

## ANALISIS DISTRIBUSI TEGANGAN *VON MISES* PADA VERTEBRA LUMBALIS 4 HINGGA SACRALIS 1 TERHADAP VARIASI SUDUT FLEKSI DENGAN METODE NUMERIK

\*Kusuma Febriyanto<sup>1</sup>, Ojo Kurdi<sup>2</sup>, Jamari<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

<sup>2</sup>Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudharto, S.H., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

\*E-mail: kusuma24febriyanto@gmail.com

### Abstrak

Struktur tulang belakang manusia, khususnya pada segmen lumbal bawah (L4–S1), memiliki peran vital dalam menopang beban tubuh dan memberikan fleksibilitas gerak. Dalam aktivitas sehari-hari seperti membungkuk, mengangkat beban, atau duduk dalam waktu lama, segmen ini mengalami kombinasi beban aksial, gaya geser, dan momen lentur yang kompleks. Interaksi ketiga beban ini dapat memicu konsentrasi tegangan internal yang berpotensi menimbulkan gangguan mekanis seperti herniasi diskus atau spondilolistesis, terutama saat sudut fleksi tubuh meningkat secara signifikan. Untuk memahami bagaimana sudut fleksi memengaruhi distribusi tegangan, dilakukan simulasi numerik menggunakan pendekatan metode elemen hingga (FEM). Geometri tulang belakang dibuat berdasarkan data CT-scan pasien yang kemudian dimodelkan dan divalidasi menggunakan perangkat lunak Mimics 21.0. Sudut fleksi divariasikan mulai dari 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, hingga 75°, dengan beban vertikal sebesar 500 N. Hasil simulasi menunjukkan peningkatan tegangan von Mises seiring bertambahnya sudut fleksi, dengan nilai maksimum 1588,9 MPa pada sudut 60°. Setelah sudut tersebut, tegangan menurun sedikit pada 75°, namun masih tergolong tinggi. Temuan ini menegaskan pentingnya pemahaman distribusi tegangan pada tulang belakang dalam merancang alat ortopedi, prosedur klinis, dan strategi rehabilitasi yang mempertimbangkan risiko cedera akibat postur ekstrem. Penelitian ini memberikan kontribusi penting dalam pengembangan intervensi biomekanik yang lebih aman dan efektif.

**Kata kunci:** fem; fleksi; lumbal; tegangan *von mises*

### Abstract

*The structure of the human spine, particularly in the lower lumbar segment (L4–S1), plays a vital role in supporting body weight and providing movement flexibility. In daily activities such as bending, lifting loads, or sitting for long periods, this segment experiences a combination of axial loads, shear forces, and complex bending moments. The interaction of these three loads can trigger internal stress concentration that potentially causes mechanical disorders such as disc herniation or spondylolisthesis, especially when the body's flexion angle significantly increases. To understand how the flexion angle affects stress distribution, a numerical simulation was conducted using the finite element method (FEM) approach. The geometry of the spine was created based on the patient's CT-scan data, which was then modeled and validated using Mimics 21.0 software. The flexion angles were varied from 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, to 75°, with a vertical load of 500 N. The simulation results show an increase in von Mises stress as the flexion angle increases, with a maximum value of 1588.9 MPa at a 60° angle. After that angle, the stress decreases slightly at 75°, but it is still considered high. These findings underscore the importance of understanding the distribution of stress on the spine in designing orthopedic devices, clinical procedures, and rehabilitation strategies that consider the risk of injury from extreme postures. This research provides an important contribution to the development of safer and more effective biomechanical interventions.*

**Keywords:** FEM; flexion; lumbar; von Mises stress

### 1. Pendahuluan

Struktur tulang belakang manusia merupakan sistem biomekanik kompleks yang menopang berat tubuh dan memungkinkan fleksibilitas gerak. Segmen lumbal bagian bawah, khususnya L4-S1, sering mengalami beban biomekanik signifikan akibat kombinasi antara tekanan aksial, gaya geser, dan momen lentur selama aktivitas harian seperti membungkuk dan mengangkat beban [1]. Dalam konteks analisis rekayasa, distribusi tegangan pada struktur ini dapat

dievaluasi menggunakan pendekatan tegangan ekuivalen *von Mises*, yang banyak digunakan dalam teknik mesin untuk menilai titik kritis kegagalan material akibat beban kompleks.

Variasi sudut fleksi pada segmen L4-S1 memiliki pengaruh langsung terhadap besarnya tegangan internal yang terjadi, terutama pada struktur diskus intervertebralis dan facet joint. Studi finite element (FE) telah menunjukkan bahwa peningkatan sudut fleksi dapat menyebabkan konsentrasi tegangan *von Mises* yang lebih tinggi pada *annulus fibrosus* (AF) dan endplate vertebra [2]. Hal ini berimplikasi besar terhadap risiko cedera mekanis maupun degeneratif, seperti herniasi diskus dan spondilolistesis.

