

Analisis Mesh Size Untuk Konvergensi Coil Spring Roda Depan Minibus Menggunakan Metode Elemen Hingga

Jagodang Harahap^{*1}, Teuku Edisah Putra², Arya Rudi Nasution³, Veranita⁴

¹Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Lhokseumawe; Lhokseumawe

²Jurusan Teknik Mesin, Universitas Syiah Kuala, Banda Aceh

³Jurusan Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, Medan

⁴Jurusan Teknik Sipil, Universitas Teuku Umar, Meulaboh

e-mail: *jagodang@pnl.ac.id

Abstrak

Konvergensi mesh dalam analisis elemen hingga berperan penting dalam memastikan akurasi simulasi, terutama pada pegas koil kendaraan. Namun, belum banyak penelitian yang mengevaluasi keseimbangan antara akurasi dan efisiensi komputasi akibat variasi ukuran mesh. data tegangan-regangan didapatkan dari regangan yang terjadi pada saat dikendarai dengan cara memasang strain gauge pada koil spring. Penelitian ini menganalisis pengaruh ukuran mesh terhadap distribusi tegangan, deformasi, dan waktu komputasi pada pegas koil depan minibus menggunakan perangkat lunak FEMAP NX Nastran. Hasil menunjukkan bahwa semakin kecil ukuran mesh, semakin tinggi tegangan dan deformasi yang dihasilkan, dengan tegangan maksimum 817 MPa pada mesh 0,1 dan 733 MPa pada mesh 0,6. Meskipun meningkatkan akurasi, ukuran mesh yang lebih kecil juga memperpanjang waktu komputasi secara signifikan. Oleh karena itu, diperlukan keseimbangan antara akurasi dan efisiensi waktu untuk optimasi desain pegas koil, dengan penelitian lanjutan direkomendasikan guna menentukan ukuran mesh optimal dalam simulasi elemen hingga.

Kata kunci— Konvergensi Mesh, Finite Element Analysis, Distribusi Tegangan, Efisiensi Komputasi

Abstract

Mesh convergence in finite element analysis is crucial for ensuring simulation accuracy, especially in vehicle coil springs. However, limited studies have evaluated the balance between accuracy and computational efficiency due to mesh size variations. Stress-strain data is obtained from the strain that occurs when driving by installing a strain gauge on the coil spring. This study analyzes the effect of mesh size on stress distribution, deformation, and computation time in the front coil spring of a minibus using FEMAP NX Nastran software. The results show that smaller mesh sizes yield higher stress and deformation values, with a maximum stress of 817 MPa at a 0.1 mesh size and 733 MPa at a 0.6 mesh size. While improving accuracy, finer mesh sizes significantly increase computation time. Therefore, balancing accuracy and computational efficiency is essential for optimizing coil spring design, with further research recommended to determine the optimal mesh size in finite element simulations.

Keywords— Mesh Convergence, Finite Element Analysis, Stress Distribution, Computational Efficiency

1. PENDAHULUAN

Konvergensi mesh dalam analisis elemen hingga merujuk pada proses penyempurnaan mesh atau diskretisasi model hingga solusi tidak lagi berubah secara signifikan. Ini penting untuk memastikan akurasi dan keandalan hasil yang diperoleh dari analisis element hingga[1]. Dengan terus-menerus memperhalus mesh, solusi mendekati solusi sebenarnya dari masalah tersebut, memungkinkan prediksi dan analisis yang lebih tepat. Konvergensi mesh adalah aspek kritis dari analisis elemen hingga yang secara langsung mempengaruhi kualitas hasil dan validitas keseluruhan analisis. Perlu untuk diketahui bahwa mencapai konvergensi mesh bisa menjadi proses yang memerlukan waktu yang lama, karena sering kali memerlukan beberapa iterasi untuk memperhalus mesh dan menganalisis ulang model yang akan di analisis[2].

Namun, manfaat mencapai konvergensi mesh jauh lebih besar daripada waktu dan usaha yang diinvestasikan dalam proses tersebut. Tanpa konvergensi mesh yang tepat, hasil analisis elemen hingga mungkin tidak dapat diandalkan dan tidak akurat, yang dapat menyebabkan kesalahan mahal dalam keputusan desain dan rekayasa. Oleh karena itu, analisis harus memprioritaskan pencapaian konvergensi mesh untuk memastikan akurasi dan validitas hasil analisis elemen hingga mereka[3]. Misalnya, dalam industri dirgantara, mencapai konvergensi mesh sangat penting saat mensimulasikan kekuatan komponen-komponen mobil terhadap berbagai kondisi beban dan kondisi jalan yang dilalui.

Konvergensi mesh juga sangat penting saat menganalisis pegas koil, karena memastikan prediksi yang akurat tentang distribusi tegangan dan regangan dalam pegas di bawah berbagai kondisi beban. Dengan memperhalus mesh dan menjalankan beberapa iterasi, seorang engineering dapat memverifikasi bahwa integritas struktural pegas koil dalam kondisi aman untuk digunakan, yang pada akhirnya menghasilkan desain yang lebih andal dan efisien[4], [5], [6]. Gagal mencapai konvergensi mesh dalam skenario ini dapat mengakibatkan kapasitas beban pegas koil yang terukur terlalu rendah, yang berpotensi menyebabkan kegagalan katastropik selama dikendarai. Oleh karena itu, sangat penting untuk memprioritaskan konvergensi mesh dalam analisis pegas koil untuk memastikan keselamatan dan kinerja sistem secara keseluruhan. Selain itu, konvergensi mesh juga memainkan peran penting dalam memprediksi dengan akurat umur kelelahan pegas koil[7], [8].

