

ANALISIS *VON MISES STRESS* PADA TULANG L1 HINGGA L2 DENGAN KONDISI PEMBEBANAN *MULTIAXIAL* MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

*Muhammad Rafli¹, 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. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

*E-mail: muhammadrafli140203@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis distribusi tegangan *von mises* pada *lumbar spine* L1 hingga L2 dengan kondisi pembebanan *multiaxial* menggunakan metode elemen hingga (*Finite Element Analysis/FEA*). Data geometri diperoleh dari CT-scan pasien laki-laki berusia 55 tahun dalam kondisi normal, yang selanjutnya direkonstruksi menjadi model 3D menggunakan perangkat lunak CAD dan disimulasikan dengan Ansys 2023 R2. Simulasi dilakukan dengan pembebanan aksial sebesar 500 N dan variasi momen lentur (2,5 N.m, 5 N.m, 7,5 N.m, dan 10 N.m) dalam enam arah gerak. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai *von mises stress* tertinggi pada bagian *cancellous* dan *endplate* ditemukan pada kondisi *flexion* dengan momen 10 N.m. Namun, terdapat ketidakteraturan pada data *endplate*, di mana tegangan tertinggi tidak selalu terjadi pada momen tertinggi. Penelitian ini juga menekankan pentingnya evaluasi biomekanis pada struktur *cancellous* dan *endplate* yang selama ini kurang diperhatikan, serta menunjukkan peran penting ligamen dalam menjaga kestabilan segmental tulang belakang.

Kata kunci: *cancellous; endplate; finite element analysis; L1-L2; ligamen; lumbar spine; multiaxial; von mises stress*

Abstract

This study aims to analyze the distribution of von mises stress on the lumbar spine L1 to L2 under multiaxial loading conditions using the Finite Element Method (FEM). Geometric data were obtained from a CT scan of a 55-year-old male patient in normal condition, then reconstructed into a 3D model using CAD software and simulated with Ansys 2023 R2. The simulation involved a 500 N axial load combined with flexural moments (2.5 N.m, 5 N.m, 7.5 N.m, and 10 N.m) applied in six motion directions. The results showed that the highest von mises stress in the cancellous and endplate regions occurred during flexion at 10 N.m moment. However, irregularities were observed in the endplate data, where maximum stress did not always correlate with the highest moment. This study highlights the importance of biomechanical evaluation of cancellous and endplate structures, which have been previously overlooked, and emphasizes the critical role of ligaments in maintaining spinal segmental stability. These findings can serve as a foundation for developing spinal implants based on stress distribution data.

Keywords: *cancellous; endplate; finite element analysis; L1-L2; ligaments; lumbar spine; multiaxial; 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].

Penelitian biomekanika kontak dengan metode *in vitro* (menggunakan spesimen asli tulang belakang manusia) menghasilkan nilai yang bervariasi, sehingga sulit untuk dilakukan analisa secara mendalam. Beberapa tahun terakhir, pengujian *in vitro* tersebut sudah mulai ditinggalkan dan digantikan oleh metode analisis elemen hingga, *Finite Element Analysis* (FEA) yang dapat meminimalisir kesulitan, keterbatasan, dan dilema moral yang terkait dengan penelitian *in vitro* serta berpotensi lebih menghemat biaya dibandingkan dengan studi eksperimental *in vivo* dan *in vitro* [10].

Finite Element Analysis (FEA) adalah sebuah eksperimen untuk membentuk beberapa alternatif model geometri tulang belakang yang kompleks dan dalam kondisi yang terbatas dengan membagi model yang rumit menjadi komponen-komponen yang lebih sederhana secara individual mudah dipelajari dan direpresentasikan secara matematis, *software* (perangkat lunak) pada metode FEA dapat men-simplifikasi model yang kompleks dengan cara memecah aspek-aspeknya menjadi komponen-komponen yang lebih mudah dikelola secara kuantitatif. Karakteristik biomekanik *lumbar spine* dapat dijelaskan secara menyeluruh dengan metode ini, termasuk juga nilai metrik, tekanan, regangan, dan energi regangan yang berasal dari karakteristik yang melekat pada tulang belakang.

Dalam penelitian ini dilakukan studi pendahuluan dengan melakukan analisis biomekanis *cancellous* dan *endplate* pada L1 hingga L2 dengan kondisi pembebanan *multiaxial* menggunakan metode *Finite Element Analysis* (elemen hingga) dengan tinjauan kekuatan material spesimen pasien lanjut usia. Penelitian dilakukan untuk mengetahui arah dan nilai *von mises stress* pada *cancellous* dan *endplate* L1-L2 pada pasien dalam kondisi normal. Penelitian ini juga bertujuan untuk mengetahui letak atau distribusi nilai tegangan *von Mises* tertinggi pada *inferior cancellous* dan *endplate* L1-L2 yang berfungsi sebagai penyangga struktur keseimbangan bantalan dalam kasus *degenerative disc disease*, letak distribusi dapat mem-visualisasi-kan letak lokasi atau tempat yang berisiko mengalami gangguan tegangan tertinggi.

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*. Karakteristik material tulang vertebra mengacu pada penelitian Ah-Reum Chom et al. [11], sementara validasi geometri dilakukan dengan membandingkan hasil model dengan penelitian oleh Haiyun et al. (2006) [12], khususnya pada nilai *displacement*, dengan toleransi error kurang dari 5%. Analisis simulasi dilakukan menggunakan beban vertikal sebesar 500 N dan momen 2,5–10 N.m dengan arah *multiaxial*. Hasil simulasi disajikan dalam bentuk tabel, diagram, dan visualisasi distribusi tegangan Von Mises, khususnya pada *endplate* dan *cancellous*, untuk mendukung kesimpulan terkait kondisi tulang lumbar pasien lansia dalam pembebanan *multiaxial*.

