

ANALISA DEFORMASI FULLY PLASTIC PADA KONTAK ANTAR ASPERITI MENGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

Sugiyanto dan Jamari*

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

*E-mail: j.jamari@gmail.com

ABSTRAK

Perubahan ketika dua permukaan diberi beban untuk pertama kalinya merupakan kombinasi dari banyak hal seperti perubahan bentuk, kekasaran permukaan, dan lain-lain. Perubahan-perubahan yang terjadi antara permulaan kontak (*start-up*) dengan kondisi tunak (*steady state*) terkait dengan keausan *running-in* (*breaking-in* atau *wearing-in*). Terdapat banyak parameter kimia dan mekanik yang mengubah geometri-mikro pada permukaan selama fase *running-in*. Namun demikian, ada dua mekanisme dominan yang terjadi yaitu deformasi plastis dan keausan ringan (*mild wear*). Pada fase ini, puncak yang lebih tinggi yang dihasilkan oleh proses pemesinan, diperhalus dengan mekanisme aliran plastis sehingga kesesuaian permukaan diperoleh. Pemahaman tentang perubahan bentuk asperiti selama fase *running-in* diperlukan dalam mengoptimalkan topografi permukaan dan pemilihan jenis proses pemesinan. Perubahan geometri permukaan yang berkontak selama proses *running-in* akan dibahas dalam paper ini. Sebuah asperiti, unit kekasaran permukaan terkecil, pada umumnya diwakili oleh bentuk setengah bola (*hemisphere*). Untuk gerakan *rolling* sempurna, kontak yang terjadi dapat diwakilkan dengan pembebanan statis yang berulang-ulang. Oleh karena itu, pemodelan deformasi plastis antar asperiti kontak statis akan dilakukan menggunakan metode elemen hingga. Dua *hemisphere* dari bahan brass dengan tujuh rasio radius yang berbeda ($R1/R2$) dikontakkan dengan beban 8000 N tanpa gesekan. Sebuah kurva non-linear yang menggambarkan hubungan antara deformasi plastis kontak *hemisphere* terhadap rasio radius dipresentasikan. Hasil menunjukkan bahwa deformasi plastis cenderung turun ketika rasio radius meningkat. Hasil ini tidak sependapat dengan kesimpulan Johnson dan Shercliff yang menyatakan bahwa deformasi plastis tidak dipengaruhi oleh geometri untuk asperiti yang berbahan sama.

Kata kunci: deformasi, mekanika kontak, kontak *fully plastic*, *asperity*, metode elemen hingga.

PENDAHULUAN

Gesekan dan keausan bukanlah sifat material, tetapi merupakan sifat sistem, yang tergantung pada material yang digunakan dan kondisi operasi. Ketika dua permukaan diberi beban untuk pertama kali dan digerakkan relatif satu terhadap yang lain, perubahan kondisi pada kedua permukaan umumnya terjadi. Perubahan ini biasanya merupakan kombinasi dari banyak hal, seperti penyesuaian sumbu (*the alignment of axes*), perubahan bentuk, perubahan kekasaran permukaan, dan penyamaan (*equalizing*) berbagai sifat mekanik dan kimia antar permukaan kontak, seperti kekerasan mikro, formasi lapisan oksida dan lapisan batas lain, dan lain-lain [1]. Perubahan-perubahan yang terjadi antara permulaan (*start-up*) dan keadaan tunak (*steady state*) dikaitkan dengan keausan *running-in* (*breaking-in* atau *wearing-in*). Walaupun dalam terminologi konservasi, keausan selalu tidak diinginkan, keausan *running-in* lebih diharapkan [2].

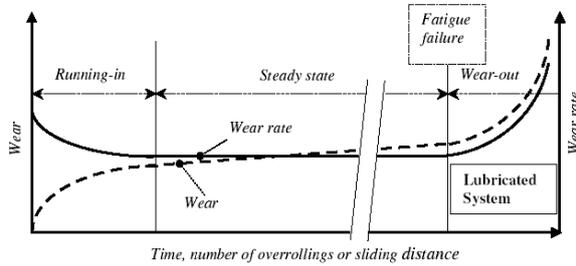
Summer-Smith [3] mendefinisikan *running-in* sebagai “Perubahan puncak (*high spots*) dalam permukaan kontak dengan keausan atau deformasi plastis pada kondisi terkendali sehingga memperbaiki keselarasan dan mengurangi resiko rusaknya lapisan

selama operasi normal”. *Running-in* terjadi pada periode pertama dalam umur (*life-time*) suatu sistem kontak *rolling* atau *sliding* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1 [4].

Selama periode *running-in*, puncak-puncak kekasaran hasil akhir proses pemesinan berkurang dengan mekanisme aliran plastis, lembah-lembah terisi dan semua bentuk menjadi saling selaras/sesuai (*matching*). Temperatur umumnya lebih tinggi akibat laju keausan (*wear rate*) yang tinggi, tetapi permukaan menjadi lebih halus atau asperiti rata. Laju keausan menurun menuju ke keadaan tunak (*steady state*). Ada dua mekanisme utama dalam periode *running-in*; deformasi plastis dan keausan ringan (*mild wear*).