Dengan memastikan bahwa mesh cukup halus, para engineering dapat lebih memahami bagaimana distribusi tegangan berubah seiring waktu saat pegas dikenakan beban siklik. Informasi ini sangat penting untuk menentukan umur pakai yang diharapkan dari pegas dan mencegah kegagalan prematur. Selain itu, konvergensi mesh dapat membantu mengidentifikasi area potensial konsentrasi tegangan yang mungkin memerlukan penguatan tambahan atau modifikasi desain untuk meningkatkan daya tahan keseluruhan pegas [4]. Pada akhirnya, mencapai konvergensi mesh dalam analisis pegas koil sangat penting untuk memastikan keandalan dan kinerja jangka panjang sistem mekanis. Misalnya, jika pegas koil digunakan dalam sistem suspensi kendaraan yang sering melewati medan kasar, beban siklik akan menyebabkan distribusi tegangan dalam pegas berubah seiring waktu[9].

Dengan mencapai konvergensi mesh dalam analisis, insinyur dapat menentukan area dengan stres tinggi dan melakukan modifikasi desain untuk mencegah kegagalan prematur serta memastikan umur panjang pegas dalam kondisi yang menuntut tersebut. Penelitian ini bertujuan untuk menyelidiki efek beban siklik pada distribusi tegangan dalam pegas koil yang digunakan dalam sistem suspensi yang terkena pengemudi di kondisi jalan datar. Dengan melakukan analisis elemen hingga dengan kepadatan mesh yang bervariasi diharapkan analisis ini mendapatkan konvergensi mesh dan mengidentifikasi dengan tepat area dengan stres tinggi. Secara khusus, studi ini akan berfokus pada bagaimana material dan geometri pegas koil mempengaruhi distribusi stres dan umur kelelahan[10], [11]. Selain itu, penelitian ini akan mengeksplorasi potensi manfaat dari menggabungkan mekanisme peredam ke dalam sistem

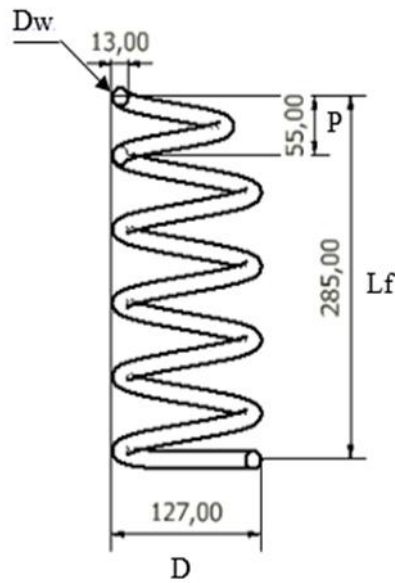
suspensi untuk lebih meningkatkan kinerja[6], [12] telah menunjukkan bahwa hasil yang akurat dapat dicapai dengan mesh yang halus, tetapi dengan biaya waktu komputasi yang lebih tinggi.

Dengan memastikan bahwa mesh telah konvergen para *engineering* dapat memiliki kemampuan pada akurasi simulasi mereka dan pada akhirnya membuat keputusan desain yang lebih terinformasi[13], [14]. Selain itu, kemajuan dalam perangkat lunak komputasional dan analisis struktural telah memungkinkan simulasi yang lebih kompleks dan detail untuk dilakukan, yang mengarah pada pemahaman yang lebih baik tentang kinerja dan daya tahan kendaraan pentingnya konvergensi mesh dan hasil simulasi yang akurat hanya akan semakin meningkat, mendorong inovasi lebih lanjut di bidang ini. Inovasi ini tidak hanya akan menguntungkan produsen kendaraan minibus tetapi juga konsumen yang mengandalkan kendaraan ini untuk berbagai tujuan rekreasi dan industri. Dengan terus-menerus meningkatkan teknik simulasi dan memastikan konvergensi mesh, para peneliti dapat mendorong batasan apa yang mungkin mempengaruhi umur dari sebuah pegas koil diantaranya beban maksimal yang sesuai dengan anjuran pabrik dan kondisi jalan yang layak untuk dilalui oleh kendaraan jenis minibus, yang pada akhirnya menghasilkan kendaraan yang lebih aman, lebih efisien, dan lebih tahan lama untuk dikendarai oleh semua orang[15], [16].

2. METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini mengkaji tentang pemanfaatan model pegas koil minibus untuk menganalisis efek dari berbagai konfigurasi suspensi terhadap kinerja minibus. Pegas koil dipilih karena fungsinya yang sangat krusial terhadap kenyamanan saat berkendara dan kemampuannya untuk mensimulasikan perilaku sistem suspensi dengan akurat di berbagai kondisi berkendara. Dengan memasukkan data tentang faktor-faktor seperti berat kendaraan, ukuran ban, dan karakteristik medan, model tersebut mampu memprediksi bagaimana perubahan kekakuan dan peredaman suspensi akan mempengaruhi penanganan dan kualitas berkendara kendaraan. Perangkat lunak analisis elemen hingga yang digunakan untuk menguji dan menganalisis sistem suspensi sangat penting dalam memastikan daya tahan dan kinerjanya. Dengan memasukkan pengaturan dan parameter tertentu ke dalam perangkat lunak berbagai kondisi untuk memprediksi bagaimana sistem suspensi akan bereaksi dalam situasi dunia industri dan memungkinkan penyesuaian dan perbaikan dilakukan sebelum pengujian fisik yang pada akhirnya menghasilkan sistem suspensi yang lebih andal dan efisien

Untuk melakukan analisis konvergensi mesh, langkah-langkah yang diambil termasuk memilih ukuran elemen yang tepat, menentukan kriteria konvergensi yang diinginkan [17]. Dengan demikian, analisis konvergensi mesh merupakan langkah penting dalam proses pengembangan produk yang efisien dan efektif. Selain itu, memastikan keakuratan model simulasi juga membantu mengurangi risiko kesalahan desain dan meningkatkan kualitas produk akhir. Dengan menggunakan pendekatan yang teliti dan sistematis, para insinyur dapat memaksimalkan potensi teknologi simulasi untuk mencapai hasil yang optimal dalam pengembangan sistem suspensi mobil. Dalam penelitian ini, komponen yang akan dianalisis adalah pegas ulir yang digunakan pada suspensi depan minibus dengan panjang pegas 285 mm (L_f), diameter luar 127 mm (D), diameter ulir 13 mm (D_w), jarak antar ulir 55 mm (P) dan 6 buah jumlah lilitan pada pegas ulir. Model pegas ulir ditunjukkan dalam Gambar 1 di bawah ini.



