

REKONSTRUKSI dan SIMULASI ELEMEN HINGGA PADA VERTEBRA LUMBALIS 1 SAMPAI SACRALIS 1 DENGAN KONDISI PEMBEBANAN BERBEDA

*Hizkia Christian Putra Setiadi¹, Jamari², Tri Indah Winarni³

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460069

³ Dosen Jurusan Anatomi, Fakultas Kedokteran, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62248454714

*Email: hizkiac85@gmail.com

Abstrak

Tulang belakang manusia terdiri dari struktur kompleks seperti vertebra, diskus intervertebralis, ligamen, dan otot. Dalam diskus intervertebralis, degenerasi dapat terjadi dan menyebabkan rasa sakit di punggung bawah. Penyebab pasien yang mengalami spondylosis adalah adanya degenerasi diskus intervertebralis yang ditandai dengan penyempitan celah sendi. Melihat nilai tegangan von Mises dalam komponen diskus intervertebralis, ditemukan bahwa nilai tegangan dari von Mises memiliki hubungan berbanding terbalik dengan nilai parameter tinggi diskus. Parameter spinopelvic pada penelitian ini yaitu pengukuran *lumbar lordosis* dilakukan dengan metode Cobb. Didapati bahwa sudut *lumbar lordosis* pada pasien adalah 9.54° . *Ventral Disc Height* (vDH) dan *Dorsal Disc Height* (dDH) diukur pada data CT scan pasien yang didapatkan dari Rumah Sakit Islam Sultan Agung. Pengukuran vDH dan dDH dilakukan pada aplikasi Mimics 21.0. Nilai *Ventral Disc Height* (vDH) lumbalis 1 hingga sacralis 1 secara berturut-turut diperoleh 6.79 mm, 9.69 mm, 11.95 mm, 13.90 mm, dan 18.22 mm. Untuk *Dorsal Disc Height* (dDH) diperoleh 6.21 mm, 6.04 mm, 7.12 mm, 7.17 mm, dan 6.67 mm. Simulasi dilakukan untuk model elemen hingga (FEM) vertebral lumbal 1 ke sakralis 1 dalam tiga kondisi pembebanan berbeda. Von Mises terbesar pada diskus intervertebralis untuk kondisi pembebanan yang berbeda dalam penelitian ini adalah di *annulus fibrosus*, dan *nucleus pulposus* L2-L3 pada pembebanan *anterior flexion*, *lateral flexion*, dan *axial rotation*.

Kata kunci: degenerasi; diskus intervertebralis; fem

Abstract

The human spine is composed of complex structures such as vertebrae, intervertebral discs, ligaments, and muscles. In the intervertebral disc, degeneration can occur and cause pain in the lower back. The cause of patients experiencing spondylosis is the degeneration of the intervertebral disc which is characterized by narrowing of the joint space. Looking at the von Mises stress values in the intervertebral disc components, it was found that the von Mises stress values had an inverse relationship with the disc height parameter values. The spinopelvic parameter in this study was the measurement of lumbar lordosis by the Cobb method. It was found that the lumbar angle of lordosis in the patient was 9.54° . Ventral Disc Height (vDH) and Dorsal Disc Height (dDH) were measured on the patient's CT scan data obtained from Sultan Agung Islamic Hospital. vDH and dDH measurements were performed on the Mimics 21.0 application. The Ventral Disc Height (vDH) values of lumbar 1 to sacral 1 obtained respectively 6.79 mm, 9.69 mm, 11.95 mm, 13.90 mm and 18.22 mm. For Dorsal Disc Height (dDH) obtained 6.21 mm, 6.04 mm, 7.12 mm, 7.17 mm and 6.67 mm. Simulations were carried out for the lumbar 1st to 1st vertebral finite element model (FEM) under three different loading conditions. The largest von Mises in the intervertebral disc for different loading conditions in this study were in the annulus fibrosus, and the L2-L3 nucleus pulposus under anterior flexion, lateral flexion, and axial rotation loading.

