

## STUDI DAN PEMODELAN KONTAK *ASPERITIES* ELASTIK-PLASTIK MENGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

\*Hagata Aersada Ginting<sup>1</sup>, Jamari<sup>2</sup>, Athanasius Priharyoto Bayuseno<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

<sup>2</sup>Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

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

\*E-mail: [hagi.ginting@gmail.com](mailto:hagi.ginting@gmail.com)

### Abstrak

Tribologi merupakan sebuah ilmu yang meneliti tentang dua permukaan yang berinteraksi dengan gerakan relatif antar satu sama lain. Tribologi pada umumnya diasosiasikan dengan konsep “tribo-system” yang terdiri dari permukaan yang bergesekan dan dipisahkan oleh lapisan pelumas. Berbagai jenis “tribo-system” sudah diciptakan di banyak spektrum bidang seperti sains dan rekayasa teknik. Saat ini, penelitian terkait bidang tribologi sudah bertumbuh pesat dalam aspek lingkup dan kedalaman ilmu, yang mana salah satunya merupakan studi kontak mekanis. Salah satu penelitian penting merupakan konsep *asperities*. *Asperities* adalah puncak-puncak ketidakrataan secara mikroskopis yang dapat menimbulkan gesekan-gesekan pada area diskret. Berbagai peneliti melaksanakan pemodelan dengan konsep bola yang ditekan oleh plat kaku, seperti model Jackson-Green dan Kogut-Etsion. Pada penelitian ini, dilaksanakan sebuah pemodelan dan simulasi menggunakan perangkat lunak ABAQUS untuk *asperities*, dengan tujuan untuk menciptakan sistem model yang memiliki akurasi sesuai dengan studi kontak terdahulu. Berdasarkan studi konvergensi, dengan ukuran *mesh* 0.005 mm, didapatkan hasil simulasi dengan parameter sumbu x (interferensi non-dimensi) dan sumbu y (kontak area non-dimensi). Simulasi telah berhasil dilakukan dan menunjukkan kesesuaian baik dengan model kontak JG dan KE, dengan hasil validasi menunjukkan rata-rata error hanya sebesar 3.7%. Pada jangka panjang, dengan menggunakan model ini untuk simulasi, hubungan antara area kontak, tekanan kontak, dan interferensi dapat dianalisis lebih lanjut. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi perpanjangan dari solusi klasik kontak Hertz.

**Kata kunci:** *asperities*; area kontak; fem; *hemisphere*; interferensi

### Abstract

Tribology is a science that examines two interacting surfaces with relative motions between one another. Tribology is generally associated with the concept of a “tribo-system” consisting of sliding surfaces separated by a layer of lubricant. Various types of “tribo-systems” have been created in a wide spectrum of fields such as science and engineering. Currently, research related to tribology has grown rapidly in terms of scope and depth of knowledge, one of which is the study of mechanical contact. One of the important studies is the concept of *asperities*. *Asperities* are microscopic peaks of unevenness that can cause friction in discrete areas. Various researchers carried out modeling with the concept of a ball pressed by a rigid plate, such as the Jackson-Green and Kogut-Etsion models. In this study, a modeling and simulation was carried out using ABAQUS software for *asperities*, with the aim of creating a model system that has accuracy in accordance with previous contact studies. Based on the convergence study, with a mesh size of 0.005 mm, simulation results are obtained with the parameters of the x-axis (non-dimensional interference) and y-axis (non-dimensional contact area). The simulation has been carried out successfully and shows good agreement with the JG and KE contact models, with the validation results showing an average error of only 3.7%. In the long term, by using this model for simulation, the relationship between contact area, contact pressure, and interference can be further analyzed. This research is expected to be an extension of the classic Hertz contact solution.

