

## ANALISA KONTAK STATIS PERMUKAAN KASAR BERBASIS ELEMEN HINGGA

**Jamari**

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro  
E-mail: j.jamari@gmail.com

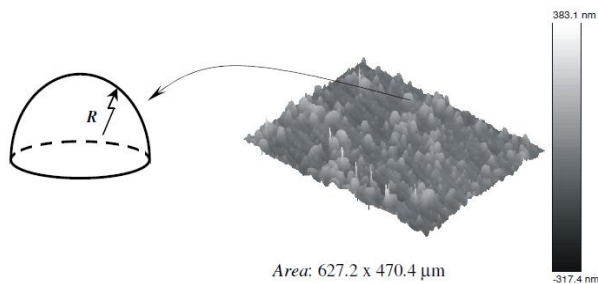
### ABSTRAK

*Teori kontak permukaan kasar telah lama dikembangkan oleh banyak peneliti. Pengembangan kontak elastis, elastoplastis dan plastis telah banyak dilakukan. Umumnya pemodelan permukaan kasar diwakilkan oleh asperiti. Asperiti sering diwakilkan dengan bentuk sederhana setengah bola (hemisphere). Untuk memodelkan permukaan kasar yang sesungguhnya, seperti hasil pengukuran, merupakan sebuah usaha yang tidak mudah. Paper ini bertujuan untuk memodelkan kontak permukaan kasar sesungguhnya akibat beban statis menggunakan metode elemen hingga. Pemodelan permukaan kasar sesungguhnya dilakukan dengan cara memanfaatkan software CAD. Geometri permukaan kasar hasil pengukuran masih berupa titik-titik dengan ketinggian tertentu. Software CAD mengubah geometri permukaan kasar ke dalam bentuk geometri solid tiga dimensi. Model permukaan kasar kemudian digunakan untuk analisa kontak. Beberapa parameter utama kontak seperti luas permukaan kontak, deformasi, dan lain-lain ditampilkan pada kontak antar permukaan kasar dengan sebuah bola.*

**Kata kunci:** permukaan kasar, mekanika kontak, CAD, metode elemen hingga.

### PENDAHULUAN

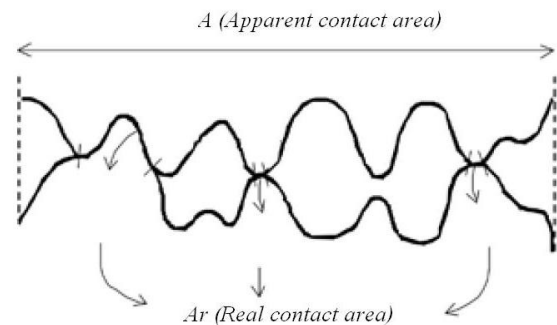
Permukaan suatu komponen permesinan yang terlihat halus jika dilihat menggunakan mikroskop dengan perbesaran skala mikro maka yang terlihat adalah permukaan yang sangat kasar (*surface roughness*). Hal ini dapat dilihat seperti pada Gambar 1. Satu unit terkecil dari bagian permukaan kasar tersebut dinamai “*asperity*”. Asperiti-asperiti tidak mengikuti geometri tertentu seperti bola atau paraboloida melainkan menonjol secara acak pada ruang tiga dimensi. Oleh karena itu jika permukaan suatu komponen permesinan saling kontak sesungguhnya yang terjadi adalah kontak antar asperiti.



**Gambar 1.** Permukaan komponen mesin dan *asperity* [1].

Kekasaran permukaan merupakan komponen dari tekstur permukaan yang melekat dalam proses produksi tetapi tidak termasuk gelombang (*waviness*) dan penyimpangan bentuk [2]. Proses pemesinan untuk membuat suatu komponen mesin akan mempengaruhi kualitas permukaannya, karena komponen hasil proses akhir suatu pemesinan salah satunya ditentukan oleh nilai kekasaran. Perbedaan jenis proses pemesinan akan menghasilkan nilai kekasaran yang berbeda-beda pula [3].

