
PENGUKURAN DEFORMASI PLASTIS PADA KONTAK ANTAR *HEMISPHERE*

B.S. Hardjuno¹⁾, J.D. Setiawan²⁾, R. Ismail²⁾, dan J. Jamari²⁾

¹⁾Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Semarang

Jln. Prof. Sudarto S.H. Tembalang, Semarang 50061

²⁾Jurusan Teknik Mesin Universitas Diponegoro, Semarang

Jln. Prof. Sudarto S.H. Tembalang, Semarang 50275

E-mail: Sighh22@yahoo.com

Abstrak

Dalam masalah gesekan, keausan, dan pelumasan, pengetahuan tentang status deformasi pada asperiti permukaan menjadi sangat penting. Pemahaman hubungan antara sifat kontak lokal dengan topografi permukaan dapat membantu pada pengoptimalan topografi permukaan dan proses pemesinan yang berkaitan dengan fungsi permukaan suatu komponen. Hipotesis Johnson dan Shercliff menyatakan bahwa "ketika terjadi kontak antar asperiti dua benda yang memiliki kekerasan sama, kedalaman deformasi plastis adalah sama untuk masing-masing benda, tidak terikat pada ukuran geometrinya".

Makalah ini membahas pembuktian hipotesis Johnson dan Shercliff dengan cara melakukan eksperimen menggunakan spesimen terbuat dari bahan brass dengan parameter rasio radius dua hemisphere (R_1/R_2) yang melibatkan tujuh macam rasio. Dalam eksperimen dilakukan pembebanan sebesar 8000 N dan 11000 N pada pasangan kontak sehingga mengalami deformasi plastis. Perbandingan deformasi plastis antara dua hemisphere tersebut diplot terhadap rasio radius dua hemisphere. Hasil menunjukkan bahwa hipotesis Johnson dan Shercliff tidak benar. Harga penurunan rasio deformasi plastis dipengaruhi besarnya beban yang diberikan dan geometri. Semakin besar beban yang diberikan semakin rendah rasio deformasi plastis yang terjadi.

Rasio deformasi plastis semakin rendah ketika rasio radius pasangan kontak meningkat, penurunan rasio deformasi tersebut tidak linier.

Kata kunci: mekanika kontak, asperiti, deformasi plastis, running-in

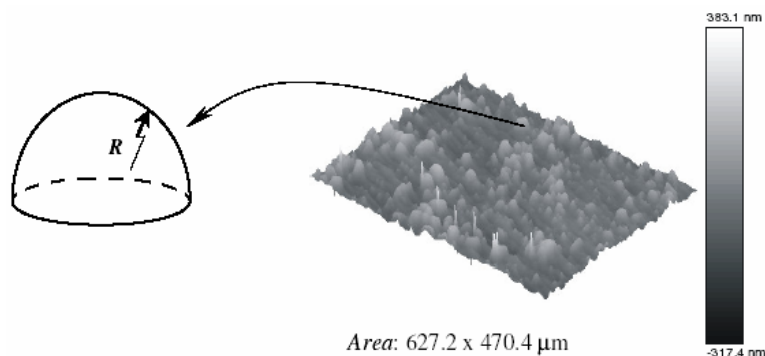
Pendahuluan

Ketika dua permukaan benda padat saling menekan selalu akan terjadi deformasi kontak, berdasar peninjauan skala yang digunakan, deformasi kontak dapat dikategorikan sebagai *macro contact* atau *micro contact*. Kebanyakan permukaan benda padat adalah tajam pada skala mikro. Titik titik tertinggi (*microprotrusions*), biasa disebut asperiti, ada pada semua permukaan benda padat, lihat Gambar 1.

