

STUDI KONVERGENSI MESH PADA KONTAK DUA *HEMISPHERE* MENGGUNAKAN METODE FINITE ELEMENT

*Muhammad Ryan¹, Sri Nugroho², Jamari²

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro Jl.

Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

*E-mail: muhhryan00@gmail.com

Abstrak

Analisis kontak antara dua hemisphere merupakan permasalahan penting dalam mekanika kontak yang sering dianalisis menggunakan metode Finite Element (FEM). Akurasi hasil simulasi sangat dipengaruhi oleh ukuran dan kerapatan mesh, terutama pada daerah kontak. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan studi konvergensi mesh pada model dua dimensi (2D) dari kontak dua hemisphere menggunakan FEM. Model 2D dibuat dengan pemberian kondisi batas dan beban tekan untuk mensimulasikan interaksi kontak. Variasi ukuran mesh diterapkan untuk mengevaluasi pengaruhnya terhadap hasil tegangan kontak dan deformasi. Hasil menunjukkan bahwa semakin halus mesh yang digunakan, nilai hasil simulasi cenderung konvergen dan lebih stabil. Studi ini menegaskan pentingnya pemilihan mesh yang tepat untuk memperoleh hasil analisis FEM yang akurat pada permasalahan kontak. **Kata kunci:** kontak hemisphere; konvergensi mesh; mekanika kontak; metode elemen hingga; model dua dimensi

Abstract

The contact between two hemispheres is an important problem in contact mechanics and is commonly analyzed using the Finite Element Method (FEM). The accuracy of the simulation results strongly depends on the mesh size and density, particularly in the contact region. This study aims to perform a mesh convergence analysis on a two-dimensional (2D) model of two hemispheres in contact using FEM. The 2D model was developed with appropriate boundary conditions and compressive loading to represent the contact interaction. Several mesh sizes were applied to evaluate their influence on contact stress and deformation results. The results show that finer meshes lead to more stable and convergent solutions. This study highlights the importance of proper mesh selection to obtain reliable FEM results in contact analysis.

Keywords: contact mechanics; finite element method; hemispherical contact; mesh convergence; two-dimensional model

1. Pendahuluan

Analisis kontak dalam mekanika teknik sering ditangani menggunakan Metode Elemen Hingga (FEM) karena mampu menangani masalah non-linier dan kompleks secara numerik. Dalam studi kontak, seperti kontak antara permukaan hemisphere, pemilihan mesh sangat memengaruhi hasil simulasi, termasuk distribusi tegangan dan deformasi. Studi yang mengkaji analisis kontak elastik-plastik pada bentuk hemisphere dengan FEM telah dilakukan untuk memahami perilaku kontak di bawah beban normal dan dibandingkan dengan solusi teoritik kontak Hertz [1].

Selain itu, penelitian lain juga melakukan analisis numerik dengan FEM untuk memahami perilaku kontak elastik-plastik antara bola dan bidang keras pada berbagai kondisi material, yang memberikan gambaran penting mengenai karakteristik kontak tanpa gesekan [2]. Studi-studi semacam ini menunjukkan bahwa strategi diskretisasi, termasuk ukuran mesh, merupakan faktor penting dalam memperoleh hasil simulasi yang akurat.

Selain itu, penelitian lain menunjukkan bahwa strategi pemodelan mesh yang baik memengaruhi akurasi simulasi dan konvergensi solusi numerik dalam masalah kontak dan permukaan kasar. Misalnya, pendekatan baru dalam pemodelan kontak numerik yang memperhitungkan topografi mikro pada permukaan memberikan gambaran penting tentang kebutuhan refinemen mesh [3]. Uji konvergensi mesh sendiri merupakan prosedur umum dalam simulasi numerik untuk memastikan bahwa hasil solusi tidak berubah signifikan saat ukuran mesh diperluas [4].

Kajian metodologis tentang konvergensi dan optimalisasi mesh menunjukkan pentingnya keseimbangan antara akurasi dan biaya komputasi dalam FEM, terutama pada simulasi kontak di mana distribusi tegangan lokal sangat sensitif terhadap mesh [5]. Penelitian yang menganalisis strategi refinemen mesh dalam konteks simulasi mekanik, meskipun tidak semua berfokus pada kontak hemispherical, menegaskan perlunya studi konvergensi untuk mendapatkan hasil yang stabil dan dapat dipercaya [6].