Banyak sekali karakteristik yang sangat dipengaruhi oleh kekasaran permukaan. Salah satunya adalah luas permukaan kontak. Awalnya, jika dua benda dengan permukaan kasar ditekan bersama, luas kontak yang sesungguhnya (*real*) adalah lebih kecil dibanding dengan luas kontak yang terlihat (*apparent*) [4] seperti yang didemonstrasikan pada Gambar 2. Ukuran luas kontak *real* sangat menentukan seperti pada hantaran listrik komponen yang berkontak maupun perambatan panas antar dua benda kontak.

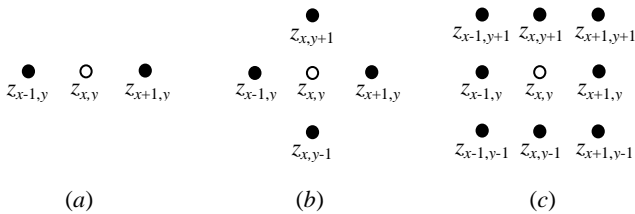


**Gambar 2.** Karakteristik luas kontak yang sebenarnya [3].

Luas permukaan kontak berhubungan dengan deformasi kontak. Ketika dua permukaan dibebani satu sama lain, kontak awalnya akan terjadi terbatas pada beberapa asperity. Semakin tinggi beban yang diberikan maka semakin banyak jumlah asperity yang berkontak. Jumlah daerah kontak tergantung pada jumlah asperity yang berkontak. Namun demikian, derajat deformasi tidak tergantung pada jumlah asperity yang berkontak maupun beban utama, melainkan tergantung pada geometri masing-masing asperity dan beban individu asperity. Permukaan kasar juga sangat memiliki pengaruh yang besar pada banyak fenomena fisik seperti gesekan, keausan, *sealing*, adesi,

kontak elektrik, termal, dan lain-lain [5]. Interaksi kontak antar dua permukaan kasar akan menentukan karakteristik kontak.

Telah dilaporkan oleh banyak peneliti bahwa kekasaran permukaan sangat menentukan karakteristik kontak yang berperan utama dalam menentukan karakter fungsional komponen. Untuk memaksimalkan kinerja komponen yang berkontak maka kekasaran permukaan tidak boleh disederhanakan menjadi satu besaran statistik seperti  $Ra$  dan lain-lain. Geometri asperiti tidak ada yang sama dan tidak mengikuti distribusi Gaussian seperti yang umumnya diasumsikan. Untuk mendapatkan data geometri asperiti banyak sekali metode yang diusulkan, seperti metode puncak sembilan titik [6], metode konservasi volume [7], dan lain-lain. Gambar 3 menunjukkan metode puncak berdasarkan titik-titik oleh Greenwood [5]. Tiga definisi puncak telah dikenalkan yaitu berdasarkan tiga titik (3a), lima titik (3b) dan sembilan titik (3c).



Gambar 3. Definisi puncak asperiti

Berdasarkan definisi di atas kurvatur dari geometri yang terbentuk didefinisikan sebagai:

$$\kappa_x = \frac{1}{\beta_x} = \frac{z_{x-1,y} - 2z_{x,y} + z_{x+1,y}}{p_x^2}$$

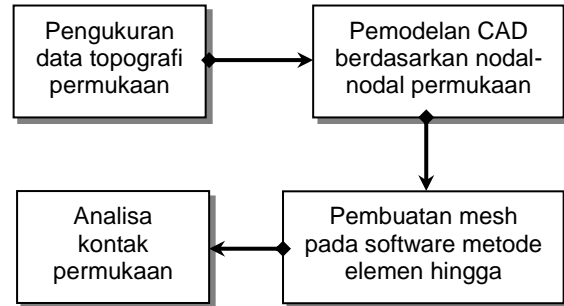
$$\kappa_y = \frac{1}{\beta_y} = \frac{z_{x,y-1} - 2z_{x,y} + z_{x,y+1}}{p_y^2}$$

dimana  $\kappa_x$  and  $\kappa_y$  adalah masing-masing kurvatur dan jari-jari asperity. Index  $x$  adalah untuk arah  $x$  dan index  $y$  untuk arah  $y$ .  $p_x$  dan  $p_y$  ukuran atau panjang piksel pada arah masing-masing  $x$  dan  $y$ . Metode ini telah banyak diaplikasikan seperti pada proses deepdrawing dan lain-lain.