Pada permukaan yang tidak dilumasi, ketika permukaan tersebut saling menekan, kontak yang nyata terjadi pada asperiti. Jumlah asperiti pada area kontak semakin banyak seiring meningkatnya beban yang diberikan. Deformasi terjadi pada daerah kontak, dimana tegangan timbul akibat pembebanan. Tergantung beban yang ditahan oleh asperiti dan sifat mekanik bahan, asperiti akan terdeformasi elastis, elastis-plastis atau plastis (*fully plastic*). Tegangan lokal pada titik kontak jauh lebih tinggi dari pada tegangan nominal. Oleh karena itu deformasi plastis lokal pada umumnya ditemukan pada kontak permukaan yang tajam. Asperiti pada benda padat kadang-kadang dianggap sebagai bentuk bola pada puncaknya dengan ukuran berbeda-beda sedemikian sehingga studi tentang kontak dua permukaan dapat disederhanakan sebagai deretan kontak bola yang terdeformasi pada ujungnya Jamari (2006).

Beban yang diberikan pada kontak permukaan kasar ditumpu oleh kontak asperiti, kontak area nyata (*real contact area*) hanyalah sebagian dari area yang tampak (*apparent area*). Fenomena kontak permukaan dan hubungannya dengan separasi telah diselidiki oleh beberapa peneliti, dan dipaparkan pada model mereka masing-masing. Oleh Greenwood dan Williamson dibuat model yang disebut model GW yang berdasar pada model kontak elastis Greenwood dan Williamson (1966), atau model berdasar asperiti (*asperiti based model*). Model ini dapat meramalkan dengan tepat perilaku yang elastis McCool (1986), tetapi perilaku deformasi plastis tidak dipertimbangkan. Abbott dan Firestone (1933) membuat model permukaan mikrogeometri (*surface microgeometry model*) untuk deformasi plastis, tetapi konservasi volume asperiti yang terdeformasi plastis diabaikan. Pullen dan Williamson (1972) menunjukkan konservasi volume yang terdeformasi

plastis perlu diperhatikan. Model yang disebutkan diatas hanya sesuai untuk deformasi elastis atau plastis murni. David M. Maietta dan L. Chang (ZMC model) (2000), mulai mengembangkan kontak *elastic-plastic* secara analitik dalam tiga *rejim* yaitu kontak *elastic*, *elastic-plastic* dan *fully plastic*.



Gambar 1 Permukaan padat dan asperiti (Jamari, 2006)

Dalam studi eksperimen Etsion,dkk (2005), hubungan antara area kontak dengan beban kontak diperoleh untuk bola tembaga kontak dengan baja yang dikeraskan. Meskipun demikian eksperimennya tidak pernah dilakukan sampai pada rejim deformasi plastis penuh. Dalam disertasi Jamari (2006) telah dilakukan eksperimen untuk membuktikan hipotesis Johnson dan Shercliff (1992) yang menyatakan bahwa “ketika terjadi kontak asperiti dua benda yang memiliki kekerasan sama, kedalaman deformasi plastis adalah sama untuk masing-masing benda, tidak terikat pada ukuran geometrinya”. Bertolak dari hipotesis tersebut dilakukan eksperimen menggunakan pasangan bola baja yang masing masing pasangan memiliki ukuran yang berbeda, masing-masing pasangan memiliki perbandingan 1, 2, 3, 4, dan 6. Dari eksperimen diperoleh bahwa rasio deformasi plastis semakin rendah ketika rasio radius benda kontak meningkat. Berdasar hasil eksperimen tersebut disimpulkan bahwa hipotesis Johnson dan Shercliff tidak benar.

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan verifikasi dan pembuktian terhadap pernyataan Johnson dan Shercliff (1992) dan Jamari (2006) yang secara eksplisit bertentangan. Eksperimen dilakukan dengan menggunakan material yang berbeda dengan material pada penelitian Jamari, yaitu *brass* dengan parameter rasio radius dua hemisphere (R_1/R_2) yang lebih detail. Perbandingan deformasi plastis antara dua hemisphere ini akan diamati dan dibandingkan dengan rasio radius dua hemisphere.