**Keywords:** *asperities*; contact area; fem; *hemisphere*; interference

## 1. Pendahuluan

Tribologi merupakan sebuah ilmu yang meneliti tentang dua permukaan yang berinteraksi dengan gerakan relatif antar satu sama lain [1]. Tribologi pada umumnya diasosiasikan dengan konsep “tribo-system” yang terdiri dari permukaan yang bergesekan dan dipisahkan oleh lapisan pelumas [2]. Berbagai jenis “tribo-system” sudah diciptakan di banyak spektrum bidang seperti sains dan rekayasa teknik. Saat ini, penelitian terkait bidang tribologi sudah bertumbuh pesat dalam aspek lingkup dan kedalaman ilmu, yang mana salah satunya merupakan studi kontak mekanis. Kontak mekanis sebagai salah satu cabang ilmu pengetahuan di dalam tribologi merupakan rumpun ilmu pengetahuan yang krusial pengaplikasiannya dalam perancangan sistem mekanis. Alat seperti bearing, gigi motor, roda kendaraan, segel mekanis, hingga struktur sistem biomekanik membutuhkan penerapan ilmu kontak mekanis agar dapat dirancang dengan baik dan efisien. Studi kontak mekanis menjadi ilmu mendasar yang perlu dikaji karena sebuah sistem mekanis selalu terdiri lebih dari satu komponen yang akan memiliki interaksi antar permukaan. Fungsi interaksi antar permukaan ini adalah untuk memindahkan gaya mekanik dari satu komponen sistem menuju komponen lainnya. Di saat bersamaan, interaksi antar permukaan ini dapat berpotensi menciptakan gaya gesek.

Salah satu penelitian pertama yang mengeksplorasi pemodelan untuk kontak asperitas elastis adalah model Greenwood-Williamson [3]. Bentuk pemodelan ini menggunakan konsep kontak non-gesekan dari elastic hemisphere dan bidang datar kaku, atau lebih dikenal dengan sebutan Hertz contact solution, untuk menciptakan pemodelan stokastik yang merepresentasikan seluruh permukaan kontak asperities dengan distribusi Gaussian yang tinggi. Model Greenwood-Williamson mengasumsikan bahwa kontak antara dua permukaan kasar dapat dimodelkan sebagai permukaan kasar tunggal setara yang menyentuh bidang halus dan asperities diasumsikan sebagai sebuah struktur berbentuk bola pada area puncak. Berangkat dari dasar teori ini, terdapat banyak peneliti [4], [5], [6], [7], [8], yang melanjutkan penelitian dengan membahas karakteristik deformasi elastis dan elastis-plastis dari asperitas tunggal, yang kemudian mengusulkan pemodelan kontak permukaan kasar..

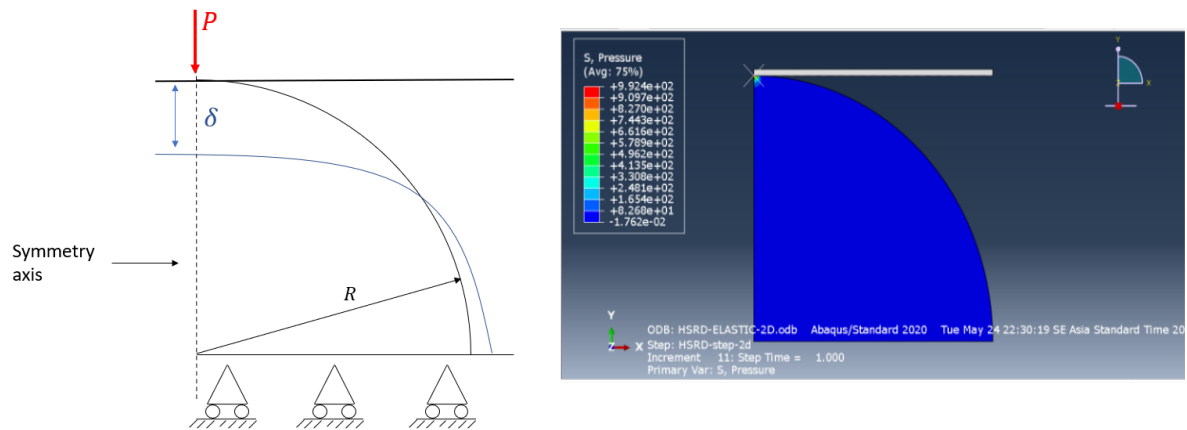
Selain penelitian diatas, banyak penelitian yang mempelajari interaksi antar permukaan kasar dengan pemodelan yang lebih sederhana, dimana pemodelan asperities memiliki beberapa asumsi dan komponen yang diberikan idealisasi [9]. Bentuk idealisasi ini berwujud sebagai bola atau silinder. Chang, Etsion, dan Bogy (CEB model) mendesain sebuah model untuk kontak statis pada fase elastik-plastik untuk studi analitik, dengan asperities dimodelkan dalam bentuk bola [10]. Zhao, Maietta, dan Chang (ZMC model) juga merancang model analitik untuk kontak static pada fase elastik-plastik dan asperities juga disederhanakan menjadi bentuk bola [11]. Konsep serupa juga dapat ditemui pada KE model [6] dan JG model [12], dimana kedua penelitian ini membahas perihal metode analisis fase elastic-plastic dengan model asperities berbentuk bola. Sebuah pemodelan baru terlihat pada penelitian Jamari-Schipper (JS model) yang memodelkan asperities sebagai bentuk ellipsoid [13].