Keywords: *degeneration; fem; intervertebral disc*

1. Pendahuluan

Tulang belakang terdiri dari struktur kompleks seperti vertebra, cakram intervertebralis, ligamen, dan otot. Pada diskus intervertebralis dapat terjadi degenerasi yang dapat menyebabkan nyeri pada punggung bawah [1]. Penyakit progresif yang menyebabkan perubahan morfologi geometrik dan sifat biomekanik dari lumbar disc atau disebut juga dengan lumbar disc degeneration dapat mempengaruhi transmisi dan alokasi tulang belakang lumbar manusia [2].

Lumbar spondylosis merupakan salah satu penyakit degeneratif vertebra yang disebabkan oleh adanya degenerasi diskus dan terbentuknya osteofit pada vertebra [3]. Degenerasi diskus lumbalis dapat disebabkan oleh usia, jenis kelamin, indeks massa tubuh (IMT), dan beban lumbalis [4]. Memahami mekanisme yang mendasari degenerasi cakram lumbalis yang menyebabkan rasa sakit adalah penting ketika menganalisis prinsip-prinsip dasar biomekanik tulang belakang, pengembangan metode bedah baru, dan pilihan pengobatan yang optimal [5].

Penelitian terkait studi analisis elemen hingga atau finite element method (FEM) dari degenerasi diskus lumbalis sudah banyak dilakukan. Salah satu studi terkait degenerasi diskus lumbalis dibuat oleh Mazni-Azian, dkk dengan membangun model elemen hingga tiga dimensi nonlinier L4-L5 yang memiliki tingkat degenerasi diskus berbeda. Model diberi gaya berupa beban kompresi aksial sebesar 500N dan momen hingga 10N [6]. Selanjutnya ada penelitian yang dilakukan oleh Ding, et al tentang mempelajari dan menganalisis perubahan tinggi foramen intervertebral dan area diskus intervertebral degeneratif menggunakan model elemen hingga L4-L5 yang diberi gaya dorong beragam [7].

Di Indonesia belum terdapat penelitian antropometri yang meneliti keterkaitan keseluruhan aspek dari parameter tulang spinopelvic dengan kejadian lumbar spondylosis pada individu lanjut usia. Sehingga diperlukan suatu penelitian parameter antropometri pada daerah lumbosacral pada manusia usia dewasa tua di Indonesia dengan pembuatan *computerized model* untuk selanjutnya dilakukan simulasi *finite element*.

Rekonstruksi lumbosacral dilakukan secara bertahap memakai aplikasi Mimics 21.0 dan data CT scan pasien dalam bentuk DICOM. Setelah proses rekonstruksi selesai, selanjutnya akan diteruskan dengan aplikasi 3-Matic 13.0 dan Geomagic Studio 12.0. Setelah tahapan rekonstruksi selesai maka akan diteruskan kepada tahap simulasi menggunakan aplikasi Ansys 2020.

2. Bahan dan Metode Penelitian

Untuk melakukan pemodelan tulang vertebra lumbalis 1 hingga sacralis 1 maka dibutuhkan data CT-scan pasien. Data tersebut diperoleh dari hasil CT-scan pasien di Rumah Sakit Islam Sultan Agung. Data hasil CT-Scan diubah kedalam bentuk DICOM yang selanjutnya di proses pada software Mimics 21.0

Parameter spinopelvic yang digunakan pada penelitian ini adalah parameter *lumbar lordosis* [8], *ventral disc height* and *dorsal disc height parameter* [9]. *Lumbar lordosis* adalah sudut yang dibentuk oleh dua garis yang ditarik tegak lurus terhadap *endplate* vertebra lumbalis 1 dan garis tegak lurus terhadap *endplate* dari vertebra lumbalis 5 [8]. Pengukuran *lumbar lordosis* ini menggunakan *Cobb's method* dimana sudut *lumbar lordotic* didapat dari perpotongan garis tegak lurus yang dibuat pada *endplate* lumbalis 1 dan *endplate* lumbalis 5 [10]. *Ventral Disc Height* (vDH) dan *Dorsal Disc Height* (dDH) adalah jarak antara *ventral* dan *dorsal height* untuk mengukur tebal disk vertebra [11].