Kontak mekanik

Kontak elastis (*elastic contact*)

Pada kontak *elastic* luas permukaan kontak A_e , gaya kontak P_e , tekanan kontak maksimum P_m , tekanan kontak rata-rata p dapat dinyatakan dalam fungsi *interference* ω . Dari teori Hertz (1882) dapat diturunkan persamaan luas permukaan kontak A_e . Saat $\omega < \omega_1$ kontak yang terjadi adalah kontak *elastic*. luas permukaan kontak A_e dinyatakan dengan:

$$A_e = \pi R \omega \quad (1)$$

Gaya kontak P_e dinyatakan dengan:

$$P_e = \frac{4}{3} E^* R^{1/2} \omega^{3/2} \quad (2)$$

Tekanan kontak maksimum P_m dinyatakan dengan:

$$P_m = \frac{2E^*}{\pi} \left(\frac{\omega}{R} \right)^{1/2} \quad (3)$$

Tekanan kontak rata-rata p dinyatakan dengan:

$$p_e = \frac{2}{3} P_o = \frac{4E^*}{3\pi} \left(\frac{\omega}{R} \right)^{1/2} \quad (4)$$

Besar *interference* ω_1 pada titik awal luluh yang diberikan oleh Zhao, Maietta dan Chang (ZMC model) dinyatakan dengan:

$$\omega_{1-ZMC} = \left(\frac{3\pi k_{1-ZMC} H}{4E^*} \right)^2 R \quad (5)$$

Kontak plastis sempurna (*fully plastic contact*)

Kontak *fully plastic* terjadi saat *interference* ω dinaikkan menjadi ω_2 yang mana tekanan kontak rata-rata p mencapai nilai H . Untuk kontak *fully plastic*, Zhao, Maietta dan Chang (2000), menggunakan model kontak *plastic*. Selama keadaan deformasi *fully plastic* ($\omega \geq \omega_{2-ZMC}$) tekanan kontak rata-rata tetap konstan pada nilai H atau:

$$p_{p-ZMC} = H \quad (6)$$

Hubungan luas permukaan kontak untuk kontak *fully plastic* dari pemodelan kontak *plastic* dengan:

$$A_{p-ZMC} = 2\pi R \omega \quad (7)$$

Gaya kontak P_p dinyatakan dengan:

$$P_{p-ZMC} = 2\pi R \omega H \quad (8)$$

Mendefinisikan nilai *interference* pada batas *fully plastic* ω_{2-ZMC} terhadap nilai *interference* kritis pada titik luluh ω_{1-ZMC} dengan persamaan:

$$\omega_{2-ZMC} = 54\omega_{1-ZMC} \quad (9)$$

Kontak elastis-plastis (*elastic-plastic contact*)

Kontak *elastic-plastic* merupakan peralihan dari kontak *elastic* ke kontak *fully plastic*. Kontak *elastic-plastic* terjadi saat *interference* berada diantara ω_1 dan ω_2 ($\omega_1 < \omega < \omega_2$). Pada kontak *elastic-plastic* deformasi yang terjadi terdiri dari deformasi *elastic* dan *plastic*. Hubungan luas permukaan kontak A_{ep} dan tekanan kontak rata-rata p sebagai fungsi dari *interference* ω merupakan hubungan yang sangat kompleks.

Zhao, Maietta dan Chang (ZMC model) memberikan luas permukaan kontak A_{ep} pada kontak *elastic-plastic* yang dinyatakan dengan:

$$A_{ep-ZMC} = \pi R \omega \left[1 - 2 \left(\frac{\omega - \omega_{1-ZMC}}{\omega_{2-ZMC} - \omega_{1-ZMC}} \right)^3 + 3 \left(\frac{\omega - \omega_{1-ZMC}}{\omega_{2-ZMC} - \omega_{1-ZMC}} \right)^2 \right] \quad (10)$$

Memberikan gaya kontak P_{ep} pada kontak *elastic-plastic* yang dinyatakan dengan:

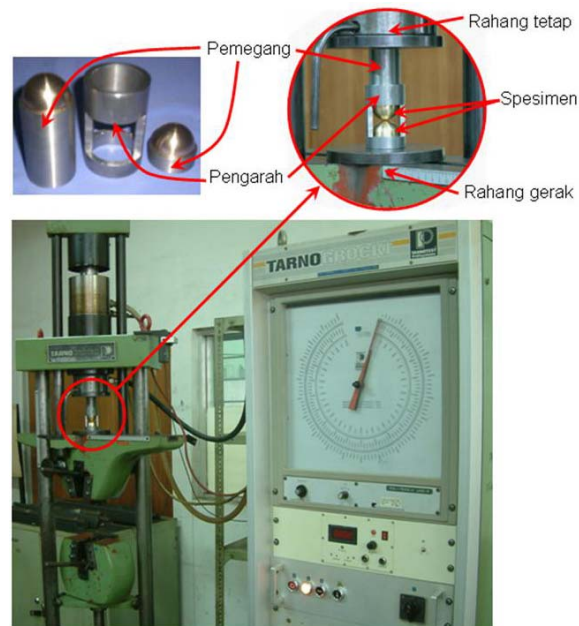
$$P_{ep-ZMC} = \left[H - H(1-k) \frac{\ln \omega_{2-ZMC} - \ln \omega}{\ln \omega_{2-ZMC} - \ln \omega_{1-ZMC}} \right] \times \left[1 - 2 \left(\frac{\omega - \omega_{1-ZMC}}{\omega_{2-ZMC} - \omega_{1-ZMC}} \right)^3 + 3 \left(\frac{\omega - \omega_{1-ZMC}}{\omega_{2-ZMC} - \omega_{1-ZMC}} \right)^2 \right] \pi R \omega \quad (11)$$

Memberikan tekanan kontak rata-rata dalam kontak *elastic-plastic* yang dinyatakan dengan:

$$p_{ep-ZMC} = H - H(1-k) \frac{\ln \omega_{2-ZMC} - \ln \omega}{\ln \omega_{2-ZMC} - \ln \omega_{1-ZMC}} \quad (12)$$

Prosedur eksperimen

Eksperimen dilakukan pada mesin uji tekan, kedua spesimen masing-masing dipasang pada pemegangnya kemudian kedua pemegang beserta spesimennya dipasang pada pengarah dengan posisi saling berhadapan sehingga terjadi kontak di permukaan yang berbentuk setengah bola. Peralatan tersebut diletakan diantara rahang tetap dengan rahang gerak, sehingga ketika rahang gerak diberi beban maka kedua spesimen akan saling menekan. Beban yang diberikan sebesar 8000 dan 11000 N selama 1 menit.



Gambar 2 Mesin uji tekan

Spesimen

Bentuk setengah bola dibuat dari bahan *brass* memiliki kekerasan 0,31 GPa dengan diameter "35", "17,5", "11,67", "8,75", "7", "5,83" dan 5 mm.



Pemegang dan pengaruh

Spesimen dipasang pada pemegangnya dengan suaian sliding sehingga menjamin keduanya sesumbu, masing-masing pemegang beserta spesimen dimasukkan kedalam pengaruh saling berhadapan sehingga kedua spesimen saling kontak seperti Gambar 2, agar kedua spesimen sesumbu maka hubungan pemegang dan pengaruh dibuat suaian sliding.

Detail eksperimen

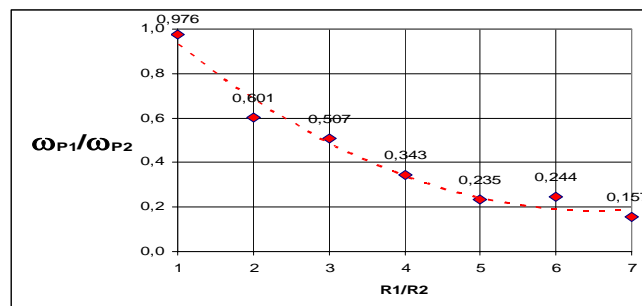
Sebelum melakukan eksperimen semua spesimen dibersihkan menggunakan alkohol, kemudian dikeringkan di udara bebas. Spesimen diukur arah axial menggunakan mikrometer, agar titik pengukuran tepat pada sumbu spesimen maka digunakan alat bantu penepat titik sumbu (*center locator*) seperti Gambar 4.