Gambar 1. Dimensi Pegas Ulir

Selanjutnya model pegas ulir yang telah didesain kemudian disimulasikan dengan menggunakan perangkat lunak yaitu FEMAP NX Nastran untuk menganalisis seberapa besar pengaruh ukuran mesh terhadap distribusi tegangan yang terjadi, guna untuk menganalisis distribusi tegangan yang terjadi pada pegas ulir tersebut dengan menggunakan data kontur jalan kondisi jalan mendatar diukur dengan *strain gauge* yang ditempelkan pada pegas ulir minibus kemudian akan divariasikan dengan berbagai ukuran mesh.

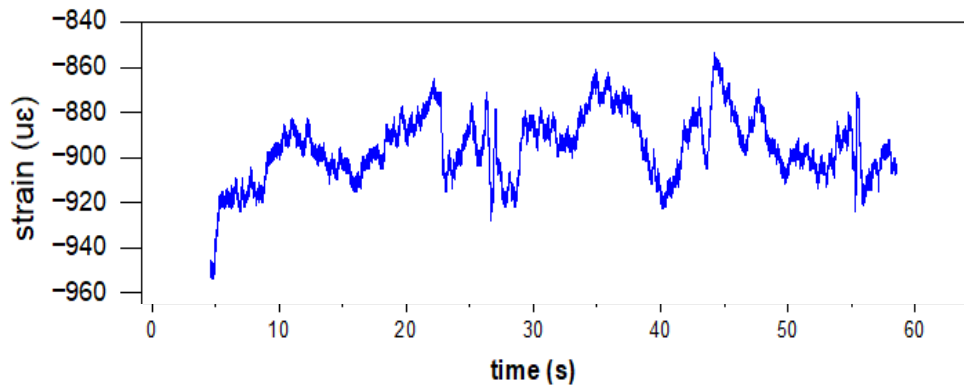
Penelitian ini menganalisis komposisi kimia dan sifat mekanik pegas ulir depan minibus dari baja SAE 5160 yang menerima pembebanan statis 3600 N. Data mengenai kedua aspek material tersebut disajikan dalam Tabel 1 dan Tabel 2. pada Tabel 1 dan 2.

Tabel 1. Komposisi kimia baja karbon SAE 5160 [18]

Carbon	Chrome	Manganese	Molybdenum	Silicon	Vanadium
0.56 – 0.64 %	0.70 – 0.90 %	0.75 – 1.0 %	0.15 – 0.25 %	0.15 – 0.30 %	0.15 %

Tabel 2. Sifat mekanis baja karbon SAE 5160 [18]

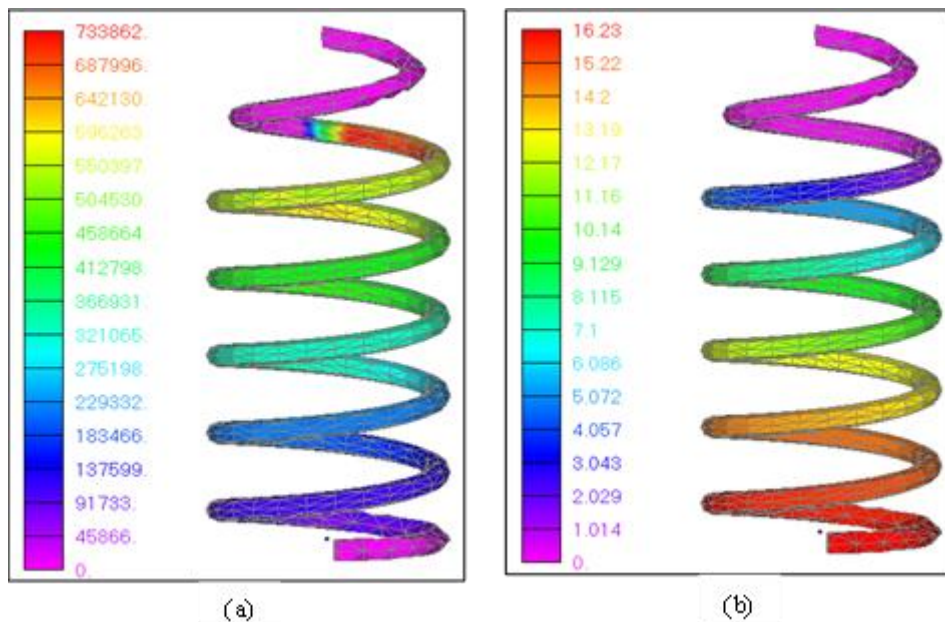
Properties	Values
UTS, S_u [MPa]	1,584
Kekakuan elastis bahan [GPa]	207
Kekuatan luluh [MPa]	1,487
Koefisien ketahanan lelah [MPa]	2,063
Eksponen ketahanan lelah, b	-0.08
Eksponen daktilitas lelah, c	-1.05
Koefisien daktilitas lelah, ϵ'_f	9.56
Eksponen pengerasan-regangan siklik	0.05
Koefisien kekuatan siklik [MPa]	1,940
Poisson ratio	0.27