Pemodelan dan simulasi *asperities* dilakukan memakai perangkat lunak ABAQUS dengan konsep model “*hemisphere on a rigid flat*”. Fokus studi ini adalah perbandingan akurasi hasil pemodelan dengan studi-studi kontak *asperities* terdahulu, untuk menentukan kelayakan dari model untuk dilanjutkan ke penelitian yang lebih kompleks. Beberapa hasil data yang dipaparkan meliputi sensitivitas *mesh*, plot perbandingan data interferensi dan area kontak non-dimensi, serta *error margin* akan dianalisis untuk menentukan keakuratan model.

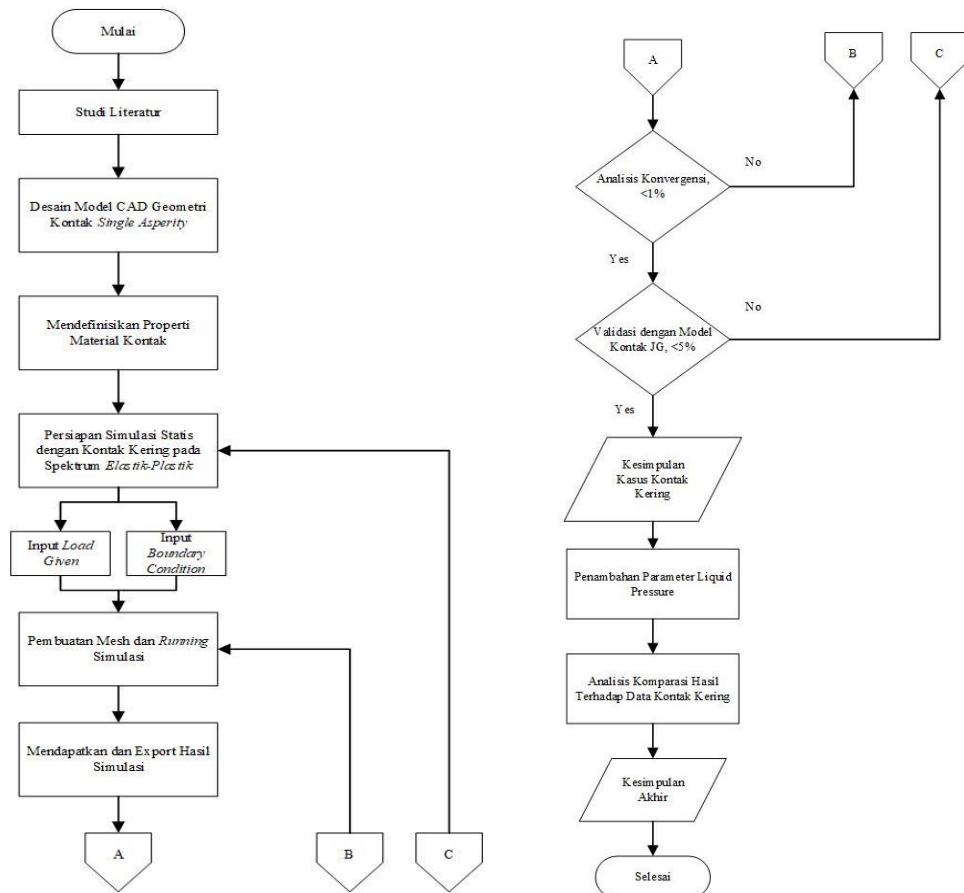
## 2. Bahan dan Metode Penelitian

Pemodelan dan simulasi dalam penelitian ini menggunakan perangkat lunak ABAQUS CAE. Konsep model menggunakan bentuk rancangan “*half hemisphere on a rigid flat*”, dimana bola akan diasumsikan sebuah puncak *asperities* yang bersentuhan dengan permukaan berlawanan dalam bentuk plat. Model ini sudah dilaksanakan oleh berbagai penelitian terdahulu. Salah satu model paling awal dari kontak asperitas elastis adalah model GW. Mereka menggunakan solusi dari kontak sphere dengan pelat kaku, atau dikenal sebagai solusi kontak Hertz, untuk secara stokastik memodelkan seluruh permukaan kontak asperiti dengan distribusi tinggi Gaussian. Dalam tujuan analitikal, model GW mengasumsikan bahwa kontak dua permukaan kasar dapat dimodelkan oleh permukaan kasar tunggal yang setara dengan bidang datar dan asperities diasumsikan sebagai bola di dekat puncak. Model simulasi dapat dilihat pada Gambar 1.

Hasil simulasi dikomparasi dengan studi-studi terkemuka dalam kontak *asperities*, yaitu KE (Kogut-Etsion) dan JG (Jackson-Green) dengan tujuan untuk mencapai *margin-of-error* yang rendah yang dapat menunjukkan keakuratan dan kesesuaian dari pemodelan yang telah dilaksanakan. Untuk ilustrasi lengkap dari metode penelitian, dapat dilihat pada *flowchart* Gambar 2.

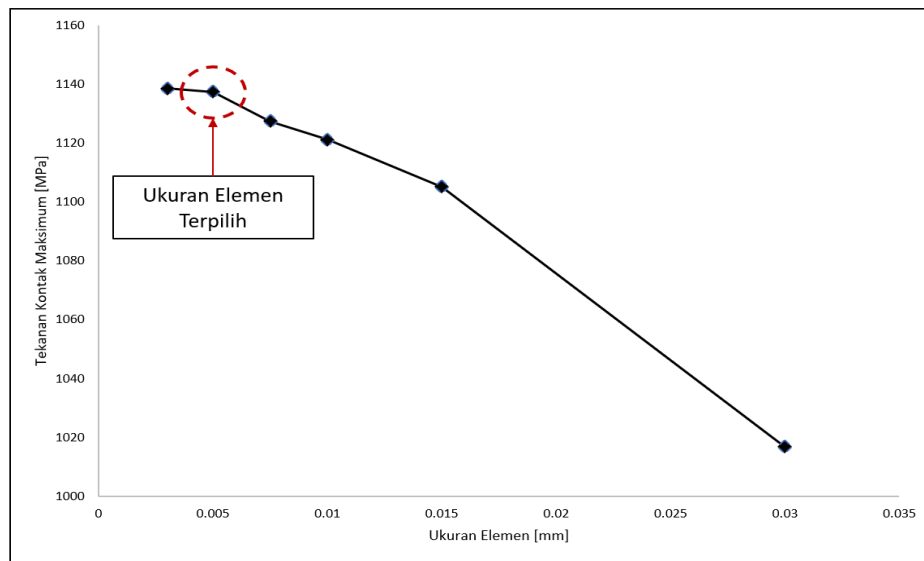


Gambar 1. Ilustrasi Model Kontak "Hemisphere on a rigid flat"