3. Hasil dan Pembahasan

Pada penelitian ini proses validasi hasil simulasi dilakukan dengan membandingkan nilai *displacement* simulasi penulis dengan hasil simulasi yang dilakukan oleh Li, et al., 2006 dengan nilai error kurang dari 5%, yaitu 0,82%.

Tabel 1 Tabel Validasi Hasil

Load	Haiyun Li et al (2006)	Present Study
500	0.4172	0.42092
1000	0.8478	0.84184
1500	1.1947	1.2628
2000	1.6926	1.6837
2500	2.1048	2.1046

Berdasarkan tabel 1 diatas hasil simulasi telah memenuhi kriteria yang ditentukan atau dapat diwakili dengan validasi geometri yang berhasil, seperti yang ditunjukkan oleh tahap pengolahan data. Tahap pengolahan data menunjukkan bahwa nilai validasi telah memiliki kesamaan dengan nilai *displacement* dengan pembebanan atau *vertical load* dalam rentang nilai dari 500 N hingga 2500 N.

Dapat diketahui bahwa adanya *irregular* data yang terjadi pada *endplate* dimana nilai *von mises stress* tertinggi berada pada *moment* 2,5 N.m bukan pada *moment* 10 N.m. Hasil simulasi mengindikasikan bahwa pada bagian *endplate* pada fase awal pembebanan (*moment* kecil) distribusi tegangan di area *endplate* lebih dipengaruhi oleh komponen gaya aksial yaitu 500 N yang mewakili berat beban pasien. Namun, ketika *moment* meningkat, kontribusi komponen *moment* menjadi lebih dominan dari beban aksial ke *moment* lentur dalam mempengaruhi nilai tegangan von mises yaitu nilai *maximum pressure* pada tubuh manusia.

Berdasarkan hasil simulasi merupakan gambar 3D dari persebaran distribusi tegangan von mises pada *endplate*. Hasil simulasi memperlihatkan bahwa distribusi tegangan cenderung meningkat seiring bertambahnya besar momen yang diberikan. Temuan ini memberikan indikasi bahwa arah pembebanan dan besar momen berpengaruh signifikan terhadap respon mekanik struktur *endplate*, serta dapat menjadi acuan dalam evaluasi biomekanik tulang belakang pada kondisi pembebanan fisiologis maupun patologis.

Berdasarkan hasil simulasi *cancellous* yang dilakukan memiliki nilai tegangan von mises tertinggi pada *cancellous* L1 kondisi *flexion* yaitu 1,7002 MPa dengan *moment* 10 N.m

Berdasarkan Gambar 4 diatas peta *von mises stress* yang diperoleh, disarankan pengembangan implan dengan pendekatan berbasis data distribusi tegangan (*stress-guided design*), di mana dimensi, bentuk, dan material implan diatur untuk mengurangi beban puncak pada *endplate* serta mendorong distribusi beban yang lebih fisiologis ke tulang *cancellous*.

4. Kesimpulan

Pada penelitian ini telah dilakukan rekonstruksi *lumbar spine* tulang L1-L2 serta analisa elemen hingga untuk maksimal *von mises stress* pada hasil rekonstruksi di bagian *endplate* dan *cancellous* dengan pembebanan aksial 500 N dan variasi *moment* 2,5 N.m, 5 N.m, 7,5 N.m, dan 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 L1–L2 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 2023, serta divalidasi terhadap penelitian sebelumnya (Li et al., 2006). Hasil validasi menunjukkan nilai error *displacement* sebesar 0,82%, yang berada dalam rentang yang dapat diterima (di bawah 5%), sehingga model dinyatakan valid dan layak digunakan untuk simulasi biomekanis..
2. Simulasi dilakukan dengan pembebanan aksial sebesar 500 N serta variasi *moment* (2,5 N.m, 5 N.m, 7,5 N.m, dan 10 N.m) dalam arah gerak *multiaxial* (fleksi, ekstensi, lateral bending kanan/kiri, dan rotasi aksial kanan/kiri). Nilai maksimum tegangan *von mises* tertinggi secara umum ditemukan pada *moment* 10 N.m, terutama pada kondisi *flexion*. Tegangan *von mises* maksimum pada *cancellous* L1 tercatat sebesar 1,7002 MPa, dan pada inferior *endplate* L2 sebesar 6,4764 MPa, keduanya terjadi pada kondisi *flexion* dengan *moment* 10 N.m. Hasil simulasi juga menunjukkan pola distribusi tegangan yang berbeda tergantung arah gerak, dengan *flexion* dan *lateral bending* kiri menghasilkan nilai tertinggi pada sebagian besar komponen.
3. Ditemukan fenomena tidak terduga (*irregularities*) pada bagian *endplate*, di mana nilai tegangan *von mises* tertinggi tidak selalu terjadi pada momen tertinggi (10 N.m), khususnya pada kondisi ekstensi. Hal ini mengindikasikan bahwa pada fase pembebanan awal, gaya aksial (500 N) memiliki pengaruh yang lebih dominan dibandingkan dengan momen lentur terhadap distribusi tegangan di *endplate*. Seiring peningkatan momen, dominasi gaya lentur mulai mengambil alih pengaruh gaya aksial.

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] Wáng, 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] Li, H. and Wang, Z. (2006) ‘Intervertebral disc biomechanical analysis using the finite element modeling based on medical images’, *Computerized Medical Imaging and Graphics*, pp. 363–370. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.compmedimag.2006.09.004>.