Gambar 4 Micrometer dan *center locator*

Eksperimen dilaksanakan menggunakan 2 beban, kelompok pertama menggunakan beban 8000 N dan kelompok kedua 11000 N. Eksperimen dilakukan dengan cara menekan spesimen pada mesin uji tekan. Pada eksperimen ini menggunakan 7 macam perbandingan pasangan, mulai dari pasangan spesimen yang memiliki perbandingan radius 1:1; 2:1; 3:1; 4:1; 5:1; 6:1; dan 7:1, agar hasil eksperimen akurat tiap perbandingan pasangan dibuat 3 pasang spesimen. Pembebanan tiap pasang spesimen dilakukan dengan menahan beban sebesar 8000 N selama 1 menit, kemudian beban ditiadakan. Setelah spesimen dilepas dari pemegangnya kemudian diukur lagi arah axial, selisih panjang spesimen sebelum dengan setelah diuji merupakan besarnya deformasi yang terjadi pada masing masing spesimen. Kemudian dilanjutkan eksperimen kelompok 2 dengan langkah yang sama tetapi beban yang diberikan sebesar 11000 N.

Hasil dan Pembahasan

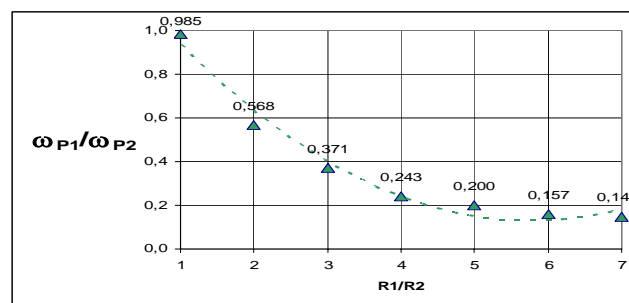
Dari pengukuran spesimen kelompok 1 sebelum dan setelah diuji dapat dibuat grafik seperti pada Gambar 5.



Gambar 5 Grafik ω_{P1}/ω_{P2} vs R1/R2

Pada Gambar 5 terlihat bahwa rasio deformasi plastis semakin rendah ketika rasio radius benda kontak meningkat. Hal tersebut dapat dikatakan pada masing-masing pasangan, spesimen yang geometrinya lebih kecil mengalami deformasi lebih besar dari pada spesimen yang geometrinya besar.

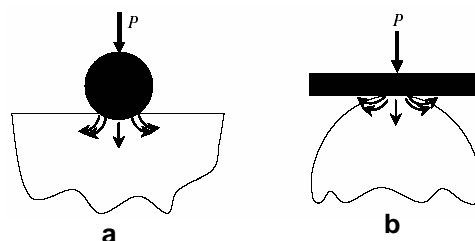
Dari pengukuran spesimen kelompok 2 sebelum dan setelah diuji dapat dibuat grafik seperti pada Gambar 6.



Gambar 6 Grafik ω_{P1}/ω_{P2} vs R1/R2

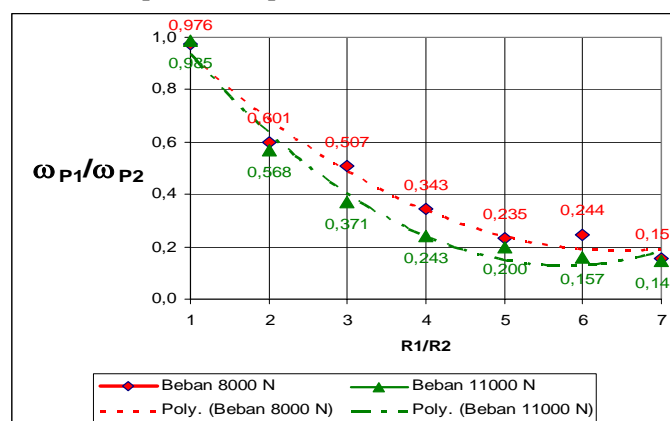
Pada Gambar 6 terlihat bahwa rasio deformasi plastis semakin rendah ketika rasio radius benda kontak meningkat. Hasil pengukuran dari kelompok satu maupun dua dapat dijelaskan menggunakan analogi hasil eksperimen yang dilakukan Tabor (1951) pada eksperimen indentasi yakni, kasus pertama menggunakan indentor bola keras terhadap *deformable half-space* dan kasus kedua *deformable sphere* ditekan oleh permukaan datar keras. Secara intuitif, untuk beban yang sangat tinggi kedua kasus ini akan menghasilkan perilaku yang berbeda terhadap deformasi seperti ditunjukkan pada Gambar skematis 7. Dalam kasus pertama bahan yang dipindahkan di *half-space* yang ditekan indentor bola keras dibatasi oleh sebagian besar elastis dari *half space*. Situasi ini akan menghasilkan tekanan kontak rata-rata lebih tinggi agar meningkatkan nilai koefisien