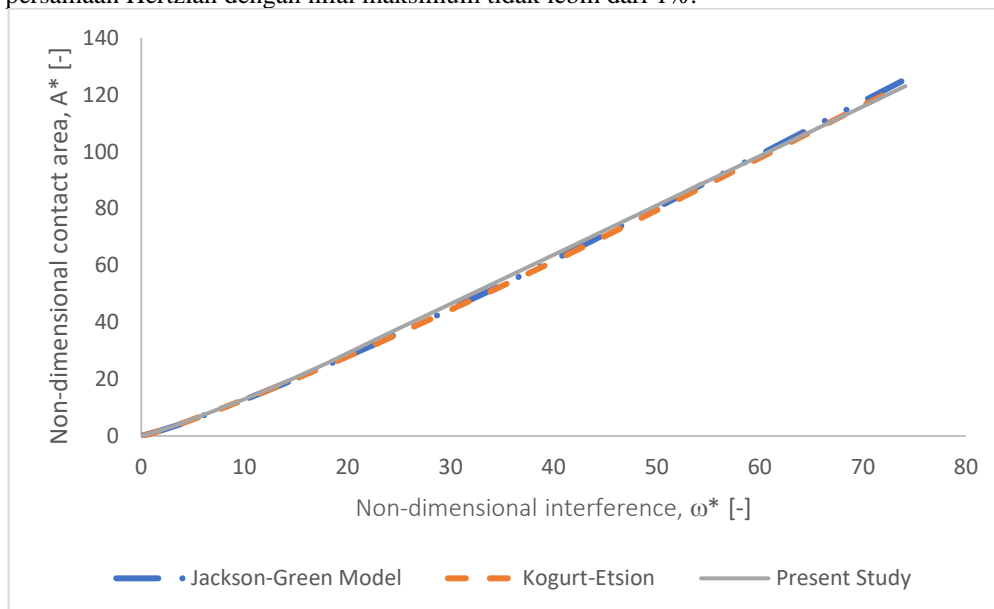
Gambar 2. Flowchart Penelitian

### 3. Hasil dan Pembahasan

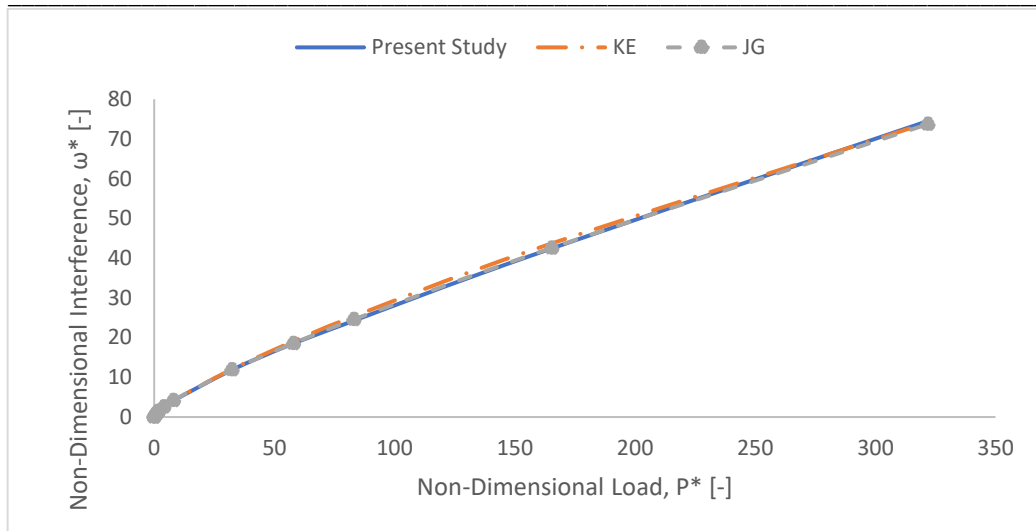


**Gambar 3** Studi Konvergensi

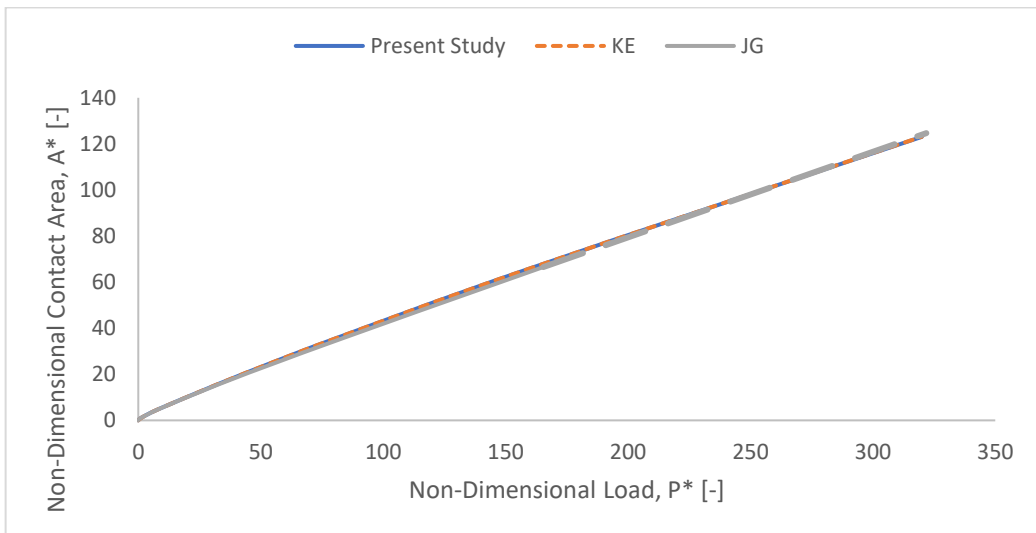
Kriteria konvergensi mesh dilakukan untuk menentukan ukuran mesh yang tepat untuk melakukan simulasi. Kepadatan mesh meningkat secara iteratif sampai tekanan kontak berbeda kurang dari 1% antara iterasi (**Gambar 4.2**). Parameter yang diamati dalam konvergensi mesh bukanlah sejumlah elemen. Karena, luas zona 1 akan berubah sesuai dengan tekanan fluida dan beban yang diberikan ke permukaan. Pergeseran area kontak jari-jari di zona I adalah nomor elemen yang terus berubah untuk berbagai kasus beban. Namun, ukuran elemen di zona 1 tetap konstan dan stabil untuk mempertahankan mesh konvergen. Ini menggambarkan mesh yang terdiri dari setidaknya 0,005 mm. Selain konvergensi mesh, model ini didefinisikan dengan baik dan akurat jika dibandingkan dengan solusi analitis elastis Hertz. Beban diberikan pada model elemen hingga dan hasilnya dibandingkan dengan persamaan Hertz. Tekanan maksimum model berbeda dari persamaan Hertzian dengan nilai maksimum tidak lebih dari 1%.