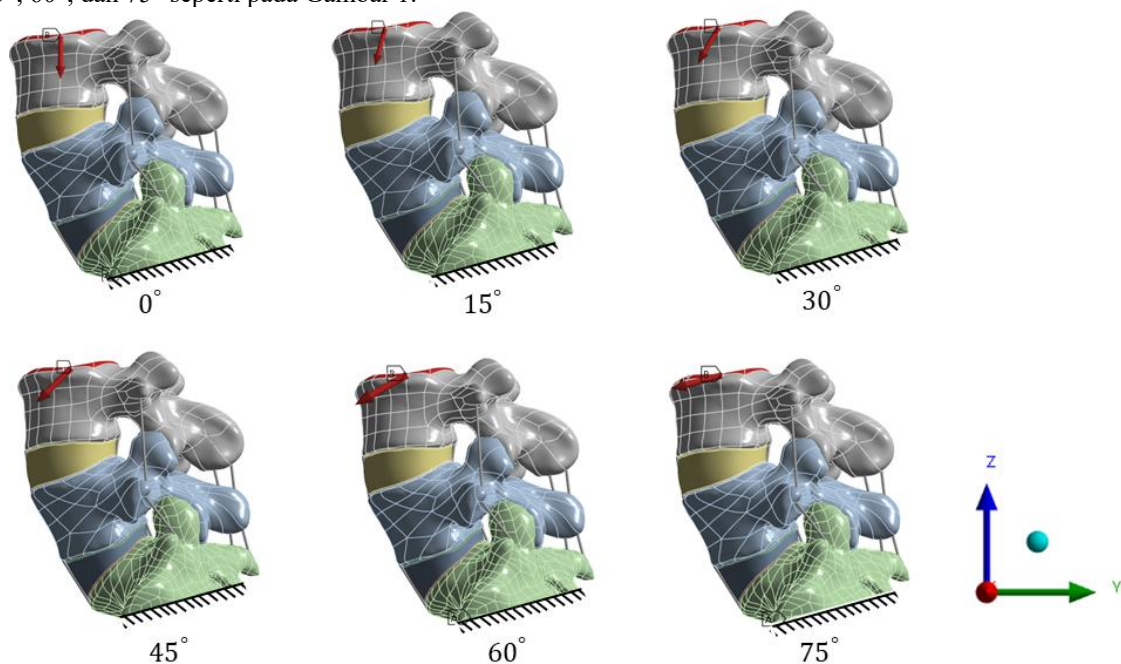
Penelitian terkini dalam bidang teknik biomekanika memperlihatkan pentingnya pemahaman distribusi tegangan *von Mises* sebagai dasar untuk desain intervensi medis seperti fiksasi pedikel, disk prostetik, dan penyesuaian teknik rehabilitasi [3] [4]. Dalam simulasi numerik menggunakan model FE, variasi sudut fleksi memberikan hasil tegangan berbeda, baik secara linier maupun nonlinier, tergantung pada kondisi batas, properti material tulang, dan konfigurasi geometris spinal [5].

Dengan demikian, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis secara komprehensif distribusi tegangan von Mises pada segmen L4-S1 terhadap variasi sudut fleksi menggunakan pendekatan elemen hingga. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan desain biomekanik serta penilaian risiko klinis pada tulang belakang lumbal bawah.

## 2. Bahan dan Metode Penelitian

Dalam proses rekonstruksi dan pemodelan tulang dari segmen L4-S1 diperlukan data hasil CT-scan. Data tersebut dikumpulkan dari CT-scan pasien di RSUD Dr. Kariadi Semarang. File DICOM dari hasil pemindaian kemudian dikonversi menjadi model dua dimensi, lalu dimodelkan menjadi bentuk 3D menggunakan perangkat lunak Mimics 21.0. Model 3D ini kemudian divalidasi dengan membandingkannya terhadap model yang diambil dari penelitian terdahulu, guna menjamin ketepatan geometri. Validasi ini mengacu pada hasil yang diperoleh dari penelitian sebelumnya, dengan membandingkan nilai range of motion (ROM) seperti yang dilaporkan oleh Rama *et al.* [6]. Validasi dianggap berhasil apabila hasil uji menunjukkan berada pada dalam *range* ROM yang tertera [7].