hardness constant. Namun dalam kasus kedua bahan yang dipindahkan di *deformable sphere* bebas untuk memperluas arah radial di tepi kontak dan kontak jari-jari meningkat dengan meningkatnya beban.



Gambar 7 (a) Perilaku *hard spherical* menekan *deformable half-space*, (b) *hard flat* menekan *deformable sphere*

Gabungan dari dua grafik diatas dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8 Grafik ω_{P1}/ω_{P2} vs $R1/R2$

Harga penurunan rasio deformasi plastis dipengaruhi besarnya beban yang diberikan, semakin besar beban yang diberikan semakin rendah rasio deformasi plastis.

Kesimpulan

Dari hasil eksperimen pembebanan pada pasangan spesimen dapat disimpulkan bahwa hipotesis Johnson dan Shercliff tidak benar. Rasio deformasi plastis semakin rendah ketika rasio radius benda kontak meningkat, penurunan rasio deformasi tersebut tidak linier. Harga penurunan rasio deformasi plastis dipengaruhi besarnya beban yang diberikan dan geometri spesimen, semakin besar beban yang diberikan semakin rendah rasio deformasi plastis.

Daftar Pustaka

- Abbott, E. J., and Firestone, F. A., 1933, *Specifying Surfaces Quality—A Method Based on Accurate Measurement and Comparison*, Mech. Eng. _Am. Soc. Mech. Eng., **55**, pp. 569.
- Etsion, I., Levinson, O., Halperin, G., and Varenberg, M., 2005, *Experimental Investigation of the Elastic-Plastic Contact Area and Static Friction of a Sphere on Flat*, ASME J. Tribol., **127**, pp. 47–50.
- Francis, H. A., 1976, *Phenomenological Analysis of Plastic Spherical Indentation*, ASME J. Eng. Mater. Technol., **98**, pp. 272–281.
- Greenwood, J. A., and Williamson, J. B. P., 1966, *Contact of Nominally Flat Surface*, Proc. R. Soc. London, Ser. A, **295**, pp. 300-319.
- Herz, H., 1882, *Über die berührung fester elastische körper and über die harte*, Verhandlungen des Vereins zur Beforderung des Gewerbefleisses, Leipzig.
- Jamari, J. 2006, *Running-in of rolling contacts*, Disertasi Program Doktor, University of Twente, The Netherlands.
- Johnson, K. L., 1985, *Contact Mechanics*, Cambridge University Press, Cambridge.

-
- Johnson, K.L. dan Shercliff, H.R., 1992, *Shakedown of 2-dimensional asperities in sliding contact*, Int. Journal of Mech. Sciences **34**, pp. 375 – 394.
- McCool, J. I., 1986, “Comparison of Models for the Contact of Rough Surfaces,” *Wear*, **107**, pp. 37–60.
- Persson, B.N.J., 2006, *arXiv:cond-mat/0603807v1 [cond-mat.soft]* 30 Mar 2006, IFF, FZ-Julich, 52425 Julich, Germany
- Pullen, J., and Williamson, J. B. P., 1972, *On the Plastic Contact of Rough Surfaces*, Proc. R. Soc. London, Ser. A, **327**, pp. 159–173.
- Tabor, D., 1951, *The Hardness of Metals*, Oxford University Press, Oxford, UK.
- Zhao, Y., Maietta, D. M., dan Chang, L., 2000, *An Asperity Microcontact Model Incorporating the Transition From Elastic Deformation to Fully Plastic Flow*, ASME Journal of Tribology, Vol. **109**, pp. 86-93.