Setelah periode *running-in* kondisi-kondisi operasi dapat diterapkan secara penuh tanpa peningkatan laju keausan yang ekstrim. Kapasitas kemampuan menahan beban meningkat ke kondisi operasi yang telah direncanakan. Istilah kondisi tunak (*steady state*) didefinisikan sebagai kondisi sistem tribologi (*tribo-system*) dimana koefisien gesek dinamis rata-rata, laju keausan, dan parameter khusus lain sudah tercapai dan terjaga pada suatu tingkatan yang konstan. Laju keausan dapat naik lagi ketika

waktu operasi cukup lama hingga terjadi proses fatik/lelah pada lapisan atas permukaan yang terbebani. Bentuk keausan menghasilkan bintik-bintik pada permukaan (kegagalan *pitting*). Akumulasi keausan ini akan mengakibatkan kegagalan suatu sistem kontak atau *wear out* [5].



Gambar 1. Skema dari perilaku keausan sebagai fungsi dari waktu, jumlah *overrolling* atau jarak *sliding* dalam kondisi operasi konstan [4].

Tujuan dari penelitian ini adalah memprediksi kekasaran permukaan setelah fase *running-in* pada kondisi gerakan *rolling* murni. Proses *running-in* sendiri cukup kompleks, jumlah variabel yang terlibat sangat banyak. Paper ini akan difokuskan hanya pada prediksi deformasi plastis asperiti dari sistem kontak yang beroperasi dalam situasi dekat atau *rolling* murni. Asperiti pada sebuah permukaan teknik sering diasumsikan sebagai bentuk setengah bola (*hemisphere*) pada puncaknya dengan ukuran jari-jari yang berbeda-beda. Oleh karena itu studi tentang kontak dua permukaan dapat disederhanakan menjadi kontak antar deretan bola-bola [6].

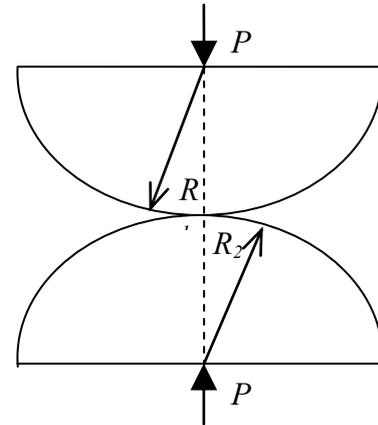
MODEL

Model plastis untuk sistem kontak belum tersedia di literatur hingga saat ini, khususnya pada sistem kontak *unloading*. Untuk itu, penelitian ini menggunakan analisa numerik metode elemen hingga dalam menyelesaikan permasalahan kontak plastis. Analisis elemen hingga menggunakan software komersial ABAQUS 6.5 [7].

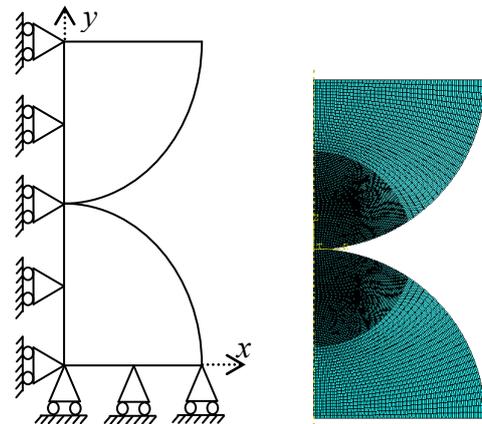
Gambar 2 menunjukkan sistem kontak antar *hemisphere* dengan radius R_1 dan R_2 yang dikenai beban P . Pada penelitian ini pemodelan elemen hingga menggunakan bentuk seperempat lingkaran seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3. Hal ini dipilih agar lebih efisien dalam analisa numeriknya karena dapat mengurangi jumlah nodal [8]. Perpindahan arah x dibatasi dan hanya diperbolehkan pada arah y sesuai dengan arah pembebanan. Selain itu, ditunjukkan juga pada gambar tersebut disain mesh yang efektif dimana mesh semakin lebar pada daerah yang semakin jauh dari posisi kontak.

Sifat-sifat material yang digunakan pada pemodelan menggunakan sifat-sifat yang diperoleh dari spesimen yang memiliki sifat material elastis-plastis sempurna tanpa strain hardening. Material yang

digunakan memiliki modulus elastisitas ($E_1 = E_2 = 96$ GPa), kekuatan luluh/*yield* ($Y = 310$ MPa), dan rasio Poisson ($\nu_1 = \nu_2 = 0.34$). Beban yang diaplikasikan adalah 8000 N. Beban tersebut sudah diuji menggunakan model kontak elastis-plastis dan sudah berada pada daerah plastis sempurna (*fully plastic*) [9-10]. Kondisi permukaan antar kontak diasumsikan memiliki koefisien gesekan yang sangat kecil atau nol dalam pemodelannya.

