

## Analisis *Grid Independence* pada Simulasi *Finite Element Method* Geometri Lumbar 4: Keseimbangan antara Akurasi dan Efisiensi Komputasi

Hasyid Ahmad Wicaksono<sup>a,b\*</sup>, M. Danny Pratama Lamura<sup>b,c</sup>, Mohamad Izzur Maula<sup>b,d</sup> J. Jamari<sup>a,b</sup>,  
Tri Indah Winarni<sup>b,e,f</sup>

<sup>a</sup>Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro  
Jl. Prof. Sudarto, SH., Tembalang-Semarang 50275

<sup>b</sup>Undip Biomechanics Engineering & Research Centre (UBM-ERC), Universitas Diponegoro  
Jl. Prof. Sudarto, SH., Tembalang-Semarang 50275

<sup>c</sup>Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik dan Sains, Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jawa Timur  
Jl. Raya Rungkut Madya, Gunung Anyar, Surabaya 60294

<sup>d</sup>Departemen Teknologi Rekayasa Manufaktur, Akademi Inovasi Indonesia  
Jl. Hasanudin, Mangunsari, Kec. Sidorejo, Kota Salatiga, Jawa Tengah 50721

<sup>e</sup>Departemen Anatomi, Fakultas Kedokteran, Universitas Diponegoro  
Jl. Prof. Sudarto, SH., Tembalang-Semarang 50275

<sup>f</sup>Center for Biomedical Research (CEBIOR), Fakultas Kedokteran, Universitas Diponegoro  
Jl. Prof. Sudarto, SH., Tembalang-Semarang 50275

\*E-mail: hasyidahmadwicaksono@gmail.com

### Abstract

This study aims to evaluate grid independence in Finite Element Method (FEM) simulations of Lumbar 4 geometry, focusing on the relationship between element size, resultant deformation, and computational resource requirements. This process was performed using ANSYS Workbench 2023 software and involved reconstructing a 3D model from CT scan data. The results showed that an element size of 1.0 mm was the ideal mesh for the simulation. Element sizes smaller than 1.0 mm only increased the computational cost significantly without providing significant additional benefits to accuracy. This study also highlights the importance of an efficient meshing strategy and suggests the use of an ideal mesh size for biomechanical analysis to minimize resource burden and high accuracy. Limitations of this study include the simple loading conditions. The findings provide practical guidance for researchers and practitioners to optimize FEM simulations in biomechanics applications.

**Keywords:** Finite Element Method, Grid Independence, Biomechanical Simulation, Computational Efficiency

### Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi *grid independence* dalam simulasi *Finite Element Method* (FEM) pada geometri Lumbar 4, dengan fokus pada hubungan antara ukuran elemen, deformasi hasil, dan kebutuhan sumber daya komputasi. Proses ini dilakukan menggunakan perangkat lunak ANSYS Workbench 2023 dan melibatkan rekonstruksi model 3D dari data CT scan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa ukuran elemen sebesar 1,0 mm merupakan mesh yang ideal untuk dilakukan simulasi. Ukuran elemen lebih kecil dari 1,0 mm hanya meningkatkan biaya komputasi secara signifikan tanpa memberikan manfaat tambahan yang signifikan pada akurasi. Penelitian ini juga menyoroti pentingnya strategi *meshing* yang efisien dan menyarankan penggunaan ukuran mesh yang ideal untuk analisis biomekanika guna meminimalkan beban sumber daya dan akurasi yang tinggi. Keterbatasan penelitian ini meliputi kondisi pembebanan yang sederhana. Temuan ini memberikan panduan praktis bagi peneliti dan praktisi untuk mengoptimalkan simulasi FEM dalam aplikasi biomekanika.

**Kata kunci:** *Finite Element Method*, *Grid Independence*, Simulasi Biomekanika, Efisiensi Komputasi

### 1. Pendahuluan

Perkembangan biomekanika di Indonesia terus menunjukkan kemajuan signifikan, terutama dalam pengaplikasian teknologi rekayasa untuk kesehatan. Salah satu topik yang menjadi perhatian adalah analisis tekanan mendalam (*deep pressure*) pada tulang dan jaringan lunak, yang memiliki implikasi penting dalam diagnosis dan terapi rehabilitasi [1, 2]. Selain itu, penerapan *Finite Element Method* (FEM) juga semakin luas digunakan dalam mempelajari biomekanika sendi, seperti *hip joint* dan tulang belakang [3, 4]. Penelitian berbasis FEM memungkinkan simulasi yang lebih mendetail terhadap beban mekanis yang dialami struktur tulang, memberikan wawasan baru dalam mendukung pengembangan

prostesis, implan, dan pengobatan kondisi klinis tertentu. Untuk memastikan akurasi dan efisiensi simulasi tersebut, studi *grid independence* menjadi bagian yang tak terpisahkan dari proses analisis berbasis FEM.