Metode konservasi volum telah dikembangkan untuk memperbaiki metode puncak. Detail metode ini dapat dilihat pada [1]. Paper ini merupakan pengembangan paper-paper sebelumnya untuk kontak elastic-plastic [8-12]. Kelebihan studi ini adalah menggunakan input kekasaran permukaan tanpa memodifikasi asperitinya.

**PROSEDUR PEMODELAN**

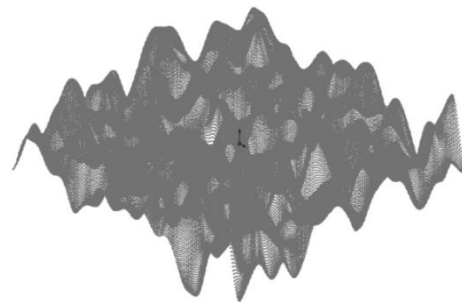
Prosedur pemodelan kontak permukaan kasar menggunakan metode elemen hingga adalah seperti yang ditunjukkan pada Hal Gambar 4.



Gambar 4. Prosedur pemodelan kontak permukaan kasar berbasis metode elemen hingga

Data topografi permukaan diperoleh dari pengukuran. Pengukuran bias dilakukan menggunakan mikroskop interferometer. Data topografi dapat juga diperoleh melalui simulasi seperti yang dilakukan oleh Thompson [13] dengan memanfaatkan nodal-nodal pada elemen-elemen yang telah dibentuk terlebih dahulu kemudian mengubah ketinggian nodal-nodal tersebut secara random.

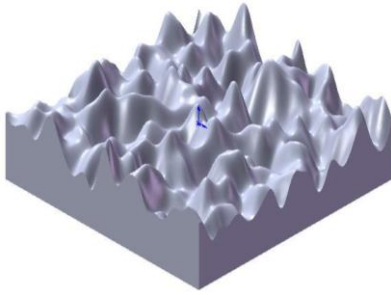
Metode membuat permukaan kasar dengan cara tersebut memiliki kelemahan yaitu puncak *asperity* yang terbentuk menjadi sangat tajam, padahal permukaan dengan puncak *asperity* yang tajam harus dihindari karena akan memunculkan tegangan yang sangat ekstrim. Permukaan kasar yang dibuat di dalam penelitian ini akan mengatasi kelemahan tersebut dengan menggunakan metode baru. Metode tersebut adalah dengan memanfaatkan perangkat CAD dalam membentuk permukaan kasar berdasarkan nodal-nodal dari pengukuran. Data yang diterima oleh *software* CAD berupa *point clouds* sedangkan *point clouds* itu sendiri berupa titik-titik yang berkumpul membentuk permukaan dengan ketinggian titik yang berbeda-beda seperti pada Gambar 5.



Gambar 5. Point clouds permukaan

Perangkat lunak komersial CAD digunakan untuk mengolah *point clouds* menjadi gambar 3D seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6. Gambar 3D tersebut masih belum bisa dipakai langsung untuk analisa kontak pada perangkat lunak CAE. Untuk itu perlu diubah format ekstensinya menjadi (\*.iges atau \*.sat). Setelah Gambar 3D tersebut diubah kemudian data gambar dikirim ke perangkat lunak CAE yang mendukung formatnya. Langkah selanjutnya adalah membuat mesh dan memberikan kondisi batas

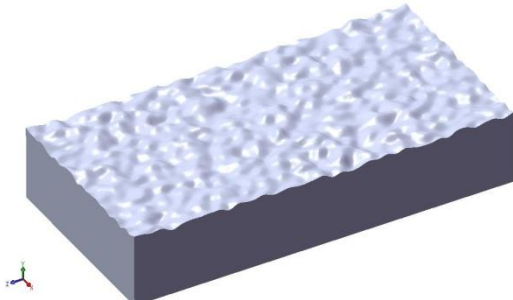
tergantung pada sistem kontak yang dianalisa. Setelah itu dilakukan analisa kontak berbasis elemen hingga.