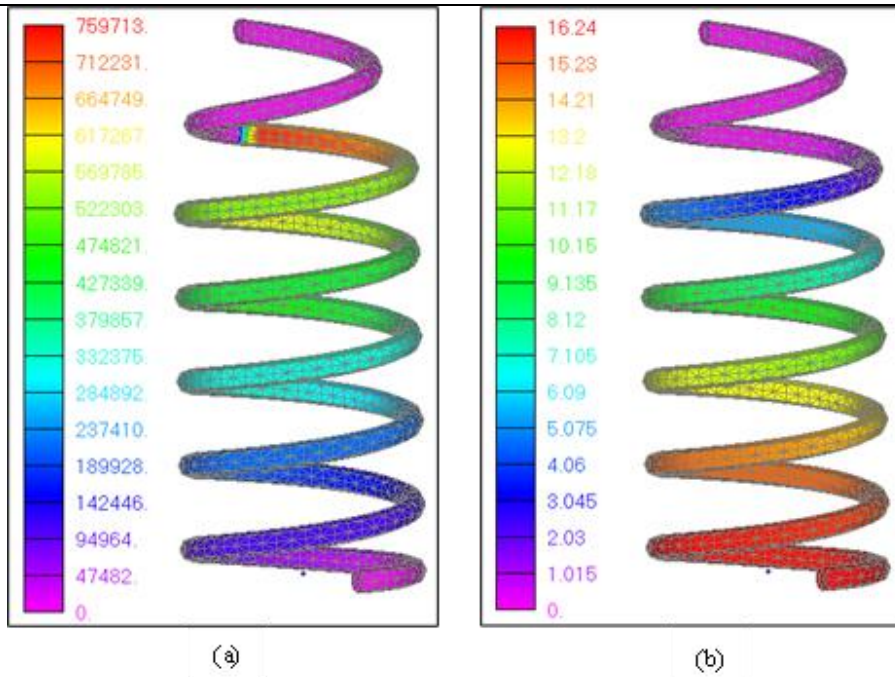
Gambar 2. Sinyal regangan pada *coil spring*

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

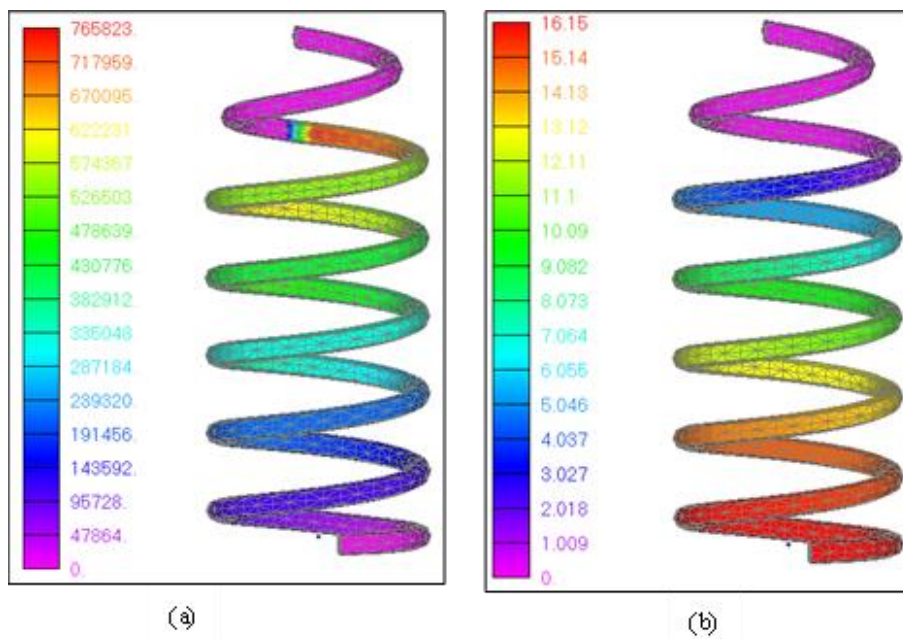
Analisis elemen hingga supaya mendapatkan hasil yang akurat maka kita harus menunjukkan bahwa hasil tersebut konvergen ke suatu solusi dan tidak bergantung pada ukuran mesh [9], [19]. Pada analisis Konvergensi mesh menghasilkan banyak elemen yang diperlukan dalam suatu model dan memastikan bahwa hasil analisis yang telah dilakukan menunjukkan bahwa ukuran mesh yang divariasikan sebanyak 6 jenis ukuran menunjukkan pengaruh yang signifikan terhadap nilai distribusi tegangan yang terjadi pada coil spring minibus tersebut. Untuk lebih detailnya dapat dilihat pada gambar 3, 4, 5, 6, 7, 8 dibawah ini.



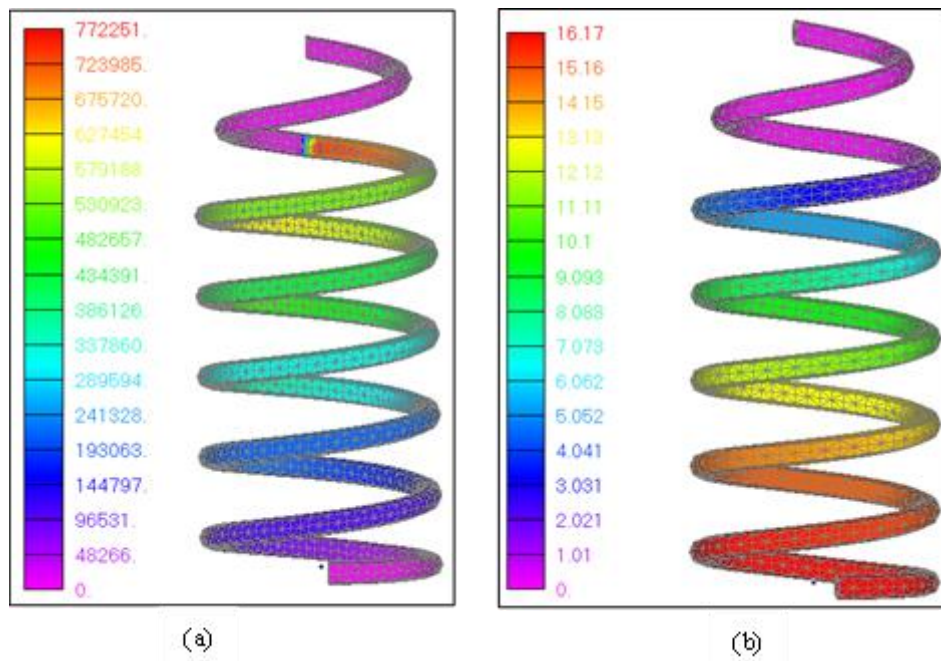
Gambar 3 Mesh Size 0,6, (a) Von-Mises Stress dan (b) Deformation