*Grid independence* mengacu pada kondisi di mana hasil simulasi tidak lagi berubah secara signifikan meskipun mesh semakin kecil. Proses ini memungkinkan peneliti untuk menentukan ukuran elemen mesh yang ideal, sehingga menghasilkan solusi yang akurat tanpa membebani sumber daya komputasi secara berlebihan [5, 6]. Dalam simulasi biomekanika, pemilihan ukuran elemen yang tepat sangat penting karena struktur biologis memiliki geometri kompleks yang membutuhkan tingkat detail tinggi untuk mencerminkan kondisi fisik yang sebenarnya. Tanpa studi *grid independence*, hasil simulasi dapat mengalami deviasi yang tidak diinginkan atau bahkan menjadi tidak valid [7].

Efisiensi komputasi menjadi perhatian utama dalam simulasi FEM, terutama untuk analisis yang melibatkan model dengan kompleksitas tinggi dan jumlah elemen yang besar. Penggunaan ukuran elemen yang terlalu kecil dapat menghasilkan hasil yang sangat detail, tetapi juga meningkatkan kebutuhan memori, waktu komputasi, dan ukuran file secara signifikan. Sebaliknya, ukuran elemen yang terlalu besar dapat mengurangi akurasi hasil [7, 8]. Oleh karena itu, diperlukan strategi untuk menentukan ukuran elemen yang dapat memberikan keseimbangan optimal antara akurasi dan efisiensi sumber daya. Pentingnya studi ini juga terlihat pada penelitian berbasis FEM sebelumnya, yang kerap langsung menggunakan mesh kecil tanpa evaluasi *grid independence*.

Penelitian berbasis FEM telah banyak digunakan untuk mengevaluasi biomekanika tulang belakang dan dampak berbagai intervensi medis pada struktur vertebra. Pada tahun 2012, Xiao *et al.* menggunakan analisis elemen hingga (FEA) untuk mengevaluasi biomekanika dari tiga skenario bedah *posterior lumbar interbody fusion* (PLIF), memberikan dasar teoretis dalam memilih opsi bedah yang sesuai untuk pasien [9]. Pada tahun 2015, Cho *et al.* menganalisis pengaruh kekakuan material augmentasi pada vertebra yang berdekatan setelah vertebroplasti osteoporotik, menunjukkan bahwa kekakuan semen tulang yang berlebihan dapat meningkatkan risiko fraktur vertebra yang berdekatan, terutama di bawah metode pembebanan terkontrol perpindahan [10]. Kemudian, pada tahun 2024, Liu *et al.* meneliti respon biomekanika dari dekompresi pada spondilolistesis degeneratif lumbar tingkat rendah. Studi ini mengevaluasi efek *total laminectomy*, *hemilaminectomy*, dan *facetectomy* terhadap parameter biomekanika seperti rentang gerak, tekanan intradiskal, stres annulus fibrosus, dan gaya kontak sendi facet [4]. Akan tetapi pada penelitian penelitian tersebut kurang menjelaskan terkait *grid independent* dan langsung memberikan mesh kecil. Padahal hal ini sangat krusial dimana kita bisa mendapatkan hasil akurat tanpa membebani sumber daya komputasi secara berlebihan

Studi ini bertujuan untuk mengevaluasi *grid independence* mesh pada geometri Lumbar 4, dengan fokus pada hubungan antara ukuran elemen, deformasi hasil, dan kebutuhan sumber daya komputasi. Penelitian ini tidak hanya memberikan panduan praktis bagi peneliti dalam menentukan ukuran elemen yang ideal, tetapi juga berkontribusi pada pengembangan metodologi simulasi FEM yang lebih efisien untuk aplikasi biomekanika. Temuan ini diharapkan dapat membantu peneliti pemula dan praktisi dalam merancang simulasi yang efisien dan akurat untuk berbagai kebutuhan analisis biomekanika.

