

ANALISIS PENGARUH GEOMETRI MODEL PADA MEKANIKA KONTAK ASPERITAS BENTUK SINUSOIDAL MENGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

*Muhammad Nur Afi¹, 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: muhnurafiiki@gmail.com

Abstrak

Permukaan material memiliki kekasaran permukaan dengan profil lembah dan bukit yang tidak beraturan atau disebut dengan asperitas. Pengamatan perilaku kontak mekanik pada tingkat asperiti perlu dilakukan untuk meningkatkan efisiensi kerja. Pemodelan sederhana dilakukan guna merepresentasikan kekasaran permukaan untuk dilakukan analisis. Salah satu model yang sering digunakan untuk menggambarkan kekasaran permukaan adalah bentuk sinusoidal. Pada penelitian ini dilakukan analisis pengaruh kondisi geometri pemodelan kontak asperitas menggunakan metode elemen hingga. Pengamatan berfokus pada model asperitas kondisi bebas dimana terdapat material dibawahnya dan kondisi terisolasi. Model geometri dilakukan studi konvergensi mesh dan didapatkan ukuran mesh efektif sebesar 0,001 mm. Selanjutnya validasi dengan solusi analitik kontak Westergaard dilakukan dan dihasilkan grafik yang memiliki nilai tidak jauh berbeda dengan tren yang mirip pada pengamatan luas area kontak. Berdasarkan hasil simulasi yang dilakukan, kedalaman material tidak mempengaruhi luas area kontak dan tegangan permukaan yang terjadi pada permukaan asperitas.

Kata kunci: asperitas; mekanika kontak; sinusoidal

Abstract

The surface of the material has roughness with irregular valley and peak profiles, known as asperities. Observation of mechanical contact behavior at the asperity level is necessary to improve work efficiency. A simple model is created to represent surface roughness for analysis. One commonly used model to figurize surface roughness is the sinusoidal form. This study analyzes the effect of asperity contact modeling geometry conditions using the finite element method. Observations focus on a free condition asperity model where there is material underneath and an isolated condition. The geometric model undergoes a mesh convergence study, and an effective mesh size of 0.001 mm is obtained. Furthermore, validation is performed with the analytical solution of Westergaard contact, resulting in a graph with values not far off and similar trends observed in the contact area. Based on the simulations conducted, the depth of the material does not affect the contact area and surface stress occurring on the asperity surface.

Keywords: asperities; contact mechanic; sinusoidal

1. Pendahuluan

Mekanika kontak merupakan salah satu cabang ilmu tribologi yang mempelajari kontak mekanis antar permukaan material. Ilmu mekanika kontak mulanya hanya diterapkan pada unsur berukuran makro dengan asumsi material tersebut bersifat kontinu dan homogen [1]. Namun, perkembangan teknologi saat ini meningkat pesat dan mampu melakukan fabrikasi tingkat mikro dengan kontrol kontur permukaan material yang baik [2]. Permukaan material yang terlihat rata tidak sepenuhnya rata, terdapat topografi bukit dan lembah tidak beraturan yang disebut dengan asperitas. Dalam berbagai kasus praktis, asperitas perlu diperhatikan dalam memprediksi kontak mekanis untuk peningkatan efisiensi dan kinerja, seperti bantalan atau *bearing* [3]. Model teoritis diperlukan untuk mendukung perkembangan ilmu kontak asperitas sehingga dapat digunakan untuk memandu desain topografi permukaan dengan kontak permukaan yang terkontrol [4].

Salah satu model asperitas yang sering digunakan untuk merepresentasikan kekasaran permukaan adalah model *sinusoidal*. Westergaard merupakan salah satu peneliti awal yang mengamati pemodelan elastis dua dimensi dengan variabel kompleks dalam model permukaan *sinusoidal*. Dari penelitian tersebut, Westergaard menghasilkan solusi tekanan kontak dan area kontak dari interaksi kontak penuh yang dikenal sebagai solusi Westergaard [5]. Beberapa peneliti [6], [7], [8], [9], berpendapat bahwa model sinusoidal lebih realistis dalam merepresentasikan kekasaran permukaan.

