

KARYA AKHIR

KORELASI MORFOLOGI PERTUMBUHAN STRUKTUR KORPUS, PEDIKEL DAN LAMINA REGIO CERVICAL, THORAKAL DAN LUMBAL DENGAN USIA BERDASARKAN GAMBARAN CT SCAN PADA VERTEBRA PEDIATRIK

*MORPHOLOGICAL CORRELATION OF THE GROWTH OF THE
KORPUS, PEDICLE AND LAMINA STRUCTURES OF THE CERVICAL,
THORACIC AND LUMBAL REGIONS WITH AGE BASED ON CT SCAN
IMAGES OF THE PEDIATRIC VERTEBRA*



Oleh:
Ahmad Ibrahim Rum
C205181001

PROGRAM PENDIDIKAN DOKTER SPESIALIS I PROGRAM STUDI ILMU
BEDAH SARAF FAKULTAS KEDOKTERAN
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2023



Optimized using
trial version
www.balesio.com

KARYA AKHIR

KORELASI MORFOLOGI PERTUMBUHAN STRUKTUR KORPUS, PEDIKEL DAN LAMINA REGIO CERVICAL, THORAKAL DAN LUMBAL DENGAN USIA BERDASARKAN GAMBARAN CT SCAN PADA VERTEBRA PEDIATRIK

MORPHOLOGICAL CORRELATION OF THE GROWTH OF THE KORPUS, PEDICLE AND LAMINA STRUCTURES OF THE CERVICAL, THORACIC AND LUMBAL REGIONS WITH AGE BASED ON CT SCAN IMAGES OF THE PEDIATRIC VERTEBRA

Sebagai syarat untuk mencapai gelar Dokter Spesialis Bedah
Saraf Program Studi Ilmu Bedah Saraf

Disusun dan diajukan Oleh:

Ahmad Ibrahim Rum

C205181001

Kepada

PROGRAM PENDIDIKAN DOKTER SPESIALIS I PROGRAM STUDI ILMU
BEDAH SARAF FAKULTAS KEDOKTERAN
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2023



LEMBAR PENGESAHAN KARYA TESIS

Korelasi Morfologi Pertumbuhan Struktur Korpus Pedikel dan Lamina Regio Cervikal Thorakal dan Lumbal dengan Usia Berdasarkan Gambaran CT-Scan pada Vertebra Pediatrik

Disusun dan diajukan oleh

Ahmad Ibrahim Rum

C205181001

Telah dipertahankan di depan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi Program Pendidikan Dokter Spesialis-1 Ilmu Bedah Saraf Fakultas Kedokteran Universitas Hasanuddin pada tanggal 29 November 2023 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui

Pembimbing Utama

Dr. dr. Nasrullah, Sp.BS(K)

NIP 196505081996031001

Pembimbing Pendamping

dr. Dario Melwan, Sp.Rad(K)

NIP 197212152008121003

Pembimbing Pendamping

dr. Joko Hendarto, M.Biomed, Ph.D

NIP 198011272006041002

Ketua Program Studi

Dekan Fakultas Kedokteran



di Asadul Islam, Sp.BS(K)

NIP 1982031001

Prof. Dr. dr. Haerani Rasyid, M.Kes.Sp.PD-KGH.,Sp.GK

NIP 196805801996032001

PERNYATAAN KEASLIAN KARYA AKHIR

Yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Ahmad Ibrahim Rum
Nomor Mahasiswa : C205181001
Program Studi : Ilmu Bedah Saraf

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa karya akhir yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri, bukan merupakan pengambil alihan tulisan atau pemikiran orang lain. Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan karya akhir ini hasil karya orang lain, saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, 30 Desember 2023

Yang menyatakan,



Ahmad Ibrahim Rum



Optimized using
trial version
www.balesio.com

ABSTRACT

BACKGROUND: Pediatric vertebrae differ from adult vertebrae, which can complicate the evaluation of abnormalities. Developing vertebrae are more prone to trauma due to physiological changes. This study aims to determine the correlation between the Korpus, pedicles, and laminae vertebrae morphology with the child's age.

MATERIAL AND METHODS: A cross-sectional study was conducted on eligible pediatric patients who had undergone spinal CT scans between February and March 2023. Anatomy of the pedicle, lamina, and vertebral body at each cervical (n=16), thoracic level (n=24), and lumbar (n=15) were assessed in axial, sagittal, and oblique sections. The Pearson correlation test was used in this study.

RESULTS: Child age was positively correlated with lamina size of C3 ($r=0.605, p<0.05$), C4 ($r=0.638, p<0.05$), C5 ($r=0.537, p<0.05$) C6 ($r=0.751, p<0.05$), and C7 ($r=0.695, p<0.05$), and pedicle sizes of C3 ($r=0.545, p=0.029$) and C4 ($r=0.577, p<0.05$) in axial sections. In addition, the child's age was positively correlated with all sizes of the measurement parameters at each level in axial and sagittal sections ($r: 0.35-0.85, p<0.01$). Furthermore, the child's age was positively correlated with lamina size at L1 axial ($r=0.595, p=0.019$), pedicle size at L2 axial ($r=0.671, p<0.01$), lamina size ($r=0.721, p<0.05$) and pedicle ($r=0.608, p=0.016$) at L3 axial, and all measurement parameters at L4-L5 axial sections ($r:0.55-0.85, p<0.01$).

CONCLUSION: Increasing age in children is always followed by growth in the lamina, pedicle, and Korpus vertebrae structure. The transverse width of the pedicle is the dimension used as a reference for pedicle screw size.

KEYWORDS: Children, Cross-Sectional Studies, *Pedicle Screw*, Tomography, Vertebral Body, Pedicle and Lamina.



ABSTRAK

LATAR BELAKANG: Vertebra pediatrik berbeda dari vertebra orang dewasa dalam beberapa hal, yang mana ini dapat membuat evaluasi kelainan vertebra lebih menantang. Perubahan *osseus* fisiologis pada vertebra pediatrik yang sedang berkembang dapat dengan mudah menjadi faktor predisposisi terjadinya trauma. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui hubungan morfologi struktur korpus, pedikel, dan lamina dengan usia anak.

METODE: Sebuah studi *cross-sectional* dilakukan pada pasien anak yang memenuhi syarat yang telah menjalani CT scan vertebra antara Februari dan Maret 2023. Anatomi pedikel, lamina, dan korpus vertebra pada setiap tingkat serviks (n=16), toraks (n=24), dan lumbal (n=15) dievaluasi pada potongan aksial dan sagital. Uji korelasi Pearson digunakan dalam penelitian ini.

HASIL: Usia anak berkorelasi positif dengan ukuran lamina C3 ($r=0,605, p<0,05$), C4 ($r=0,638, p<0,05$), C5 ($r=0,537, p<0,05$) C6 ($r=0,751, p<0,05$), dan C7 ($r=0,695, p<0,05$) serta ukuran pedikel C3 ($r=0,545, p=0,029$) dan C4 ($r=0,577, p<0,05$) pada potongan aksial. Selain itu, usia anak berkorelasi positif dengan seluruh ukuran lamina, pedikel, dan korpus vertebra torakal level upper, middle, dan lower pada semua potongan aksial dan sagittal ($r:0,35-0,85, p<0,01$). Selanjutnya, usia anak berkorelasi positif dengan ukuran lamina pada L1 potongan aksial ($r=0,595, p=0,019$), ukuran pedikel pada L2 potongan aksial ($r=0,671, p<0,01$), ukuran lamina ($r=0,721, p<0,05$) dan pedikel ($r=0,608, p=0,016$) pada L3 potongan aksial, dan semua parameter pengukuran pada L4-L5 potongan aksial ($r:0,55-0,85, p<0,01$).

KESIMPULAN: Pertambahan usia anak selalu diikuti dengan pertumbuhan struktur lamina, pedikel, dan Korpus verbebra. Lebar pedikel secara melintang merupakan dimensi yang digunakan sebagai acuan ukuran *screw* pedikel.

KATA KUNCI: Anak, *Pedicle Screw*, Studi *cross-sectional*, Tomografi, Korpus Vertebra, Pedikel, and Lamina



KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas berkat dan kemurahan-nya, sehingga saya dapat menyelesaikan karya akhir ini sebagai salah satu prasyarat dalam Program Pendidikan Dokter Spesialis-I Ilmu Bedah Saraf di Fakultas Kedokteran Universitas Hasanuddin, Makassar.

Saya menyadari banyak hambatan dan tantangan yang saya hadapi dalam penyusunan karya akhir ini tetapi atas bantuan yang tulus, bimbingan, dan dorongan semangat yang diberikan pembimbing saya, Dr. dr. Nasrullah Mustamir, Sp.BS(K), dr. Dario Agustinus Nelwan, Sp.Rad(K), dan dr. Joko Hendarto, M. Biomed, Ph.D serta penguji saya Prof. Dr. dr. Andi Asadul Islam, Sp.BS(K), Dr. dr. Djoko Widodo, Sp.BS(K), Dr. dr. Willy Adhimarta, Sp.BS(K), dan Dr. dr. Wahyudi, Sp.BS(K) sehingga penulisan karya ini dapat diselesaikan.

Pada kesempatan ini saya ingin menyampaikan rasa terima kasih dan penghargaan yang sebesar-besarnya kepada Prof. Dr. Jamaluddin Jompa, M.Si selaku Rektor Universitas Hasanuddin; Prof. Dr. dr. Haerani Rasyid, Sp.PD-KGH Sp.GK M.Kes, sebagai Dekan Fakultas Kedokteran Unhas; Dr. dr. Takdir Misbah, Sp.An-KMN selaku manajer Program Studi Dokter Spesialis Universitas Hasanuddin, Prof. Dr. dr. Andi Asadul Islam, Sp.BS(K), selaku Ketua Program Studi Ilmu Bedah Saraf Universitas Hasanuddin, Dr. dr. Willy Adhimarta, Sp.BS(K) sebagai Sekretaris Program Studi Ilmu Bedah Saraf Universitas Hasanuddin, yang telah memberikan kesempatan kepada saya untuk menyelesaikan Program Pendidikan Dokter Spesialis-I Ilmu Bedah Saraf di Fakultas Kedokteran Universitas



'din.

ima kasih kepada pada guru-guru saya, seluruh Guru Besar dan Staf Departemen Ilmu Bedah Universitas Hasanuddin, khususnya kepada

seluruh Staf Pengajar Divisi Bedah Saraf Prof. Dr. dr. Andi Asadul Islam, Sp.BS(K), Dr. dr. Djoko Widodo, Sp.BS(K), Dr. dr. Nasrullah Mustamir, Sp.BS(K), Dr. dr. Willy Adhimarta, Sp.BS(K), (Alm) Dr. dr. Andi Ihwan, Sp.BS(K), dan Dr. dr. Wahyudi, Sp.BS(K) yang telah dengan sabar mendidik dan membimbing saya untuk meningkatkan ilmu dan keterampilan pada diri saya.

Terima kasih kepada para sejawat Residen Bedah Saraf Fakultas Kedokteran Universitas Hasanuddin yang telah memberikan bantuan, semangat dan doa sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik. Secara khusus saya ucapkan terima kasih kepada Ibu Fifi Noviani Madjid, AMD, dr. Rais Al-'Abqary, dr. Abdul Wahab Rasyid, dr. Nailul Humam, dr. Ahmad Yasin, dr. Muh. Ismail Pratama, dan dr. Kelvin; terima kasih untuk segala bantuan dan dukungan yang telah diberikan. Tidak lupa pula saya ucapkan limpah terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu namun tidak dapat saya sebutkan satu persatu.

Terima kasih yang istimewa saya haturkan kepada Ayahanda (Alm) dr. H. Muh. Rum Limpo, Sp.B dan Ibunda Indaryati Fudhail, S.Si, Apt, Ayah Mertua Prof. Dr. Syarifuddin Ondeng, M.Ag dan dan Ibu Mertua Hj. Nurzahira Said, S.Pd, kepada istriku tercinta dr. Dzatur Rizqi Fathienah Syarifuddin dan anak-anakku Ahmad Zafran Aldzakiy Ibrahim dan Almahyra Zerina Adeeva Ibrahim. Kepada saudara-saudariku dr. Aisyah Prima Putri dan Ahmad Azhar Kurniawan dan keluarga besar yang senantiasa telah memberikan dukungan, semangat, dan doanya kepada dalam menyelesaikan penelitian saya ini.

Saya sangat menyadari bahwa penelitian kami ini masih jauh dari sempurna, h banyak kekurangan. Oleh karena itu kami sangat mengharapkan adanya sarah yang membangun dari semua pihak dalam memperbaiki penelitian



Akhir kata semoga tesis ini bermanfaat dalam perkembangan ilmu Bedah Saraf dimasa mendatang.

Makassar, 30 Desember 2023

Penulis

Ahmad Ibrahim Rum



Optimized using
trial version
www.balesio.com

DAFTAR ISI

COVER	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR GAMBAR	iii
DAFTAR TABEL	v
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Pendahuluan.....	5
2.2 Perkembangan Vertebra	6
2.3 Anatomi Fungsional Vertebra	19
2.4 Biomekanika Vertebra Anak	40
2.5 Modalitas Imaging.....	50
BAB III KERANGKA PENELITIAN.....	51
3.1 Kerangka Teori	51
3.2 Kerangka Konsep	52
BAB IV METODE PENELITIAN.....	53
4.1 Desain Penelitian	53
4.2 Lokasi dan Waktu	53
4.3 Populasi dan Sampel Penelitian	53
Perkiraan Besar Sampel	53
Kriteria Inklusi dan Eksklusi	54
Identifikasi Variabel.....	54



4.7	Definisi Operasional.....	54
4.8	Prosedur Penelitian.....	56
4.9	Izin Penelitian dan Ethical Clearance	56
4.10	Pengolahan Data	56
4.11	Alur Penelitian.....	57
BAB V HASIL PENELITIAN.....		58
5.1	Vertebra Cervikal	58
5.2	Vertebra Thorakal	68
5.2	Vertebra Lumbal	81
BAB VI PEMBAHASAN		94
6.1	Pertumbuhan Vertebra.....	94
6.2.	Faktor yang menjadi prediktor vertebra pediatrik.....	98
6.3.	Korelasi pertumbuhan vertebra cervical berdasarkan usia dan jenis Kelamin	100
6.4	Korelasi pertumbuhan vertebra thorakal berdasarkan usia dan jenis Kelamin	102
6.5	Korelasi pertumbuhan vertebra lumbar berdasarkan usia dan jenis Kelamin	104
BAB VII KESIMPULAN DAN SARAN		102
7.1	Kesimpulan	107
7.2	Saran	107
DAFTAR PUSTAKA.....		108



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.	Masa triploblastik	6
Gambar 2.	Somites pada embrio manusia	7
Gambar 3.	Potongan melintang regio thorakal somite.....	8
Gambar 4.	Radiografi lateral vertebra pada usia 34 minggu	10
Gambar 5.	Pusat osifikasi sekunder pada vertebra thorakal	11
Gambar 6.	Penyatuan arkus vertebra janin ke sentra pada sendi neurosentral vertebra cervical, thorakal dan lumbal	11
Gambar 7.	Sinkondosis neurosentral pada kolumna vertebra.....	12
Gambar 8.	Kartilaginosa vertebra setelah minggu 30.....	16
Gambar 9.	Lebar transversal pedikel berdasarkan level	21
Gambar 10.	Lebar sagital pedikel berdasarkan level.....	21
Gambar 11.	Sudut transversal pedikel berdasarkan level	22
Gambar 12.	Sudut sagital pedikel berdasarkan level	22
Gambar 13.	Anatomi atlas (C1)	24
Gambar 14.	Anatomi axis (C2)	24
Gambar 15.	Ligamentum eksternal kraniocervikal tampak anterior.....	24
Gambar 16.	Ligamentum eksternal kraniocervikal tampak posterior.....	25
Gambar 17.	Ligamentum eksternal kraniocervikal tampak lateral	25
Gambar 18.	Ligamentum internal kraniocervikal tampak posterior.....	25
Gambar 19.	Ligamentum internal kraniocervikal tampak posterior setelah membran tectoria diangkat.....	26
Gambar 20.	Ligamentum internal kraniocervikal tampak posterior setelah ligamentum cruciate diangkat	26
Gambar 21.	Ligamentum internal kraniocervikal tampak superior setelah ligamentum cruciate diangkat	26
	22. Anatomi kolumna vertebra cervical empat (C4).....	28
	23. Anatomi kolumna vertebra cervical tiga dan empat (C3 & C4).....	28



Gambar 24. Anatomi kolumna vertebra servikal tujuh (C7).....	28
Gambar 25. Anatomi kolumna vertebra thorakal enam (T6).....	30
Gambar 26. Anatomi kolumna vertebra thorakal tujuh, delapan, dan sembilan (T7, T8 dan T9).....	30
Gambar 27. Anatomi kolumna vertebra thorakal duabelas (T12).....	30
Gambar 28. Anatomi regio lumbal	32
Gambar 29. Perubahan posisi regio lumbal yang berefek pada volume kanalis spinalis	32
Gambar 30. Anatomi kolumna vertebra lumbal tiga dan empat (L3 & L4).....	33
Gambar 31. Anatomi sacrum dan coccygeus	33
Gambar 32. Diskus intervertebralis.....	35
Gambar 33. Ligamentum pada vertebra	36
Gambar 34. Panjang momentum ligamentum vertebra	37
Gambar 35. Sistem koordinat x, y dan z	42
Gambar 36. Ilustrasi sifat struktur dan material vertebra	42
Gambar 37. Data geometrik pertumbuhan vertebra servikal	43
Gambar 38. Mineralisasi tulang kortikal dan trabekular berdasarkan periode pertumbuhan	45
Gambar 39. Variasi sudut sendi facet berdasarkan usia	46
Gambar 40. Pertumbuhan diskus intervertebralis (anulus fibrosis dan nucleus) pada anak usia satu tahun, tiga tahun, enam tahun dan dewasa (dari kiri kekanan).....	47
Gambar 41. Respon medulla spinalis pada gerakan fleksi dan ekstensi.....	48
Gambar 41. Kerangka teori.....	51
Gambar 42. Kerangka konsep	52
43. Alur penelitian	57
44. Ukuran Lamina (Axial) berdasarkan kategori usia	92
45. Ukuran Pedikel (Axial) berdasarkan kategori usia.....	92



Gambar 46. Ukuran Korpus AP (Axial) berdasarkan kategori usia.....	93
Gambar 47. Ukuran Korpus Transversal (Axial) berdasarkan kategori usia.....	93
Gambar 48. Ukuran Korpus (Sagital) berdasarkan kategori usia	93
Gambar 49. Ukuran Pedikel (Sagital) berdasarkan kategori usia.....	93

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Deskripsi subjek vertebra cervical berdasarkan usia.....	58
Tabel 2. Deskripsi subjek vertebra cervical berdasarkan jenis kelamin.....	58
Tabel 3. Perbedaan rerata diameter lamina, pedikel, Korpus AP, Korpus transversal, dan sudut pada vertebra cervical pediatrik.....	59
Tabel 4. Perbedaan perkembangan cervical berdasarkan usia.....	61
Tabel 5. Perbedaan antara usia pada tingkat vertebra cervical.....	62
Tabel 6. Perbedaan perkembangan vertebra cervical berdasarkan jenis kelamin	63
Tabel 7. Uji Beda Rerata Parameter Sagital Cervikal.....	64
Tabel 8. Perbedaan perkembangan vertebra cervical berdasarkan usia	65
Tabel 9. Perbedaan perkembangan cervical berdasarkan jenis kelamin	66
Tabel 10. Korelasi usia dan jenis kelamin terhadap perkembangan vertebra pediatrik	67
Tabel 11. Deskripsi subjek vertebra thorakal berdasarkan usia	68
Tabel 12. Deskripsi subjek vertebra thorakal berdasarkan jenis kelamin	69
Tabel 13. Uji beda rerata vertebra thorakal potongan axial	70
Tabel 14. Perbedaan perkembangan vertebra thorakal berdasarkan usia....	70
. Hasil uji post-hoc vertebra thorakal.....	72
. Perbedaan perkembangan vertebra thorakal berdasarkan jenis	72