Model yang digunakan terdiri dari tulang L4 hingga S1, yang meliputi struktur seperti *cortical bone*, *cancellous bone*, *intervertebral disc*, *endplate*, dan *ligament*. Nilai sifat mekanik materialnya diambil dari penelitian yang sama oleh Rama *et al.* [6]. Pemberian beban dilakukan menyesuaikan *vertikal load* sebesar 500 N dengan sudut fleksi, yaitu 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, dan 75° seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. Pemberian *boundary conditions* pada model geometri L4-S1

Pembuatan mesh dilakukan dengan memperhatikan beberapa batasan teknis. Proses ini dimulai dari elemen berukuran besar yang kemudian dikecilkan secara bertahap. Tujuannya adalah membentuk model geometri untuk simulasi [8]. Teknik meshing bertujuan membagi model menjadi elemen-elemen lebih kecil agar dapat dianalisis secara numerik melalui metode elemen hingga (FEM). Pemilihan ukuran elemen, jenis, dan kerapatan mesh sangat penting untuk menjamin akurasi simulasi. Selain itu, proses ini juga berguna untuk mengurangi jumlah elemen yang tidak diperlukan dan mengurangi noise di area sekitar tulang saat simulasi dilakukan [9]. Oleh karena itu, pemilihan parameter mesh yang tepat sangat krusial karena akan mempengaruhi hasil simulasi akhir [10].

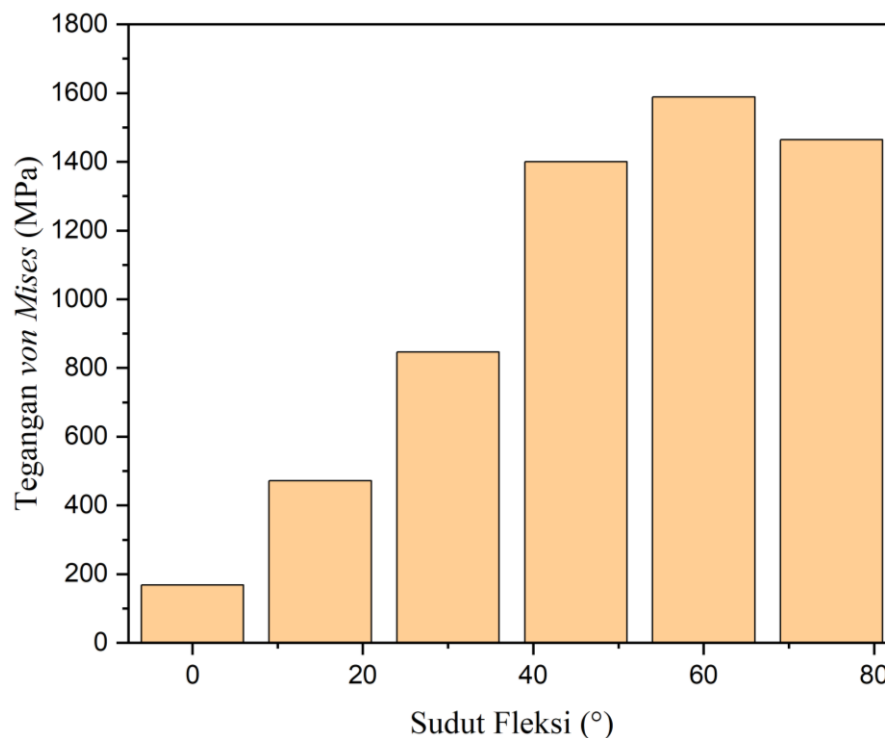
### 3. Hasil dan Pembahasan

Penelitian ini menganalisis tegangan *von Mises* pada segmen tulang L4-S1 akibat variasi sudut fleksi menggunakan metode elemen hingga. Hasil simulasi ditampilkan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Tegangan *von Mises* terhadap variasi sudut fleksi.

Sudut Fleksi (°)	Tegangan <i>von Mises</i> (MPa)
0	168,07
15	472,08
30	846,64
45	1399,9
60	1588,9
75	1464,7

Tegangan *von Mises* meningkat secara signifikan seiring bertambahnya sudut fleksi dari 0° hingga 60°, dengan nilai maksimum sebesar 1588,9 MPa pada sudut 60°. Setelah mencapai puncaknya pada 60°, tegangan mulai sedikit menurun pada sudut 75° (1464,7 MPa), namun masih tetap tinggi seperti pada Gambar 2. Peningkatan tegangan ini menunjukkan bahwa beban internal pada struktur tulang belakang semakin besar ketika tubuh dalam posisi membungkuk atau fleksi tinggi.



Gambar 2. Diagram batang tegangan *von Mises* terhadap variasi sudut fleksi.

Konsentrasi tegangan yang tinggi terutama pada sudut >45° menunjukkan risiko kerusakan mekanis seperti herniasi diskus atau spondilolistesis jika gerakan membungkuk dilakukan berulang atau dalam kondisi beban tinggi. Analisis ini mendukung temuan sebelumnya bahwa struktur tulang belakang sangat sensitif terhadap variasi sudut fleksi, terutama dalam kondisi fisiologis ekstrem. Hasil ini juga selaras dengan studi *finite element* lain yang menyatakan bahwa *annulus fibrosus* dan *endplate* merupakan titik kritis dalam menahan beban fleksi.