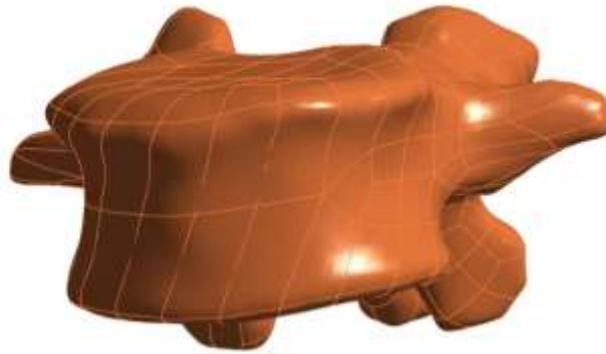
## 2. Material Dan Metode Penelitian

Pada pengujian kali ini proses pembuatan geometri untuk analisis Lumbar 4 dilakukan secara rinci pada gambar 1, dimulai dari pembuatan model 3D dari data CT scan hingga simulasi menggunakan perangkat lunak ANSYS Workbench 2023. Langkah pertama adalah pengolahan data CT scan dalam format *Digital Imaging and Communications in Medicine* (DICOM), yang merupakan standar internasional untuk menyimpan dan mengirimkan data citra medis. File DICOM dari hasil pemindaian ini kemudian diimpor ke perangkat lunak pemrosesan citra medis untuk merekonstruksi volume 3D berdasarkan irisan gambar [11, 12].



Gambar 1 Diagram Alir Metode Penelitian

Selanjutnya, data hasil rekonstruksi diolah menggunakan perangkat lunak Mimics Materialise untuk menghasilkan model 3D. Proses ini dimulai dengan segmentasi jaringan untuk memisahkan struktur Lumbar 4 dari gambar CT, memastikan bentuk dan volumenya tergambar secara akurat. Setelah segmentasi, *smoothing* model 3D dengan menghilangkan noise dan memperbaiki kontur agar lebih presisi, kemudian diekspor dalam format yang kompatibel untuk diolah lebih lanjut. Selanjutnya dilakukan perhalusan model yang bertujuan meningkatkan kualitas permukaan model dengan menghilangkan cacat geometrik, memperbaiki ketidakteraturan, dan menghasilkan bentuk yang mulus. Model akhir yang telah diperhalus siap untuk dilakukan simulasi menggunakan perangkat lunak ANSYS Workbench 2023 dan dapat dilihat pada Gambar 2. Kemudian diberikan sifat material pada model sesuai dengan Tabel 1.



Gambar 2 Model *Finite Element* untuk Lumbar 4

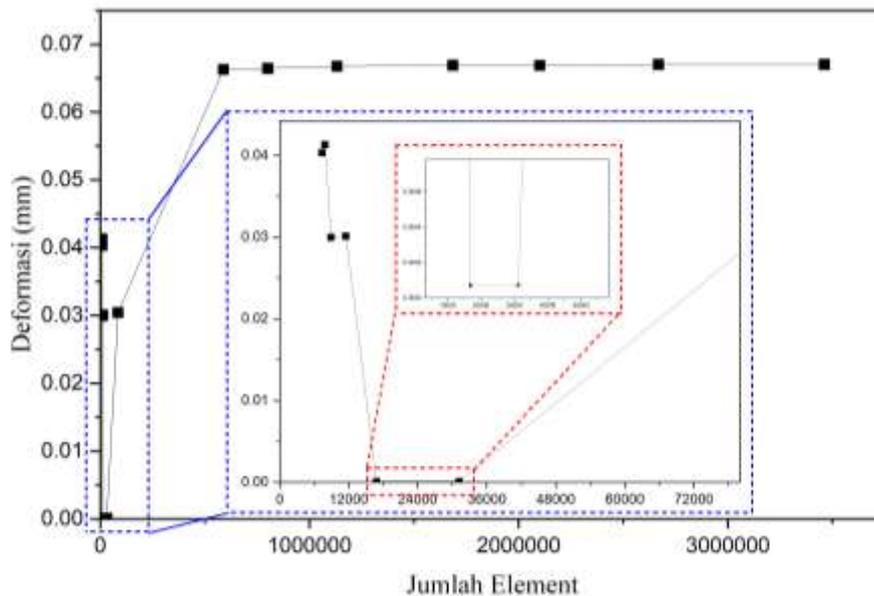
Tabel 1 Sifat Material

Komponen	Elastic Modulus (Mpa)	Poisson's Ratio	Referensi
Tulang Kortikal	12000	0,3	[10, 13]
Tulang Karselus	100	0,2	[10, 13]

Dalam studi ini, kondisi batas yang diterapkan adalah sebagai berikut: pada permukaan atas tulang kortikal diberikan beban vertikal sebesar 500 N, sementara permukaan bawah tulang kortikal diberi *fix support*. Hal ini dirancang untuk mensimulasikan kondisi mekanis dimana tulang terkena beban dalam analisis elemen hingga.