Tabel 17. Beda Rerata vertebra thorakal potongan sagital	74
Tabel 18. Perbedaan perkembangan vertebra thorakal berdasarkan usia.....	75
Tabel 19. Hasil uji post-hoc vertebra thorakal potongan sagital	76
Tabel 20. Perbedaan perkembangan vertebra thorakal sagital berdasarkan jenis kelamin.....	77
Tabel 21. Korelasi usia dan jenis kelamin terhadap perkembangan vertebra Pediatrik thorakal	79
Tabel 22. Deskripsi subjek vertebra lumbal berdasarkan usia	81
Tabel 23. Deskripsi subjek vertebra lumbal berdasarkan jenis kelamin	81
Tabel 24. Uji beda rerata vertebra lumbal.....	82
Tabel 25. Perbedaan perkembangan vertebra lumbal berdasarkan usia	84
Tabel 26. Hasil uji post-hoc vertebra lumbal.....	86
Tabel 27. Perbedaan perkembangan vertebra lumbal berdasarkan jenis kelamin	88
Tabel 28. Uji Beda Rerata vertebra lumbal.....	89
Tabel 29. Perbedaan perkembangan vertebra lumbal berdasarkan usia	90
Tabel 30. Perbedaan perkembangan vertebra lumbal potongan sagital berdasarkan jenis kelamin	91
Tabel 31. Korelasi usia dan jenis kelamin terhadap perkembangan vertebra lumbal	92



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Vertebra pediatrik berbeda dari vertebra orang dewasa dalam beberapa hal, yang mana ini dapat membuat evaluasi kelainan vertebra lebih menantang. Perubahan *osseus* fisiologis pada vertebra pediatrik yang sedang berkembang dapat dengan mudah menjadi faktor predisposisi terjadinya trauma. Kelemahan ligamen juga memungkinkan rentang pergerakan yang lebih besar pada vertebra pediatrik dibanding orang dewasa. Mekanisme bantalan beban kraniocervikal pada anak-anak membuat mereka rentan terhadap pola cedera vertebra yang berbeda dari orang dewasa. Memahami anatomi normal dari vertebra pediatrik pada pencitraan merupakan hal yang sangat substansial untuk diagnosis yang akurat.¹

Medulla spinalis dan kolumna vertebra berkembang dari serangkaian proses embriologis yang kompleks. Penting untuk kita memahami setiap tahapan perkembangan, dan mempelajari bagaimana hubungannya satu sama lain. Banyak malformasi pada vertebra yang dapat dipahami dengan lebih baik dalam konteks embriologi dan penyimpangan dari perkembangan normal yang menyebabkan malformasi. Penanganan cedera dan penyakit yang berhubungan dengan vertebra, terutama pada anak dan bayi, dapat dilakukan dengan pengetahuan tentang pertumbuhan dan perkembangan vertebra.²

Kolumna vertebra terdiri dari 33 segmen yang saling tersusun membentuk kurvatura vertebra. Setiap segmen kolumna vertebra memiliki komponen fungsional utama yaitu untuk menahan beban tubuh, membentuk lengkung vertebra, melindungi medulla spinalis (*neuroprotective*), dan prosesus transversus untuk perlekatan ligamen. Vertebra secara keseluruhan terdiri dari tujuh kolumna vertebra servikal, dua belas kolumna vertebra thorakal, dan lima kolumna vertebra lumbal, lima kolumna vertebra yang menyatu di daerah sakral dan empat kolumna vertebra yang menyatu membentuk tulang ekor.

ma vertebra di setiap regio memiliki fitur unik yang membantunya alankan fungsi utamanya. Kolumna vertebra saling berhubungan oleh i facet yang memungkinkan mobilitas vertebra. Diskus intervertebralis



memisahkan masing-masing tulang yang memberikan dukungan tambahan untuk menahan beban.³

Cedera pada vertebra jarang terjadi pada anak-anak hanya sekitar 2% sampai 5% dari semua cedera vertebra.⁹⁻¹³ Lebih dari 80% cedera terjadi pada vertebra servikal, sedangkan persentase trauma pada vertebra servikal pada orang dewasa hanya sekitar 30% sampai 40%.¹⁴ Distribusi cedera, *timing* ketika terjadi cedera, berbeda menurut usia. Anak-anak berusia kurang dari 8 tahun biasanya mengalami cedera servikal bagian atas karena sifat anatomi dan biomekanik vertebra pediatrik yang belum matang, sedangkan pada anak-anak yang lebih tua yang biomekaniknya lebih mirip dengan orang dewasa, rentan terhadap cedera servikal bagian bawah. Diperkirakan juga bahwa cedera pada vertebra thorakal dan lumbal sekitar 6% sampai 9% dari semua trauma pada vertebra pediatrik.¹⁵ Setelah usia 14 tahun, ditemukan bahwa kejadian cedera servikal menurun dan menyerupai pola pasien dewasa.¹⁶ Pola distributif ini dapat diakibatkan oleh beberapa faktor seperti ukuran kepala, elastisitas jaringan lunak, dan struktur penunjang, dan *alignment* sendi faset.^{17,18}

Radiografi masih terus menjadi pemeriksaan utama pada vertebra pediatrik, meskipun kemajuan pesat juga pada pencitraan diagnostik lain. Radiografi memberikan informasi penting tentang alignment korpus vertebra, tinggi diskus intervertebralis, integritas sendi faset, pola trabekuler, dan kerusakan tulang kortikal. Computed tomography (CT) digunakan untuk menggambarkan kondisi patologis yang ditemukan pada radiografi polos konvensional. Karakteristik diagnostik, lokasi yang tepat dan ketidakstabilan fraktur atau kondisi yang berpotensi dapat dievaluasi.⁷⁰

Pada penelitian ini ditujukan untuk menilai morfologi struktur anatomi vertebra pediatrik yaitu korpus, pedikel dan lamina diharapkan dapat sebagai bahan rujukan klinis terutama pada kasus kelainan struktur atau perubahan struktur anatomi akibat proses trauma ataupun proses non-trauma untuk dilakukannya tindakan fusi vertebra dengan instrumentasi.

1.2 Rumusan Masalah



Berdasarkan uraian latar belakang diatas, maka dapat dirumuskan penelitian sebagai berikut: Bagaimana korelasi morfologi struktur korpus, pedikel dan lamina regio servikal, thorakal dan lumbal dengan usia berdasarkan gambaran CT scan pada vertebra pediatrik.

1.3 Tujuan Penelitian

1.3.1 Tujuan Umum

Untuk Mengetahui korelasi morfologi struktur korpus, pedikel dan lamina regio cervical, thorakal dan lumbal dengan usia berdasarkan gambaran ct scan pada vertebra pediatrik.

1.3.2 Tujuan Khusus

- a. Untuk mengetahui korelasi morfologi besar diameter anteroposterior dan lateral struktur korpus vertebra potongan axial; dan besar diameter struktur korpus vertebra potongan sagital dengan usia berdasarkan gambaran CT scan pada vertebra pediatrik level cervical, thorakal dan lumbal.
- b. Untuk mengetahui korelasi morfologi besar diameter dan panjang struktur pedikel dan lamina potongan axial; dan besar diameter struktur pedikel potongan sagital dengan usia berdasarkan gambaran CT scan pada vertebra pediatrik level cervical, thorakal dan lumbal.

1.3 Manfaat Penelitian

1.4.1 Manfaat Bagi Pengetahuan

Hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai tambahan data dan acuan pengembangan penelitian selanjutnya tentang diagnostik radiologi dimasa yang akan datang.

1.4.2 Manfaat Bagi Klinisi

- a. Hasil penelitian ini dapat memberikan informasi bagi klinisi tentang korelasi morfologi pertumbuhan struktur korpus, pedikel dan lamina regio cervical, thorakal dan lumbal dengan usia berdasarkan gambaran CT scan pada vertebra pediatrik.
- b. Hasil penelitian ini dapat menjadi pedoman bagi klinisi saat melakukan tindakan instrumentasi pada kolumna vertebra pediatrik.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pendahuluan

Perkembangan embriologi vertebra manusia merupakan proses yang sangat kompleks yang baru sebagian yang dipahami. Diferensiasi jaringan pluripoten embrio menyebabkan pembentukan awal struktur vertebra tersegmentasi terus menerus. Karena embrio sangat rentan terhadap malformasi dan gangguan perkembangan, setiap tahapan pembentukan sangat penting dipahami.³⁻⁶ Memahami berbagai tahapan proses perkembangan dapat membantu dalam memahami tidak hanya sindrom kongenital, tetapi juga kemungkinan peran perkembangan mengenai beberapa predisposisi proses degeneratif vertebra, biasanya dianggap sebagai kondisi “keausan” telah membantu dalam pemahaman kondisi ini.^{7,8}

Vertebra adalah tulang segmental yang tersusun membentuk kerangka aksial. Setiap columna vertebralis disatukan oleh serangkaian artikulasi intervertebralis yang membentuk dukungan yang fleksibel serta sebagai pelindung saraf (medulla spinalis dan saraf spinal). Vertebra terdiri dari 33 segmen columna vertebra, bagian vertebra yang bergerak terdiri dari 7 columna cervikal, 12 columna thorakal, 5 columna lumbal, 5 vertebra yang menyatu membentuk sakrum yang relatif kaku dan 4 empat tulang coccigeus menyusun tulang ekor.³

Cedera vertebra jarang terjadi pada anak-anak hanya sekitar hanya sekitar 2% sampai 5% dari semua cedera vertebra.⁹⁻¹³ Lebih dari 80% cedera terjadi pada vertebra cervikal, sedangkan persentase cedera vertebra cervikal pada orang dewasa hanya sekitar 30% sampai 40%.¹⁴ Distribusi cedera, *timing* ketika terjadi cedera, berbeda menurut usia. Anak-anak berusia kurang dari 8 tahun biasanya mengalami cedera cervikal bagian atas karena sifat anatomi dan biomekanik vertebra anak-anak yang belum matang, sedangkan pada anak-anak yang lebih tua yang biomekaniknya lebih mirip dengan orang dewasa, rentan terhadap cedera pada cervikal bagian bawah. Diperkirakan juga bahwa cedera vertebra thorakal dan lumbal sekitar 6% sampai 9% dari semua trauma vertebra anak.¹⁵ Setelah tahun, ditemukan bahwa kejadian cedera cervikal menurun dan pait pola pasien dewasa.¹⁶ Pola distributif ini dapat diakibatkan oleh

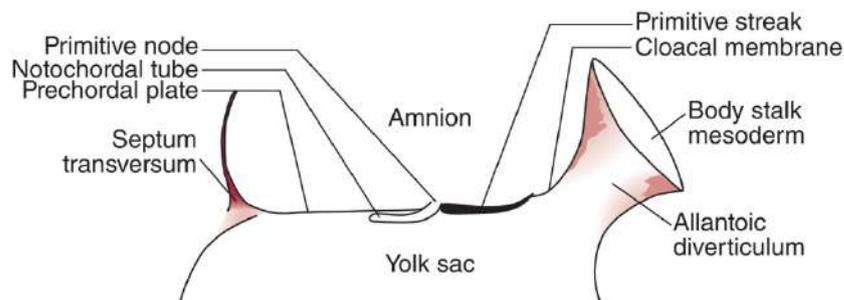


beberapa faktor seperti ukuran kepala, elastisitas jaringan lunak, dan struktur penunjang, dan *alignment* sendi.^{17,18}

Instrumentasi telah mengalami evolusi yang cepat selama 20 tahun terakhir, dengan berbagai pilihan rekonstruksi yang dihasilkan secara signifikan memperluas cakupan patologi vertebra yang dapat dikelola dengan sukses melalui intervensi bedah. Meskipun berbeda dalam desain dan indikasi bedah, sebagian besar implan yang tersedia saat ini memiliki tujuan yang sama untuk menstabilkan vertebra selama periode pasca operasi.¹⁹

2. 2 Perkembangan Vertebra

Perkembangan vertebra manusia dimulai pada hari ketujuh belas masa kehamilan. Dimulai dari tahap embrio triploblastik yang berbentuk seperti cakram (Gambar 1). Di salah satu sisi cakram adalah rongga amnion, dan di sisi lainnya adalah kantung *yolk sack*. Pada lapisan dorsal cakram (yang bersentuhan dengan amnion), terdapat sel epiblastik yang menyatu dan berinvasi ke dalam cakram untuk membentuk lubang atau nodus primitif. Setelah tertanam di dalam jaringan, kemudian akan terbentuk struktur seperti tuba yang memanjang ke arah kranial, disepanjang permukaan ventral cakram. Rongga tuba ini kemudian membuat hubungan dengan cairan amnion yang dikenal sebagai tuba *notochordal*.³



Gambar 1. Masa triploblastic.³

Pada titik ini, dinding ventral tuba *notochordal* bersentuhan dengan *yolk sac*, yang menyebabkan disintegrasi sel-sel ini. Sisa-sisa sel dinding dorsal dari tuba *notochordal* membentuk *notochordal plate* pada hari kesembilan belas. *Notochordal plate* kemudian matur dan menebal selanjutnya membentuk struktur

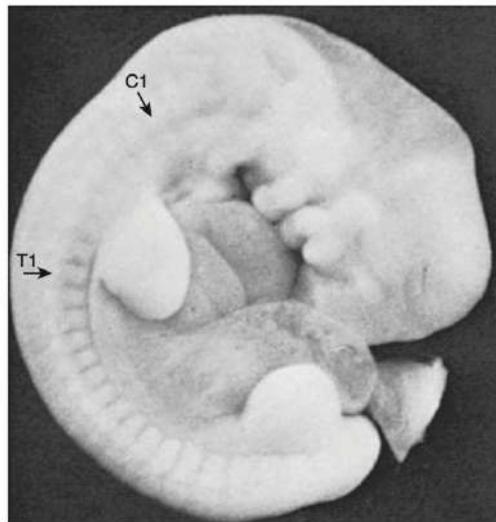
at yang dikenal sebagai *notochord*. Disaat bersamaan *Yolk sac* menutup sisi sementara antara amnion dan *yolk sac*. Kehadiran notochord aksi penebalan dalam sel-sel ektodermal di atasnya, yang akan menjadi euroektodermal. Proses penebalan ini akan membentuk *neural plate*.



Pada tahap ini, *neural plate* bersabung dengan rongga amnion. Pada hari kedelapan belas, *neural plate* mulai melengkung untuk membentuk tabung. Ketika ujung-ujungnya telah menyatu, akan membentuk tuba yang dikenal sebagai *neural tube*. Cairan amnion yang terperangkap di dalamnya akan menjadi *precursor* cairan spinal.³

Notochord terletak pada ventral *neural tube* digaris tengah. Jaringan mesodermal di kedua sisi struktur ini juga menyatu untuk membentuk kolom longitudinal. Pada hari kesembilan belas, ada tiga kolom berbeda di kedua sisi garis tengah: (1) kolom paraxial medial, yang berperan pada perkembangan somites; (2) kolom mesodermal intermediate, yang membentuk organ urogenital; dan (3) lempeng mesodermal lateral, yang membentuk rongga usus. Untuk memahami perkembangan vertebra, perhatian difokuskan pada kolom paraxial medial.³

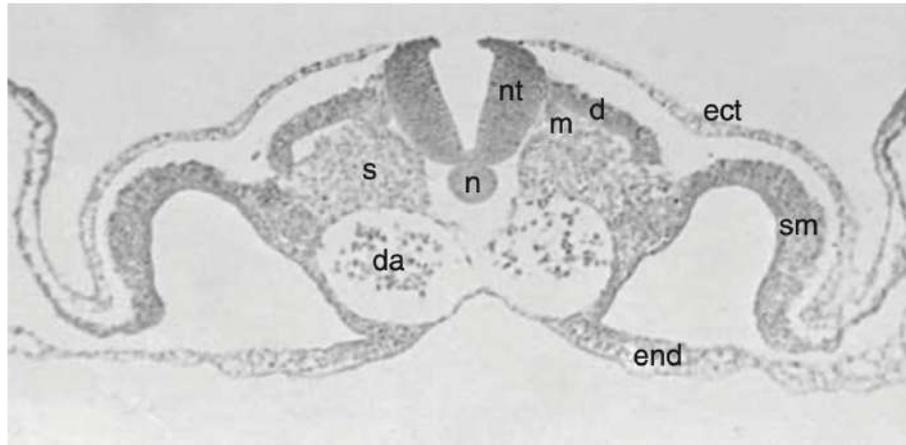
Somites tersusun di sepanjang aspek dorsal embrio yang mana bagian yang pertama kali terbentuk adalah aspek rostral (atau kranial) embrio, diikuti pembentukan kearah caudal untuk membentuk 42 hingga 44 segmen selama beberapa hari dari kolom paraksial medial yang sebelumnya ada. Karena somites berada pada permukaan dorsal maka akan terlihat seperti rangkaian peninggian manik-manik (Gambar. 2).³



Gambar 2. Somites pada embrio manusia.³



Pada somites sel-sel dorsolateralnya akan menjadi dermomyotome yang pada akhirnya akan berkembang menjadi kulit (lateral) dan otot (medial) yang melapisi vertebra. Sel-sel ventromedial somite akan menjadi sklerotom yang merupakan prekursor komponen kerangka (vertebra). *Neural tube* selanjutnya berkembang menjadi medulla spinalis (Gambar 3).³



Gambar 3. Somite potongan melintang regio thorakal. *Notochord* (n), *neural tube* (nt), *dermatome* (d), *myotome* (m), *sclerotome* (s), *somatic mesoderm* (sm), *endoderm* (end), *ectoderm* (ect), *dorsal aortae* (da).³

Sclerotome, *myotome*, *notochord*, dan *neural tube* secara bersamaan akan berkembang menjadi kompleks vertebra diskoligamen, otot-otot paraspinal, nukleus pulposus, dan elemen saraf. Perkembangan ini masih akan melalui berbagai tahapan perkembangan.³

Tahap *mesenchymal*:

Sel-sel mesenchymal dalam sclerotome terbagi menjadi tiga regio utama. Sel-sel mesenchymal pada regio pertama akan segera mengelilingi notochord yang merupakan prekursor untuk korpus vertebra dan anulus fibrosus dari diskus intervertebralis. Selanjutnya sel-sel mesenchymal pada regio kedua akan mengelilingi *neural tube* yang nantinya akan berkembang menjadi arkus posterior vertebra. Kemudian sel-sel mesenchymal pada regio ketiga akan membentuk jaringan lunak ekstraspinal.^{3,20}



Teori resegmentasi juga dikemukakan untuk menjelaskan lanjutan tahapan vertebra yakni menggambarkan pembagian setiap sclerotome bagian kranial dan bagian kaudal. Bagian kranial tersusun longgar,

sedangkan bagian kaudal terdiri dari sel-sel yang padat.²⁰ Sel-sel bermigrasi keatas untuk membentuk bagian annular dari diskus intervertebralis serta mengelilingi notochord. Sebagian besar sel padat bergabung dengan sel longgar dari sklerotom kaudal yang berdekatan. Perpaduan ini menciptakan centrum yang merupakan prekursor korpus vertebra. Centrum berkembang dari dua sklerotom yang berdekatan. Kondisi ini memiliki arti penting pada anatomi vertebra yang sedang berkembang. Awalnya, prekursor saraf segmental terletak dibagian tengah setiap sklerotom, sedangkan arteri segmental terletak pada junctional antara dua tingkat yang berdekatan. Setelah resegmentasi, saraf berjalan pada level diskus dan arteri berjalan pada mid-centrum.³

Tahap *cartilaginous*:

