 2010.

Uysal H, Demir SO, Oktay F, et al: Extremity shortness in obstetric brachial plexus lesion and its relationship to root avulsion, *J Child Neurol* 22(12):1377–1383, 2007.

Moore KL, Persaud TVN: *Before we are born: essentials of embryology and birth defects*, ed 7, Philadelphia, 2008, WB Saunders.

Sayers A, Tobias JH: Fat mass exerts a greater effect on cortical bone mass in girls than boys, *J Clin Endocrinol Metab* 95(2):699–706, 2010.

Goodman CC, Fuller KS: *Pathology: implications for the physical therapist*, ed 3, Philadelphia, 2009, WB Saunders.

Bailey CA, Kukuljan S, Daly RM: Effects of lifetime loading history on cortical bone density and its distribution in middle aged and older men, *Bone* 47:673–680, 2010.

Guadalupe-Grau A, Fuentes T, Guerra B, et al: Exercise and bone mass in adults, *Sports Med* 39(6):439–468, 2009.

Nikander R, Kannus P, Rantalainen T, et al: Cross-sectional geometry of weight-bearing tibia in female athletes subjected to different exercise loadings, *Osteoporos Int* 21(10):1687–1694, 2010.

Cousins JM, Peti MA, Paudel ML, et al: Muscle power and physical activity are associated with bone strength in older men: the osteoporotic fractures in men study, *Bone* 47:205–211, 2010.

Hamilton CJ, Swan VJD, Jamal SA: The effects of exercise and physical activity participation on bone mass and geometry in postmenopausal women: a systematic review of pQCT studies, *Osteoporos Int* 21:11–23, 2010.

Hamilton CJ, Thomas SG, Jamal SA: Associations between leisure physical activity participation and cortical bone mass and geometry at the radius and tibia in a Canadian cohort of postmenopausal women, *Bone* 46:774–779, 2010.