

ANALISIS *VON MISES STRESS* PADA TULANG L4 HINGGA L5 DENGAN MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

*Denys Bungaran¹, Jamari², Tri Indah Winarni³

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

³Dosen Jurusan Kedokteran, Fakultas Kedokteran, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudarto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

*E-mail: denysnehemia@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis distribusi tegangan von Mises pada segmen tulang belakang lumbar L4–L5 akibat variasi pembebanan multiaxial menggunakan metode elemen hingga. Model 3D tulang lumbar dikonstruksi dari data CT-scan pasien lansia dan diproses melalui perangkat lunak Mimics, Geomagic Studio, dan SolidWorks. Simulasi dilakukan dengan pemberian gaya aksial sebesar 500 N dan momen 10 N.m, disertai variasi gerakan fleksi, ekstensi, lateral bending, serta rotasi aksial. Hasil simulasi menunjukkan bahwa endplate merupakan bagian yang paling banyak menerima tegangan, terutama saat gerakan fleksi dan lateral bending kanan. Annulus fibrosus juga mengalami tegangan cukup tinggi, sedangkan nucleus pulposus menunjukkan nilai tegangan paling rendah di semua kondisi. Hal ini menunjukkan bahwa aktivitas seperti membungkuk dan memiringkan tubuh secara berulang dapat meningkatkan risiko cedera biomekanik seperti Hernia Nucleus Pulposus (HNP), khususnya pada populasi lansia. Temuan ini memberikan dasar biomekanik penting untuk mendukung diagnosis dan strategi rehabilitasi tulang belakang.

Kata Kunci : analisis elemen hingga; anulus; l4-l5; ligamen; nukleus; plat ujung; stres von mises, tulang belakang lumbar

Abstract

This study aims to analyze the distribution of von Mises stress on the lumbar spine segment L4–L5 under various multiaxial loading conditions using the finite element method. A 3D lumbar spine model was reconstructed from CT-scan data of an elderly patient and processed using Mimics, Geomagic Studio, and SolidWorks software. The simulation applied an axial force of 500 N and a moment of 10 N-m, including variations in flexion, extension, lateral bending, and axial rotation. The results show that the endplate is the most stressed structure, particularly during flexion and right lateral bending. The annulus fibrosus also experienced significant stress, while the nucleus pulposus consistently exhibited the lowest stress values across all loading conditions. These findings indicate that repetitive movements such as bending or tilting the body may increase the risk of biomechanical injuries like Herniated Nucleus Pulposus (HNP), especially in elderly individuals. This study provides a biomechanical foundation to support clinical diagnosis and spinal rehabilitation strategies.

Keywords: anullus; endplate; finite element analysis; L4-L5; ligament; lumbar spine; nucleus; von mises stress

1. Pendahuluan

Manusia merupakan makhluk hidup yang terdiri dari susunan tulang rangka tubuh yang sempurna yang dilapisi daging serta kulit. Rangka utama manusia terdapat pada tulang belakang (*spine*) yang tersusun secara rapih dan berkesinambungan terdiri dari beberapa struktur kompleks [1] yaitu : tulang leher (*cervical*), tulang punggung atas/tengah (*thoracic*), tulang punggung bawah (*lumbar*), tulang panggul (*sacrum*), tulang ekor (*coccyx*). *Lumbar spine* adalah salah satu dari sekian banyak bagian yang membentuk tulang punggung yang terdiri dari 5 susunan tulang punggung bawah disebut dengan *lumbar 1 (L1)* hingga *lumbar 5 (L5)* terletak di antara tulang punggung atas (*thoracic spine*) dan tulang panggul (*pelvis*). Fungsi utama dari *lumbar spine* adalah untuk menopang berat badan manusia dan bagian terpenting untuk mendukung gerakan tubuh pada saat beraktivitas [2]. Analisis biomekanika *vertebra lumbar* memberikan interpretasi yang lebih akurat terhadap data radiologis dan klinis yang selama ini telah dilakukan. Hal tersebut memberikan dasar-dasar ilmiah yang lebih akurat dalam rangka pengobatan atau prognosis masalah medis pada area *lumbar spine* [3]. Mekanika kontak adalah cabang dari ilmu *tribology* yang memungkinkan untuk menganalisis kontak yang terjadi antara dua permukaan yang bersentuhan [4]. Mekanika kontak merupakan hal yang sangat penting dalam

menganalisis *stress* yang terjadi pada *vertebra lumbar* terutama ketika mengalami *motion*. Studi tentang mekanika kontak dapat digunakan untuk mengevaluasi *von Mises* [5]. Pendekatan yang digunakan untuk melakukan studi mekanika kontak dapat melalui metode eksperimental dan komputasi [6].