Sebelum usia enam minggu, prekursor embrio vertebra terdiri dari sel mesenchymal. Selanjutnya pada minggu keenam, pusat pembentuk kartilago, atau pusat kondrifikasi terbentuk didalam setiap vertebra yang sedang berkembang. Meskipun produksi kolagen tipe II didalam matriks ekstraseluler telah terdeteksi pada minggu kelima. Pada tahap ini kondrifikasi paling aktif terjadi, namun proses ini akan menurun setelah memasuki tahap osifikasi, tetapi produksinya tetap ada pada notochordal remnant dari nukleus pulposus. Dua pusat kondrifikasi terbentuk disetiap centrum yang pada akhirnya akan menyatu membentuk blok tulang rawan yang padat. Hemivertebra dapat terbentuk akibat kegagalan kondrifikasi pada sebagian korpus vertebra. Arteri segmental dikedua sisi sentrum kemudian akan menyatu dibagian tengah. Pusat kondrifikasi juga terbentuk disetiap arkus vertebra dan kemudian juga akan menyatu satu dengan lainnya pada garis tengah dan pada aspek posterior centrum.³

Selanjutnya, proses primitif kondrifikasi prosesus transversus dan prosesus spinosus yang berkembang dari arkus vertebra. Bukti terbaru menunjukkan bahwa kondrifikasi proses spinosus terbentuk dari Msx1 dan Msx2 (dua protein embriologik), menghasilkan sel mesenkim yang membutuhkan BMP4 untuk berdiferensiasi.²¹ Hubungan ini memperlihatkan interaksi penting protein primordial dalam mengatur perkembangan vertebra.³

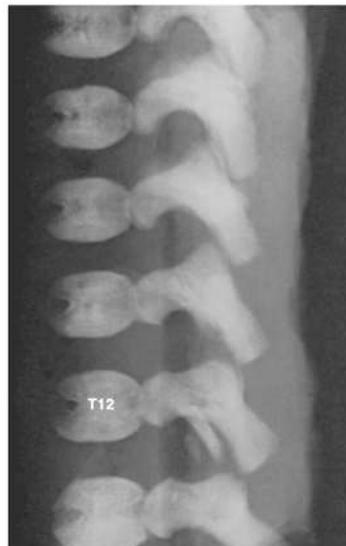
Centrum dan vertebra yang sedang berkembang memiliki notochord poros tengah. Bagian luar diskus dibentuk oleh sel-sel sklerotom yang longgarda, yang nantinya akan berkembang menjadi anulus fibrosus. asi notochord didalam centrum selama tahap resegmentasi dan



kondrifikasi kecuali disekitar diskus intervertebralis, dimana beberapa selnya tetap ada. Nukleus fibrosus adalah pengganti dari embriologi notochord.³

Tahap ossifikasi:

Pusat osifikasi primer berkembang pada minggu ke sembilan intrauterin. Pada vertebra pusat osifikasi terbentuk didalam template kondrifikasi. Terdapat tiga pusat osifikasi primer pada embrionik vertebra: satu berada pusat centrum dan yang lainnya berada pada sisi-sisi arkus vertebra. Proses persiapan osifikasi centrum dimulai dengan invasi pembuluh darah perikostal keanterior dan posterior centrum.²² Pembuluh darah ini membuat lakuna ventral dan dorsal yang mendukung proses awal osifikasi (Gambar 4). Osifikasi sentral dimulai pertama kali pada vertebra thorakal bawah yang kemudian berlanjut kearah kranial dan kaudal dari titik tersebut.²³

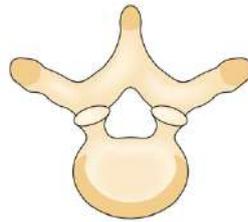


Gambar 4. Radiografi lateral vertebra pada usia 34 minggu.³

Pusat osifikasi sekunder vertebra berkembang setelah lahir yaitu setelah masa pubertas. Terdapat lima pusat osifikasi sekunder, yang pertama terletak pada ujung tip prosesus spinosus, satu disetiap ujung tip prosesus transversus, dan masing-masing satu cincin epifisis pada superior dan inferior endplate korpus vertebra. Proses perkembangannya ini terjadi pada usia sekitar 15 atau 16 tahun, dan akhirnya pusat osifikasi ini akan menyatu dibagian tengah korpus pada dekade ketiga (Gambar 5).²⁴ Prosesus transversus vertebra cervical khususnya C7 menunjukkan tambahan pusat osifikasi kosta yang dapat ilkan kosta cervical yang bermasalah; kondisi ini memperkuat konsep



bahwa semua ruas vertebra secara primitif memiliki potensi untuk membentuk tulang kosta.³



Gambar 5. Pusat osifikasi sekunder pada vertebra thorakal.³

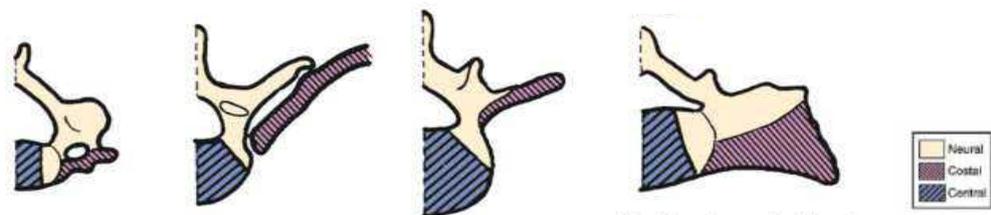
Sepasang sendi pada masa embriologi, yang dikenal sebagai sendi neurosentral, sendi ini tidak didapatkan pada vertebra yang telah berkembang sempurna. Terletak pada peralihan antara arkus vertebra dan sentrum tetapi lebih anterior dari cikal bakal pedikel. Meskipun bukan "sendi" yang sebenarnya, sendi ini memungkinkan ekspansi arkus vertebra dan kanalis spinalis seiring dengan pertumbuhan korpus vertebra. Ekspansinya paling cepat terjadi pada usia kehamilan 18 dan 36 minggu kehamilan.⁵ Saat lahir, diameter kanalis spinalis pada L1 hingga L4 sekitar 70% dari ukuran orang dewasa, sedangkan di L5 hanya 50%.⁵ Kondisi ini menunjukkan bahwa dapat terjadi perbedaan pertumbuhan pada setiap regio vertebra selama perkembangan janin. Dimensi vertebra dewasa dicapai pada usia 1 tahun pada regio L3 dan L4. Sendi neurosentral dapat menetap pada usia 3 hingga 6 tahun. Penyatuan arkus vertebra janin ke sentral terjadi dianterior pedikel, dilokasi sendi neurosentral. Korpus vertebra definitif mencakup lebih dari tulang yang berasal dari pusat osifikasi centrum, sehingga istilah korpus dan centrum tidak dapat dipertukarkan secara akurat (Gambar 6 dan 7).



Gambar 6. Penyatuan arkus vertebra janin ke sentra pada sendi neurosentral vertebra cervical, thorakal dan lumbal.³



Ciri-ciri anatomi vertebra lumbal dewasa yaitu "*lateral buttress*". Sagi dan kolega menganalisis secara histomorfologi vertebra lumbalis janin usia 8 sampai 20 minggu untuk menentukan urutan dan lokasi osifikasi pars interartikularis dari berbagai tingkatan. Mereka melaporkan beberapa temuan yaitu pars interartikularis mulai mengeras pada minggu kedua belas hingga ketiga belas masa kehamilan. Pada regio lumbal atas, osifikasi dimulai pada bagian posterior pedikel dan berlanjut ke arah kaudal, menciptakan osifikasi yang seragam dan trabekulasi pada pars interartikularis. Sebaliknya, pars interartikularis dari regio lumbal bawah dimulai ditengah pars interartikularis itu sendiri, meluas dari titik ini kemudian terhubung ke struktur disekitarnya. Sagi dan kolega menemukan bahwa hal ini menghasilkan osifikasi yang tidak merata. Temuan ini dapat membantu menjelaskan area lemah dalam pars interartikularis pada regio lumbal bawah dan mungkin menunjukkan bahwa ada predileksi prenatal untuk terjadinya *stress fracture* pada sebagian besar individu.⁷



Gambar 7. Sinkondosis neurosentral pada kolumna vertebra (cervikal, thorakal, lumbal, sakrum).³

Pada awal masa embrio, notochord merupakan templat kaku disekitar area yang nantinya akan berkembang menjadi vertebra yang berada disepanjang vertebra primordial. Studi pewarnaan imunohistokimia dari embrio 4 dan 5 minggu mengidentifikasi bahwa kompleks molekul matriks ekstraseluler sudah ada dalam selubung ini, termasuk glikosaminoglikan sulfat, asam hialuronat, ibronektin, laminin, tenascin, dan kolagen II.²⁵ Aggrekan, keratan sulfat, dan agregasi proteoglikan besar lainnya (yang ada pada vertebra matur) tidak didapatkan pada tahap ini, hal ini menunjukkan bahwa molekul matriks ekstraseluler ini akan muncul kemudian dalam perkembangan. Sel-sel notochord itu sendiri menunjukkan s terhadap transformasi *growth factor*- β (TGF- β), menunjukkan pengaruh or pertumbuhan ini pada matriks ekstraseluler yang sedang berkembang, tentukan pembuluh darah, kartilago, dan tulang.^{25,26} Gangguan pada jalur



TGF- β berimplikasi pada morfologi tulang yang abnormal dan kelemahan ligamen yang ditemukan pada sindrom Loeys-Dietz, mutasi autosomal dominan dari TGF-BR1 atau TGF-BR2. Pasien dengan sindrom ini, pertama kali dijelaskan pada tahun 2005, yaitu memiliki deformitas dan ketidakstabilan vertebra servikal.²⁷

Pada saat embrio berukuran 20 mm, notochord akan menjadi struktur yang tersegmentasi secara intrinsik diregio thorakal dan lumbal; pada saat embrio berukuran 30 mm, struktur ini juga terlihat diregio servikal. Segmentasi ini akan mengalami pembesaran fusiform pada diskus intervertebralis, sedangkan notochord akan menghilang secara perlahan pada area korpus vertebra yang sedang berkembang. Didalam korpus vertebra yang sedang berkembang, notochord akan meregang menjadi "*mucoïd streak*". Dengan pertumbuhan yang terus berlanjut, *mucoïd streak* ini juga perlahan akan menghilang dan hanya akan menyisakan tulang.³

Notochord berkembang di area diskus intervertebralis membentuk nukleus pulposus, hal ini telah dijelaskan secara rinci oleh Luschka.²⁸ Notochord merupakan sumber utama nukleus pulposus, dan telah terlihat secara histokimia dan autoradiografi bahwa sel notochordal terus berproliferasi dalam beberapa tahun setelah lahir.²⁹ Meskipun sel notochordal umumnya tidak didapatkan dalam nukleus pulposus manusia pada individu yang berusia lebih dari 5 tahun. Chordoma adalah pertumbuhan neoplastik abnormal dari sel-sel notochord yang tetap ada di dalam vertebra saat dewasa. Hal ini menunjukkan bahwa sisa sel notochordal dapat bertahan hingga usia paruh baya pada beberapa individu. Neoplasma ini dapat berkembang disepanjang jalur notochordal tetapi biasanya di daerah rostral (basisphenoid atau basiocciput) dan kaudal (regio sakrum).³

Area notochord sebelumnya telah dijelaskan terletak dianterior pusat perkembangan korpus vertebra. Hal ini telah diverifikasi oleh Nolting dan rekan,²³ yang mendeteksi adanya sisa-sisa jaringan notochordal pada anterior pusat kartilaginosa di 13 vertebra janin berusia 10 sampai 24 minggu. Temuannya semakin memperkuat bahwa penggunaan istilah sentrum dan korpus vertebra secara bergantian adalah tidak tepat.³

Pembentukan medulla spinalis dimulai pada hari ke-20, jaringan ektodermal di kedua sisi *neural plate* menjadi menebal dan mengerut. Area ini sebagai *neural crest*, yang berisi sel-sel yang pada akhirnya akan membentuk elemen-elemen neural. Jaringan mesenkim dibawah *neural crest* akan membentuk *neural fold* (lipatan saraf). Karena lipatan tumbuh ke arah garis tengah,



kedua *neural crest* bertemu dan menyatu pada hari kedua puluh dua. Kemudian *neural plate* yang berada dibawahnya juga membentuk tabung, yang dikenal sebagai *neural tube* yang dindingnya terdiri dari *neural plate*. *Neural tube* selanjutnya melakukan invaginasi ke dalam dorsum embrio. Pada hari kedua puluh enam, sel *neural crest* yang telah menyatu berinvaginasi ke dalam embrio dan membelah menjadi globula kanan dan kiri. Pembelahan ini kemudian dikenal sebagai *dorsal root ganglia* yang berbentuk oval dan telah ada sebelum fase osifikasi vertebra.³⁰

Pada minggu kelima, *neural tube* berubah menjadi bentuk berlian dan disebut *neural canal*. Sulcus limitans terbentuk antara bagian anterior (basal) dan posterior (alar), yang akan menjadi traktus motorik dan sensorik. *Dorsal root ganglion* terdiri dari sel-sel sensorik saja yang kemudian akan berkembang menjadi dua lengan. Satu lengan adalah perpanjangan menuju aspek posterior *neural canal*, yang pada akhirnya akan bergabung dengan lokasi kolumna posterior medula spinalis dimasa depan. Lengan lainnya adalah ekstensi kearah lateral yang menonjol dari ganglion dorsal untuk mencapai jaringan perifer.³

Pada minggu keenam, sulcus limitans menghilang, selain itu bagian basal dan alar bergabung bersama, namun masing-masing tetap mempertahankan fungsi motorik dan sensorik. *Ventral horn* terbentuk dibagian basal, yang tampak sebagai materi abu-abu (*gray matter*) terdiri dari badan sel motorik. Akson tumbuh dari *ventral horn* ke struktur perifer. Akson ini bergabung dengan *dorsal root ganglion* untuk membentuk saraf vertebra, yang keluar dari vertebra sebagai satu kesatuan.³

Pada minggu ketujuh hingga kedelapan, *white matter* akhirnya berkembang didalam medulla spinalis, mewakili pembentukan mielin disepanjang selubung akson pada traktus ascendens dan descendens. Bagian tengah medulla spinalis mempertahankan rongga kecil yang dilapisi dengan sel-sel ependym yang memungkinkan transfer cairan. Rongga ini dulunya diisi oleh amnion, analog embriologis awal dari cairan serebrospinal.³

Perkembangan elemen costa hanya menetap pada vertebra thorakal. Selama minggu kelima, prosesus costa terbentuk dikedua sisi centrum. Pada minggu ketujuh mulai terbentuk sendi costovertebral dan costotransversal. yang telah mengalami kondrifikasi mulai mengeras pada minggu n sebagai tulang rusuk (tulang kosta). Pada vertebra cervical, prosesus mordial bergabung dengan prosesus transversus untuk membentuk



tangkai costotransversal yang berisi foramen transversal yang merupakan jalur arteri vertebralis. Pada vertebra lumbal, prosesus costa tidak sepenuhnya berkembang, hanya sebagian berkembang membentuk prosesus transversus. Prosesus transversus embrionik membentuk prosesus mamillari (bukan prosesus transversus) yang pada akhirnya prosesus transversus dan prosesus mamillari akan menyatu. Pada vertebra sakrum, prosesus costa menyatu dengan prosesus transversus embrionik dan membentuk *sacral lateral mass*.³

Pembentukan diskus intervertebralis pada tahap perkembangan embrionik dimulai dengan terdapatnya peningkatan jumlah sel dibagian perifer diskus dan penurunan jumlah yang berdekatan dengan notokord. Saat embrio tumbuh melebihi panjang 10 mm, sel-sel di zona perifer menjadi memanjang dan tersusun dalam pola pipih. Ketika mencapai panjang 20 hingga 40 mm, serat kolagen mulai disintesis dan dikeluarkan dari sel, membentuk matriks ekstraseluler yang kaya akan kolagen. Serat kolagen tersusun mengikuti pola sel dan dalam pola pipih, memberikan diskus perifer (atau anulus fibrosus) karakteristik komposisinya berupa pita jaringan yang melingkar. Tidak ada fibers yang sepenuhnya tersambung membentuk seluruh pinggiran diskus; sebaliknya, banyak helai saling bertautan untuk menciptakan struktur yang sangat kuat. Bundel pipih ini tampak tersusun lebih padat pada anulus anterior dan kurang padat di anulus posterior disetiap kolumna vertebra yang sedang berkembang. Hal ini dapat menjelaskan kecenderungan ruptur diskus posterior pada pasien muda. Saat embrio memasuki tahap janin pada usia 2 bulan, jumlah sel mulai berkurang, namun produksi matriks ekstraseluler semakin meningkat.⁸

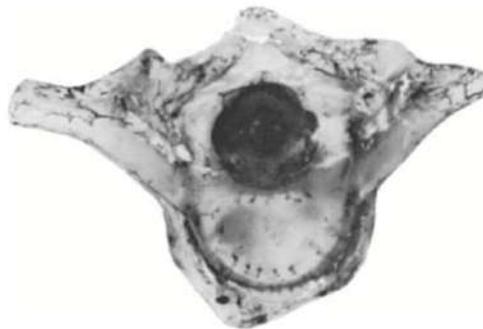
Pada awal periode janin, diskus memiliki tiga daerah yang berbeda: (1) *external fibrous zone*, (2) *internal hyaline zone* yang mengelilingi notochord, dan (3) *fibrocartilaginous zone*. Diskus tumbuh dengan pertumbuhan interstitial dan aposisional. Pertumbuhan interstitial mengacu pada pertumbuhan yang terjadi pada perlekatan luar anulus ke kartilago endplate. Pertumbuhan aposisi mengacu pada pertumbuhan yang terjadi secara longitudinal antara vertebra dan diskus. Serat lamellar membentuk perlekatan pada kartilago endplate nukleus pulposus yang membungkus struktur seperti gel secara sempurna. Lapisan luar anulus menjadi tertanam dalam ke bagian perifer kartilago endplate.³¹



aat endplate mengalami ossifikasi membentuk cincin apofisis serat yang masuk menjadi terikat erat. "Hubungan lemah" dalam kompleks ini antara cincin apofisis dan korpus vertebra yang berdekatan, sehingga

fraktur yang memisahkan apofisis lebih sering terjadi daripada ruptur diskus intervertebralis pada vertebra yang belum matur. Interval antara apofisis dan pusat osifikasi vertebra memberikan jalan masuk bagi pembuluh darah untuk memasok nutrisi ke endplate dan ke diskus intervertebralis melalui difusi. Pasokan ini menghilang setelah penyatuan cincin apofisis ke korpus vertebra.³¹

Pada diskus janin, anulus pulposus tampak mengalami vaskularisasi. Taylor dan Twomney menemukan bahwa pleksus pembuluh darah disekitar lingkaran diskus mengirimkan cabang ke dalam anulus.³¹ Sebaliknya, Whalen dan kolega melaporkan bahwa pembuluh darah ini hanya memasuki bagian terluar lamela anulus fibrosus.³² Selain pembuluh darah didalam anulus, terdapat juga celah didalam kartilago diantara kartilaginosa endplate dan diskus (Gambar 8) saluran ini kemungkinan besar tidak bertindak sebagai pembuluh darah melainkan sebagai sistem “*cul-de-sac*” sinusoidal yang mengantarkan faktor nutrisi melalui difusi.