Metode komputasi dengan memanfaatkan Analisis Elemen Hingga dapat menjadi alternatif untuk memodelkan dan melihat pengaruh model geometri.. Metode *Finite Elemen Analisis* (FEA) sering digunakan untuk pemodelan kontak asperitas dengan merepresentasikan kekasaran permukaan menjadi

beberapa bentuk seperti, bola, sinusoidal, eliptical, dan lainnya yang berkontak dengan pelat datar kaku. Beberapa peneliti [10], [9], [11], [3] menggunakan metode ini untuk memodelkan kontak asperitas dengan berbagai asumsi dan idealisasi parameter. Dalam beberapa penelitian, kontak asperitas dimodelkan dalam kondisi bebas dan terisolasi.

Melihat dari pemaparan diatas, pengamatan mekanika kontak antar asperitas menjadi hal yang penting untuk meningkatkan efisiensi kerja mekanis. Selain itu, dengan menggunakan metode komputasi elemen hingga pengamatan perilaku mekanika kontak akan lebih mudah. Oleh karena itu, pada penelitian ini dilakukan analisis pengaruh geometri asperitas dengan model *sinusoidal* bebas dan terisolasi dengan menggunakan analisis elemen hingga.

2. Bahan dan Metode Penelitian

Pada penelitian ini dilakukan pemodelan asperitas dengan profil *sinusoidal* pada kondisi bebas dan terisolasi yang berkontak dengan plat rata kaku. Simulasi kontak mekanik dilakukan dengan membuat model sederhana asperitas untuk merepresentasikan kekasaran permukaan. Pemodelan profil permukaan *sinusoidal* mengikuti persamaan (1). Model tersebut akan dilakukan validasi mengikuti solusi kontak Westergaard (2) untuk mendapatkan model yang valid. solusi kontak Westergaard merupakan solusi analitis untuk area asperitas yang berkontak dengan plat kaku pada model dua dimensi. Selanjutnya, berdasarkan penelitian yang dilakukan Shvarts & Yastrebov [11] didapatkan properti material yang digunakan untuk simulasi kontak mekanik dua dimensi model *sinusoidal*, yaitu berupa aluminium.

$$y = \Delta \cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) \quad (1)$$

$$\frac{A}{A_0} = \frac{2a}{\lambda} = \frac{2}{\pi} \arcsin \sqrt{\frac{p_0}{p^*}}, 0 \leq p_0 \leq p^* \quad (2)$$

Dimana p_0 adalah tekanan awal, p^* merupakan tekanan yang diperlukan untuk berkontak sempurna dan E^* merupakan modulus elastisitas efektif yang dinyatakan dengan Modulus Elastisitas E dan Poisson's Rasio ν

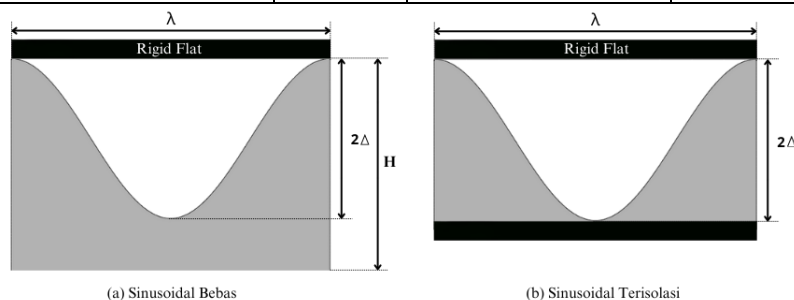
$$p^* = \frac{\pi E^* \Delta}{\lambda} \quad (3)$$

$$E^* = \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)^{-1} \quad (4)$$

Pada penelitian ini, *Software Solidworks* digunakan untuk memodelkan profil permukaan *sinusoidal* dan plat kaku. Selanjutnya model yang telah dibuat sesuai dengan penelitian terdahulu, model dimasukkan ke *Software ABAQUS* untuk dilakukan analisis *Finite Element Analysis* berdasarkan parameter yang sudah ditetapkan. Parameter pengujian dan properti material akan ditampilkan pada Tabel 1. Pemodelan yang telah dilakukan dapat dilihat pada Gambar 1.