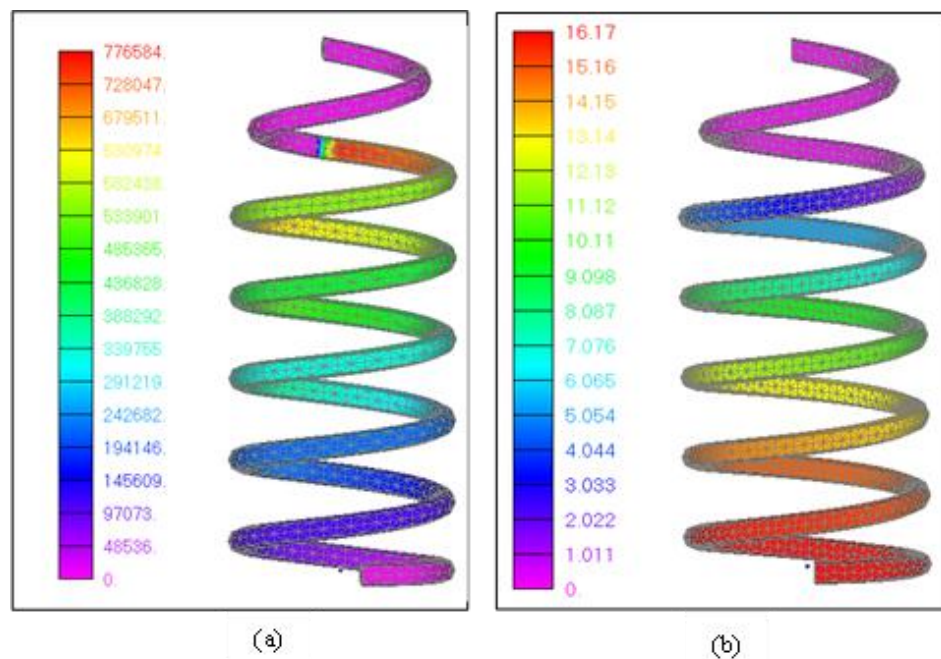
Gambar 4. Mesh Size 0,5, (a) Von-Mises Stress dan (b) Deformation



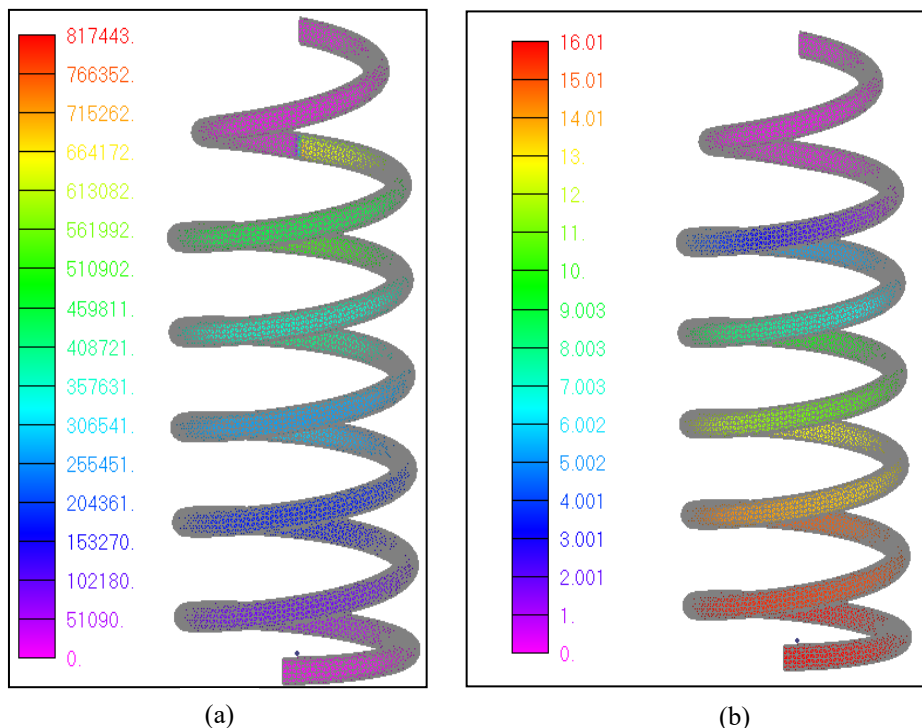
Gambar 5. Mesh Size 0,4, (a) Von-Mises Stress dan (b) Deformation