Area dalam diskus mungkin tidak mengalami vaskularisasi pada setiap titik perkembangan. Diskus intervertebralis dewasa bersifat avaskular, menerima nutrisi hanya melalui difusi melalui endplate yang dibantu oleh aliran cairan ke dan dari nukleus pulposus. Avaskularitas ini kemungkinan muncul pada minggu ketujuh belas sampai keduapuluh empat.²²

Boszczyk dan kolega menggunakan ultrasonografi untuk mempelajari pergerakan 52 vertebra janin normal intrauterin, menemukan bahwa gerakan rotasi 4 hingga 10 derajat dapat diukur pada janin pada usia 9 hingga 36 minggu. Para peneliti ini menyimpulkan bahwa jumlah rotasi ini memengaruhi morfologi utama sendi dan bahwa tegangan torsional terjadi sebelum dan sesudah kelahiran.³³



Sebagian besar vertebra berkembang dengan cara yang sangat seragam. Pergerakan mekanis dari kranial dan kaudal vertebra menyebabkan proses memungkinkan transisi fungsional antara kepala dan tungkai bawah. Empat

miotom oksipital dapat dengan mudah diidentifikasi dalam embrio manusia dengan panjang 4 mm. Yang pertama berukuran kecil, yang kedua berukuran sedang, dan yang ketiga dan keempat ekuivalen dengan segmen servikal berikutnya. Saraf servikal pertama dan arteri hipoglosal dengan jelas membatasi segmen oksipital paling kaudal. Delapan serabut saraf hipoglosus dapat dilihat secara rostral dari arteri hipoglosus, dan ini biasanya bersatu menjadi empat, tetapi tidak kurang dari tiga serabut utama. Hal ini menegaskan bahwa keterlibatan setidaknya tiga segmen precervikal dalam pembentukan oksiput. DeBeer mengklaim bahwa total ada sembilan segmen mungkin terlibat dalam pembentukan cranium. Empat yang pertama tampak sangat primitif tetapi berkontribusi pada kranium preotik, sedangkan yang kelima belum sempurna karena tanpa myotome. Empat segmen terakhir merupakan prekursor dari kompleks oksipital.³⁴

Axis dan atlas, dianggap sebagai dua kolom yang berkembang penuh pada vertebra berasal dari tiga centra yang berbeda. O'Rahilly dan Meyer deskripsikan bahwa ketiga centra ini diberi nama komponen X, Y, dan Z.³⁵ Komponen X apikal merupakan bagian pertama yang bertumbuh ke foramen magnum dan membentuk sendi occipitoaxial yang kemudian dikenal sebagai proatlas dan merupakan bagian utama dari prosesus odontoid. Meskipun secara umum tertulis bahwa prosesus odontoid berkembang dari sentrum C1, hal ini mungkin tidak sepenuhnya benar.³⁶ Sisa dari syndesmosis occipitocervikal tampak jelas dengan pembentukan ligamen alar. Komponen Y menjadi sentrum atlas, dan komponen Z menjadi sentrum axis (C2). Komponen X, Y, dan Z terkait dengan serabut saraf servikal pertama, kedua, dan ketiga yang menjelaskan redundansi penomoran serabut saraf servikal atas. Muller dan O'Rahilly menentukan bahwa ketiga komponen ini benar-benar berkembang hanya dari dua setengah sklerotom dalam embrio.³⁷

Mempertimbangkan kompleksitas segmental yang terlibat dalam perkembangan artikulasi craniocervikal manusia normal, terkadang didapatkan anomali pada pemisahan, fusi, dan osikel bukanlah hal yang mengejutkan. Prosesus odontoid berasal dari bagian aksial oksipital dan dua sklerotom servikal atas dan terbentuk dari dua pusat osifikasi yang terpisah kemudian menyatu pada bulan ketujuh kehamilan.³⁸ Pusat osifikasi lainnya yang membentuk tip odontoid pada usia 3 sampai 6 dan menyatu sewaktu masa pubertas. Karena prosesus odontoid berkembang dari centrumnya sendiri, dapat dipahami bahwa prosesus odontoid dapat muncul sehingga anomaliya dimanifestasikan



sebagai spherule tulang yang tergantung di antara dua ligamen alar tanpa ada hubungan tulang yang jelas dengan korpus C2. Os odontoideum telah diteorikan terkait dengan cedera sebelumnya pada prosesus odontoid yang dapat bermanifestasi secara klinis sebagai nyeri leher, mielopati, atau bahkan kematian mendadak. Perkembangan embriologiknya juga membantu menjelaskan daerah didasar prosesus odontoid yang menjadi predisposisi nonunion setelah fraktur *displaced*.³⁸

Anomali morfologi odontoid telah dijelaskan bahwa disebabkan akibat gangguan diawal masa perkembangan. Tidak adanya integrasi pada garis tengah dari pusat osifikasi primer dapat terbentuk prosesus odontoid yang bifid yang dapat menyebabkan ketidakstabilan kraniocervikal. Selain itu, kecenderungan bentuk prosesus odontoid dapat dipengaruhi oleh traksi ligamen apikal pada tip prosesus odontoid selama perkembangan kraniocervikal.³⁹ Posisi prosesus odontoid yang lebih kearah kaudal telah dijelaskan pada pasien dengan malformasi Chiari I.⁴⁰

Varian yang paling sering muncul adalah *occipital condyle* pada midline yang juga dikenal sebagai tuberkulum basilar. Struktur ini menjadi proyeksi pada basion (titik pusat anterior) foramen magnum. Terkadang struktur tuberkulum ini berbentuk bulat, tetapi dalam kasus yang lebih kompleks terdapat facet artikular yang mengikat tip prosesus odontoid membentuk diarthrosis (sendi) yang sebenarnya. Terkadang facet accesorius terletak lebih kearah lateral dari pusat proyeksi.⁴¹

Ossicles yang tidak menyatu "*floating*" dapat terjadi pada syndesmosis kraniocervikal. Bentuk yang bervariasi, biasanya seukuran kacang polong yang terjadi diantara basion dan tip dari prosesus odontoid (saat prosesus odontoid telah terbentuk sempurna) dikenal sebagai Bergmann ossicle yang kemungkinan besar merupakan turunan dari varian mesenkim ante-proatlas. Juga perlu dicatat bahwa dapat terbentuk osikel kecil antara tepi anterior foramen magnum dan arkus anterior atlas didalam membran atlanto-oksipital anterior yang diyakini bahwa ini merupakan manifestasi dari potensi hipokordal somit oksipital (ante-proatlas).⁴²

Osifikasi korpus vertebra sakral bersifat unik karena selain zona ossifikasi sentral tunggal, dua lempeng epifisis sejati juga menyediakan osifikasi tambahan pada permukaan superior dan inferior setiap segmen. Pusat untuk tiga vertebra perior terlihat pada minggu ke-9, sedangkan pusat-pusat untuk segmen dan kelima tidak muncul sampai minggu ke-24. Setiap arkus vertebra menunjukkan pusat konvensional bilateral, tetapi sebagai tambahan enam



pusat menghasilkan alae sakral. Antara minggu 24 dan 32, pusat-pusat ini muncul anterolateral ke foramen sakral anterior dari tiga vertebra sakral atas.³

Pada awal tahun pertama setelah kelahiran, vertebra sakralis masih dipisahkan oleh diskus intervertebralis, dan dua vertebra terbawah adalah yang pertama menyatu pada akhir masa remaja. Sebelum ini, pusat ossifikasi untuk lempeng epifisis superior dan inferior tubuh muncul dan antara usia 18 dan 20 tahun, lempeng epifisis lateral terbentuk pada permukaan aurikular alae sakral. Pada pertengahan dekade ketiga, seluruh tulang sakrum menyatu, meskipun sisa-sisa intervertebral plate menetap sepanjang hidup. Hal ini dapat divisualisasikan pada potongan sagital atau pada radiografi yang diambil pada sudut anteroposterior yang tepat.³

Segmen coccygeal tidak memiliki ekuivalen arkus neural dan membentuk pusat osifikasi tunggal untuk tubuhnya. Hal ini pertama kali muncul sebelum usia 5 tahun, dan tiga pusat osifikasi lainnya mengeras selama interval 5 tahun berturut-turut.³

2. 3 Anatomi Fungsional Vertebra

Vertebra manusia merupakan struktur kompleks yang bekerja sama secara harmonis dan dinamis yang terdiri dari tulang, cartilago, sendi, ligamen, otot, dan elemen saraf. Vertebra manusia sebagian besar berkembang intrauterin. Proses terbentuknya kurvatur atau kelengkungan pada vertebra ini terbagi atas proses kelengkungan primer dan sekunder. Kelengkungan primer berkembang pada masa intrauterin membentuk kyphosis daerah toraks dan sakral. Kelengkungan ini terbentuk oleh karena korpus vertebra yang berbentuk baji, dimana tinggi anterior korpus vertebra lebih kecil dibanding tinggi posterior. Perkembangan kelengkungan primer ini berlanjut hingga awal usia kanak-kanak. Selanjutnya perkembangan kelengkungan sekunder yang membentuk lengkung lordosis di daerah cervikal dan lumbal, lengkungan ini semakin signifikan karena adanya gaya gravitasi yang diciptakan oleh berat kepala dan postur tegak. Kelengkungan area cervikal dan lumbal diakibatkan oleh diskus intervertebral yang berbentuk baji, dimana ketinggian anterior dari diskus lebih besar dari ketinggian posterior.



kelengkungan normal ini terbentuk pada bidang sagital. Terentuknya ngan normal vertebra ini memungkinkan kita untuk menatap lurus pada bidang horizontal saat berdiri dalam posisi tegak, peningkatan as, dan *shock absorbance*. Perkembangan anatomi dan postur vertebra

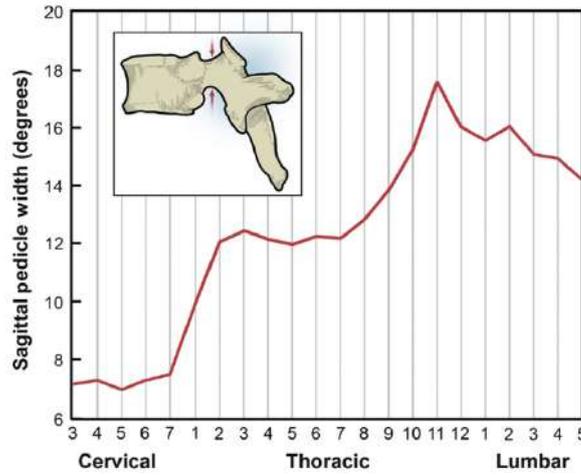
bersifat dinamis dan berbeda-beda pada setiap individu. Variasi antara diskus intervertebralis dan korpus vertebra dapat terjadi akibat anomali kongenital, proses degeneratif dan pembentukan osteofit, cedera traumatik, gangguan neurologis, dan ketidakseimbangan otot-otot paraspinal. Variasi ini dapat mengakibatkan ketidakseimbangan dan kondisi patologi pada vertebra. Namun dengan adanya sifat fleksibilitas dan dinamis dari vertebra sehingga mampu mengkompensasi abnormalitas atau kelainan bentuk secara signifikan.⁴³

Bentuk vertebra yang begitu kompleks berfungsi untuk memberikan stabilitas pada vertebra, selain itu juga memberi *support* dan perlindungan untuk medulla spinalis dan saraf spinal. Tulang cancellous yang ditemukan dibagian dalam trabekula memungkinkan dukungan mekanis yang kuat dan membatasi berat vertebra. Semua struktur yang sejajar dengan korpus vertebra bertindak untuk menahan beban kompresi. Kolum anterior berfungsi untuk memindahkan berat badan ke panggul saat berdiri dalam posisi tegak. Karena fungsinya dalam menahan beban, korpus vertebra bertambah besar dari regio cervical ke lumbal. *Endplate* vertebra, terdiri dari sekitar 1,3 mm tulang kortikal, bagian terkuat berada ditepi dan bagian terlemah berada ditengah. Elemen dorsal vertebra berfungsi untuk melindungi medulla spinalis. Elemen dorsal juga berfungsi sebagai *tension band* dan pengungkit, mentransfer kontraksi otot otot paraspinal melalui kolum anterior dan tengah vertebra. Elemen dorsal tulang termasuk pedikel, yang muncul dari aspek superior korpus vertebra dan membentuk dinding lateral kanalis spinalis. Dari regio cervical ke daerah midthoracic, lebar transversal pedikel secara bertahap menurun, dan kemudian meningkat dari daerah midthoracic ke lumbal (Gambar 9). Lebar sagital pedikel meningkat dari regio cervical ke thoracolumbal dan kemudian menurun pada regio lumbal (Gambar 10). Dari regio cervical ke thoracolumbal, sudut transversal pedikel menurun, dan meningkat pada regio lumbal (Gambar 11). Sudut pedikel sagital merupakan pertimbangan terakhir berkenaan dengan anatomi pedikel; itu menjadi cukup curam diregio thoraks dan thoracolumbal (Gambar 12). Lamina memanjang dari pars interartikularis dan menyatu untuk membentuk dinding dorsal kanalis spinalis. Persimpangan lamina dan tempat prosesus spinosus muncul, mendukung stabilitas fungsional vertebra karena perlekatannya pada ligamen dan otot. Setiap segmen vertebra terhubung

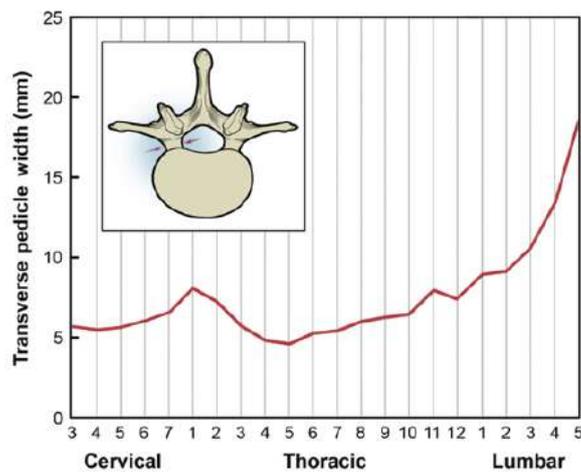
dan berikutnya melalui sendi facet bilateral. Anatomi sendi facet bervariasi kan regio vertebra tersebut sesuai fungsi gerakannya. Sendi facet juga



bersifat dinamis sesuai bebannya dengan peningkatan beban pada keadaan ekstensi dibanding fleksi.⁴³

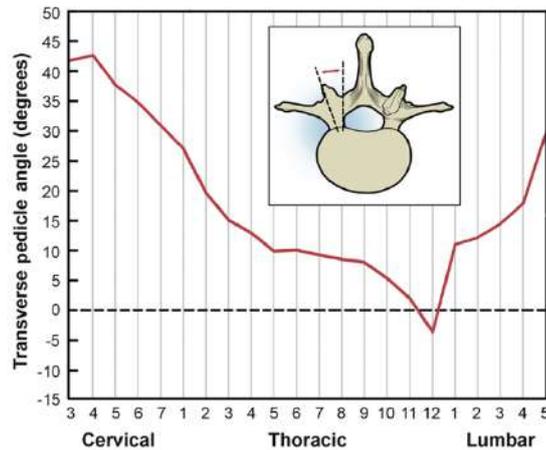


Gambar 9. Lebar transversal pedikel berdasarkan level.⁴³

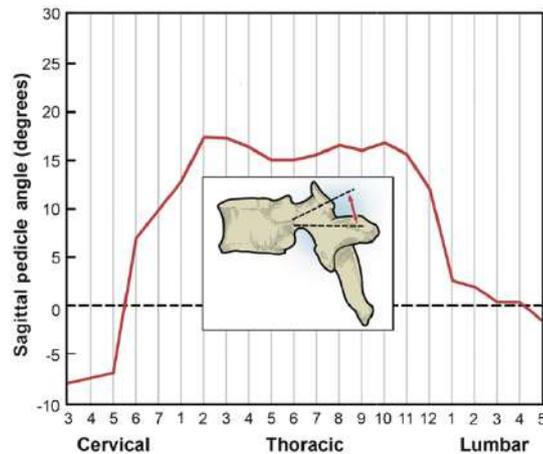


Gambar 10. Lebar sagital pedikel berdasarkan level.⁴³





Gambar 11. Sudut transversal pedikel berdasarkan level.⁴³



Gambar 12. Sudut sagital pedikel berdasarkan level.⁴³

Atlas (C1) dan axis (C2)

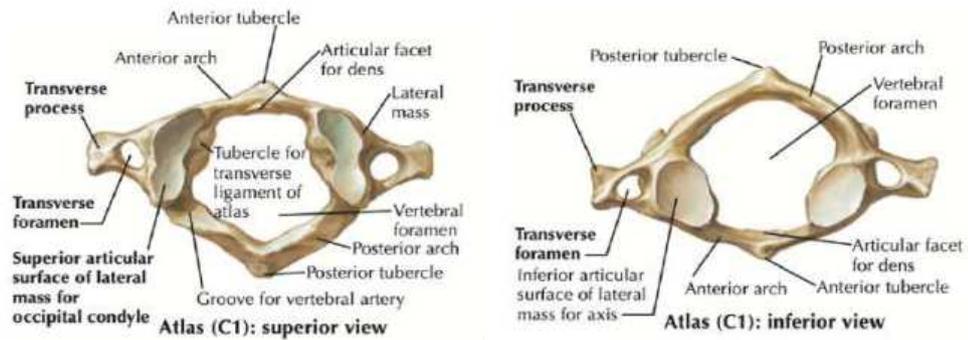
Vertebra cervikal pertama mempunyai artikulasinya yang unik dengan kondilus oksipital kranium. Artikulasi ini adalah dasar untuk pergerakan fleksi dan ekstensi kepala yang signifikan. Aspek unik lain dari atlas adalah bahwa tulang atlas tidak memiliki korpus ventral yang sebenarnya, namun dapat menopang cranium dengan permukaan facet superior dari lateral mass (Gambar 13). Permukaan facet kaudal lateral mass berartikulasi dengan facet superior axis. Prosesus transversal atlas merupakan tempat bernaung arteri vertebralis setelah



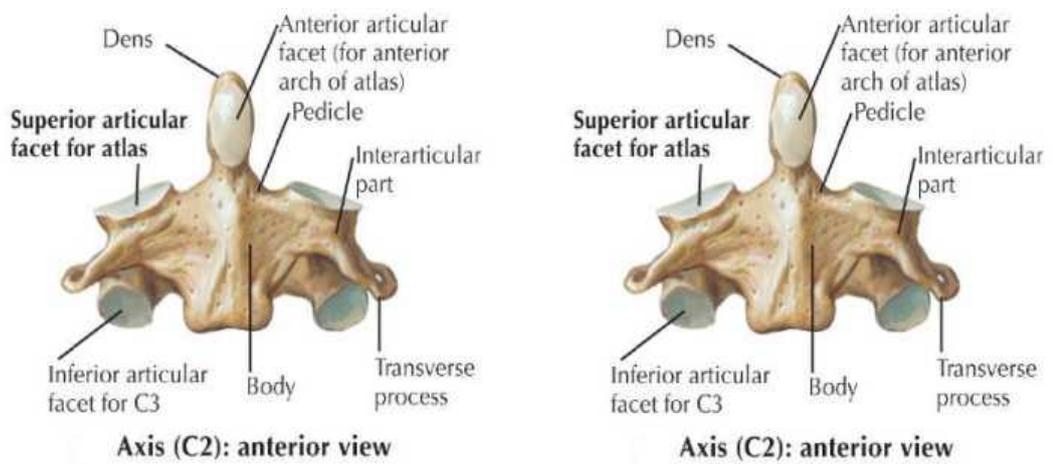
ari foramen transversus. Muskulus obliquus superior dan obliquus inferior pada kranium dan axis. Membran oksipital anterior dan posterior di atas pada atlas yang juga berkontribusi terhadap stabilitas. Membran

oksipital anterior dan posterior merupakan kelanjutan dari ligamentum longitudinal anterior (ALL) dan ligamentum flavum. Axis adalah vertebra cervical kedua dan berfungsi untuk memberikan rotasi dan stabilitas cervical bagian atas (Gambar 14). Artikulasi antara atlas dan axis yang dikenal sebagai sendi atlantoaksial berkontribusi pada sebagian besar rotasi regio cervical. Berbeda dengan atlas, axis memiliki korpus vertebra yang dikenal sebagai prosesus odontoid yang berproyeksi ke arah kranial dari aspek dorsal korpus vertebra. Ligamentum alar, cruciform, dan transversal terikat pada prosesus odontoid. Stabilitas regio cervical juga ditunjang karena adanya perlekatan otot-otot pada prosesus spinosus axis, yang meliputi otot rektus mayor dan obliquus inferior. Seperti atlas, foramen transversal membungkus arteri vertebralis. Anatomi ligamentum dari tulang cervical atas memiliki keunikan, memberikan *support* untuk kepala dan menjaga stabilitas meskipun daerah tersebut sangat fleksibel. Terdapat berbagai ligamentum didalam dan diluar kanalis spinalis (Gambar 15 - 21). Sebagian besar stabilitas daerah kraniocervikal dibentuk oleh ligamentum-ligamentum ini yang terletak dibagian ventral medulla spinalis. Ligamentum-ligamentum ini tersusun tiga lapis, membran tectoria adalah yang paling dorsal dari ligamentum ini dan merupakan kelanjutan dari ligamentum longitudinal posterior (PLL), menempel pada dorsal ke ligamentum cruciatum di basiocciput. Ligamentum cruciate merupakan lapisan tengah dan berfungsi untuk membatasi translasi ventral antara C1 dan C2. Ligamentum cruciate adalah kompleks ligamen yang terbentang horizontal dan vertikal. Ligamentum odontoid, atau ligamentum apikal, adalah ligamentum yang terletak paling ventral dan memanjang dari kondilus lateral. Diluar kanalis spinalis terdapat jaringan fibroelastik yang memanjang dari foramen magnum ke C1 yaitu membran atlantookspital anterior yang terletak di bagian ventral foramen magnum dan membran atlantookspital posterior yang terletak dibagian dorsal foramen magnum. Karena ini adalah membran yang tipis, kontribusinya terhadap kekuatan vertebra cervical juga terbatas.⁴³