Tabel 1. Parameter Pengujian dan Material Properties

Parameter	Simbol	Nilai	Unit
Panjang Gelombang	λ	1	mm
Amplitudo <i>Sinusoidal</i>	Δ	0,25	mm
Normal Load	P_0	1-640	MPa
Modulus Elastisitas	E	70	GPa
Poisson's Rasio	ν	0.33	-



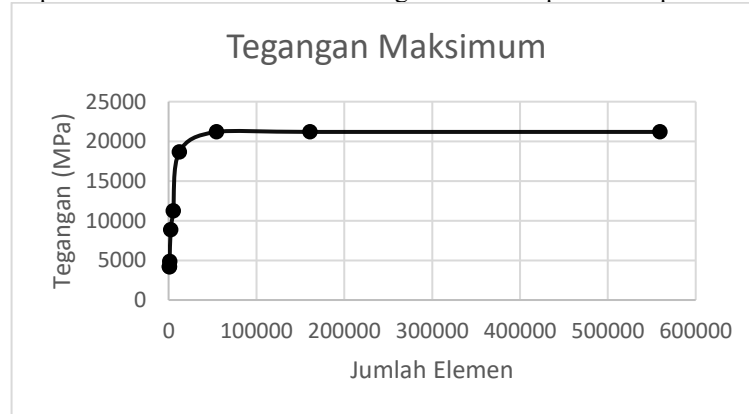
Gambar 1. Model Kontak Asperitas Sinusoidal.

Studi Konvergensi Mesh akan dilakukan untuk menjaga elemen tetap konvergen dan konsisten selama analisis berjalan. Ukuran mesh diperkecil secara bertahap untuk meningkatkan kapadatan *meshing* secara iteratif hingga tekanan kontak memiliki perbedaan dibawah 1% antar iterasi sehingga ukuran mesh tidak lagi mempengaruhi hasil simulasi. Pembebanan diberikan dalam bentuk tekanan mekanik sebesar 0 sampai 640 MPa dari bawah pada arah sumbu Y.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Studi Konvergensi Mesh

Studi konvergensi mesh dilakukan untuk menentukan ukuran mesh yang efektif dalam melakukan simulasi agar tidak mempengaruhi hasil. Perubahan pada area kontak menjadi variabel yang dipengaruhi tergantung pada pembebanan dan tekanan kontak. Namun, dengan penentuan mesh yang tepat dan konvergen, akan menjaga elemen tetap stabil dan konsisten. Pengurangan ukuran mesh akan meningkatkan jumlah elemen dan kepadatan mesh. Hasil studi konvergensi mesh dapat dilihat pada Gambar 2.

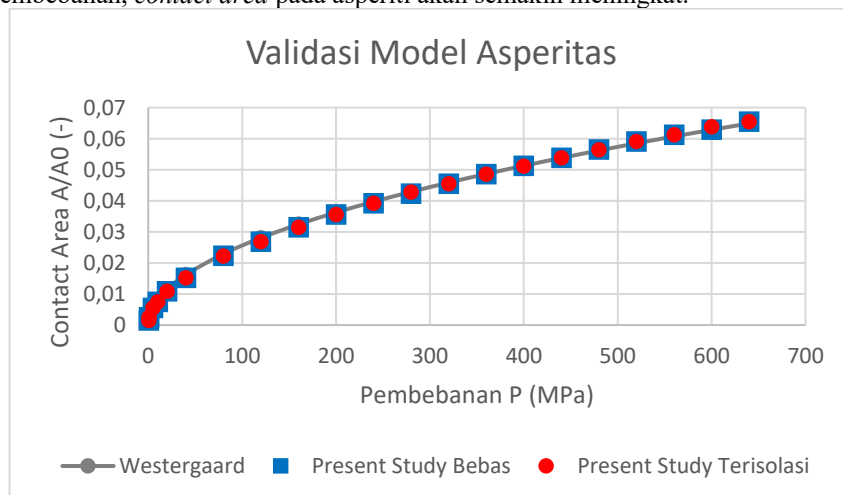


Gambar 2. Studi Konvergensi Mesh

Grafik pada Gambar 3.1 menunjukkan bahwa meshing sudah mulai konvergen pada jumlah elemen kurang lebih 54000 dengan ukuran mesh 0,001 mm. Hal ini menunjukkan bahwa elemen mesh yang digunakan sudah konvergen dan konsisten sehingga tidak mempengaruhi hasil simulasi. Simulasi model dapat dilanjutkan ke tahap selanjutnya, yaitu validasi dengan solusi model terdahulu.