**Gambar 6.** Permukaan kasar 3D hasil proses CAD

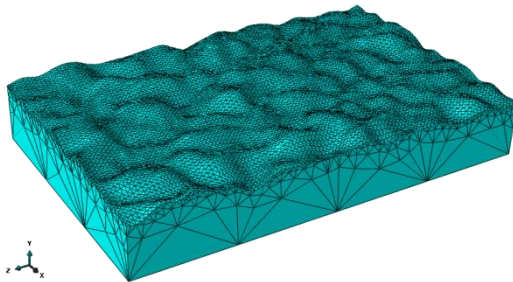
### HASIL DAN DISKUSI

Gambar 7 merupakan hasil permukaan kasar 3D yang diperoleh dari *point clouds* yang telah diproses dengan *software* CAD. Data permukaan kasar tersebut diperoleh dari hasil pengukuran. Data geometri pada Gambar 7 belum bias digunakan untuk analisa kontak dengan metode elemen hingga.



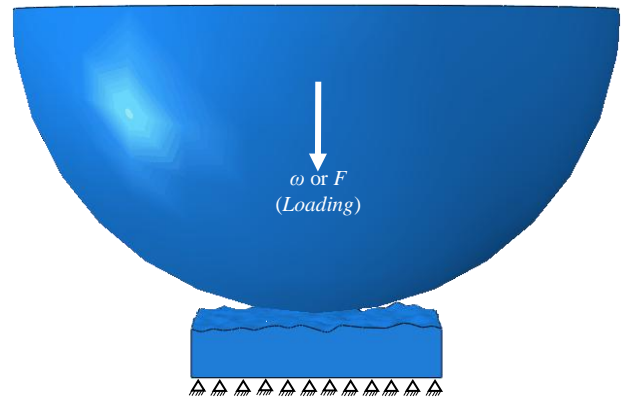
**Gambar 7.** Geometri permukaan kasar 3D dari hasil pengukuran

Untuk keperluan analisa elemen hingga geometri tersebut kemudian dilakukan diskretisasi atau *meshing* guna membagi satu geometri menjadi beberapa elemen yang berhingga. Jumlah mesh akan menentukan jumlah nodal dan berakibat pada biaya perhitungan. Pada penelitian ini digunakan computer dengan *Processor AMD Phenom X4B55* dengan jumlah *4-core* dan RAM 8GB. Sampel geometri permukaan kasar dipilih sedemikian sehingga biaya perhitungan tidak tinggi dan hasil analisa sudah cukup mewakili. Geometri akhir lengkap dengan *mesh* pada penelitian ini adalah seperti yang diperlihatkan pada Gambar 8.



**Gambar 8.** Geometri permukaan kasar 3D yang telah *dimesh*

Kontak statik antara sebuah bola rigid halus dengan sebuah permukaan datar kasar digunakan dalam penelitian ini. Data geometri dan material sistem kontak yang digunakan adalah seperti yang telah digunakan dalam eksperimen oleh Jamari [1]. Material permukaan datar kasar adalah aluminium yang memiliki sifat *elastic perfectly plastic* dengan modulus elastisitas  $E = 75.2$  GPa, rasio Poisson  $\nu = 0.3$  dan kekuatan luluh  $\sigma_y = 85.714$  MPa. Bola *rigid* sebagai *indenter* memiliki radius  $R = 5000$   $\mu\text{m}$ . Perangkat lunak CAE memiliki kemampuan untuk mendefinisikan suatu benda rigid sehingga data material untuk bola tidak perlu dimasukkan. Gambar 9 menunjukkan model elemen hingga sistem kontak antara sebuah bola rigid dengan sebuah permukaan kasar yang *deformable*. Beban kontak  $F$  yang diberikan pada penelitian ini adalah 5 N. Permukaan kasar ditahan pada semua arah sumbu agar tidak bergerak ke mana-mana. Bola diberikan beban ke arah kontak yaitu dari sumbu bola ke arah normal permukaan kasar.