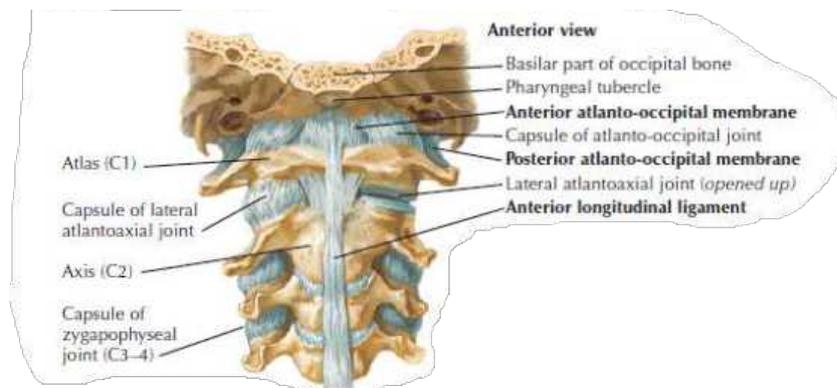




Gambar 13. Anatomi atlas (C1).⁴⁴

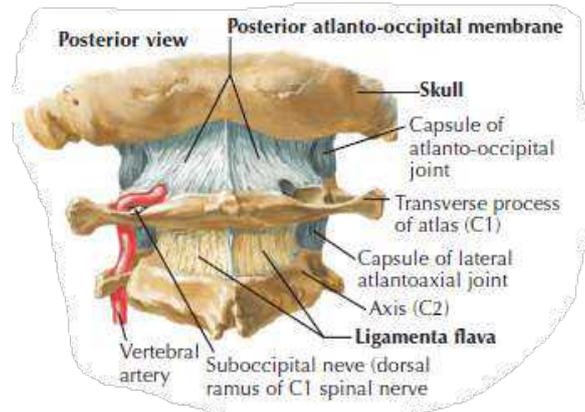


Gambar 14. Anatomi axis (C2).⁴⁴

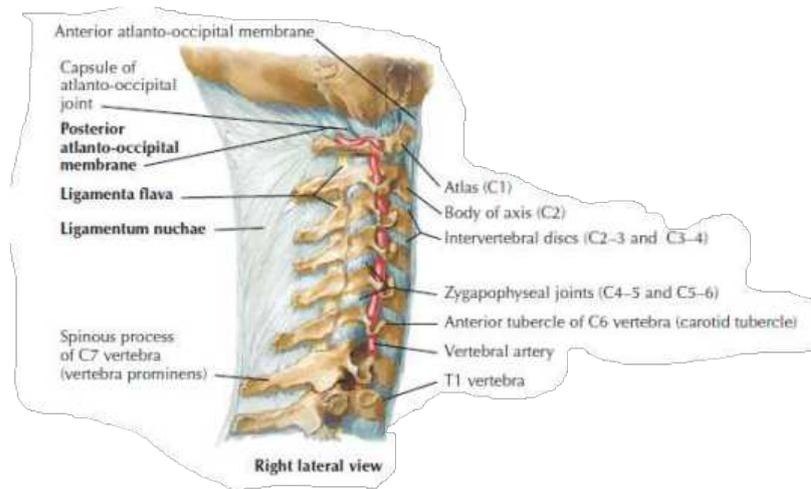


Gambar 15. Ligamentum eksternal kraniocervikal tampak anterior.⁴⁴

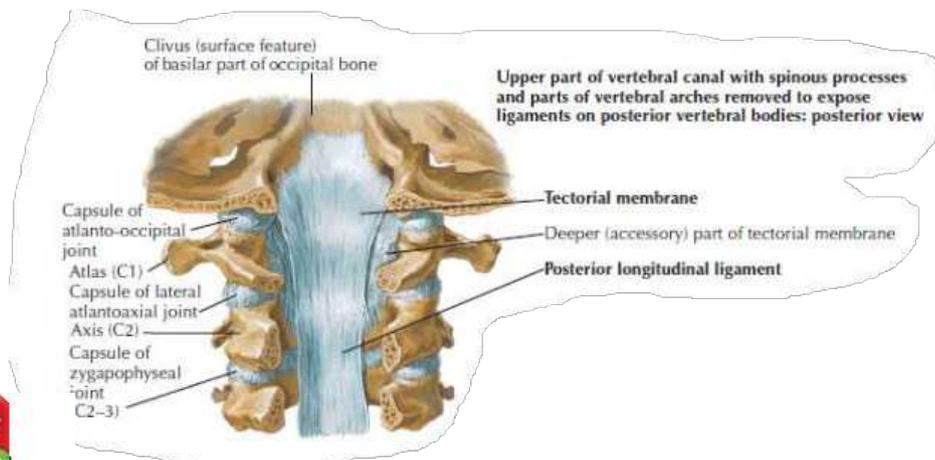




Gambar 16. Ligamentum eksternal kranio cervical tampak posterior.⁴⁴

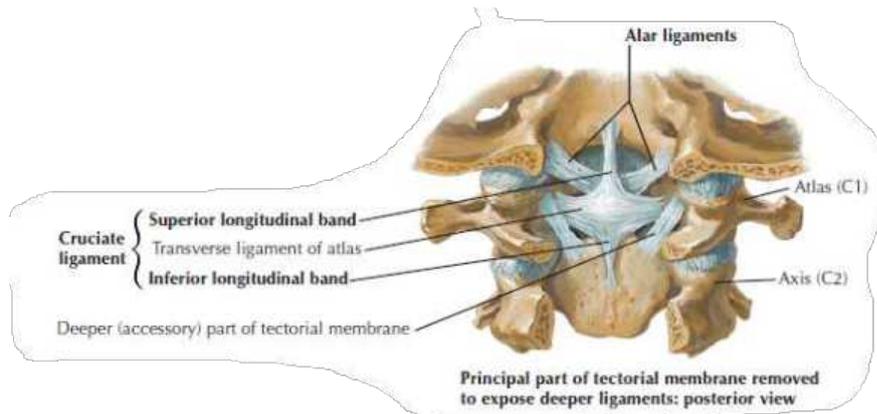


Gambar 17. Ligamentum eksternal kranio cervical tampak lateral.⁴⁴

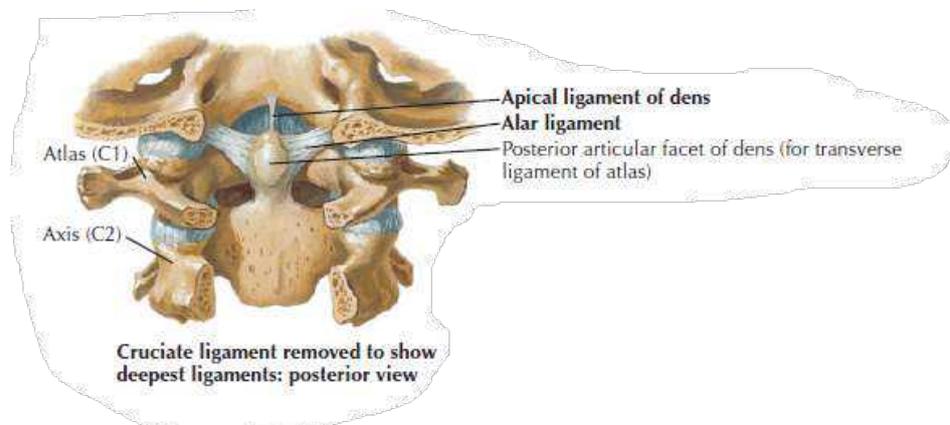


Gambar 18. Ligamentum internal kranio cervical tampak posterior.⁴⁴

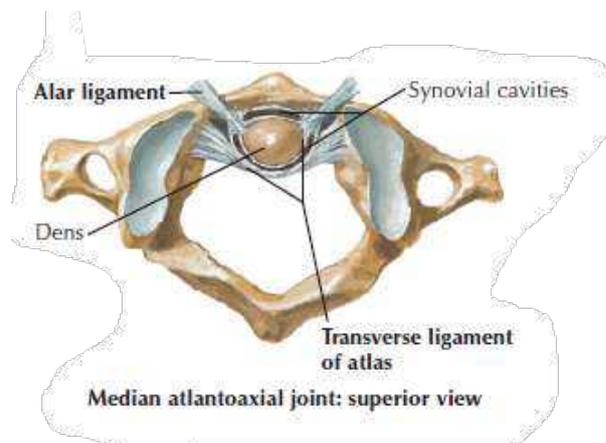




Gambar 19. Ligamentum internal kraniocervikal tampak posterior setelah membran tectorial diangkat.⁴⁴



Gambar 20. Ligamentum internal kraniocervikal tampak posterior setelah ligamentum cruciate diangkat.⁴⁴



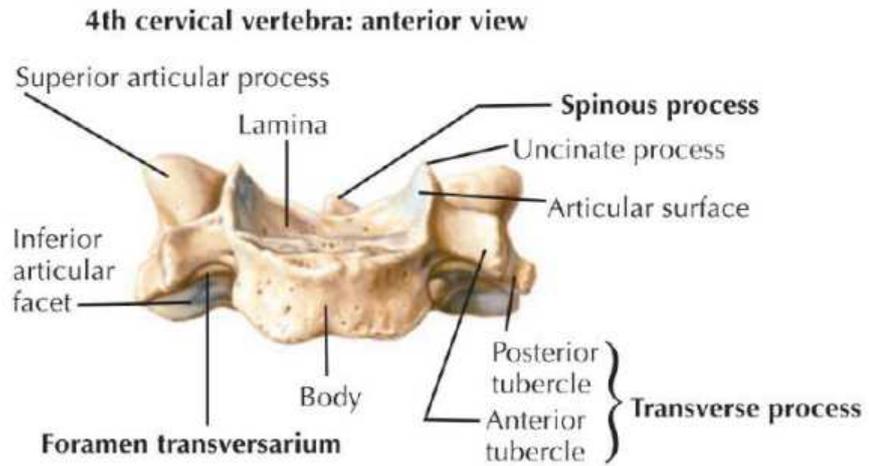
Gambar 21. Ligamentum internal kraniocervikal tampak superior setelah ligamentum cruciate diangkat.⁴⁴



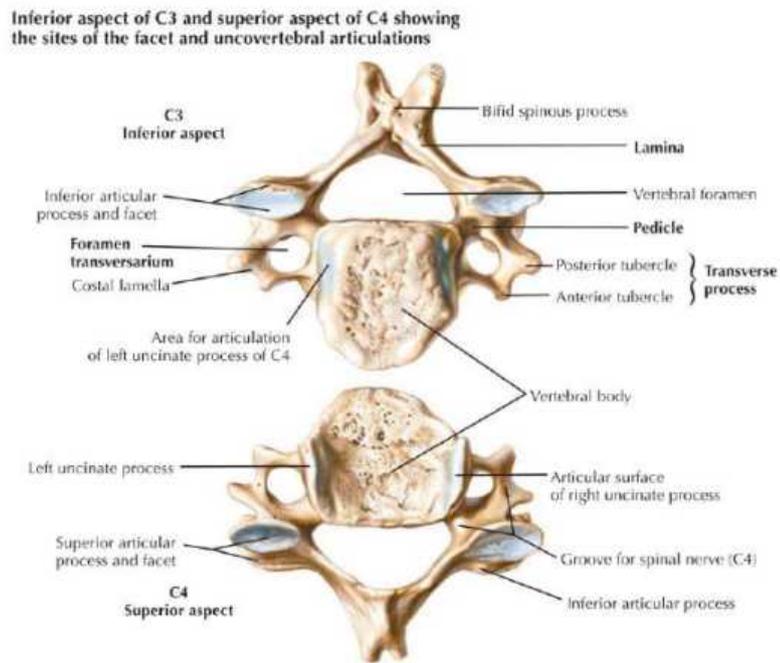
Vertebra cervical subaxial (C3-C7)

Vertebra cervical yang tersisa dari fitur anatomi dapat dianggap terpisah dari atlas dan axis. Vertebra tersebut merupakan bagian yang berukuran terkecil jika dibandingkan dengan semua regio vertebra lainnya dan selanjutnya tren peningkatan ukuran secara bertahap dengan setiap tingkat yang lebih rendah. Semakin ke bawah level vertebra, semakin banyak berat badan yang ditopang, itulah sebabnya ukuran vertebra bertambah. *Endplate* vertebra pada regio ini berbentuk cekung dibagian superior dan cembung dibagian inferior dan berartikulasi membentuk sendi uncovertebral (sendi Luschka). Sendi ini sering menjadi tempat terjadinya artritis yang dapat menyebabkan pergeseran *nerve root* (serabut saraf). Posisi vertebra cervical subaksial mempengaruhi ukuran neural foramen. Secara klinis, hal ini ditunjukkan dengan manuver Spurling. Jika osteofit atau fragmen diskus mengganggu/ menurunkan diameter foramen neural (foramen intervertebralis), nyeri dapat terprovokasi dengan gerakan ekstensi dan memiringkan kepala ke arah sisi yang terkena. Pedikel pendek dan muncul dari titik tengah korpus vertebra. Lamina sedikit kecil, prosesus spinosus C3 - C6 berbentuk bifida (Gambar 22 dan 23), dan C7 merupakan bagian yang terbesar (Gambar 24). Prosesus transversus cervical muncul dari peralihan antara korpus vertebra dan pedikel. Kebanyakan individu memiliki arteri vertebralis yang melewati foramen transversal C1 – C6, tetapi pada 5% kasus arteri ini melewati foramen di C7.⁴⁵ Sendi facet berorientasi koronal dan kapsul facet itu lemah yang memungkinkan mobilitas dari vertebra cervical. Hal ini memungkinkan gerakan fleksi, ekstensi, rotasi, dan menekuk kearah lateral yang signifikan. Pada vertebra cervical terdapat rentang jarak gerakan ekstensi yang lebih besar dibandingkan dengan fleksi. Ligamentum nuchae merupakan struktur ligamentum utama pada aspek dorsal vertebra cervical diluar kanalis spinalis yang mengikat prosesus spinosus. Turun melewati C7 ligamentum nuchae bertransisi menjadi ligamentum supraspinosum yang membentang hingga ke regio lumbosakral berakhir antara L3 dan L5. *Range of motion* vertebra cervical dapat bervariasi karena faktor usia, jenis kelamin, dan metode pengukuran.^{43,45}

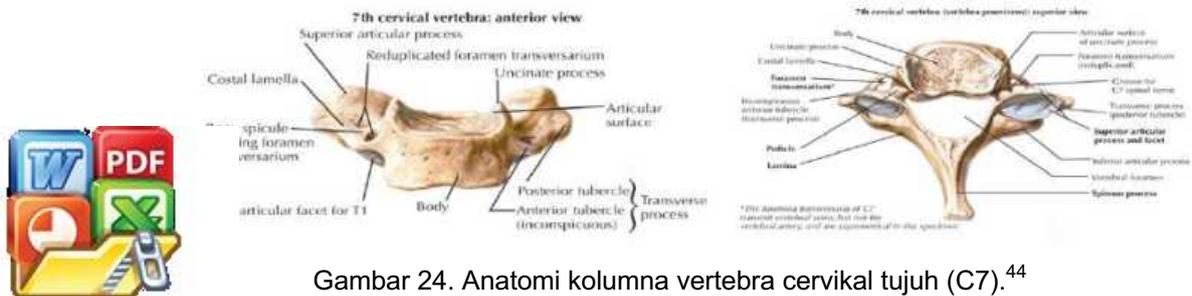




Gambar 22. Anatomi kolumna vertebra cervical empat (C4).⁴⁴



Gambar 23. Anatomi kolumna vertebra cervical tiga dan empat (C3 & C4).⁴⁴



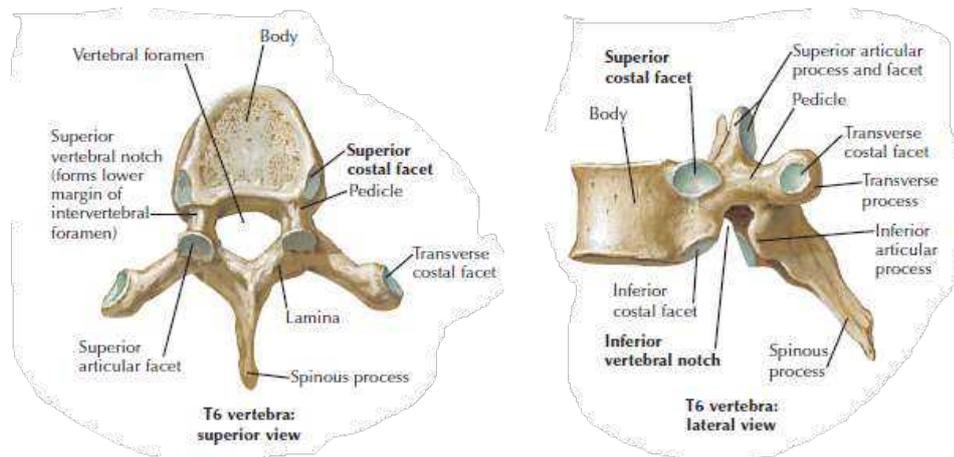
Gambar 24. Anatomi kolumna vertebra cervical tujuh (C7).⁴⁴