**Gambar 4.** Plot data perbandingan hasil penelitian simulasi dengan studi analitik model JG dan KE



**Gambar 5.** Komparasi Parameter Interferensi terhadap Beban non-dimensi antara studi dan model KE dan JG



**Gambar 6.** Komparasi Parameter Area Kontak terhadap Beban non-dimensi antara studi dan model KE dan JG

Hasil simulasi FEM ini akan dibandingkan secara langsung dengan hasil perhitungan analitik dengan model JG (Jackson & Green, 2005) dan model KE (Kogut & Etsion, 2002). Pada Gambar 4, 5, dan 6, terlihat kesamaan tren secara garis besar dari penelitian simulasi FEM ini dengan hasil perhitungan analitik untuk model KE dan JG. Dimana pada gambar 4, nilai area kontak semakin meningkat seiring dengan bertambahnya nilai interferensi non-dimensi. Gambar 5 dan 6 menunjukkan pola yang sama, meningkatnya beban non-dimensi meningkatkan nilai area kontak non-dimensi. Tabel 4. 2 merupakan perhitungan error validation untuk penelitian kontak non liquid pressure terhadap model KE dan JG.

**Tabel 1.** Perhitungan *error validation* untuk penelitian kontak non *liquid pressure* terhadap model KE dan JG.

$P^*$	$\omega^*$ <i>present study</i>	$\omega^*$ KE	Error (%)
0	0	0	1.44
0.05	0.126567688	0.124739809	0.59
0.2	0.328043503	0.329991925	1.96
0.4	0.526409621	0.536725751	2.59
0.6	0.695349308	0.71338709	3.48
0.8	0.843580582	0.872974488	4.31
1	0.978778545	1.020959651	5.03
1.2	1.104762013	1.160310882	5.56
1.4	1.22477214	1.292869138	5.90

1.6	1.340716774	1.419876829	6.15
1.8	1.452851959	1.542223011	7.65
4	2.508996662	2.700889511	6.66
8	4.118826015	4.392946741	1.28
32	11.76214158	11.91315726	2.83
56	18.04479697	18.55479029	4.46
80	23.55866188	24.60946085	3.12
160	41.31597036	42.6036988	0.51
320	74.13624537	73.75517741	1.44
<b>Nilai rata-rata error (%)</b>			<b>3.74</b>

Keterangan warna:

- Nilai error <5%
- Nilai error >5%

Sebagai validasi perhitungan error, nilai hasil studi saat ini akan dibandingkan langsung dengan nilai perhitungan KE. Batas nilai error yang ditoleransi adalah 5%. Berdasarkan perhitungan, sebagian besar nilai error berada dibawah 5% (14 data) dan hanya 6 set data yang berada diatas nilai 5%, sehingga memberikan rata-rata error value pada kisaran 3.74%. Nilai error rendah ini menunjukkan bahwa hasil nilai simulasi dalam penelitian ini memiliki pola kesamaan serupa dengan model KE, sehingga dapat dikatakan sebagai sebuah pemodelan FEM yang akurat.