Gambar 6. Mesh Size 0,3, (a) Von-Mises Stress dan (b) Deformation



Gambar 7. Mesh Size 0,2, (a) Von-Mises Stress dan (b) Deformation



Gambar 8. Mesh Size 0,1, (a) Von-Mises Stress dan (b) Deformation

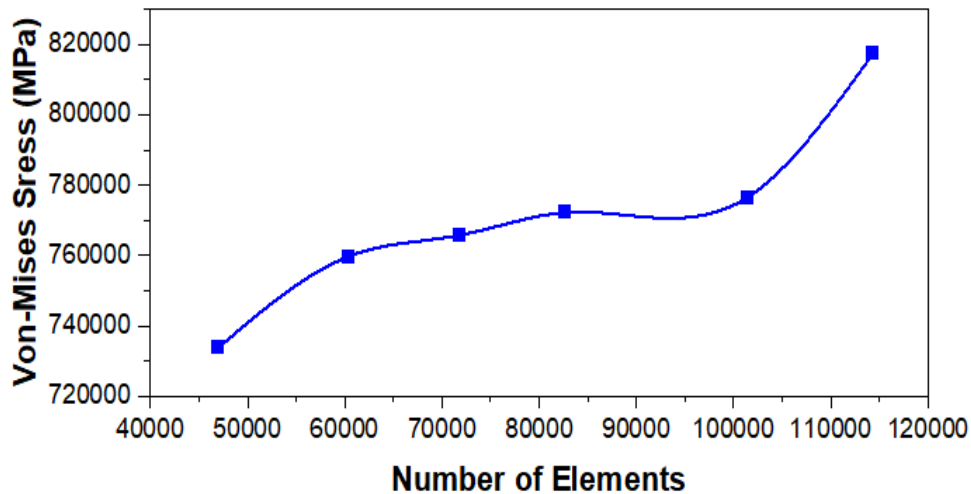
Hasil analisis dengan variasi ukuran mesh menunjukkan nilai distribusi tegangan maksimum yang berbeda-beda, di mana terjadi peningkatan pada nilai tegangan dan deformasi yang dialami suspensi. Pada ukuran mesh 0,6, tegangan maksimum mencapai 733.862 kPa (733 MPa). Untuk mesh 0,5, nilainya menjadi 759.713 kPa (759 MPa). Pada mesh 0,4, tegangan meningkat menjadi 765.823 kPa (765 MPa). Di mesh 0,3, nilai yang tercatat adalah 772.251 kPa (772 MPa). Sementara pada mesh 0,2, tegangan mencapai 776.584 kPa (776 MPa), dan nilai tertinggi diperoleh pada mesh 0,1, yaitu 817.443 kPa (817 MPa). Dari keenam variasi mesh tersebut, terlihat kenaikan signifikan pada distribusi tegangan seiring dengan pengecilan ukuran mesh. Meskipun semua nilai tegangan masih berada di bawah kekuatan luluh material (1.487 MPa), tingkat tegangan yang dihasilkan dari variasi mesh ini berpotensi menyebabkan kerusakan fatik.

Hal ini dapat terjadi karena kerusakan fatik mampu muncul pada komponen yang mengalami pembebanan berulang, sekalipun nilai tegangannya masih di bawah batas luluh material. Tren kenaikan nilai tegangan maksimum yang stabil seiring pengecilan mesh—dari 733 MPa (mesh 0,6) ke 817 MPa (mesh 0,1)—membuktikan bahwa mesh yang lebih rapat mampu merepresentasikan konsentrasi tegangan secara lebih teliti. Hasil simulasi pada mesh 0,1 yang mencatat tegangan tertinggi mengisyaratkan bahwa nilai inilah yang paling merepresentasikan kondisi sebenarnya pada pegas. Maka, walaupun semua nilai tegangan hasil simulasi masih di bawah kekuatan luluh material (1.487 MPa), penerapan mesh yang terlalu kasar berisiko menyebabkan rendahnya perkiraan tegangan kerja aktual, sehingga berujung pada prediksi umur lelah yang tidak aman dan berpotensi membahayakan integritas desain.

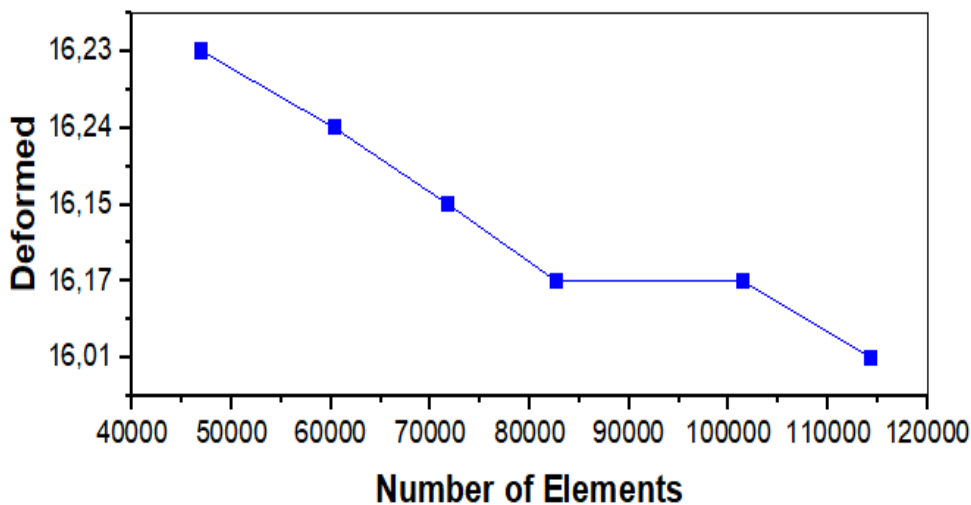
Setelah didapatkan nilai didistribusi tegangan yang terjadi akibat memvariasikan ukuran mesh pada komponen coil spring tersebut maka didapat dan diketahui bahwa ukuran mesh tersebut menunjukkan pengaruh terhadap nilai stress, deformasi dan waktu yang dibutuhkan untuk menganalisis komponen tersebut. Semakin kecil ukuran mesh yang diberikan maka nilai stress yang didapatkan akan semakin tinggi dan seiring dengan waktu komputasi yang

dibutuhkan semakin lama. Berangkat dari hasil tersebut maka spesifikasi dan kemampuan hardware yang digunakan harus mumpuni demi mendapatkan hasil yang optimal. Tidak dapat dipungkiri memang untuk mendapatkan suatu hasil analisis yang baik diperlukan modal, kemampuan analisis dan data yang akan digunakan pada proses tersebut sehingga proses komputasi berjalan lancar dan efektif.