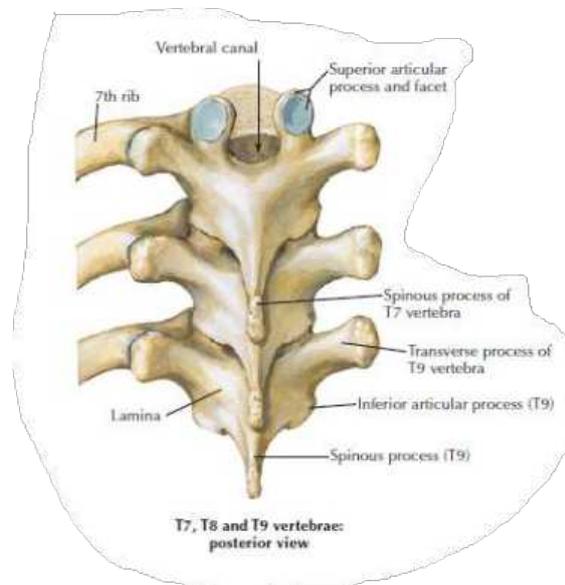
Vertebra thorakal

Vertebra thorakal memiliki jumlah vertebra paling banyak dibandingkan dengan regio lain. Korpus vertebra secara bertahap bertambah besar dari T1 – T12. Empat vertebra thorakal pertama mempertahankan beberapa ciri-ciri vertebra servikal dan empat vertebra thorakal terakhir memiliki ciri-ciri vertebra lumbal yang merupakan transisi antara regio yang berdekatan. Adanya *superior vertebral notch* merupakan ciri-ciri servikal pada T1 dan ciri-ciri lumbal pada T12 yang mana prosesus artikular yang mengarah ke lateral dan inferior. Lamina diregio thorakal lebih besar dibanding pada vertebra servikal dan saling tumpang tindih, sedangkan ukuran prosesus transversus akan semakin bertambah besar kebawah level vertebra thorakal.⁴⁶ Prosesus spinosus vertebra thorakal tersusun secara bervariasi dalam bentuk horizontal, oblique, atau tumpang tindih vertikal. Prosesus spinosus horizontal ditemukan pada T1 – T2 dan T11 – T12, dan prosesus spinosus oblique pada T3 – T4 dan T9 – T10 (Gambar 25 - 27), dengan sisa vertebra thorakal memiliki prosesus spinosus vertikal yang tumpang tindih. Facet thorakal terutama tersusun koronal tetapi kemudian akan tersusun sagital didekat peralihan vertebra lumbal. Orientasi facet ini memungkinkan untuk sedikit gerakan fleksi, ekstensi dan rotasi yang terbatas. Terdapat sedikit ruang kosong didalam kanalis spinalis pada regio thorakal bila dibandingkan regio servikal dan lumbal. Ciri khas vertebra thorakal yaitu berhubungan dengan tulang kosta.⁴⁷ Tulang kosta berartikulasi dengan korpus vertebra dan pedikel melalui facet kostal, namun pada prosesus transversus dengan T10 – T12 menjadi pengecualian untuk facet pada prosesus transversus. Vertebra thorakal memiliki kekakuan relatif maksimum dibanding semua regio vertebra, yang merupakan fungsi dari hubungan antara tulang kosta dan vertebra yang dikombinasikan dengan dukungan dari ligamentum aksesorius. Daerah transisi atau peralihan vertebra seperti pada C7 – T1 dan T12 – L1 adalah tempat transisi dari daerah vertebra yang relatif kaku ke daerah vertebra yang dapat bergerak maksimal. Lokasi peralihan ini sering menjadi lokasi patologi alami ataupun iatrogenik.⁴⁷

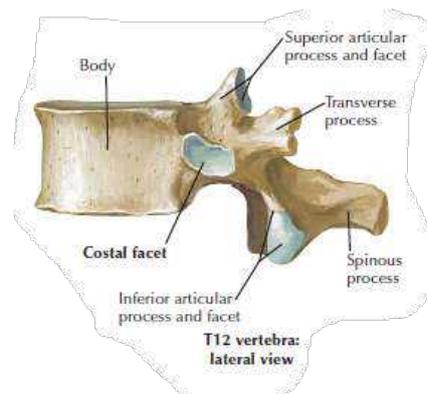




Gambar 25. Anatomi kolumna vertebra thorakal enam (T6).⁴⁴



Gambar 26. Anatomi kolumna vertebra thorakal tujuh, delapan, dan sembilan (T7, T8 dan T9).⁴⁴



Gambar 27. Anatomi kolumna vertebra thorakal duabelas (T12).⁴⁴

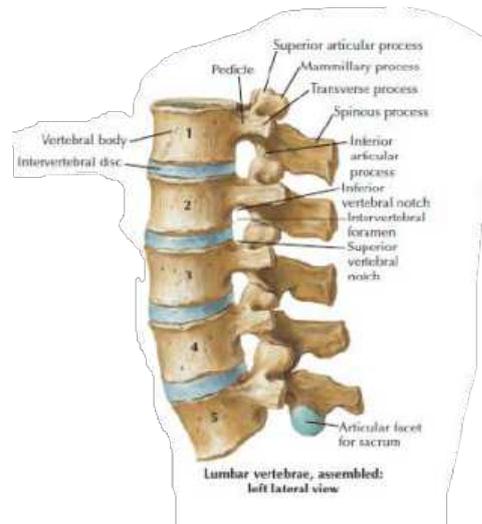


Vertebra lumbal

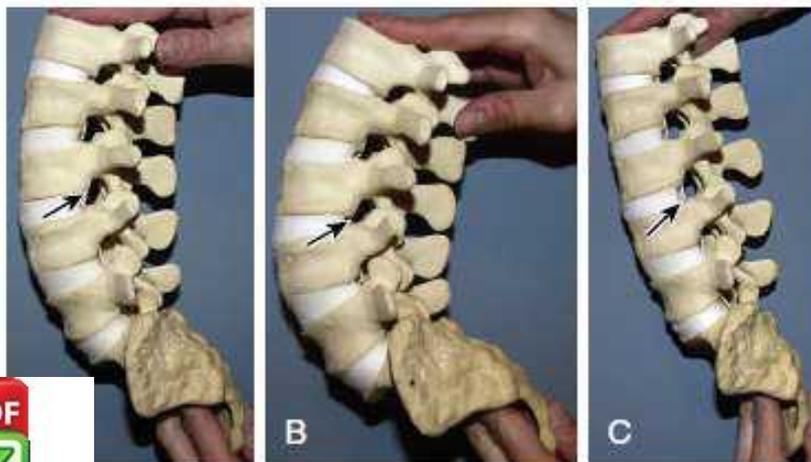
Vertebra lumbal mempunyai ukuran korpus vertebra yang terbesar dibanding regio lain pada vertebra (Gambar 28). Ukuran diameter vertebra ini bertambah secara progresif ketika mendekati sakrum dengan diameter transversal lebih lebar dibanding diameter anteroposterior. Pada regio lumbal terdapat variasi subregional anatomi vertebra. Hal ini dikaitkan dengan bobot dan kekuatan yang lebih besar yang harus didistribusikan oleh kolumna vertebra lumbal saat bertransisi ke panggul. Korpus vertebra L1 – L2 memiliki kedalaman yang lebih besar dibagian dorsal, sedangkan korpus vertebra L4 – L5 memiliki kedalaman yang lebih besar dibagian ventral. Kedua subregion diseimbangkan oleh korpus vertebra L3, yang menyediakan titik transisi diantara keduanya. Angulasi dan translasi korpus vertebra dipengaruhi oleh perbedaan anatomi lokoregional pada saat fleksi dan ekstensi. Variasi ini menghasilkan perubahan tinggi diskus intervertebralis dan luas penampang foramen, yang secara fungsional terkait dengan gerakan selama fleksi dan ekstensi. Variasi ini juga dapat dikaitkan dengan kerentanan didaerah lumbar untuk terjadi herniasi diskus intervertebralis, stenosis kanalis spinalis, dan kondisi patologi lainnya. Studi pada kadaver menunjukkan bahwa gerakan fleksi pada regio L4 – L5 menghasilkan bulging diskus intervertebralis kearah dorsal yang lebih besar dibanding pada regio L1 – L2. Diameter kanalis spinalis diregio lumbal menunjukkan bahwa, dibandingkan dengan posisi netral, gerakan fleksi meningkatkan luas area sebesar 12% (15 mm^2), dan gerakan ekstensi menurunkan luas area sebesar 15% (19 mm^2). Korpus vertebra bergerak lebih dekat kearah ventral dan menjauh kearah dorsal selama fleksi, yang meningkatkan dimensi kanalis spinalis; hal sebaliknya terjadi sewaktu gerakan ekstensi.⁴⁸ Potongan melintang area *nerve root* secara fungsional terkait dengan gerakan fleksi dan juga ekstensi. *Nerve root* berjalan dibawah resesus lateral pedikel dan facet artikularis melalui foramen intervertebralis. Batas ventral *nerve root* adalah korpus vertebra dan diskus intervertebralis, batas dorsal adalah lamina dan facet, dan batas superior dan inferior adalah pedikel yang berdekatan. Karena perbedaan anatomi locoregional pada regio lumbal, gerakan fleksi dan ekstensi mengubah batas ini dan menghasilkan perubahan pada potongan *nerve root* (Gambar 29). Perubahan ini dapat dikaitkan dengan an terhadap terjepitnya *nerve root*. Studi kadaver menemukan bahwa nampang area *nerve root* posisi netral L1 – L2 adalah sekitar $28,31 \pm$



10,48 mm; pada fleksi meningkat menjadi $32,37 \pm 9,92$ mm, dan pada ekstensi menurun menjadi $22,97 \pm 7,52$ mm. Pada regio lumbal bawah variasi dengan gerakan kurang jelas, karena potongan melintang posisi netral *nerve root* L4 – L5 adalah $34,48 \pm 11,25$ mm; pada fleksi adalah $34,10 \pm 13,85$ mm, dan pada ekstensi ditemukan meningkat menjadi $36,45 \pm 1,63$ mm. Data ini terbatas oleh validitas eksternal; namun dari data ini menunjukkan bahwa anatomi unik dari setiap aspek vertebra memiliki hubungan fungsional dan klinis yang harus diperhatikan. Orientasi sendi facet vertebra lumbal semakin mengarah sagital dari L1 – L5 (Gambar 30). Hal ini bertujuan untuk membatasi gerakan rotasi namun memberikan fungsi fleksi dan ekstensi yang maksimal. Namun, sendi faset L5 – S1 memiliki orientasi koronal guna menahan translasi anteroposterior.⁴⁸

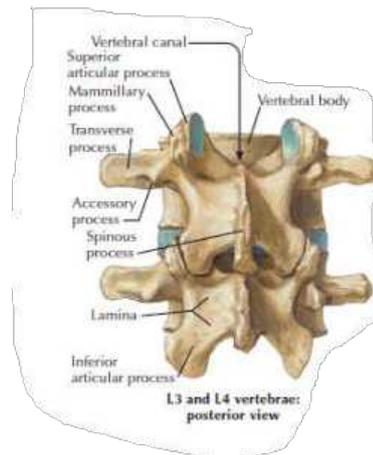


Gambar 28. Anatomi regio lumbal.⁴⁴



29. Perubahan posisi regio lumbal yang berefek pada volume kanalis spinalis.⁴³

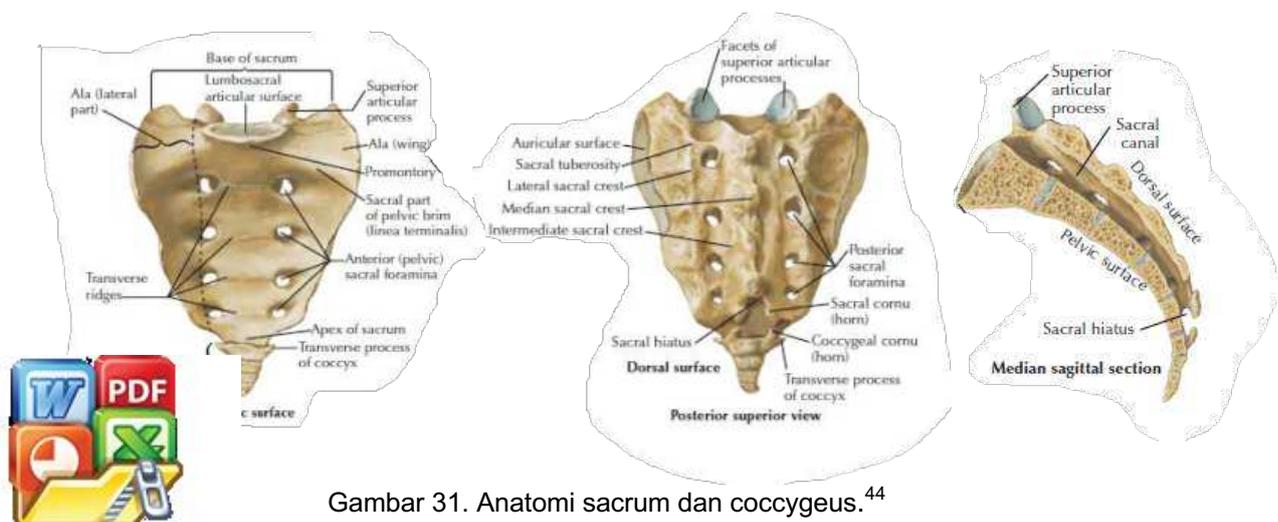




Gambar 30. Anatomi kolumna vertebra lumbal tiga dan empat (L3 & L4).⁴⁴

Sacrum dan Coccygeus

Lima vertebra, ligamen kosta, dan prosesus transversus menyatu untuk membentuk sakrum. Korpus sakrum dipisahkan oleh garis melintang. *Nerve root* keluar dari foramina dorsal dan ventral yang membulat dibagian lateral korpus vertebra. Perpaduan unik vertebra pada sakrum berfungsi untuk memberikan kekuatan dan stabilitas pada panggul, dan melalui artikulasi dengan ilea pada sendi sacroiliac, berat tubuh didistribusikan ke tulang pelvis. Tulang coccygeus adalah bagian terminal dari vertebra dan umumnya disebut sebagai “tulang ekor” yang dapat ditemukan sebagai satu tulang yang menyatu, atau elemen coccygeal pertama dapat dipisahkan dari yang lain. Tidak ada elemen dorsal vertebra pada coccygeus. Fungsi utama tulang ekor adalah berfungsi sebagai tempat perlekatan otot-otot panggul (Gambar 28).⁴³



Gambar 31. Anatomi sacrum dan coccygeus.⁴⁴



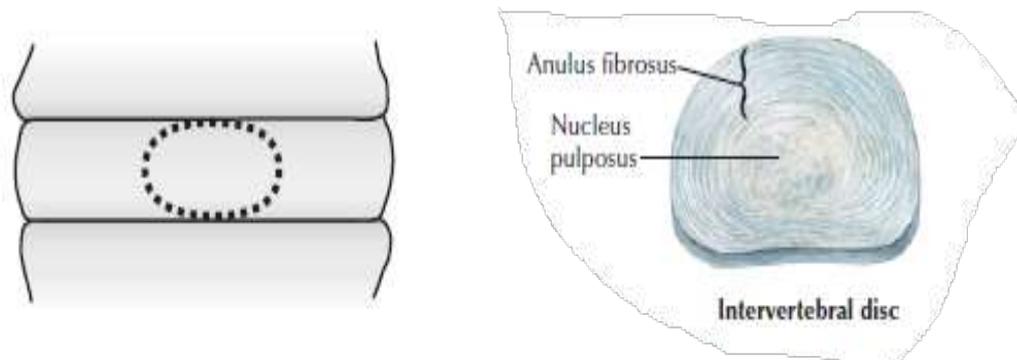
Diskus Intervertebralis

Korpus vertebra dipisahkan pada tiap levelnya oleh diskus intervertebralis. Struktur viskoelastik ini terdiri dari nukleus pulposus pada bagian sentral, annulus fibrosus pada bagian perifer, dan kartilago *end plate* diskus, yang memisahkannya dari korpus vertebral diatas dan dibawah. Viskoelastisitas didefinisikan sebagai sifat material yang menunjukkan karakteristik melakat dan elastis saat mengalami deformasi. Oleh karena itu materialnya memiliki sifat mekanik yang berbeda dan juga bervariasi tergantung pada tingkat pembebanan yang berbeda. Artinya, jika beban diberikan secara perlahan, diskus dapat merespons dengan deformasi yang lebih besar, sedangkan jika beban diberikan dengan cepat, deformasi yang terjadi lebih sedikit. Karakteristik ini juga berubah seiring bertambahnya usia; dengan bertambahnya usia terjadi penurunan dalam kemampuan diskus untuk berubah bentuk. Terdapat 23 diskus intervertebralis dimulai antara C2 dan C3 dan berakhir di L5 dan S1 yang membentuk 20% hingga 33% dari total tinggi vertebra dan terdapat perbedaan regional yang terlihat sejajar dengan vertebra. Luas penampang diskus intervertebral meningkat ke arah rostrocaudal. Nukleus pulposus terdiri dari mukopolisakarida dan mukoprotein, membentuk gel dengan kadar air berkisar antara 70% sampai 90%.⁴⁹ Kandungan air tertinggi saat lahir dan menurun seiring bertambahnya usia. Nukleus pulposus membentuk kira-kira 30% sampai 50% dari luas penampang diskus dan terletak lebih posterior pada vertebra lumbal pada peralihan sepertiga tengah dan posterior diskus pada bidang sagital. Sifat viskoelastik dari nukleus pulposus memungkinkannya bertindak sebagai *shock absorber* yang efektif untuk vertebra. Disekeliling nukleus pulposus terdapat annulus fibrosus, yang terdiri dari serat-serat kolagen dalam tautan laminasi konsentris, dengan setiap tautan berorientasi 90 derajat ke tautan yang berdekatan dan 30 derajat ke bidang diskus (Gambar 29). Serabut bagian dalam annulus melekat pada kartilago *endplate* dan serabut terluar yang dikenal sebagai serat Sharpey melekat pada tulang kortikal korpus vertebra. Karena orientasi serat diskus intervertebralis secara efektif menahan rotasi dan regangan, namun annulus tidak untuk gaya tekan. Seiring bertambahnya usia, kandungan air nukleus pulposus berkurang dan nukleus itu sendiri menjadi kurang terdeformasi.



gan ini mengakibatkan diskus intervertebralis menjadi lebih kaku secara an sehingga berpegaruh bila dalam kondisi beban tekan. Diskus ebralis pada orang yang muda saat nukleus dikompresi mengakibatkan is viskoelastik dibagian tengah *endplate*, tetapi ketika nukleus menjadi

kurang elastis dan kaku, beban ditransmisikan melalui serat annular di sekitar perifer dengan deformasi yang sangat kecil, mengakibatkan beban yang lebih tinggi pada *endplate*. Hal ini dapat mengakibatkan fraktur kompresi seperti yang sering ditemukan pada orang tua atau populasi osteoporosis. Kekakuan diskus dan tulang yang meningkat menghasilkan zona elastis yang lebih kecil dan ambang *threshold* yang lebih rendah.⁵⁰

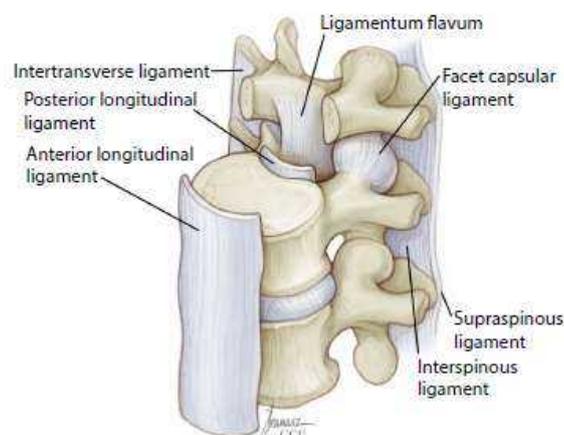


Gambar 32. Diskus intervertebralis.^{43,44}



Ligamentum pada vertebra

Ligamentum pada vertebra terdiri dari elastin dan kolagen dan dapat menjangkau beberapa segmen. Selain *craniocervikal junction* (yang telah dibahas di atas), ada tujuh ligamentum vertebra utama yang bekerja untuk menstabilkan vertebra subaksial dalam rentang gerak fisiologisnya. Ligamentum ini juga berfungsi untuk membatasi gerakan vertebra hingga batas yang jelas, sementara pada saat yang sama memungkinkan gerakan yang memadai dan postur yang tetap untuk melindungi medulla spinalis. Dimulai dari anterior ke posterior ligamentum ini adalah ALL, PLL, ligamentum kapsular, ligamentum prosesus intertransversus, ligamentum flavum, ligamentum interspinosum, dan ligamentum supraspinosus (Gambar 33). Karakteristik kekuatan ligamentum ini bervariasi dan keefektifan ligamentum ini tidak hanya bergantung pada morfologi tetapi juga pada panjang lengan momentum yang bekerja (Gambar 34). Panjang lengan momentum yang lebih panjang memberikan keuntungan mekanis pada ligamentum yang relatif lemah sehingga dapat berkontribusi lebih besar pada stabilitas vertebra secara keseluruhan.⁵¹