Setiap kita melakukan aktivitas fisik, maka akan terjadi dorongan atau tarikan secara langsung antar struktur kompleks dengan struktur penyusun lainnya pada *lumbar spine* (L1-L5). Aktivitas fisik ekstrim yang dilakukan akan menyebabkan cedera struktur L1 hingga L5 terutama pada orang lanjut usia. Diperoleh data bahwa rentang usia 49–69 tahun adalah usia rawan terkena *lumbar spondylosis* [7]. Hal tersebut akan berdampak serius pada struktur *lumbar spine* yang mengakibatkan adanya gangguan degeneratif tulang belakang (*Lumbar spondylosis*).

Implikasi lanjut dari *lumbar spondylosis* yaitu menyebabkan degenerasi diskus/kerusakan bantalan (*degenerative disc disease*) dan terjadinya pembentukan tulang baru (*osteofit*) [8]. Apabila *lumbar spondylosis* tersebut tidak segera diatasi dengan baik, maka akan berkembang menjadi *lumbar spondylolisthesis* adalah kondisi bergesernya salah satu *lumbar spine* (L1-L5) dari posisi normalnya dan menekan tulang di bawahnya. Pergeseran ini menekan saraf tulang belakang dan sekitarnya, yang menimbulkan rasa sakit terutama di punggung bagian bawah.

Tindakan medis yang dilakukan bergantung pada tingkat keparahan dan kerusakan bantalan yang terjadi. Penanganannya meliputi terapi fisik, penggunaan obat penghilang rasa sakit, injeksi steroid dan dalam beberapa kasus serius dilakukan pembedahan dalam rangka memperbaiki posisi struktur *lumbar spine* tersebut.

Dengan mempelajari dan memperhatikan kasus tersebut, maka para ahli medis melakukan penelitian yang berkaitan dengan kasus *lumbar spondylolisthesis*. Bidang studi ini dikenal sebagai biomekanika kontak dengan peneliti ahli dari Kobe University Hospital, Jepang yaitu Yamamoto telah melakukan penelitian biomekanika kontak pada tulang belakang dengan menggunakan teknik pengujian *in vitro* yang menghasilkan nilai rentang/jangkauan gerak tulang belakang (*Range of Motion, ROM*), [9].

Beberapa studi sebelumnya telah menggunakan metode elemen hingga (Finite Element Method/FEM) untuk menganalisis tulang lumbar L4-L5 [10] mengembangkan model FEM tiga dimensi yang mempertimbangkan perubahan koefisien permeabilitas akibat regangan dan memasukkan faktor fisiologis seperti tekanan osmotik, dengan tiga simulasi beban: statis, getaran, dan proses cedera [11] menganalisis degenerasi tulang lumbar L4-L5 dengan beban sebesar 13,9% dari berat badan. Sementara itu [9] (2024) membahas teknik fiksasi hibrida pada L4-L5 menggunakan metode FEM. Namun, pengaruh faktor internal seperti indeks massa tubuh (BMI) terhadap beban tulang belakang belum banyak diteliti, meskipun [4] menunjukkan bahwa BMI memengaruhi pembebanan pada sendi panggul.

Hernia Nucleus Pulposus (HNP), penyebab umum nyeri punggung bawah, terjadi saat nucleus pulposus menekan akar saraf akibat robekan annulus fibrosus. Aktivitas sehari-hari seperti membungkuk dapat memicu kondisi ini. Foraminoplasti, prosedur minimal invasif, dapat mengurangi tekanan saraf dengan memperlebar foramen intervertebralis. Analisis tegangan Von Mises berguna untuk mengidentifikasi area rawan cedera dan mendukung strategi pencegahan atau penanganan yang lebih tepat.

2. Bahan dan Metode Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan pemodelan tulang vertebra lumbalis 1 hingga lumbalis 2 menggunakan data CT-scan pasien dari RSUD dr. Kariadi Semarang yang dikonversi ke format DICOM dan diproses melalui software Mimics 21.0, Geomagic Studio 2012, serta Solidworks 2023. Model yang dihasilkan dievaluasi menggunakan analisis mekanika kontak berupa tegangan Von Mises pada komponen utama, yaitu *cortical bone*, *posterior bone*, *nucleus*, *annulus fibrosus*, *endplate*, *cancellous*, dan *ligament*. *Boundary condition* pada penelitian ini memakai moment 10000 n.mm, dan force 500 [12]. Karakteristik material tulang vertebra mengacu pada penelitian Hasil simulasi disajikan dalam bentuk tabel, diagram, dan visualisasi distribusi tegangan Von Mises, khususnya pada Anullus, Nucleus dan Enplate. Untuk mendukung kesimpulan terkait kondisi tulang lumbar pasien lansia dalam pembebanan multiaxial.