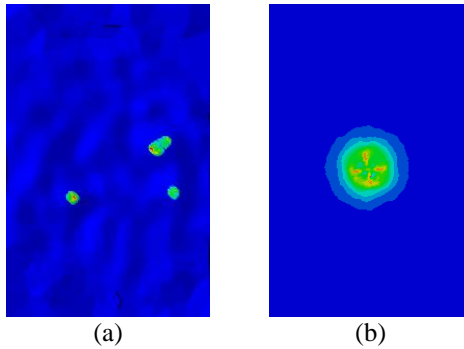


**Gambar 9.** Model elemen hingga sistem kontak antara sebuah bola dengan sebuah permukaan kasar

Gambar 10a menunjukkan kontur tegangan von Mises dan luas permukaan yang dihasilkan dari analisa kontak elemen hingga antara sebuah bola dengan sebuah permukaan kasar. Di sini terlihat bahwa tegangan terbesar terjadi pada daerah yang memiliki asperiti tertinggi yang berkontak sedangkan pada daerah yang semakin jauh dari kontak tegangan von Misesnya semakin kecil. Akibat kontur asperiti yang tidak beraturan maka kontur tegangan von Mises juga tidak beraturan seperti maksimum hanya pada salah satu sisi dan sebagainya. Luas permukaan kontak juga tidak beraturan mengikuti geometri asperiti yang berkontak. Permukaan kontak tersebar pada beberapa lokasi. Analisa kontak elastis-plastis juga memperlihatkan bahwa untuk permukaan kasar telah mencapai daerah plastis yang lebih tinggi dibandingkan dengan permukaan halus. Konsekuensi dari hal ini adalah luas permukaan permukaan kasar lebih kecil dibandingkan dengan permukaan halus.

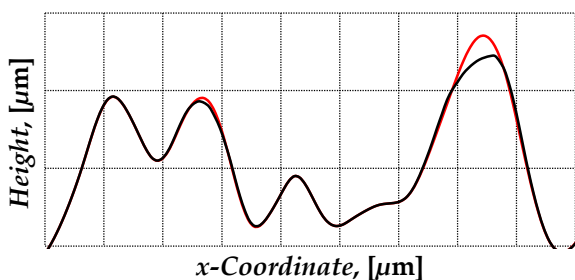
Sebagai pembandingan maka dilakukan analisa kontak dengan beban, material yang sama hanya permukaan kasar yang diganti dengan permukaan halus. Hasil dari analisa ini didemostrasikan pada

Gambar 10(b). Terlihat jelas di sini bahwa hasilnya sangat berbeda dengan sistem kontak pada analisa sebelumnya. Kontur tegangan von Mises sangat teratur dan terkumpul hanya pada satu lokasi. Demikian juga dengan hasil luas permukaan kontakannya. Jika dihitung berdasarkan warna kontur *contact pressure* yang berada pada beberapa elemen terkait maka *contact area* permukaan kasar sekitar  $1962.5 \mu\text{m}^2$  sedangkan *contact area* permukaan *smooth* sekitar  $70650 \mu\text{m}^2$ .



**Gambar 10.** Kontur tegangan von Mises dan penampang luas permukaan kontak untuk (a) permukaan kasar dan (b) permukaan halus

Gambar 11 menunjukkan plot deformasi plastis pada masing-masing asperiti akibat beban yang diberikan. Pada plot melintang yang menghubungkan antar dua asperiti yang berkontak ini terlihat bahwa terdapat dua asperiti yang terdeformasi plastis. Garis merah adalah geometri permukaan kasar sebelum berkontak dan garis hitam adalah geometri permukaan kasar setelah kontak dan beban dihilangkan.