### 4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi menggunakan metode elemen hingga, dapat disimpulkan bahwa tegangan *von Mises* pada segmen tulang belakang lumbal bawah (L4–S1) meningkat seiring bertambahnya sudut fleksi. Tegangan maksimum tercatat pada sudut fleksi 60°, yaitu sebesar 1588,9 MPa, yang menunjukkan bahwa pada sudut ini struktur tulang belakang mengalami tekanan internal paling besar. Hal ini mengindikasikan bahwa aktivitas dengan posisi fleksi tinggi berisiko menimbulkan cedera mekanis seperti herniasi diskus atau spondilolistesis. Pengetahuan mengenai distribusi tegangan ini penting dalam mendukung pengembangan intervensi klinis, termasuk perancangan alat fiksasi tulang belakang, prostetik diskus, serta penyesuaian teknik rehabilitasi. Dengan demikian, hasil penelitian ini dapat memberikan kontribusi signifikan dalam upaya pencegahan dan penanganan gangguan biomekanik pada tulang belakang lumbal bawah.

## 5. Daftar Pustaka

- [1] A. A. Ivanov, A. Kiapour, N. A. Ebraheim, and V. Goel, "Lumbar fusion leads to increases in angular motion and stress across sacroiliac joint: a finite element study," *Spine (Phila. Pa. 1976)*, 2009, [Online]. Available: [https://journals.lww.com/spinejournal/fulltext/2009/03010/Bone\\_SPECT\\_of\\_the\\_Back\\_After\\_Lumbar\\_Surgery.00020.aspx](https://journals.lww.com/spinejournal/fulltext/2009/03010/Bone_SPECT_of_the_Back_After_Lumbar_Surgery.00020.aspx).
- [2] W. Wang *et al.*, "Biomechanical responses of human lumbar spine and pelvis according to the Roussouly classification," *PLoS One*, 2022, doi: 10.1371/journal.pone.0266954.
- [3] M. Mumtaz, A. P. Collins, N. Shekouhi, K. Varier, and S. Tripathi, "Effects of fixation strategies and multi-rod constructs on biomechanics of the proximal junction in long thoracolumbar posterior instrumented fusions," *Spine Deform.*, 2024, doi: 10.1007/s43390-024-00932-w.
- [4] J. S. Park, T. S. Goh, J. S. Lee, and C. Lee, "Analyzing isolated degeneration of lumbar facet joints: implications for degenerative instability and lumbar biomechanics using finite element analysis," *Front. Bioeng. Biotechnol.*, vol. 12, no. March, pp. 1–15, 2024, doi: 10.3389/fbioe.2024.1294658.
- [5] W. Fan and L. X. Guo, "Influence of different frequencies of axial cyclic loading on time-domain vibration response of the lumbar spine: a finite element study," *Comput. Biol. Med.*, vol. 87, pp. 66–72, 2017, doi: 10.1016/j.combiomed.2017.05.009.
- [6] L. J. Rama *et al.*, "Online : <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/jtm> Online : <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/jtm>," vol. 12, no. 3, pp. 25–28, 2024.
- [7] Z. Shi *et al.*, "The biomechanical effect on the adjacent L4/L5 segment of S1 superior facet arthroplasty: a finite element analysis for the male spine," *J. Orthop. Surg. Res.*, vol. 16, no. 1, pp. 1–9, 2021, doi: 10.1186/s13018-021-02540-0.
- [8] A. Wibisono, "Perancangan dan Analisis Metode Elemen Hingga Pada Desain Total Knee Replacement Berdasarkan MRI/CT–Scan Tulang Lutut Untuk Penderita Osteoarthritis." 2023.
- [9] A. A. Salimi, "Simulasi Finite Element Analysis (FEA) dan Fabrikasi Implan untuk Perbandingan Kinerja Implan Konvensional dan Custom Cruciate Retaining (CR) untuk Penderita Osteoarthritis Berdasarkan Rekonstruksi Data MRI/CT Scan Tulang Lutut," in *Simulasi Finite Elem. Anal. Dan Fabrikasi Implan Untuk Perbandingan Kinerja Implan Konvensional Dan Cust. Cruciate Retaining Untuk Penderita Osteoarthr. Berdasarkan Rekonstruksi Data MRI/CT Scan Tulang Lutut*, 2023, pp. 1–115.
- [10] Y. Sanjaya, A. R. Prabowo, F. Imaduddin, and N. A. B. Nordin, "Design and analysis of mesh size subjected to wheel rim convergence using finite element method," *Procedia Struct. Integr.*, vol. 33, no. C, pp. 51–58, 2021, doi: 10.1016/j.prostr.2021.10.008.