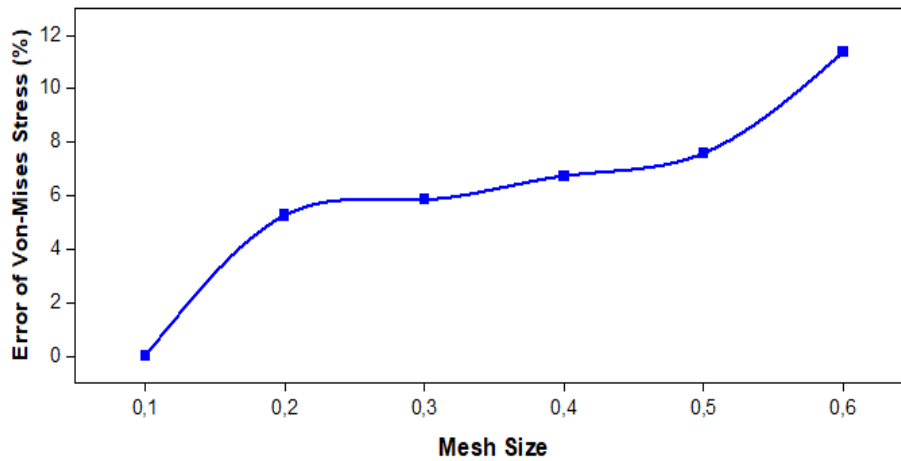
Semisal jika nilai distribusi yang didapatkan memang mengalami peningkatan akibat variasi ukuran mesh yang semakin kecil, namun disisi lain waktu komputasi yang dibutuhkan juga sangat lama hingga belasan jam maka bisa di asumsikan hasil yang didapat tidak efisien karna membutuhkan waktu yang lama yang nantinya akan menambah biaya yang dikeluarkan dalam analisis ini. selain itu, penting untuk mempertimbangkan trade-off antara akurasi analisis dan sumber daya komputasi yang dibutuhkan. Misalnya, jika nilai distribusi meningkat karena ukuran mesh yang lebih kecil, tetapi waktu komputasi juga meningkat secara signifikan menjadi beberapa jam, dapat diasumsikan bahwa hasil yang diperoleh tidak efisien. Ini karena waktu komputasi yang berkepanjangan pada akhirnya akan menambah biaya yang dikeluarkan dalam analisis ini. Oleh karena itu, sangat penting untuk mencapai keseimbangan antara akurasi analisis dan efisiensi komputasi guna memastikan hasil yang hemat biaya dan tepat waktu



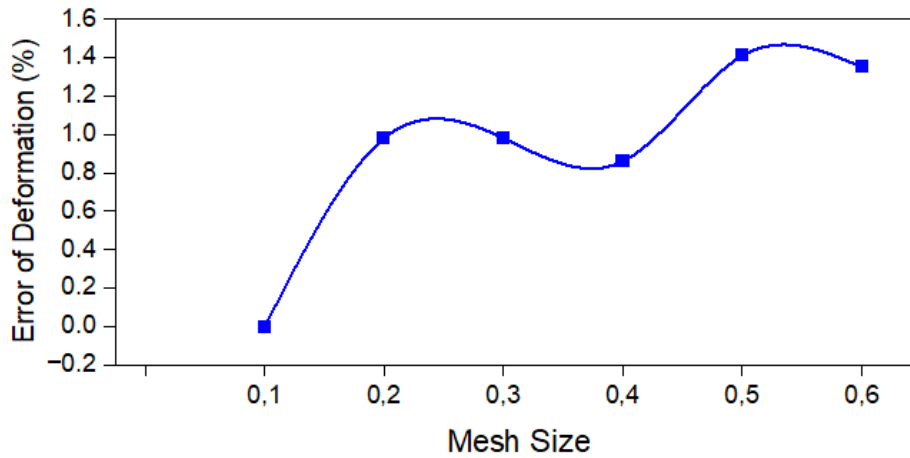
Gambar 9. Stress Distribution



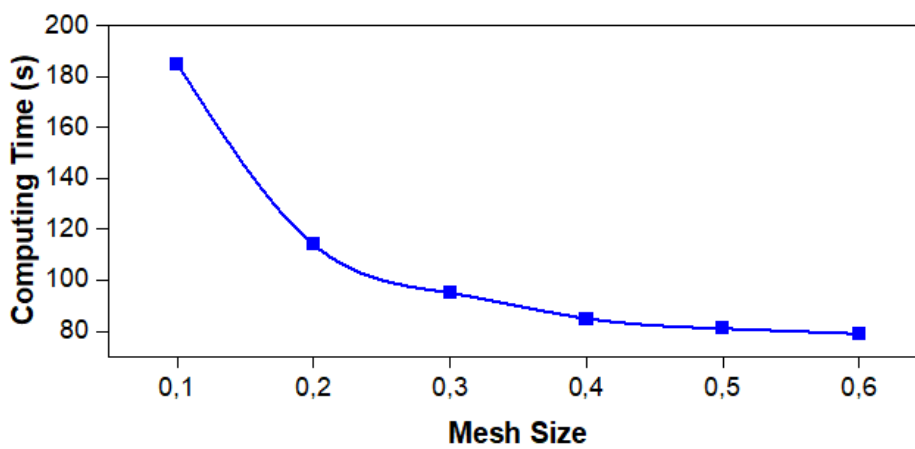
Gambar 10. Deformation



Gambar 11. Perbandingan ukuran mesh (error) terhadap stress



Gambar 12. Perbandingan ukuran mesh (error) terhadap deformasi



Gambar 13. Waktu yang dibutuhkan komputasi

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menganalisis pengaruh ukuran mesh terhadap konvergensi hasil simulasi pegas koil depan minibus menggunakan metode elemen hingga. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin kecil ukuran mesh yang digunakan, semakin tinggi akurasi dalam menentukan distribusi tegangan dan deformasi. Namun, peningkatan akurasi ini diiringi dengan peningkatan waktu komputasi yang signifikan, yang dapat mempengaruhi efisiensi analisis. Meskipun nilai tegangan yang dihasilkan tetap berada di bawah *yield strength* material, terdapat potensi kerusakan akibat kelelahan (*fatigue*), terutama jika beban siklik terus berulang dalam jangka waktu lama. Oleh karena itu, diperlukan keseimbangan antara ukuran mesh yang optimal dan efisiensi waktu komputasi untuk memastikan hasil yang akurat tanpa meningkatkan biaya analisis secara berlebihan. Penelitian ini berkontribusi dalam memberikan wawasan bagi industri otomotif terkait optimasi desain suspensi kendaraan, serta membuka peluang penelitian lebih lanjut untuk meningkatkan efisiensi dan akurasi simulasi dengan mempertimbangkan faktor-faktor tambahan, seperti material dan kondisi jalan yang lebih kompleks

5. SARAN

Untuk penelitian mendatang, disarankan untuk menerapkan teknik *adaptive meshing* bersamaan dengan analisis kelelahan guna meningkatkan akurasi simulasi dan memperkirakan masa pakai pegas secara lebih andal. Perlu juga dikaji material alternatif serta pengaruh perlakuan panasnya untuk mencapai komposisi yang ideal antara performa dan massa. Validasi melalui pengujian eksperimental dan simulasi kondisi jalan aktual diperlukan guna memastikan keandalan hasil numerik. Aspek lain yang patut dieksplorasi meliputi penerapan *topology optimization* dan perbandingan dengan metode komputasi lain guna penyempurnaan desain serta analisis sistem suspensi secara komprehensif.