### 3. Hasil dan Pembahasan

*Grid independence* sangat penting dalam analisis elemen hingga untuk mencapai solusi yang akurat dan konvergen dengan menyempurnakan mesh hingga penyempurnaan lebih lanjut tidak lagi memberikan perubahan signifikan pada hasil. Proses ini bertujuan untuk mengidentifikasi ukuran mesh ideal yang menyeimbangkan biaya komputasi dan akurasi solusi, sekaligus memastikan penggunaan sumber daya komputasi secara efisien dengan hanya menyempurnakan mesh pada area yang diperlukan. Optimalisasi ini sangat krusial dalam simulasi skala besar di mana biaya komputasi menjadi perhatian utama [14 - 16]. Selain itu, studi *grid independence* merupakan komponen penting dalam proses validasi dan verifikasi pada FEM, yang memberikan keyakinan bahwa solusi numerik benar-benar merepresentasikan masalah fisik dan tidak dipengaruhi oleh konfigurasi mesh [17, 18].



Gambar 3. Perbandingan antara Hasil Studi Saat Ini Berdasarkan Jumlah Element

Pada Gambar 3 menunjukkan hubungan antara jumlah elemen dan deformasi untuk berbagai ukuran elemen dalam analisis *grid independence*. Pada tahap awal, untuk ukuran elemen yang lebih besar (8,0 mm hingga 4,0 mm), jumlah elemen dalam mesh relatif rendah (7368 hingga 16837 elemen), dan nilai deformasi menunjukkan ketidakstabilan. Bahkan, deformasi pada elemen 4 mm ( $7,181 \times 10^{-5}$  mm) mengalami penurunan drastis yang jauh berbeda dari nilai lainnya, menunjukkan bahwa resolusi mesh pada ukuran elemen besar terlalu kasar untuk menghasilkan hasil yang akurat. Pada

tahap pertengahan (3,0 mm hingga 2,0 mm), jumlah elemen meningkat signifikan (31186 hingga 84202 elemen), namun deformasi masih belum stabil, meskipun mulai mendekati tren yang lebih baik pada elemen 2 mm (0,030 mm).

Tahap stabil dimulai pada ukuran elemen 1,0 mm hingga 0,6 mm, di mana jumlah elemen meningkat drastis (588628 hingga 2668790 elemen), dan deformasi mencapai nilai konstan di sekitar 0,066 mm hingga 0,067 mm. Selain itu pada ukuran elemen 1,0 mm dan 0,9 mm dimana jumlah elemen meningkat sebesar 36% memiliki deviasi yang sangat baik sebesar 0,2 %. Ini menunjukkan bahwa simulasi telah mencapai konvergensi mesh, di mana peningkatan jumlah elemen tidak lagi memberikan perubahan signifikan pada hasil deformasi. Hasil ini menegaskan bahwa ukuran elemen 1,0 mm atau lebih kecil adalah pilihan terbaik untuk analisis ini karena memberikan keseimbangan antara akurasi hasil dan efisiensi komputasi.

**Tabel 2** Perbandingan antara besar file, memori yang digunakan dan lama waktu untuk simulasi

No	Ukuran Elemen (mm)	Jumlah Elemen	Ukuran File (MB)	Penggunaan Memori (MB)	Waktu Komputasi (s)
1	8,0	7368	5,563	611	6
2	7,0	7856	5,813	618	6
3	6,0	8948	6,563	620	5
4	5,0	11522	8,188	664	6
5	4,0	16837	11,563	719	5
6	3,0	31186	21,063	866	8
7	2,0	84202	55,125	1353	14
8	1,0	588628	373,310	6128	62
9	0,9	800803	504,810	6362	142
10	0,8	1131043	708,750	9561	165
11	0,7	1685570	1025,300	12649	269
12	0,6	2668790	1613,800	21295	450

Tabel 2 menggambarkan hubungan antara ukuran elemen mesh dengan karakteristik simulasi seperti jumlah elemen, ukuran file, penggunaan memori, dan waktu komputasi. Semakin kecil ukuran elemen, jumlah elemen meningkat, menyebabkan ukuran file, memori, dan waktu komputasi bertambah secara signifikan. Pada ukuran elemen yang lebih kecil, mesh menghasilkan detail yang lebih baik, tetapi dengan konsekuensi peningkatan kebutuhan sumber daya komputasi.