#### 4. Kesimpulan

Hasil simulasi metode elemen hingga yang disajikan pada jurnal ini bertujuan untuk memahami metode pemodelan dan bagaimana akurasi pemodelan tersebut jika dibandingkan dengan penelitian terdahulu. Dalam kasus ini, model berbentuk seperempat bola yang dapat dideformasi berlawanan flat kaku, dengan referensi dari penelitian terdahulu oleh model JG dan KE. parameter yang digunakan adalah penggunaan ukuran jari-jari *hemisphere* 2 mm. Pemodelan dijelaskan menggunakan ukuran elemen ideal 0.005 mm. Simulasi telah berhasil dilakukan dan menunjukkan kesesuaian baik dengan model kontak JG dan KE, dengan hasil validasi menunjukkan rata-rata error hanya sebesar 3.7%.

#### 5. Daftar Pustaka

- [1] [1] Y. Yan, "Tribology and tribo-corrosion testing and analysis of metallic biomaterials," *Met. Biomed. Devices*, pp. 178–201, 2010, doi: 10.1533/9781845699246.2.178.
- [2] V. Pratap, N. Saboo, and A. Gupta, "Tribology as emerging science for warm mix technology : A review," *Constr. Build. Mater.*, vol. 359, no. October, p. 129445, 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129445.
- [3] J. A. Greenwood and J. B. P. Williamson, "Contact of nominally flat surfaces," *Proc. R. Soc. London. Ser. A. Math. Phys. Sci.*, vol. 295, no. 1442, pp. 300–319, 1966, doi: 10.1098/rspa.1966.0242.
- [4] R. L. Jackson and L. Kogut, "A comparison of flattening and indentation approaches for contact mechanics modeling of single asperity contacts," *J. Tribol.*, vol. 128, no. 1, pp. 209–212, 2006, doi: 10.1115/1.2114948.
- [5] C. Jacq, D. Nélias, G. Lormand, and D. Girodin, "Development of a three-dimensional semi-analytical elastic-plastic contact code," *J. Tribol.*, vol. 124, no. 4, pp. 653–667, 2002, doi: 10.1115/1.1467920.
- [6] L. Kogut and I. Etsion, "Elastic-plastic contact analysis of a sphere and a rigid flat," *J. Appl. Mech. Trans. ASME*, vol. 69, no. 5, pp. 657–662, 2002, doi: 10.1115/1.1490373.
- [7] L. Vu-Quoc, X. Zhang, and L. Laesburg, "A normal force-Displacement model for contacting spheres accounting for plastic deformation: Force-Driven formulation," *J. Appl. Mech. Trans. ASME*, vol. 67, no. 2, pp. 363–371, 2000, doi: 10.1115/1.1305334.
- [8] H. Zhang, L. Chang, M. N. Webster, and A. Jackson, "Effects of friction on the contact and deformation behavior in sliding asperity contacts," *Tribol. Trans.*, vol. 46, no. 4, pp. 514–521, 2003, doi: 10.1080/10402000308982658.
- [9] M. Thompson, "A Multi Scale Iterative Approach for Finite Element Modeling of Thermal Contact Resistance," *PhD Thesis*, pp. 1–100, 2007.
- [10] W. R. Chang, I. Etsion, and D. B. Bogy, "An elastic-plastic model for the contact of rough surfaces," *J. Tribol.*, vol. 109, no. 2, pp. 257–263, 1987, doi: 10.1115/1.3261348.
- [11] Y. Zhao, D. M. Maietta, and L. Chang, "An asperity microcontact model incorporating the transition from elastic deformation to fully plastic flow," *J. Tribol.*, vol. 122, no. 1, pp. 86–93, 2000, doi: 10.1115/1.555332.
- [12] R. L. Jackson and I. Green, "A finite element study of elasto-plastic hemispherical contact against a rigid flat," *J. Tribol.*, vol. 127, no. 2, pp. 343–354, 2005, doi: 10.1115/1.1866166.
- [13] J. Jamari and D. J. Schipper, "An elastic-plastic contact model of ellipsoid bodies," *Tribol. Lett.*, vol. 21, no. 3, pp. 262–271, 2006, doi: 10.1007/s11249-006-9038-3.