3.2 Validasi Model Kontak

Validasi model simulasi metode elemen hingga bertujuan untuk menyesuaikan hasil pemodelan kontak dengan model terdahulu yang telah teruji sehingga pemodelan memiliki dasar penelitian dan dapat dipertanggungjawabkan. Validasi pada penelitian ini menggunakan solusi kontak Westergaard untuk profil asperitas *sinusoidal*, merujuk pada persamaan (2). Grafik hasil validasi perbandingan present study dan dengan solusi kontak Westergaard dapat dilihat pada Gambar 3. Pada grafik tersebut memperlihatkan bahwa trend hasil simulasi elemen hingga memiliki nilai yang tidak jauh berbeda dengan solusi analitik kontak Westergaard. Hasil pada simulasi FEM maupun perhitungan analitik menunjukkan bahwa dengan peningkatan pembebanan, *contact area* pada asperiti akan semakin meningkat.

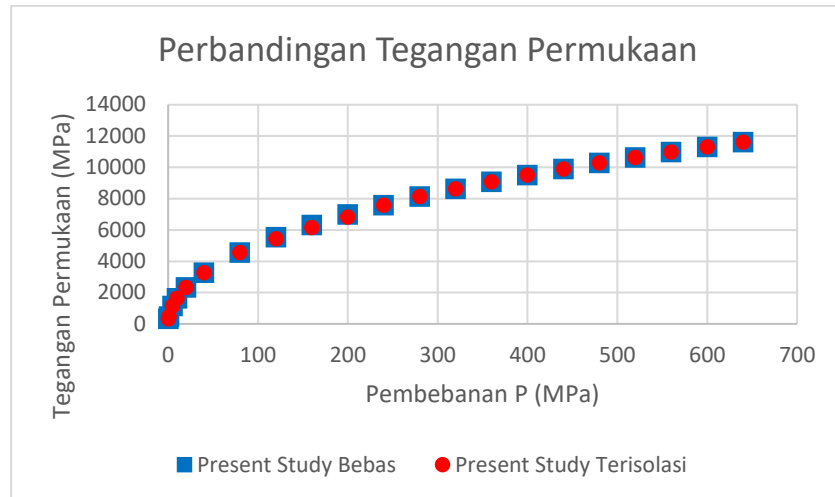


Gambar 3. Validasi Hasil Simulasi Numerik dengan Studi Analitik Kontak Westergaard.

Pada Gambar 3 menunjukkan bahwa besarnya area kontak tak berdimensi antara solusi kontak Westergaard, *Present study* bebas, dan terisolasi memiliki tren garis yang serupa. Berdasarkan hasil penjelasan tersebut, kondisi pemodelan kontak asperitas dengan ketinggian atau ketebalan material tidak menunjukkan pengaruh signifikan terhadap area kontak yang terjadi pada asperitas. Oleh karena itu, untuk mengamati area kontak asperiti dapat dilakukan dengan model asperitas bebas maupun terisolasi.

3.3 Perbandingan Tegangan Permukaan

Tegangan permukaan merupakan konsentrasi gaya pada permukaan benda akibat adanya pembebanan yang terjadi pada permukaan benda tersebut. Setiap benda yang diberikan tekanan akan menimbulkan tegangan pada area yang berkontak, tegangan yang terjadi pada permukaan material disebut dengan *contact pressure*. Ketika permukaan material saling berkontak, sebenarnya yang berinteraksi adalah asperitas masing-masing material. Pada pemodelan kekasaran permukaan pada tingkat asperitas perlu diperhatikan keterlibatan material dibawahnya. Hal ini didasarkan pada aplikasi di dunia nyata setiap benda tidak hanya memiliki kekasaran permukaan tapi juga memiliki ketebalan dan kedalaman material.. Perbandingan tegangan permukaan yang terjadi pada model asperitas kondisi bebas dan terisolasi dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Grafik Perbandingan Tegangan Permukaan

Gambar 4 menunjukkan grafik perbandingan tegangan permukaan yang terjadi pada permukaan asperitas. Berdasarkan grafik hasil simulasi, Nilai Tegangan permukaan yang terjadi antara model asperitas bebas dan terisolasi memiliki tren yang tidak jauh berbeda dan cenderung sesuai. Kemiripan yang terjadi antara model asperitas bebas dan terisolasi menunjukkan bahwa ketebalan material tidak berpengaruh pada tegangan permukaan yang terjadi pada kontak asperitas.