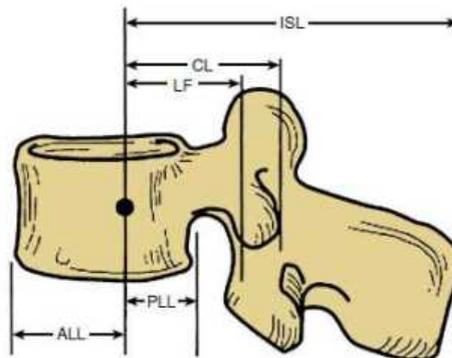


Gambar 33. Ligamentum pada vertebra.⁴³

ALL mencakup keseluruhan panjang vertebra, memanjang dari batas ventral foramen magnum (basion) dimana ALL dikenal sebagai membran sipital anterior hingga ke sakrum. ALL mencakup 25% hingga 33% an ventral korpus vertebra dan diskus intervertebralis, menopang annulus dan mencegah hiperekstensi. ALL tersusun dalam tiga lapisan: lapisan



terluar yang mencakup empat hingga lima level, lapisan tengah yang mencakup tiga level dan menghubungkan korpus vertebra dan diskus intervertebralis, dan lapisan paling dalam yang mengikat diskus intervertebralis yang berdekatan. PLL dimulai sebagai membran tektorial pada C2 dan memajang hingga ke sakrum. PLL terbentang didalam kanalis spinalis dan melebar pada tingkat diskus intervertebralis yang terhubung dengan anulus fibrosus, menyempit pada korpus vertebra yang tersusun longgar. Lapisan PLL serupa dengan ALL, tetapi berfungsi untuk mencegah hiperfleksi.⁵¹



Gambar 34. Panjang momentum ligamentum vertebra.⁴³

Ligamentum interspinosus dan supraspinosus memberikan stabilitas pada elemen dorsal kolumna vertebra. Ligamentum flavum menghubungkan lamina vertebra secara terputus-putus dan terhubung dengan kapsul sendi facet. Inserio proksimal ligamentum flavum adalah bagian ventral lamina sisi kranial meluas ke bagian dorsal dari lamina kaudal. Sisi lateral ligamentum flavum terhubung dengan kapsul ventral sendi facet. Elastisitas ligamentum flavum memungkinkannya meregang sewaktu gerakan fleksi tanpa dibatasi gerakan dan memungkinkannya menjadi kencang saat kembali ke posisi netral selama ekstensi. Seiring bertambahnya usia seseorang, elastin diganti dengan persentase kolagen yang lebih tinggi, menyebabkannya menjadi kurang elastis yang dapat menyebabkan tertekuk ke dalam kanalis spinalis. Ligamentum interspinosus dan supraspinosus menghubungkan prosesus spinosus yang berdekatan. Ligamentum interspinosum terbentang dari dasar ke ujung tip prosesus spinosus dari C2 hingga ke S1.

Ligamentum supraspinosus dimulai pada aspek dorsal C7 melekat pada ujung tip prosesus spinosus hingga ke regio lumbosakral. Ligamentum supraspinosus merupakan kelanjutan dari ligamentum nuchae yang berhubungan dengan



vertebra cervikal. Ligamentum nuchae menggunakan panjang lengan momentum yang melekat pada prosesus spinosus untuk memberikan resistensi yang efektif terhadap gerakan fleksi. Ligamentum-ligamentum ini penting dalam menjaga stabilitas vertebra secara efektif.⁵¹

Otot-otot paravertebra

Mayoritas berat badan mengarah ke ventral korpus vertebra dengan otot-otot paravertebra berperan untuk menyeimbangkan kekuatan pada kolumna vertebra. Otot-otot ini dapat dibagi menjadi otot ekstrinsik dan intrinsik. Otot-otot ekstrinsik meliputi latissimus dorsi, trapezius, rhomboids, dan serratus posterior. Otot latissimus dorsi dipersarafi oleh saraf thorakodorsal yang muncul dari inferior prosesus spinosus vertebra thorakal enam dan memanjang ke aksila yang berfungsi untuk mengangkat tubuh saat lengan terfiksasi. Otot trapezius dipersarafi oleh saraf aksesorius yang melekat pada prosesus spinosus C7 – T12 dan berfungsi pada pergerakan skapula. Otot rhomboid dipersarafi oleh saraf scapular dorsal yang melekat pada prosesus spinosus C7 – T1 (otot rhomboid minor) dan T2 – T5 (otot rhomboid mayor). Otot rhomboid juga berfungsi pada pergerakan scapula. Otot serratus posterior memiliki dua bagian: bagian superior dipersarafi oleh saraf interkostal yang melekat pada prosesus spinosus C7 – T3, dan bagian inferior yang dipersarafi oleh saraf vertebra thorakal, saraf ini melekat pada prosesus spinosus T11 – L2. Kedua bagian tersebut berfungsi masing-masing untuk mengangkat dan menurunkan tulang rusuk. Otot-otot intrinsik paravertebra superfisial adalah otot splenius capitis dan cervicis, dipersarafi oleh rami dorsal saraf cervikal. Otot splenius capitis melekat pada ligamentum nuchae dan prosesus spinosus C7 – T4 dan berinsersio pada occiput. Otot splenius cervicis melekat pada prosesus spinosus T3 – T6 dan berinsersio pada prosesus transversus C1 – C4. Kedua otot tersebut berfungsi untuk gerakan leher kearah lateral.⁵¹

Lapisan tengah otot-otot intrinsik paravertebra terdiri dari otot erektor spinae yang merupakan trio kolum. Dari lateral ke medial mereka adalah otot iliocostalis, longissimus, dan spinalis. Kolum tumpang tindih dan memiliki tendon besar yang melekat pada krista iliaka, sakrum, ligamentum sakroiliaka, dan prosesus spinosus lumbosakral. Otot erektor spinae adalah ekstensor utama dari dan dipersarafi oleh rami dorsal saraf spinal. Lapisan terdalam otot-otot terdiri dari otot semispinalis, multifidus, dan rotatore yang kesemuanya



dipersarafi oleh rami dorsal saraf spinal. Ada tiga otot semispinalis: capitis, cervicis, dan thoracis. Otot semispinalis capitis melekat pada proses transversus cervikal dan thorakal dan berinsersio pada occiput yang berfungsi untuk gerakan ekstensi kepala. Otot semispinalis cervicis dan thoracis melekat pada proses transversus dan masing-masing berinsersio pada proses spinosus vertebra yang lebih superior. Otot-otot ini berfungsi untuk gerakan ekstensi sesuai regionya pada vertebra. Otot multifidus dan rotator berfungsi menstabilkan dan memutar vertebra.⁵¹

Kelemahan kelompok otot yang menopang vertebra dapat menyebabkan deformitas ataupun nyeri. Otot memiliki peran penting dalam stabilitas vertebra. Atrofi otot dapat menyebabkan deformitas, degenerasi, atau kondisi patologi lain yang dapat mengakibatkan nyeri. Secara biomekanik otot yang kuat dapat berkontribusi untuk menjaga keseimbangan beban disepanjang vertebra. Selain itu pada kondisi degeneratif, kekuatan otot dapat membantu mengurangi beban yang merugikan dan mengganggu keseimbangan pada regio vertebra yang mengalami degeneratif.⁵¹

Medulla spinalis

Medulla spinalis adalah struktur yang terletak disepanjang kanalis spinalis dengan panjang sekitar 40 hingga 50 cm yang terbentang dari foramen magnum hingga level vertebra L1 - L2. Area transisi pada titik ini menjadi kumpulan serabut saraf yang dikenal sebagai *cauda equina*. Serabut saraf spinal keluar dari foramen saraf terdiri dari serabut sensorik dorsal dan serabut motorik ventral dengan pengecualian C1 dan C2. Selaput terluar atau meninges yang menutupi medulla spinalis dan cauda equina adalah duramater, arachnoidmater, dan piamater (lapisan paling dalam dari meninges). Ligamentum dentatum merupakan struktur penahan medulla spinalis yang menghubungkan bagian terdalam (piamater) dengan bagian terluar meninges (duramater). Medulla spinalis dibagi menjadi beberapa regio seperti kolumna vertebra: delapan cervikal, duabelas thorakal, lima lumbal, dan lima sakrum dan satu regio coccygeus. Medulla spinalis adalah bagian dari sistem saraf pusat dan seperti otak yang dipetakan dalam susunan somatotopik. Traktus kortikospinalis bertanggung jawab atas fungsi motorik.



Traktus ini kontrol gerakan tangan terletak medial dan kontrol gerakan kaki lebih lateral. Traktus spinothalamic mengirimkan informasi sensorik sensasi pada tangan terletak di ventromedial dan sensasi sakral

dorsolateral. Regio lumbal kolum posterior medulla spinalis memiliki segmen sakral yang terletak dimedial dan regio lumbal atas lebih lateral. Dimensi medulla spinalis memberikan ruang yang cukup untuk medula spinalis pada semua segmen kecuali regio midthoracic yang mana resiko terjadinya kerusakan jaringan saraf pada saat instrumentasi bedah meningkat.⁴³

Penurunan dimensi kanal dapat menyebabkan stenosis kanalis spinalis pada gambaran radiografi serta kondisi klinis pasien. Penurunan ukuran diameter kanalis spinalis ini dapat bersifat kongenital yang umumnya muncul pada usia yang muda atau *acquired* yang muncul pada usia yang tua akibat perubahan degeneratif. Stenosis merupakan kondisi penyempitan kanalis spinalis yang sering diawali oleh perubahan degeneratif mengakibatkan perubahan tekanan mekanis serta kondisi degeneratif pada sendi facet dan ligamen. Stenosis kanalis spinalis dapat menyebabkan perubahan tekanan intradural sehingga mengurangi aliran darah ke serabut saraf dan mengubah aliran axoplasmic. Penekanan akut pada serabut saraf dapat mengakibatkan edema substansial yang dapat memperlambat konduksi listrik dan transportasi nutrisi dan yang lebih substansial daripada kondisi kronis, selain itu komponen inflamasi pada stenosis juga dapat mengubah konsentrasi neuropeptida.⁴³

2.4 Biomekanik Vertebra Anak

Biomekanika adalah ilmu yang digunakan untuk menganalisis efek beban mekanik pada jaringan biologis. Hal ini berkaitan dengan penerapan prinsip-prinsip teknik mekanika dan teknik komputasi. Biomekanik klinis vertebra mengacu pada pemahaman tentang fungsi normal dan patologis dari kolumna vertebra. Peneliti biomekanik telah menentukan kapasitas beban komponen vertebra, mengevaluasi mekanisme cedera menggunakan beberapa segmen vertebra dan seluruh kolumna vertebra, menilai respons sekunder vertebra terhadap instrumentasi dan stabilisasi, dan meneliti peran berbagai komponen vertebra dalam mempertahankan fungsi fisiologis normal.⁵²

Biomekanik klinis vertebra

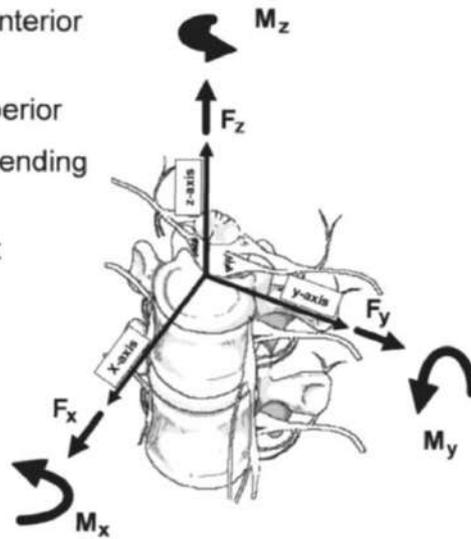


tilah-istilah berikut membantu pemahaman tentang biomekanik klinis Skalar, menggambarkan besarnya energi yang diserap oleh segmen dari berbagai arah. Vektor memiliki besar dan arah. Gaya beban yang n pada vertebra dapat dipecah menjadi komponen vektor menggunakan

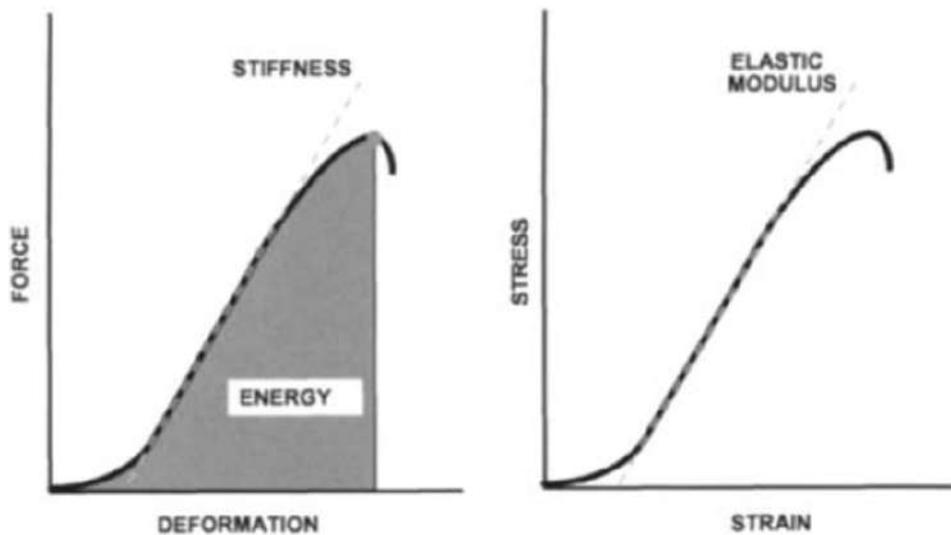
sistem referensi. Sistem *right handed Cartesian* merupakan yang paling umum digunakan (Gambar 35) terdiri dari tiga sumbu yang saling ortogonal: x, y, dan z. Gaya dari posterior ke anterior, dari lateral kanan ke kiri, dan dari inferior ke superior adalah positif sepanjang arah x, y, dan z. Gerakan translasi dan rotasi vertebra terjadi disepanjang dan disekitar axis ini. Gerakan translasi adalah positif sepanjang arah axis positif. Rotasi searah jarum jam disekitar sumbu axis yang terlihat dari titik asal pada axis positif, adalah positif. Dengan demikian, gerakan menekuk dari kiri ke kanan, fleksi, dan puntiran aksial kiri adalah positif. Karena vertebra pediatrik dan dewasa tersusun dalam kolom multisegmen dengan berbagai sifat konstitutif, penerapan gaya dapat menghasilkan deformasi translasi atau rotasi. Perubahan panjang menghasilkan deformasi translasi; perubahan angulasi menghasilkan deformasi rotasi. Regangan juga merupakan produk sampingan dari deformasi yaitu perubahan satuan panjang atau sudut. Regangan normal adalah perubahan panjang dibagi panjang semula, dan regangan yang membentuk sudut adalah perubahan sudut siku-siku (90 derajat). Deformasi sepanjang arah penerapan gaya merupakan regangan aksial, dan deformasi transversal ke arah penerapan gaya adalah regangan transversal. Rasio regangan lateral (transversal) terhadap regangan longitudinal (aksial) adalah rasio Poisson. Studi tentang mekanika vertebra dalam hubungannya dengan gaya dan deformasi adalah kinetika. Sebaliknya, kinematika hanya berurusan dengan gerakan. Akibatnya, kinetika dan kinematika dapat diterapkan pada biomekanik vertebra (pediatrik). Energi mewakili kerja yang dilakukan menghubungkan gaya dan deformasi. Ini adalah area di bawah kurva gaya-deformasi (Gambar 36). Kekakuan linier adalah rasio gaya terhadap defleksi dan kekakuan sudut adalah rasio momen terhadap rotasi. Fleksibilitas merupakan kebalikan dari kekakuan adalah sifat struktural. Sebaliknya tegangan rasio gaya terhadap luas penampang yang diterapkan dan regangan adalah sifat material yang dihubungkan oleh elastisitas dalam domain linier adalah rasio tegangan terhadap regangan atau kemiringan kurva tegangan-regangan.^{53,54}



- +F_x posterior-to-anterior
- +F_y right-to-left
- +F_z inferior-to-superior
- +M_x right lateral bending
- +M_y flexion
- +M_z left axial twist



Gambar 35. Sistem koordinat x, y dan z.²



Gambar 36. Ilustrasi sifat struktur dan material vertebra.²

Biomekanik struktur vertebra

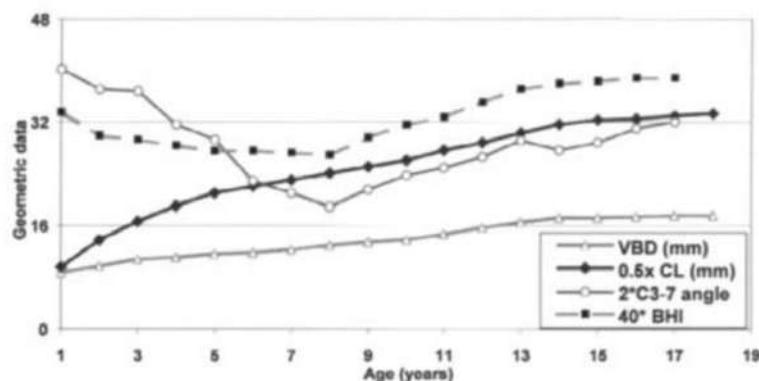


Karena karakteristik anatomi yang berbeda dari vertebra dan adanya rostral disetiap segmen vertebra termasuk kompleks atlantoaksial, manusia selalu berada dibawah aksi gaya tekan eksentrik, yaitu setiap vertebra menahan momen tekukan. Dengan demikian kompresi-fleksi

merupakan mode pemuatan fisiologis. Sehingga setiap komponen vertebra berkontribusi untuk fungsi normal dan daya dukung beban.²

Vertebra

Kolumna vertebra merupakan media interkoneksi antara jaringan lunak seperti otot, diskus intervertebralis, dan ligamen yang menahan gaya ke segala arah. Namun, aksi biomekanik utamanya adalah menahan beban tekanan. Besarnya gaya yang ditahan oleh korpus vertebra meningkat dari servikal ke lumbal. Pemahaman tentang karakteristik defleksi gaya tekan dan tingkat toleransi korpus vertebra dalam hubungannya dengan perkembangan struktur vertebra pediatrik penting untuk fiksasi fraktur. Meskipun data geometris berbasis radiografi pertumbuhan vertebra pada (Gambar 37). Sama halnya jaringan vertebra pediatrik lainnya, respons biomekanik yang sesuai usia belum dipublikasikan. Korpus vertebra dewasa dan geriatric telah diuji di bawah kompresi dan ketegangan. Korpus vertebra yang diuji biasanya dibebani oleh pelat perangkat pengujian material, kekakuan, energi dan data tegangan-regangan berasal dari penerapan gaya dan deformasi.^{57,58}