Pada mesh dengan ukuran elemen 1,0 hingga 0,6 mm, hasil simulasi menunjukkan konvergensi yang baik dengan deviasi sebesar 0,2 %, menghasilkan akurasi tinggi tanpa adanya instabilitas. Ukuran elemen ini cukup detail untuk memenuhi kebutuhan analisis tanpa membebani sumber daya secara berlebihan. Sebaliknya, ukuran elemen lebih kecil dari 0,6 mm cenderung meningkatkan kebutuhan komputasi secara drastis tanpa memberikan peningkatan signifikan pada hasil, sehingga ukuran elemen 1,0 mm dapat dianggap sebagai pilihan yang ideal.

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan untuk interpretasi hasil secara lebih mendalam. Pertama, kondisi pembebanan yang digunakan dalam simulasi relatif sederhana dan tidak sepenuhnya mencerminkan kompleksitas beban biomekanika yang terjadi pada situasi nyata. Hal ini dapat membatasi generalisasi hasil studi terhadap aplikasi praktis di lingkungan yang lebih dinamis dan kompleks. Kedua, penelitian ini tidak mencakup analisis sensitivitas terhadap parameter material, seperti sifat elastisitas, viskoelastisitas, atau anisotropi bahan, yang secara signifikan dapat memengaruhi akurasi hasil simulasi. Dengan demikian, pengaruh variabilitas parameter material terhadap hasil simulasi belum sepenuhnya dieksplorasi dalam studi ini.

Namun, meskipun terdapat keterbatasan, studi ini berhasil menunjukkan bahwa ukuran elemen merupakan salah satu parameter yang sangat krusial dalam analisis elemen hingga. Parameter ini secara langsung memengaruhi kualitas mesh, efisiensi komputasi, dan akurasi hasil simulasi. Temuan ini memberikan wawasan yang sangat berharga bagi para peneliti dan praktisi untuk mengoptimalkan strategi meshing, khususnya dalam penelitian dan aplikasi biomekanika. Penelitian di masa depan diharapkan dapat memperluas cakupan analisis, termasuk mempertimbangkan beban biomekanika yang lebih kompleks serta sensitivitas terhadap parameter material, untuk meningkatkan relevansi dan validitas hasil.

#### 4. Kesimpulan

Studi ini menekankan pentingnya pemilihan ukuran elemen dalam analisis elemen hingga untuk mencapai keseimbangan antara akurasi, efisiensi komputasi, dan stabilitas hasil. Ukuran elemen yang lebih kecil meningkatkan akurasi deformasi, namun disertai dengan peningkatan signifikan dalam kebutuhan sumber daya komputasi, seperti ukuran file, penggunaan memori, dan waktu simulasi. Ukuran elemen 1,0 mm diidentifikasi sebagai pilihan yang ideal karena memberikan hasil yang akurat dengan kebutuhan sumber daya yang masih dapat dikelola. Ukuran elemen lebih kecil dari 1,0 mm tidak memberikan peningkatan signifikan pada akurasi, sementara biaya komputasi meningkat drastis.

Meski hasil penelitian ini valid untuk kondisi tertentu, terdapat keterbatasan, seperti kondisi pembebanan yang sederhana dan tidak adanya analisis sensitivitas parameter material. Penelitian di masa depan diharapkan dapat mengeksplorasi beban biomekanika yang lebih kompleks, sensitivitas parameter material, dan teknik meshing adaptif untuk meningkatkan relevansi dan efisiensi simulasi. Temuan ini memberikan wawasan berharga bagi peneliti dan praktisi dalam mengoptimalkan strategi meshing untuk aplikasi biomekanika, khususnya di bawah keterbatasan sumber daya komputasi.