2. Bahan dan Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pemodelan dua dimensi (2D axisymmetric) untuk merepresentasikan kontak antara dua hemisphere identik dengan asumsi bahan elastik linier-isotropik. Geometri model dibuat sedemikian hingga simetri axisymmetric digunakan untuk efisiensi komputasi, dan beban tekan diterapkan sejajar sumbu simetri untuk mensimulasikan kondisi kontak yang relevan. Model dibuat dan dianalisis dalam perangkat lunak FEM standar seperti Abaqus yang mendukung pemodelan kontak non-linier dan kontrol mesh adaptive. Strategi ini umum dipakai dalam pemodelan kontak bola atau permukaan bulat dalam tribologi karena dapat menangkap distribusi tekanan dan deformasi secara menyeluruh [7].

Interaksi kontak dimodelkan sebagai frictionless contact (kontak tanpa gesekan) dengan formulasi numerik yang cocok untuk masalah non-linier (penalty atau augmented Lagrangian), dan analisis dilakukan secara incremetal-iteratif hingga memenuhi kriteria konvergensi gaya dan perpindahan. Kondisi batas dan interaksi kontak dikalibrasi berdasarkan literatur algoritma kontak untuk memastikan simulasi yang stabil dan akurat dalam menangani permasalahan kontak mekanik. Studi algoritma kontak seperti ini menjadi dasar pemilihan metode numerik yang digunakan untuk mendiskretkan hubungan kontak antara elemen yang berinteraksi pada permukaan [8].

Studi konvergensi mesh dilakukan dengan membuat beberapa variasi ukuran mesh termasuk refinement lokal pada zona kontak, sehingga evaluasi dapat dilakukan terhadap parameter kunci seperti tekanan kontak maksimum, daerah kontak, serta deformasi total saat mesh diperhalus. Konvergensi dinyatakan tercapai ketika perubahan hasil antara dua model mesh berturut-turut berada di bawah batas toleransi yang ditentukan (misalnya <3%) [9]. Prinsip dasar konvergensi FEM menyatakan bahwa solusi numerik akan stabil dan tidak lagi berubah signifikan saat mesh diperhalus, sehingga hasil tersebut dapat dianggap representatif dari solusi sebenarnya [10].

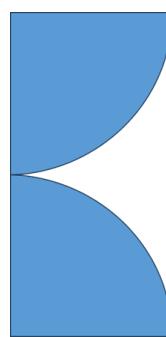
Tabel 1. Material Properties

Material	Young's Modulus (GPa)	Poisson Ratio	Yield Strength (Mpa)
Brass	96	0.34	310

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Permodelan Hemisphere

Untuk permodelan *Hemisphere* langsung menggunakan aplikasi ABAQUS. Model pada penelitian ini diambil dari penelitian yang dilakukan oleh ismail [11]. Model ini terdiri dari dua bola yang dimodelkan secara aksisimetris terhadap sumbu y dengan jari-jari 17.5 mm.



Gambar 1. Model Dua Hemisphere

Proses simulasi dimulai dengan pembuatan geometri dua hemisphere dalam modul Part pada Abaqus, di mana untuk model dua dimensi digunakan pendekatan axisymmetric agar dapat merepresentasikan perilaku kontak tiga dimensi secara efisien. Setelah geometri dibuat, material didefinisikan pada modul Property dengan memasukkan parameter mekanik seperti modulus elastisitas dan rasio Poisson yang terdapat pada tabel 1, kemudian material tersebut di-assign ke masing-masing bagian. Selanjutnya, pada modul Assembly, kedua hemisphere diposisikan sehingga permukaan yang akan saling bersentuhan berada pada jarak yang sangat dekat untuk memudahkan proses inisiasi kontak.

Tahap berikutnya dilakukan pada modul Step, di mana analisis ditetapkan sebagai analisis statik nonlinier untuk mengakomodasi efek kontak. Interaksi kontak kemudian didefinisikan dalam modul Interaction dengan memilih pasangan permukaan (surface-to-surface contact) dan menetapkan properti kontak sebagai frictionless. Kondisi batas dan pembebanan diberikan pada modul Load, misalnya dengan menahan salah satu hemisphere dan memberikan beban tekan atau perpindahan pada hemisphere lainnya untuk menghasilkan kondisi kontak. Untuk beban yang digunakan pada simulasi bernilai 2000 N