Penelitian ini menganalisis tegangan von Mises menggunakan komponen utama yaitu *cortical bone*, *cancellous bone*, *endplate*, *nucleus pulposus*, dan *annulus fibrosus* pada tulang lumbalis 1 hingga sacralis 1 [12]. Penelitian ini dilakukan secara teliti dengan merekonstruksi vertebra lumbalis 1 hingga sacralis 1 pasien. Proses rekonstruksi menggunakan perangkat lunak Mimics 21.0, kemudian dilakukan *finishing* model tulang vertebra lumbalis 1 - sacralis 1 dengan menggunakan aplikasi Geomagic Studio 2012 dan Solidworks 2020, dan terakhir simulasi tegangan von Mises menggunakan aplikasi Ansys 2020.

3. Hasil dan Pembahasan

Untuk parameter spinopelvic pada penelitian ini, pengukuran *lumbar lordosis* dilakukan dengan metode Cobb. Didapati bahwa sudut *lumbar lordosis* pada pasien adalah 9.54°. *Ventral Disc Height* (vDH) dan *Dorsal Disc Height* (dDH) diukur pada data CT scan pasien yang didapatkan dari Rumah Sakit Islam Sultan Agung. Pengukuran vDH dan dDH dilakukan pada aplikasi Mimics 21.0. Data hasil pengukuran vDH dan dDH pada tulang lumbalis 1 hingga lumbalis 5 dapat dilihat pada tabel 3.

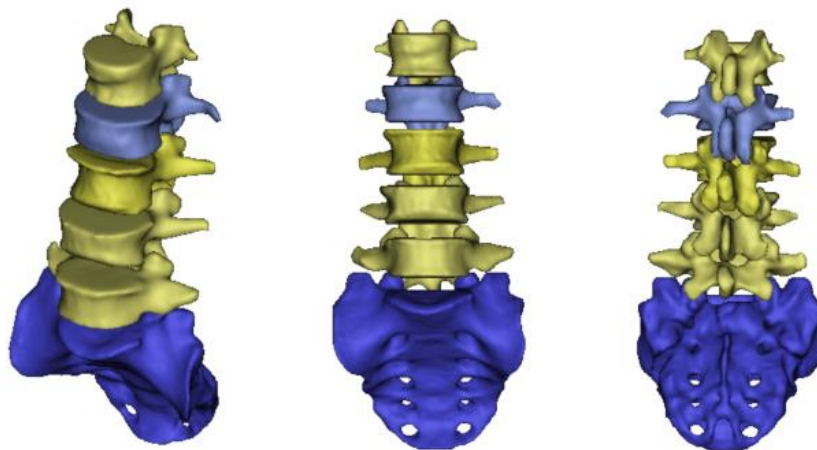
Tabel 1. Dimensi *ventral disc height* dan *dorsal disc height*

Vertebra Lumbalis	Ventral Disc Height (vDH)	Dorsal Disc Height (dDH)
L1 – L2	6.79 mm	6.21 mm
L2 – L3	9.69 mm	6.04 mm
L3 – L4	11.95 mm	7.12 mm
L4 – L5	13.90 mm	7.17 mm
L5 – S1	18.22 mm	6.67 mm

Proses rekonstruksi tulang vertebra lumbalis yang dimulai dengan rekonstruksi *cortical bone* menggunakan software Mimics 21.0 dengan menginput file hasil ct scan dalam bentuk DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine) kemudian direkonstruksi dengan menggunakan metode segmentasi, Untuk tampilan data CT scan pada Mimics 21.0 dapat dilihat pada Gambar 1 dan untuk hasil rekonstruksi *cortical bone* dapat dilihat pada Gambar 2.