#### Daftar Pustaka

- [1] M. I. Maula *et al.*, “Comfort evaluation and physiological effects/autonomic nervous system response of inflatable deep pressure vest in reducing anxiety,” *Heliyon*, vol. 10, no. 16, p. e36065, 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e36065.
- [2] M. I. Maula, I. Y. Afif, M. I. Ammarullah, M. D. P. Lamura, J. Jamari, and T. I. Winarni, “Assessing the calming effects of a self-regulated inflatable vest: an evaluation based on Visual Analogue Scale and Electroencephalogram,” *Cogent Eng.*, vol. 11, no. 1, p., 2024, doi: 10.1080/23311916.2024.2313891.
- [3] M. I. Ammarullah, M. I. Maula, and M. D. Pratama, “A Review of Enhanced Total Hip Prosthesis Design and Material Bearing Combination to Accommodate Muslim Prayer (Salat) Movements\_ Biomechanical, Biotribological, and Biological Perspectives,” *Tribol. Int.*, p. 110518, 2025, doi: 10.1016/j.triboint.2025.110518.
- [4] R. Liu, T. He, X. Wu, W. Tan, Z. Yan, and Y. Deng, “Biomechanical response of decompression alone in lower grade lumbar degenerative spondylolisthesis--A finite element analysis,” *J. Orthop. Surg. Res.*, vol. 19, no. 1, pp. 1–11, 2024, doi: 10.1186/s13018-024-04681-4.
- [5] A. Haider, “a Comparison of Free and Mapped Meshes for Static Structural Analysis,” *Fatigue Aircr. Struct.*, vol. 2023, no. 15, pp. 115–132, 2024, doi: 10.2478/fas-2023-0007.
- [6] G. B. Barbat, M. Cervera, H. Venghaus, and M. Chiumenti, “Objectivity in quasi-brittle structural failure via adaptive formulation and mesh refinement,” *Theor. Appl. Fract. Mech.*, vol. 122, 2022, doi: 10.1016/j.tafmec.2022.103646.
- [7] Z. Pan, D. Wang, R. Ma, and A. Chen, “A mesoscopic analysis of chloride diffusion with adaptive mesh refinement,” in *Maintenance, Safety, Risk, Management and Life-Cycle Performance of Bridges - Proceedings of the 9th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, IABMAS 2018*, 2018, pp. 1702–1703. [Online]. Available: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85067031031&partnerID=40&md5=9e7bea53d8c43e423812f43310ed8857>
- [8] M. Lee, G. Park, C. Park, and C. Kim, “Improvement of Grid Independence Test for Computational Fluid Dynamics Model of Building Based on Grid Resolution,” *Adv. Civ. Eng.*, vol. 2020, 2020, doi: 10.1155/2020/8827936.
- [9] Z. Xiao, L. Wang, H. Gong, and D. Zhu, “Biomechanical evaluation of three surgical scenarios of posterior lumbar interbody fusion by finite element analysis,” *Biomed. Eng. Online*, vol. 11, pp. 1–11, 2012, doi: 10.1186/1475-925X-11-31.
- [10] 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,” *Pain Physician*, vol. 18, no. 6, 2015, [Online]. Available: [www.painphysicianjournal.com](http://www.painphysicianjournal.com)
- [11] M. Larobina, “Thirty Years of the DICOM Standard,” *Tomography*, vol. 9, no. 5, pp. 1829–1838, 2023, doi: 10.3390/tomography9050145.
- [12] E. Kalemi, E. Martiri, B. Manaj, and D. Prifti, “Dicomprint, an application for managing DICOM images,” *Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics)*, vol. 9281, pp. 177–184, 2015, doi: 10.1007/978-3-319-23222-5\_22.
- [13] 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, pp. 1–14, 2022, doi: 10.1038/s41598-022-15241-3.
- [14] L. Wang and J. Ruan, “Theory and Research Progress of the Collocation-Type Meshfree Methods,” *Chinese Q. Mech.*, vol. 42, no. 4, pp. 613–632, 2021, doi: 10.15959/j.cnki.0254-0053.2021.04.001.
- [15] E. Sotelo and R. L. Gibson, “Application of the Generalized Finite Element Method to the acoustic wave propagation,” in *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2019, pp. 3899–3903. doi: 10.1190/segam2019-3192496.1.
- [16] M. D. P. Lamura, C. B. Achmad, M. Imam, M. I. Maula, and F. A. Husaini, “The Contact Pressure Analysis of Different Load and Diameter Ratio on Hemispherical Contact : Biomechanical Perspectives,” pp. 55–73, 2024.
- [17] R. S. Raju and K. Ramesh, “Study of grid independence of finite element method on MHD free convective casson fluid flow with slip effect,” in *AIP Conference Proceedings*, 2018. doi: 10.1063/1.5033282.
- [18] L. Kwasniewski, “Application of grid convergence index in FE computation,” *Bull. Polish Acad. Sci. Tech. Sci.*, vol. 61, no. 1, pp. 123–128, 2013, doi: 10.2478/bpasts-2013-0010.