3.2 Meshing

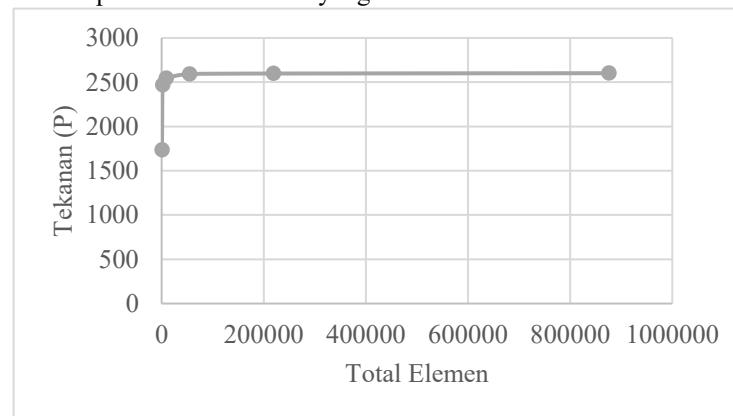
Konfigurasi mesh dilakukan pada modul Mesh dengan menentukan jenis elemen 2D axisymmetric yang sesuai. Untuk penelitian ini digunakan jenis elemen CAX4. Mesh dibuat dengan kerapatan berbeda untuk keperluan studi konvergensi, di mana daerah kontak diberi refinemen mesh yang lebih halus dibandingkan bagian lainnya. Proses ini diulang dengan beberapa variasi ukuran elemen untuk menghasilkan beberapa model mesh. Berikut variasi mesh yang digunakan.

Tabel 2. Variasi Mesh

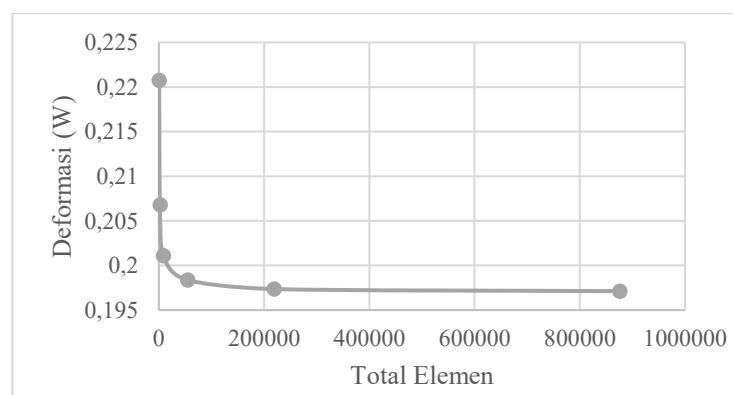
LOAD	MESHING
2000	1
	0,5
	0,25
	0,1
	0,05
	0,025

Berdasarkan Tabel 2, variasi ukuran mesh yang digunakan berkisar dari 1 mm hingga 0,025 mm dengan beban tetap sebesar 2000 N. Variasi ini dipilih untuk mengamati pengaruh ukuran elemen terhadap hasil simulasi, khususnya pada nilai tekanan kontak, tegangan, dan deformasi di daerah kontak antara dua hemisphere. Mesh dengan ukuran lebih besar (misalnya 1 dan 0,5) merepresentasikan kondisi mesh kasar, sedangkan ukuran lebih kecil (0,1 hingga 0,025) mewakili mesh yang lebih halus dan diharapkan mampu menangkap distribusi tegangan secara lebih akurat.

Setiap variasi mesh dijalankan secara terpisah menggunakan kondisi batas dan beban yang sama. Hasil yang diperoleh dari masing-masing simulasi kemudian dibandingkan untuk mengevaluasi tingkat perubahan nilai tegangan dan deformasi. Jika selisih hasil antara dua mesh berturut-turut sudah sangat kecil, maka kondisi tersebut dianggap telah mencapai konvergensi. Dengan pendekatan ini, dapat ditentukan ukuran mesh optimal yang memberikan keseimbangan antara akurasi hasil dan efisiensi waktu komputasi. Berikut merupakan hasil simulasi yang dilakukan.



Gambar 3. Grafik hasil konfigurasi mesh Tekanan terhadap total elemen



Gambar 4. Grafik hasil konfigurasi mesh Deformasi terhadap total elemen

Berdasarkan hasil simulasi, dapat diamati bahwa semakin kecil ukuran mesh, jumlah elemen meningkat secara signifikan dan nilai hasil simulasi menjadi semakin stabil. Pada mesh 1 hingga 0,25 masih terlihat perubahan yang cukup besar pada nilai tekanan kontak dan deformasi, yang menunjukkan bahwa hasil belum konvergen. Hal ini disebabkan oleh mesh yang masih terlalu kasar sehingga belum mampu menangkap distribusi tekanan dan deformasi secara akurat di daerah kontak.