UCAPAN TERIMA KASIH

Dengan memanjatkan puji syukur ke hadirat Allah SWT atas segala rahmat dan hidayah-Nya, penulis dapat menyelesaikan karya riset ini. Penulis menyampaikan penghargaan dan terima kasih yang tulus kepada almarhum Prof. Teuku Edisah Putra atas kontribusi intelektualnya. Apresiasi juga diberikan kepada seluruh pihak laboratorium, rekan sejawat, serta keluarga tercinta atas dukungan, bantuan, dan doa yang diberikan. Akhirnya, penulis berharap semoga temuan dalam artikel ini dapat memberikan sumbangsih bagi kemajuan disiplin ilmu teknik mesin, teristimewa pada ranah material dan manufaktur

DAFTAR PUSTAKA

- [1] T. Naumov, J. Hadfield, and M. Tan, "Effect Of Shell Element Mesh Size On Finite Element Results."
- [2] G. Cadet and M. Paredes, "Convergence analysis and mesh optimization of finite element analysis related to helical springs," *Mechanics and Industry*, vol. 25, 2024, doi: 10.1051/meca/2024018.
- [3] J. Oliver, A. E. Huespe, and P. J. Sánchez, "A comparative study on finite elements for capturing strong discontinuities: E-FEM vs X-FEM," *Comput Methods Appl Mech Eng*, vol. 195, no. 37–40, pp. 4732–4752, Jul. 2006, doi: 10.1016/j.cma.2005.09.020.

- [4] H. Patil and P. V. Jeyakarhikeyan, "Mesh convergence study and estimation of discretization error of hub in clutch disc with integration of ANSYS," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Institute of Physics Publishing, 2018. doi: 10.1088/1757-899X/402/1/012065.
- [5] J. Valeš and Z. Kala, "Mesh convergence study of solid FE model for buckling analysis," in *AIP Conference Proceedings*, American Institute of Physics Inc., Jul. 2018. doi: 10.1063/1.5043796.
- [6] A. Dutt, "Effect of Mesh Size on Finite Element Analysis of Beam," *International Journal of Mechanical Engineering*, vol. 2, no. 12, pp. 8–10, Dec. 2015, doi: 10.14445/23488360/IJME-V2I12P102.
- [7] H. Patil and P. V. Jeyakarhikeyan, "Mesh convergence study and estimation of discretization error of hub in clutch disc with integration of ANSYS," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Institute of Physics Publishing, 2018. doi: 10.1088/1757-899X/402/1/012065.
- [8] P. Simulasi *et al.*, "Sasis Mobil BAJA SAE," *Jurnal Mekanova : Mekanikal, Inovasi dan Teknologi*, vol. 10, no. 2, 2024.
- [9] I. Imoro, J. K. Nkrumah, B. Ziblim, and A.-H. Mohammed, "Analysis of the Material Properties of Vehicle Suspension Coil Spring," *World Journal of Engineering and Technology*, vol. 11, no. 04, pp. 827–858, 2023, doi: 10.4236/wjet.2023.114056.
- [10] J. Larsson, "Spring Element Evaluation Using Finite Element Analysis," 2019.
- [11] "Investigating FEA Results (Mesh Convergence)." [Online]. Available: <https://www.valuedes.co.uk/investigating-fea-results.html>
- [12] J. Harahap, T. Riyadhsyah, J. Teknik Mesin Politeknik Negeri Lhokseumawe, and J. Teknik Elektro Politeknik Negeri Lhokseumawe, "Pembuatan Material Pereduksi Panas Eco-Friendly Berbasis Komposit dengan Memanfaatkan Ampas Sagu," *Jurnal Mekanova : Mekanikal, Inovasi dan Teknologi*, vol. 11, no. 1, 2025.
- [13] N. Naik, P. Shenoy, N. Nayak, S. Awasthi, and R. Samant, "Nithin Nayak, Swetank Awasthi and Rashmi Samant, Mesh Convergence Test for Finite Element Method on High Pressure Gas Turbine Disk Rim Using Energy Norm: An Alternate Approach," *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)*, vol. 10, no. 1, pp. 765–775, 2019, doi: 10.34218/IJMET.10.1.2019.078.
- [14] H. Jagodang, Husaini, E. P. Teuku, and S. Dieter, "Stress analysis on an automotive coil spring driven on flat, uphill, and downhill road surfaces," in *Key Engineering Materials*, Trans Tech Publications Ltd, 2021, pp. 124–128. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.892.124.
- [15] G. Cadet and M. Paredes, "A new exhaustive semi-analytical method to calculate stress distribution on the surface of a curved beam with circular cross section, with an application to helical compression springs," 2023.
- [16] J. Zhu *et al.*, "Composite structure helical springs with designability of spring constants: Structural design and compression property evaluation," *Polym Compos*, vol. 46, no. S2, pp. S537–S549, Sep. 2025, doi: 10.1002/pc.29856.
- [17] 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," in *Procedia Structural Integrity*, Elsevier B.V., 2021, pp. 51–58. doi: 10.1016/j.prostr.2021.10.008.
- [18] ncode, "Powerful System for Test Data Processing and Durability Analysis Product Details," 2024. [Online]. Available: www.hbmprensia.com
- [19] J. Harahap, K. Mizan, and P. Pribadyo, "Analisis Distribusi Tegangan Pada Sistem Suspensi Depan Minibus Dengan Beban Bervariasi," *Austenit*, vol. 16, no. 1, pp. 48–54, May 2024, doi: 10.53893/austenit.v16i1.8558.
-