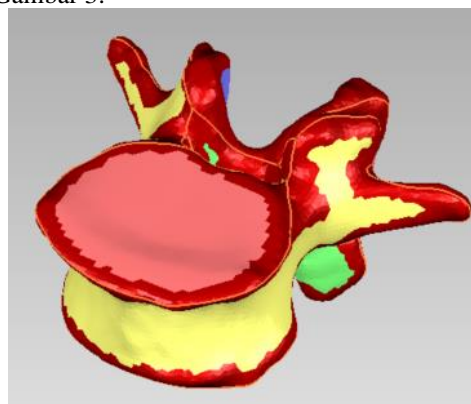


Gambar 1. Tampilan data CT scan



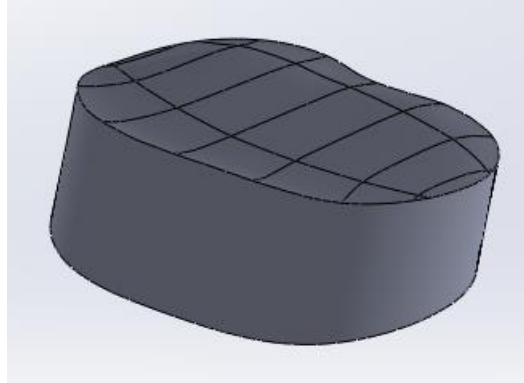
Gambar 2. Rekonstruksi tulang vertebra lumbalis 1 hingga sacralis 1

Tulang vertebra lumbalis yang telah direkonstruksi kemudian dimasukkan ke dalam software Geomagic Studio 12.0 untuk dilakukan proses *detect contour* dan *surface patching* agar *surface* menjadi lebih *smooth* dan teratur. Untuk proses *detect contour* dapat dilihat pada Gambar 3.



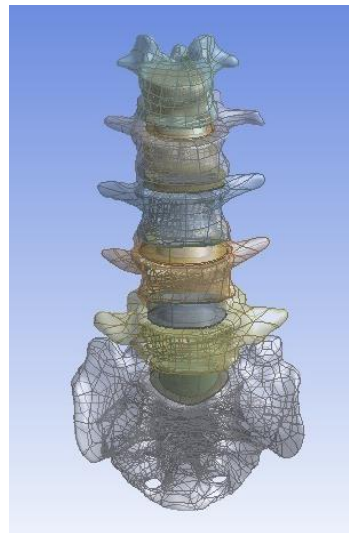
Gambar 3. Detect contour

Setelah semua permukaan pada komponen vertebra lumbalis telah rapi, tahap selanjutnya yaitu proses pembuatan diskus intervertebrata menggunakan software Solidworks 2018. Untuk gambaran diskus intervertebrata yang lebih jelas dapat dilihat pada Gambar 4.



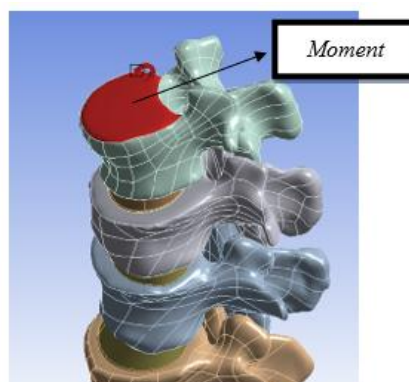
Gambar 4. Pemodelan awal diskus intervertebralis

Setelah melalui proses pembuatan *finite element model* maka terbentuklah model hasil rekonstruksi tulang vertebra lumbali 1 hingga sacralis 1 dimana model ini dapat digunakan untuk simulasi pada aplikasi Ansys 2020. *Finite element model* (FEM) yang telah selesai dapat dilihat pada gambar 5.