Gambar 37. Data geometrik pertumbuhan vertebra servikal.²

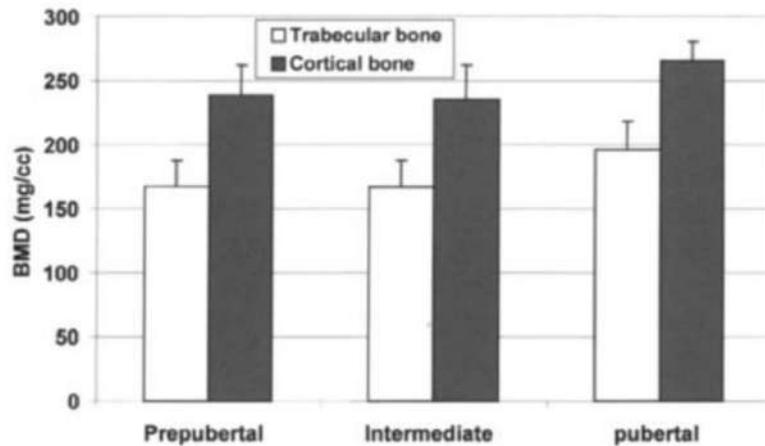
Studi kuantitatif Komputasi Tomografi (CT) terhadap kepadatan mineral tulang trabekuler (BM) memberikan informasi tidak langsung tentang kekuatan tekan dan arsitektur vertebra. BM dan kekuatan vertebra lumbal dewasa isi positif dan sangat tinggi. Studi tentang vertebra lumbal telah kkan bahwa BM tulang kortikal pada vertebra yang sedang berkembang a 18 tahun) 40% lebih tinggi daripada tulang trabekular, dan BM ti nilai dewasa pada usia rata rata 16 tahun. Gambar 38 menunjukkan



nilai BM sebagai fungsi tahap prapubertas (rata-rata: 6 tahun), menengah (rata-rata: 12 tahun), dan pubertas (rata-rata 16 tahun). Studi ini menunjukkan bahwa pubertas secara signifikan meningkatkan BM pada kedua jenis kelamin; setelah memperhitungkan pubertas, BM vertebra tidak berkorelasi dengan usia, jenis kelamin, tinggi badan, berat badan, atau indeks massa tubuh (BMI). Data ini menunjukkan bahwa kepadatan trabekuler tidak sepenuhnya menjelaskan perbedaan jenis kelamin pada osteopenia atau osteoporosis. Faktor-faktor seperti genetik dan penurunan aktivitas fisik dapat mempengaruhi gangguan tersebut. Studi lain pada L1 dan L2 menggunakan 40 subjek normal dari usia 4 bulan hingga 18 tahun menemukan hasil yang sama, yaitu peningkatan mineral tulang dengan usia meskipun perbedaan jenis kelamin tidak signifikan secara statistik (rata-rata usia laki-laki: $7,8 \pm 5,6$ tahun, perempuan: $7,0 \pm 4,8$ tahun; BM dinyatakan sebagai $\text{mg K}_2\text{HPO}_4/\text{mL}$ laki-laki: 182 ± 21 , perempuan: 178 ± 27). Data ini lebih baik dibandingkan dengan studi mineral vertebra lumbal dewasa dan menyarankan bahwa tulang trabekuler mencapai kekuatan biomekaniknya yang matang di awal kehidupan. Dengan menggunakan data ini, persamaan ketergantungan usia berikut (usia 2 hingga 18 tahun) dapat digunakan $\text{BM} = 150 + (2,4 \times \text{umur})$.^{59,60}

Karena faktor mekanis berkontribusi pada pertumbuhan dan perkembangan vertebra, untuk tujuan biomekanik, berdasarkan pola pertumbuhan ossifikasi, vertebra cervical telah dikategorikan ke dalam tahapan berikut. Secara umum, kelompok usia antara bayi baru lahir hingga 1 tahun diwakili oleh tiga pusat osifikasi primer: 1 hingga 3 tahun dengan fusi sinkondrosis posterior; 3 hingga 6 tahun dengan fusi lengkap sinkronisasi anterior dan neurosentral bilateral, dan setelah >8 tahun, terjadi osifikasi sekunder dan fitur anatomi tambahan telah berkembang. Proses osifikasi sekunder, yang bermanifestasi dalam bentuk endplate, dimulai setelah tahap osifikasi primer; endplate berkontribusi pada pertumbuhan lebih lanjut bersama dengan sendi uncinata dan uncovertebral. Komponen yang dikembangkan secara sekunder ini bertanggung jawab atas bentuk pelana vertebra cervical. seperti yang ditunjukkan sebelumnya, gerakan gabungan vertebra terjadi karena perubahan ini.^{52,61}



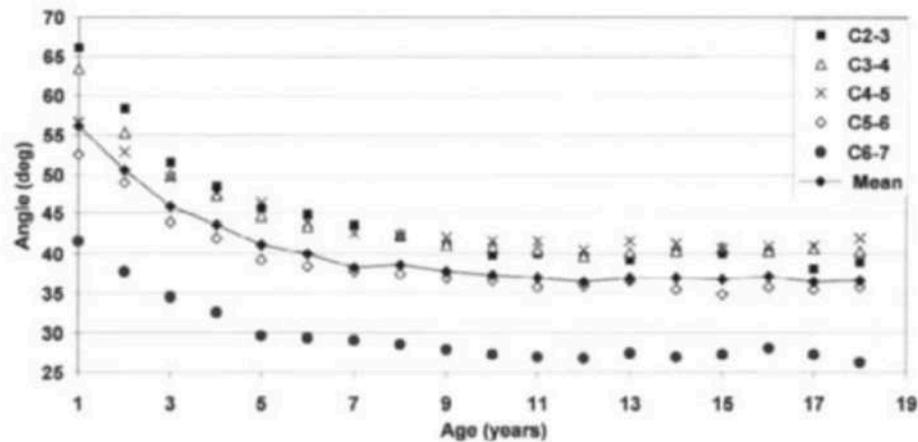


Gambar 38. Mineralisasi tulang kortikal dan trabekular berdasarkan periode pertumbuhan.⁵⁹

Sendi facet

Sendi facet merupakan komponen integral dari unit intervertebra untuk menahan beban mekanis. Perubahan orientasi sendi faset mengubah mobilitas dan juga kapasitas pemikul beban. Penelitian menggunakan vertebra orang dewasa telah melaporkan kontribusi sendi facet terhadap kekuatan dan stabilitas vertebra. Orientasi koronal utama dari sendi facet di daerah cervical, dibandingkan dengan orientasi intermediet di daerah thoraks dan orientasi sagital di daerah lumbar, bertanggung jawab untuk perubahan besaran mobilitas. Orientasi bidang sagital sendi facet di daerah lumbal membuat vertebra lumbal mampu menahan rotasi. Peneliti biomekanik telah menentukan orientasi sendi faset berdasarkan pertumbuhan vertebra sebagai fungsi usia untuk transmisi beban dan momen (Gambar 39). Khususnya vertebra cervical atas mempertahankan angulasi sendi facet yang lebih tinggi daripada vertebra cervical bawah, terutama pada tahun-tahun awal kehidupan. Namun, saat ini eksperimen yang meneliti tentang biomekanika fisiologis dan kegagalan sendi faset pediatrik tidak tersedia.⁶²





Gambar 39. Variasi sudut sendi facet berdasarkan usia.²

Diskus intervertebralis

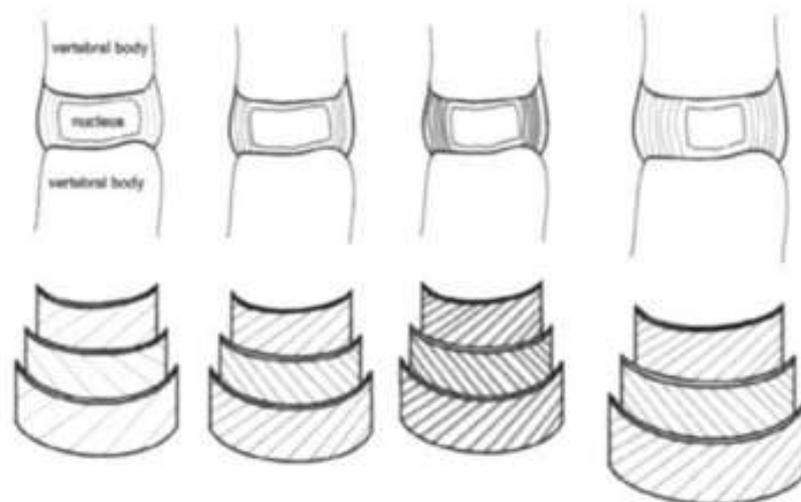
Diskus intervertebralis merupakan media transfer beban dari satu korpus vertebra ke korpus vertebra yang berdekatan (kaudal dari perspektif fisiologis). Karena tiga dimensi dan kemampuan korpus vertebra untuk menahan gaya multiaksial, mekanisme transfer beban didalam diskus intervertebralis menjadi kompleks. Perbedaan perubahan terkait usia antara elemen diskus intervertebralis dan korpus vertebra semakin menambah kompleksitas. Setiap diskus menahan kompresi, tegangan, gesekan, tekukan, dan torsi. Serupa dengan peningkatan geometri tubuh vertebra caudal, perubahan geometri diskus menyebabkan peningkatan beban aksial yang ditentang oleh berbagai tingkatan. Meskipun diskus jarang mengalami regangan langsung yang bersamaan sepanjang penampang (kecuali pada kondisi traumatik) gaya tarik terjadi pada setiap area diskus. Dalam kondisi fisiologis, annulus mengalami gaya tarik. Pada keadaan fleksi, aspek dorsal diskus mengalami regangan; pada keadaan ekstensi bagian ventral mengalami regangan; pada keadaan tekukan kearah lateral, gaya tarik dilawan oleh diskus pada sisi kontralateral; dan regangan melingkar terjadi dibawah kompresi. Jadi, diskus menahan gaya tarik secara lokal, meskipun vektor beban eksternal mungkin dalam mode yang berbeda. Selain itu, tekanan internal dari nucleus juga berkontribusi terhadap tekanan lokal pada serat annular.^{56,63}



tidak seperti korpus vertebra, diskus intervertebralis tidak dapat diuji terpisah, misalnya, dukungan vertebra yang berdekatan diperlukan untuk memahami sifat diskus intervertebralis sebagai satu kesatuan. Secara rutin, unit

fungsional atau segmen gerak (vertebra-diskus-vertebra) atau sendi diskus (unit fungsional tanpa kompleks posterior) yang digunakan. Komponen terlemah dari unit vertebra fungsional pada saat kompresi adalah endplate, bukan diskus intervertebralis. Pada vertebra lumbal dewasa dan pediatrik, diskus normal merespons dengan daya dukung beban yang lebih tinggi dan kekakuan yang lebih tinggi dibandingkan dengan diskus yang mengalami degenerasi. Pergerakan material nukleus ke inti cancellous korpus vertebra pada diskografi.⁵⁶

Model komputasi telah dikembangkan untuk lebih memahami nukleus pulposus, serat annulus, dan matriks dasar mengalami perubahan perkembangan yang cukup besar. Pola pertumbuhan juga saling terkait dalam nukleus dan annulus. Biasanya sekitar usia 1 tahun, diskus ditandai dengan nukleus besar dengan serat annular yang tertanam longgar yang memberikan perbedaan yang kurang jelas antara nukleus dan annulus (Gambar 40). Pada usia sekitar 3 tahun, perbedaan yang lebih jelas terjadi karena peningkatan pembentukan serat. Namun, nukleus masih menempati sejumlah besar diskus. Sekitar usia 6 tahun, serat mencapai kekakuan dan kepadatan yang lebih tinggi yang juga memperlihatkan batas antaranya. Selama masa remaja dan dewasa, nukleus semakin menyusut mencapai tingkat "matur secara struktur" dengan perkembangan bersama dengan annulus fibrosis. Diskus memanjang secara lateral di luar sentrum untuk membentuk prosesus uncinatus selama pubertas bersamaan dengan proses osifikasi vertebra sekunder. Variasi struktural diskus ini disertai dengan pembentukan sendi uncovertebral.^{64,65}

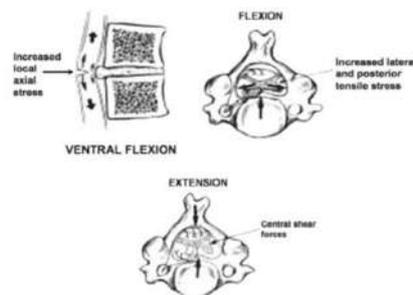


0. Pertumbuhan diskus intervertebralis (anulus fibrosis dan nucleus) pada anak 1 tahun, tiga tahun, enam tahun dan dewasa (dari kiri kekanan).²



Medulla spinalis

Medulla spinalis adalah bagian sistem saraf pusat yang merupakan lanjutan dari batang otak yang terbentang hingga regio lumba. Mirip dengan respons biomekanik dari unit fungsional vertebra, distraksi medulla spinalis pada cadaver menunjukkan fase yang berbeda dalam kurva perpindahan beban. *Displace* awal yang besar terjadi dengan tingkat gaya yang kecil yang menunjukkan fleksibilitas medulla spinalis yang tinggi. Namun, fleksibilitas awal ini diikuti dengan kekakuan dimana regangan atau gangguan tambahan membutuhkan tingkat beban yang lebih tinggi. Medulla spinalis turut berpartisipasi dengan kolumna vertebra pada perubahan konfigurasi sekunder posisi tubuh dan beban eksternal. Medulla spinalis cervical memanjang saat fleksi dan memendek saat ekstensi. Ketika kepala-leher mengalami fleksi, kanalis spinalis teregang pada dinding anterior dan posterior serta kontur vertebra posterior berbentuk cembung. Saat keadaan fleksi, medulla spinalis memanjang di dalam kanalis spinalis dan menurunkan diameter anteroposterior. Hal ini menginduksi peningkatan tegangan aksial pada silinder akson dari traktus *white matter* dan lesi pada kanalis spinalis dapat mengganggu area penampang; terutama tonjolan kearah ventral medulla spinalis sebagai respon peningkatan ketegangan aksial lokal (Gambar 41). Penurunan luas penampang kanalis spinalis terjadi akibat penonjolan dorsal annulus serta penebalan ligamentum flavum dapat menyebabkan penjepitan pada medulla spinalis. Kerusakan medulla spinalis ireversibel terjadi ketika kompresi melebihi 30% dari diameter medulla spinalis awal.⁶⁶



Gambar 41. Respon medulla spinalis pada gerakan fleksi dan ekstensi.⁶⁶



aya tarik yang diterapkan pada medulla spinalis dalam posisi netral ilkan distribusi beban yang merata di seluruh struktur; namun jika medulla mengalami tekukan, peningkatan tegangan tekan pada sisi cekung

menyebabkan peningkatan gangguan pada sisi cembung. Berbeda dengan gaya tarik, gaya geser maksimal menuju pusat medulla spinalis. Interaksi dari vektor-vektor gaya ini yang diterapkan ke berbagai daerah medulla psinalis selama fleksi menunjukkan potensi pola cedera yang kompleks. Selama hiperekstensi tiba-tiba, peningkatan tegangan geser yang nyata didaerah tengah medulla spinalis terjadi karena aksi seperti menjepit. Berdasarkan studi sebelumnya, Persamaan dapat dikembangkan menghubungkan peregangan sumsum vertebra dengan usia.⁶⁶

Ligamentum

Meskipun ligamen berbentuk seperti gambaran tiga dimensi, dari sudut pandang biomekanik, struktur ini hanya merespons tegangan. Efektivitas ligamentum untuk menahan beban biomekanik bergantung pada rasio elastin terhadap kolagen dan lengan momen yang dilaluinya. Secara umum, elastin menambah elastisitas dan kolagen berkontribusi pada integritas mekanis. Kontribusi ligamentum sebagai penahan beban pada vertebra, lokasi dan kekuatan anatomisnya merupakan faktor penting. Ligamentum yang sangat kuat terletak ditempat yang relatif memiliki jarak pendek dari sumbu rotasi dibandingkan dengan ligamentum yang memiliki rotasi lebih jauh. Misalnya, ligamentum longitudinal posterior memberikan sedikit resistensi terhadap fleksi karena perlekatan ventralnya yang lebih dekat, sedangkan ligamentum supraspinous memberikankan lebih banyak resistensi. Hal yang sama berlaku untuk ligamentum flavum yang berada di bawah tekanan kecuali kondisi hiperekstensi. Ligamentum ini juga memiliki kandungan elastin yang tinggi. Meskipun ligamentum kapsular memiliki lengan pengungkit yang lebih pendek, terutama pada vertebra cervical, ligamentum ini memainkan peran penting dalam stabilitas vertebra.⁶⁷

Variasi dalam kekuatan dan stabilitas dapat dikaitkan dengan geometri vertebra dan karakteristik pembebanan; ligamentum terjauh dari sumbu rotasi sesaat menunjukkan kekuatan tertinggi. Secara umum, kegagalan defleksi meningkat dengan bertambahnya jarak dari pusat rotasi vertebra, dengan peningkatan kekuatan dari vertebra cervical ke lumbar. Ligamentum yang secara anatomi terletak di sisi cembung kurvatura vertebra umumnya lebih kuat terutama yang terletak pada peralihan thorakolumbal dan cervical. Parameter biomekanik



aporkan untuk ligamentum longitudinal anterior dan posterior dewasa, dan, ligamentum flavum, dan ligamentum interspinous dan supraspinous lumbar. Parameter biomekanik seperti kekakuan, energi, dan tegangan

dan regangan kegagalan, dan parameter geometris seperti luas penampang dan panjang asli telah tersedia. Data serupa dilaporkan untuk ligamentum vertebra cervical bagian tengah ke bawah. Dalam artikel aslinya, Yoganan dan et al memberikan kurva force-deflection yang terperinci sebagai fungsi dari tipe ligamen dan level vertebra cervical.^{68,69}

2.5 Modalitas Imaging

Radiografi masih terus menjadi pemeriksaan utama pada vertebra pediatrik, meskipun kemajuan pesat juga pada pencitraan diagnostik lain. Radiografi memberikan informasi penting tentang alignment korpus vertebra, tinggi diskus intervertebralis, integritas sendi faset, pola trabekuler, dan kerusakan tulang kortikal.⁷⁰

Computed tomography (CT) digunakan untuk menggambarkan kondisi patologis yang ditemukan pada radiografi polos konvensional. Karakteristik diagnostik, lokasi yang tepat dan ketidakstabilan fraktur atau kondisi yang berpotensi dapat dievaluasi. CT lebih unggul dari MRI dalam menunjukkan kondisi detail tulang terutama saat terjadi injury. CT vertebra yang terjadi fraktur akan memberikan informasi yang diperlukan untuk mengklasifikasikan sebagai fraktur yang stabil atau tidak stabil dan menentukan apakah diperlukan tindakan operatif. Ini juga berguna untuk menentukan kecukupan fusi vertebra atau penyembuhan dari bagian yang terjadi defek. Selain itu, sangat berguna untuk mengidentifikasi lesi pada facet dan elemen posterior (pedikel, lamina, prosesus transversus dan prosesus spinosus) menentukan fraktur burst pada korpus vertebra dan mengevaluasi kanalis spinalis.⁷⁰

Kemajuan teknologi CT scan memungkinkan peningkatan resolusi gambar, pengurangan waktu akuisisi, dan perangkat lunak yang dapat memberikan gambaran tiga dimensi (3-D). Gambar standar CT yang didapatkan adalah potongan aksial, tetapi dengan perkembangan CT spiral yang memungkinkan mendapatkan data volumetrik, gambar yang diformat ulang pada bidang koronal dan sagital guna memberikan informasi tambahan. Baru-baru ini, perangkat lunak telah tersedia secara luas yang memungkinkan komputer grafis menghasilkan gambar rekonstruksi 3-D dari data yang dikumpulkan selama pencitraan aksial. CT



gat membantu untuk mengevaluasi masalah kompleks pada daerah craniocervikal pediatrik, kelainan bawaan atau dengan pola cedera lainnya.⁷⁰