**Gambar 11.** Plot deformasi plastis kontak permukaan kasar. Garis merah adalah geometri sebelum kontak dan garis hitam adalah geometri setelah kontak

Arah deformasi adalah searah dengan arah pembebanan dan terdistribusi sesuai dengan geometri kontak antara asperiti dengan bola. Untuk asperiti yang lebih jauh dari pusat bola akan terdeformasi agak ke arah keluar. Untuk asperiti yang dekat dengan pusat bola akan terdeformasi dominan ke arah tegak lurus permukaan.

## KESIMPULAN

Mekanika kontak sangat berpengaruh dalam menentukan fungsi ataupun karakteristik antara komponen yang berkontak. Teori mengenai kontak telah lama dikembangkan oleh banyak peneliti, mulai dari teori elastik Hertz hingga teori kontak elastik-plastik yang berkembang pesat akhir-akhir ini. Pemodelan kontak permukaan kasar umumnya menggunakan pendekatan statistik. Belum banyak pemodelan kontak permukaan kasar berdasarkan data geometri permukaan kasar yang sebenarnya (*real rough surface*) atau hasil pengukuran. Penelitian ini telah berhasil memodelkan kontak antara sebuah bola rigid dengan sebuah permukaan kasar yang sebenarnya menggunakan metode elemen hingga.

Dalam melakukan pemodelan tersebut terdapat tahap-tahap yang diperlukan meliputi pengukuran permukaan kasar, pembangunan model permukaan kasar 3D menggunakan *software* CAD dan pembangunan model permukaan kasar untuk analisa elemen hingga. Parameter-parameter kontak seperti distribusi tegangan kontak von Mises, distribusi luas permukaan kontak, dan deformasi asperiti permukaan kasar telah berhasil dievaluasi. Model yang telah dibangun ini telah berhasil mensimulasikan perilaku mekanika kontak statis elastis-plastis pada permukaan kasar.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Jamari, Running-in of Rolling Contacts, PhD Thesis University of Twente, The Netherlands (2006).
2. A. van Beek, A., Advanced Engineering Design Lifetime Performance and Reliability, Technische Universiteit Delft, The Netherlands (2006).
3. D. Dowson, History of Tribology, Second Edition, Professional Engineering Publishing, London (2008).
4. A.A. Bandeira, P.M. Piment., P. Wriggers, A 3D Contact Investigation of Rough Surfaces Considering Elastoplasticity, *Exacta*, 6 (2008) 109-118.
5. V.L. Popov, 2010, Contact Mechanics and Friction, Berlin University of Technology, Germany (2010).
6. J.A. Greenwood, A Unified Theory of Surface Roughness, *Proc. R. Soc. London A393* (1984) 133-157.
7. M.B. de Rooij, Handout Solids and Surfaces, University of Twente, Enschede, The Netherlands (2005).
8. W.R. Chang, I. Etsion, D.B. Bogy, An Elastic-Plastic Model for the Contact of Rough Surfaces, *ASME Journal of Tribology* 109 (1987) 257-263.
9. R.L. Jackson, I. Green, A Finite Element Study of Elasto-Plastic Hemispherical Contact against a Rigid Flat, *ASME Journal of Tribology* 127 (2005) 343-354.

10. J. Jamari, D.J. Schipper, An Elastic-Plastic Contact Model of Ellipsoid Bodies, *Tribology Letters* 21 (2006) 262-271.
11. L. Kogut, I. Etsion, Elastic-Plastic Contact Analysis of a Sphere and a Rigid Flat, *ASME Journal of Applied Mechanics* 69 (2002) 657-662.
12. Y. Zhao, D.M. Maietta, L. Chang, An Asperity Microcontact Model Incorporating the Transition from Elastic Deformation to Fully Plastic Flow, *ASME Journal of Tribology* 122 (2000) 86-93.
13. M.K. Thompson, A Multi-scale Iterative Approach for Finite Element Modeling of Thermal Contact Resistance, Ph.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, USA (2007).