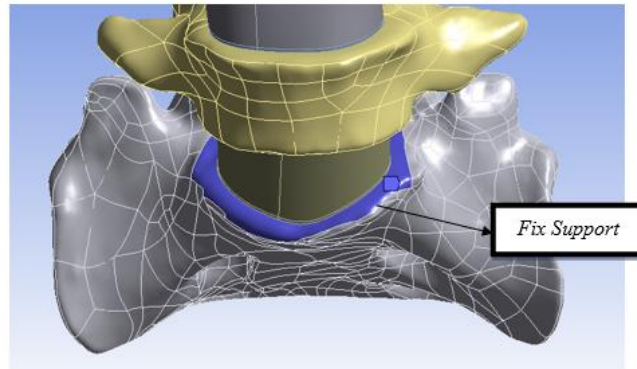


Gambar 5. *Finite element model* lumbalis 1 hingga sacralis 1

Setelah FEM selesai dibuat maka dilanjutkan dengan proses simulasi pembebanan untuk mencari besar tegangan von Mises yang terjadi. Letak momen berada pada bagian atas *cortical bone* lumbalis 1, dan *fix support* pada bagian sacralis 1.



Gambar 6. Lokasi momen



Gambar 7. Lokasi *fix support*

Berdasarkan hasil simulasi yang telah dilakukan pada pemodelan tulang lumbalis 1 hingga sacralis 1 pada pasien, sakit pinggang yang disebabkan oleh *lumbar spondylosis* dapat terlihat. Tegangan von Mises terbesar pada *intervertebral disc* untuk kondisi pembebanan yang berbeda ada pada *Annulus Fibrosus*, dan *nucleus pulposus* L2-L3. *Annulus fibrosus* yang telah mengalami degenerasi (penipisan) dapat menimbulkan nyeri dan yang terparah dapat mengalami kerusakan dimana tidak mampu lagi melindungi *nucleus pulposus* sehingga pada saat tulang vertebra menerima beban, *nucleus pulposus* dapat keluar melalui celah tersebut. *Annulus fibrosus* yang telah rusak atau yang biasa disebut dengan *Hernia Nucleus Pulposus* (HNP)[14], ini sering terjadi pada bagian dorsal diskus intervertebrata.

4. Kesimpulan

Dari penelitian ini disimpulkan bahwa rekonstruksi tulang pada bagian vertebra lumbalis 1 hingga sacralis 1 dapat dilakukan dengan data hasil *CT Scan* dalam bentuk DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine) yang selanjutnya direkonstruksi bertahap menggunakan software Mimics 21.0, Geomagic Studio 12.0, dan Solidworks 2018. *Finite Element Model* (FEM) disimulasikan dengan aplikasi Ansys 2020. Nilai parameter antropometri tulang vertebra lumbalis juga dapat diukur secara presisi menggunakan software Mimics 21.0 dengan memakai fitur *measure*.

Berdasarkan hasil simulasi tegangan von Mises yang telah dilakukan, ditemukan bahwa variasi kondisi pembebanan menghasilkan titik von Mises maximum yang terjadi berbeda pada pemodelan lumbalis 1 hingga sacralis 1. Pada kondisi pembebanan *Anterior Flexion* dan *lateral flexion* titik von Mises terjadi pada komponen *upper enplate* L3-L4. Pada kondisi pembebanan *axial rotation* nilai von Mises tertinggi ada pada komponen *cortical bone*. Sakit pinggang yang disebabkan oleh *lumbar spondylosis* dapat terlihat dari gambaran distribusi tegangan von Mises pada *intervertebral disc* yang terdiri dari *Annulus Fibrosus*, dan *nucleus pulposus* L2-L3.