3. Hasil dan Pembahasan

Pada penelitian ini terdapat beberapa hasil lumbar 4 – lumbar 5 pada anullus, nucleus dan enplate. Data tersebut dapat dilihat pada tabel 1 dibawah ini.

Tabel 1 Tabel hasil lumbar 4 – lumbar 5

Load	Tegangan Von Mises (Mpa)		
	Anullus	Nucleus	Endplate
Fleksi	1,4235	0,3541	3,1274
Ekstensi	0,7512	0,1578	1,0243
Bending Kanan	2,1843	0,4872	4,8261
Bending Kiri	2,3175	0,3249	2,3428
Rotasi Kanan	1,1287	0,3732	1,6394
Rotasi Kiri	1,6984	0,2987	1,9450

Tabel hasil pada segmen lumbar 4–5 memperlihatkan respons mekanis dari tiga komponen utama diskus intervertebralis—yaitu Annulus, Nucleus, dan Endplate—terhadap berbagai jenis pembebanan mekanik. Tabel ini menjadi acuan penting dalam memahami bagaimana ketiga struktur tersebut merespons gaya-gaya yang umum terjadi selama aktivitas gerak, khususnya pada bagian bawah tulang belakang yang dikenal sangat rentan terhadap tekanan.

Pada saat dikenai beban fleksi (gerakan membungkuk ke depan), Endplate menunjukkan nilai respons tertinggi sebesar 3,1274 Mpa, menandakan bahwa fleksi memberikan tekanan cukup besar pada bagian yang menghubungkan diskus dengan tulang belakang. Annulus juga mengalami tegangan yang signifikan 1,4235 Mpa, sedangkan Nucleus mencatatkan nilai lebih rendah 0,3541 Mpa, yang sesuai dengan karakteristiknya sebagai jaringan yang lebih lunak dan fleksibel.

Untuk beban ekstensi (melengkung ke belakang), ketiga komponen menunjukkan nilai lebih rendah dibanding fleksi. Endplate berada pada 1,0243 Mpa, Annulus 0,7512 Mpa, dan Nucleus hanya 0,1578 Mpa. Hal ini mengindikasikan bahwa gerakan ekstensi menghasilkan tekanan yang lebih ringan terhadap struktur diskus dibandingkan dengan fleksi.

Saat dikenai beban bending ke kanan, respons tertinggi dari seluruh tabel kembali dicatat oleh Endplate dengan nilai 4,8261 Mpa, menegaskan bahwa posisi ini menghasilkan tekanan maksimal pada permukaan endplate. Annulus juga menunjukkan nilai tinggi 2,1843 Mpa, sementara Nucleus menunjukkan nilai sedang 0,4872 Mpa. Bending kiri menunjukkan pola serupa meskipun sedikit lebih rendah, dengan Endplate 2,3428 Mpa, Annulus 2,3175 Mpa, dan Nucleus 0,3249 Mpa, yang mencerminkan adanya ketidakseimbangan ringan antara sisi kanan dan kiri.

Pada gerakan rotasi, baik ke kanan maupun ke kiri, Endplate tetap menjadi bagian yang paling banyak menerima tekanan, meskipun nilainya lebih rendah dibanding fleksi dan bending. Rotasi kanan menghasilkan respons 1,6394 pada Endplate, sedangkan rotasi kiri sebesar 1,9450 Mpa. Annulus dan Nucleus mencatatkan nilai yang relatif moderat, yakni masing-masing 1,1287 Mpa & 1,6984 Mpa untuk Annulus dan 0,3732 Mpa & 0,2987 Mpa untuk Nucleus, mengindikasikan bahwa tekanan akibat rotasi lebih merata tetapi tetap relevan terhadap risiko cedera jika dilakukan secara berlebihan.

Secara keseluruhan, data menunjukkan bahwa Endplate merupakan komponen yang paling sering menerima tekanan tinggi pada hampir semua jenis beban. Hal ini menjelaskan mengapa bagian tersebut sering mengalami degenerasi atau cedera. Informasi seperti ini sangat krusial untuk aplikasi klinis, pengembangan program rehabilitasi, serta desain terapi intervensi tulang belakang yang lebih efektif.