4. Kesimpulan

Pada penelitian ini telah dilakukan simulasi elemen hingga pembebanan pada model kontak asperitas profil *sinusoidal*. Hasil penelitian ini dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Berdasarkan hasil dari pengujian yang telah dilakukan diketahui bahwa pemodelan kontak asperitas dapat dilakukan dengan memanfaatkan *software* Solidworks dan ABAQUS. Pemodelan kontak asperitas dengan plat kaku merujuk pada penelitian terdahulu sebagai referensi. Pemodelan yang dilakukan telah mencapai nilai konvergensi mesh pada ukuran 0,001 mm. Selain itu, pemodelan yang dilakukan juga telah divalidasi menggunakan solusi analitik kontak Westergaard dan menunjukkan tren yang serupa.
2. Nilai area kontak dan tegangan permukaan yang terjadi tidak banyak terpengaruh oleh kondisi pemodelan kontak asperitas. Pemodelan kontak asperitas pada kondisi bebas maupun terisolasi memiliki nilai dan tren yang serupa untuk pengamatan area kontak dan tegangan permukaan asperitas.

Selain itu, untuk mendukung perkembangan penelitian kontak asperitas, Pemodelan kontak asperitas perlu ditambahkan parameter fluida diantara asperitas sebagai pengamatan ketika kontak terjadi pada kondisi terlubrikasi.

5. Daftar Pustaka

- [1] K. Kildashti, K. Dong, and A. Yu, "Contact force models for non-spherical particles with different surface properties: A review," *Powder Technol.*, vol. 418, no. February, p. 118323, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.powtec.2023.118323.
- [2] I. Etsion, "State of the art in laser surface texturing," *J. Tribol.*, vol. 127, no. 1, pp. 248–253, 2005, doi: 10.1115/1.1828070.
- [3] S. Saha and R. L. Jackson, "Elastic and elastic-perfectly plastic analysis of an axisymmetric sinusoidal surface asperity contact," *Tribol. - Mater. Surfaces Interfaces*, vol. 14, no. 1, pp. 1–21, 2020, doi: 10.1080/17515831.2019.1663396.
- [4] F. Jin, Q. Wan, and X. Guo, "A double-Westergaard model for adhesive contact of a wavy surface,"

-
- [5] *Int. J. Solids Struct.*, vol. 102–103, pp. 66–76, Dec. 2016, doi: 10.1016/j.ijsolstr.2016.10.016.
 - [6] K. L. Johnson, J. A. Greenwood, and J. G. Higginson, “The contact of elastic regular wavy surfaces,” *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 27, no. 6, pp. 383–396, Jan. 1985, doi: 10.1016/0020-7403(85)90029-3.
 - [7] J. Rostami, “Study of pressure distribution within the crushed zone in the contact area between rock and disc cutters,” *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 57, pp. 172–186, 2013, doi: 10.1016/j.ijrmms.2012.07.031.
 - [8] R. L. Jackson, V. Krithivasan, and W. E. Wilson, “The pressure to cause complete contact between elastic-plastic sinusoidal surfaces,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part J J. Eng. Tribol.*, vol. 222, no. 7, pp. 857–863, 2008, doi: 10.1243/13506501JET429.
 - [9] S. Saha, Y. Xu, and R. L. Jackson, “Perfectly Elastic Axisymmetric Sinusoidal Surface Asperity Contact,” *J. Tribol.*, vol. 138, no. 3, 2016, doi: 10.1115/1.4031994.
 - [10] M. Liu, “Finite element analysis of large contact deformation of an elastic-plastic sinusoidal asperity and a rigid flat,” *Int. J. Solids Struct.*, vol. 51, no. 21–22, pp. 3642–3652, 2014, doi: 10.1016/j.ijsolstr.2014.06.026.
 - [11] S. Shankar and M. M. Mayuram, “Sliding interaction and wear studies between two hemispherical asperities based on finite element approach,” *Int. J. Surf. Sci. Eng.*, vol. 2, no. 1–2, pp. 71–83, 2008, doi: 10.1504/IJSURFSE.2008.018969.
 - [12] A. G. Shvarts and V. A. Yastrebov, “Trapped fluid in contact interface,” *J. Mech. Phys. Solids*, vol. 119, pp. 140–162, 2018, doi: 10.1016/j.jmps.2018.06.016.