5. Daftar Pustaka

- [1] W. M. Park, K. Kim, and Y. H. Kim, "Effects of degenerated intervertebral discs on intersegmental rotations, intradiscal pressures, and facet joint forces of the whole lumbar spine," *Comput Biol Med*, vol. 43, no. 9, pp. 1234–1240, Sep. 2013, doi: 10.1016/j.compbio.2013.06.011.
- [2] X. Lu *et al.*, "Biomechanical effects of interbody cage height on adjacent segments in patients with lumbar degeneration: a 3D finite element study," *J Orthop Surg Res*, vol. 17, no. 1, Dec. 2022, doi: 10.1186/s13018-022-03220-3.
- [3] R. Tsujimoto *et al.*, "Prevalence of lumbar spondylosis and its association with low back pain among community-dwelling Japanese women," *BMC Musculoskelet Disord*, vol. 17, no. 1, pp. 1–6, Dec. 2016, doi: 10.1186/s12891-016-1343-x.
- [4] Y. Aoki *et al.*, "Prevalence of lumbar spondylolysis and spondylolisthesis in patients with degenerative spinal disease," *Sci Rep*, vol. 10, no. 1, Dec. 2020, doi: 10.1038/s41598-020-63784-0.
- [5] X. yi Cai *et al.*, "Biomechanical Effect of L4–L5 Intervertebral Disc Degeneration on the Lower Lumbar Spine: A Finite Element Study," *Orthop Surg*, vol. 12, no. 3, pp. 917–930, Jun. 2020, doi: 10.1111/os.12703.
- [6] Masni-Azian and M. Tanaka, "Biomechanical investigation on the influence of the regional material degeneration of an intervertebral disc in a lower lumbar spinal unit: A finite element study," *Comput Biol Med*, vol. 98, pp. 26–38, Jul. 2018, doi: 10.1016/j.compbio.2018.05.010.
- [7] H. Ding, L. Liao, P. Yan, X. Zhao, and M. Li, "Three-Dimensional Finite Element Analysis of L4-5 Degenerative Lumbar Disc Traction under Different Pushing Heights," *J Healthc Eng*, vol. 2021, 2021, doi: 10.1155/2021/1322397.
- [8] C. Yilgor *et al.*, "Relative lumbar lordosis and lordosis distribution index: Individualized pelvic incidence-based proportional parameters that quantify lumbar lordosis more precisely than the concept of pelvic incidence minus lumbar lordosis," *Neurosurg Focus*, vol. 43, no. 6, Dec. 2017, doi: 10.3171/2017.8.FOCUS17498.

- [9] M. Hohenhaus *et al.*, “The challenge of measuring spinopelvic parameters: inter-rater reliability before and after minimally invasive lumbar spondylodesis,” *BMC Musculoskelet Disord*, vol. 23, no. 1, Dec. 2022, doi: 10.1186/s12891-022-05055-9.
- [10] G. S. Skaf, C. M. Ayoub, N. T. Domloj, M. J. Turbay, C. El-Zein, and M. H. Hourani, “Effect of Age and Lordotic Angle on the Level of Lumbar Disc Herniation,” *Adv Orthop*, vol. 2011, pp. 1–6, 2011, doi: 10.4061/2011/950576.
- [11] M. Hohenhaus *et al.*, “The challenge of measuring spinopelvic parameters: inter-rater reliability before and after minimally invasive lumbar spondylodesis,” *BMC Musculoskelet Disord*, vol. 23, no. 1, Dec. 2022, doi: 10.1186/s12891-022-05055-9.
- [12] S. Kang *et al.*, “Analysis of the physiological load on lumbar vertebrae in patients with osteoporosis: a finite-element study,” *Sci Rep*, vol. 12, no. 1, Dec. 2022, doi: 10.1038/s41598-022-15241-3.
- [13] A.-R. Cho, S.-B. Cho, J.-H. Lee, and K.-H. Kim, “Experimental Study Effect of Augmentation Material Stiffness on Adjacent Vertebrae after Osteoporotic Vertebroplasty Using Finite Element Analysis with Different Loading Methods”, [Online]. Available: www.painphysicianjournal.com
- [14] I. P. Pappou, F. P. Cammisa, and F. P. Girardi, “Correlation of end plate shape on MRI and disc degeneration in surgically treated patients with degenerative disc disease and herniated nucleus pulposus,” *Spine Journal*, vol. 7, no. 1, pp. 32–38, Jan. 2007, doi: 10.1016/j.spinee.2006.02.029.