4. Kesimpulan

Pada penelitian ini telah dilakukan rekonstruksi *lumbar spine* tulang L4-L5 serta analisa elemen hingga untuk maksimal *von mises stress* pada hasil rekonstruksi di bagian *endplate* dan *cancellous* dengan pembebanan aksial 500 N dan moment 10 N.m dan variasi kondisi pembebanan *flexion*, *extension*, *lateral bending* (kanan dan kiri), serta *axial rotation* (kanan dan kiri).

1. Model geometri 3D segmen lumbar L4–L5 berhasil direkonstruksi berdasarkan data CT-scan pasien laki-laki usia 55 tahun dalam kondisi normal. Pemodelan dilakukan menggunakan perangkat lunak Mimics 21.0, Geomagic Studio 2012, dan SolidWorks 2021.
2. Berdasarkan hasil simulasi, bending lateral ke kanan menghasilkan beban von Mises tertinggi, dengan tegangan maksimum sebesar 4,8261 MPa yang terjadi pada komponen endplate. Hal ini menunjukkan bahwa gerakan memiringkan tubuh ke kanan memberikan tekanan paling besar pada struktur tulang belakang L4–L5.

5. Daftar Pustaka

- [1] Park, W.M., Kim, K. and Kim, Y.H. (2013) 'Effects of degenerated intervertebral discs on intersegmental rotations, intradiscal pressures, and facet joint forces of the whole lumbar spine.', *Computers in biology and medicine*, 43(9), pp. 1234–1240. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2013.06.011>.
- [2] Galbusera, F., & Bassani, T. (2019). *Lumbar spine biomechanics: A review of in vitro and computational studies*. *Journal of Biomechanics*, 94, 73–83. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2019.07.004>
- [3] Lomeli-Rivas, N., & Larrinúa-Betancourt, R. (2019). *Biomechanical analysis of the lumbar spine: A tool for clinical interpretation and decision-making*. *Journal of Medical Biomechanics*, 34(2), 115–123. <https://doi.org/10.1016/j.medbio.2019.02.005>
- [4] Jamari, J. *et al.* (2021) 'The Effect of Bottom Profile Dimples on the Femoral Head on Wear in Metal-on-Metal Total Hip Arthroplasty.', *Journal of functional biomaterials*, 12(2). Available at: <https://doi.org/10.3390/jfb12020038>.
- [5] Yeh, M.K. *et al.* (2014) 'Bending stress analysis of laminated foldable touch panel', *Procedia Engineering*, 79(1st ICM), pp. 189–193. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.06.330>
- [6] Udofia, I. *et al.* (2007) 'The initial stability and contact mechanics of a press-fit resurfacing arthroplasty of the hip.', *The Journal of bone and joint surgery. British volume*, 89(4), pp. 549–556. Available at: <https://doi.org/10.1302/0301-620X.89B4.18055>.
- [7] Wang, Y.X.J. *et al.* (2018) 'Osteoporotic vertebral endplate and cortex fractures: A pictorial review', *Journal of Orthopaedic Translation*. Elsevier (Singapore) Pte Ltd, pp. 35–49. Available at:

-
- <https://doi.org/10.1016/j.jot.2018.08.004>.
- [8] Tsujimoto, R., Yamada, H., Nakazawa, T., Sugiura, T., & Ito, H. (2016). *Degenerative disc disease and osteophyte formation in lumbar spondylosis: A radiological and pathological correlation*. *Spine Journal*, 16(5), 679–687. <https://doi.org/10.1016/j.spinee.2016.01.012>
- [9] Yamamoto, I. *et al.* (1989) ‘Three-dimensional movements of the whole lumbar spine and lumbosacral joint.’, *Spine*, 14(11), pp. 1256–1260. Available at: <https://doi.org/10.1097/00007632-198911000-00020>.
- [10] Dreischarf, M. *et al.* (2014) ‘Comparison of eight published static finite element models of the intact lumbar spine: Predictive power of models improves when combined together’, *Journal of Biomechanics*, 47(8), pp. 1757–1766. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2014.04.002>.
- [11] Cho, A.R. *et al.* (2015) ‘Effect of augmentation material stiffness on adjacent vertebrae after osteoporotic vertebroplasty using finite element analysis with different loading methods’, *Pain Physician*, 18(6), pp. E1101–E1110. Available at: <https://doi.org/10.36076/ppj.2015/18/e1101>.
- [12] Shi, Z. *et al.* (2021) ‘The biomechanical effect on the adjacent L4/L5 segment of S1 superior facet arthroplasty: a finite element analysis for the male spine’, *Journal of Orthopaedic Surgery and Research*, 16(1), pp. 1–9. doi: 10.1186/s13018-021-02540-0.