Pada ukuran mesh 0,1, nilai deformasi sebesar 0,198374 dan tekanan kontak sebesar 2591,68 mulai menunjukkan perubahan yang kecil jika dibandingkan dengan mesh yang lebih halus, yaitu 0,05 dan 0,025. Selisih nilai tekanan antara mesh 0,1 dan 0,05 hanya sekitar 0,25%, sedangkan terhadap mesh 0,025 sekitar 0,39%, yang berada di bawah batas toleransi error 1%. Demikian pula pada nilai deformasi, perubahannya relatif kecil, yang menandakan bahwa solusi telah mencapai kondisi konvergen.

Oleh karena itu, mesh 0,5 dipilih sebagai ukuran mesh optimal karena mampu memberikan hasil yang cukup akurat dengan error kurang dari 1% serta tetap efisien secara komputasi untuk analisis kontak dua hemisphere menggunakan metode Finite Element.

4. Kesimpulan

Pada penelitian ini telah dilakukan simulasi elemen hingga pada kontak dua *hemisphere*. Hasil penelitian ini dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Variasi ukuran mesh berpengaruh signifikan terhadap hasil simulasi kontak, khususnya pada nilai tekanan kontak dan deformasi, di mana mesh yang lebih halus menghasilkan hasil yang lebih stabil dan mendekati kondisi konvergen.
2. Hasil studi konvergensi menunjukkan bahwa ukuran mesh 0,05 telah mencapai kondisi konvergen dengan tingkat error kurang dari 1%, sehingga dapat dianggap cukup akurat untuk merepresentasikan perilaku kontak dua hemisphere.
3. Penggunaan mesh 0,05 memberikan keseimbangan terbaik antara akurasi hasil dan efisiensi komputasi, dibandingkan dengan mesh yang lebih halus yang memerlukan sumber daya komputasi jauh lebih besar.

5. Daftar Pustaka

- [1] R. L. Jackson, “A Finite Element Study of Elasto-Plastic Hemispherical,” vol. 127, no. April, pp. 343–354, 2005, doi: 10.1115/1.1866166.
- [2] P. Sahoo, B. Chatterjee, and D. Adhikary, “Finite Element based Elastic-Plastic Contact Behaviour of a Sphere against a Rigid Flat – Effect of Strain Hardening,” vol. 2, no. 1, pp. 1–6, 2010.
- [3] J. Bonari, M. Paggi, and D. Dini, “International Journal of Solids and Structures A new finite element paradigm to solve contact problems with roughness,” *Int. J. Solids Struct.*, vol. 253, no. February, p. 111643, 2022, doi: 10.1016/j.ijsolstr.2022.111643.
- [4] I. B. Favryyan *et al.*, “UJI KONVERGENSI MESH MODEL ELEMEN HINGGA STRUKTUR MASS TIMBER DENGAN ABAQUS CAE,” vol. 25, no. 1, pp. 46–53, 2023.
- [5] C. Guillaume and P. Manuel, “Mechanics Convergence analysis and mesh optimization of finite element analysis related to helical springs,” vol. 22, 2024.
- [6] M. Aspects, “Methodological Aspects and Mesh Convergence in Numerical Analysis of Athermal Fiber Network Material Deformation,” 2024.
- [7] L. Hotma *et al.*, “MESH CONVERGENCE TEST BY USING FINITE ELEMENT ANALYSIS (FEA) IN SHAFT LOADING OF 2 KW INDUCTION,” vol. 15, no. 3, pp. 1271–1280, 2024, doi: 10.21776/jrm.v15i3.1516.
- [8] P. Wriggers, “Finite Element Algorithms for Contact Problems,” vol. 2, no. March, pp. 1–49, 1995
- [9] C. Carstensen, “Convergence of adaptive finite element methods in computational mechanics ☆,” *Appl. Numer. Math.*, vol. 59, no. 9, pp. 2119–2130, 2009, doi: 10.1016/j.apnum.2008.12.006.
- [10] J. Liu, L. Wu, K. Yin, C. Song, X. Bian, and S. Li, “Methods for Solving Finite Element Mesh-Dependency Problems in Geotechnical Engineering — A Review,” pp. 1–20, 2022.
- [11] R. Ismail, T. Prasojo, M. Tauqiqirrahman, J. Jamari, and D. J. Schipper, “Numerical Investigation of the Plastic Contact Deformation between Hemispheres : Variation of Radii Ratio and Normal Loads,” vol. 1123, pp. 16–19, 2015, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1123.16.