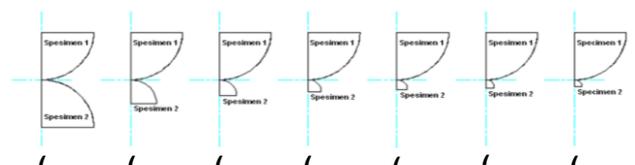


Gambar 2. Pembebanan kontak *hemisphere* dengan gaya P .



Gambar 3. Kondisi batas pemodelan dan hasil *meshing*.

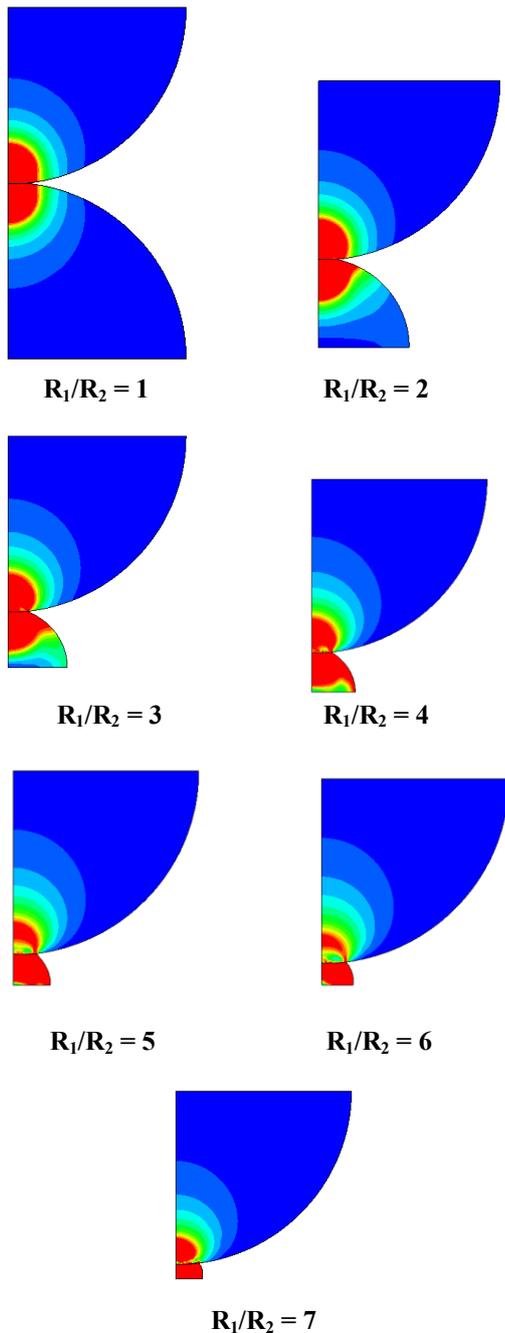
Pemodelan terdiri dari 7 simulasi, dimana masing-masing simulasi mewakili kontak antar dua model setengah bola seperti terlihat pada Gambar 4, dimana masing-masing pasangan kontak tersebut memiliki perbandingan ukuran (R_1/R_2) berturut-turut 1, 2, 3, 4, 5, 6, dan 7.



Gambar 4. Variasi perbandingan R_1/R_2 : 1, 2, 3, 4, 5, 6, dan 7.

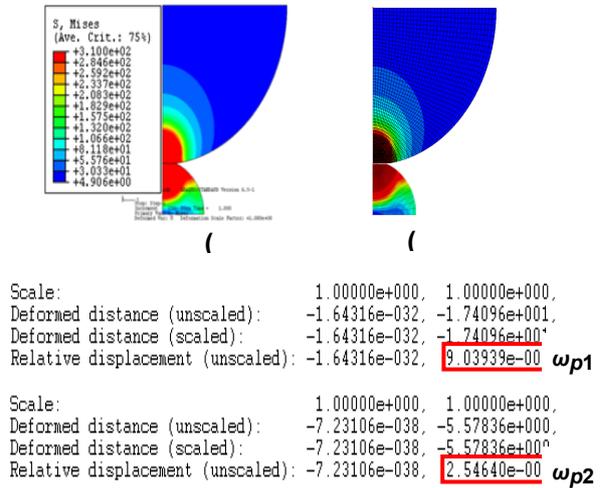
HASIL DAN ANALISA

Hasil simulasi menggunakan metode elemen hingga tujuh macam rasio radius (lihat Gambar 4) hemisphere adalah seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5. Pada gambar tersebut, distribusi tegangan von Mises saat kondisi loading terlihat sudah terdistribusi seragam, khususnya untuk tegangan tertinggi yang berwarna merah. Kondisi fully plastic ditemui pada permukaan kontak pada hampir semua rasio radius.



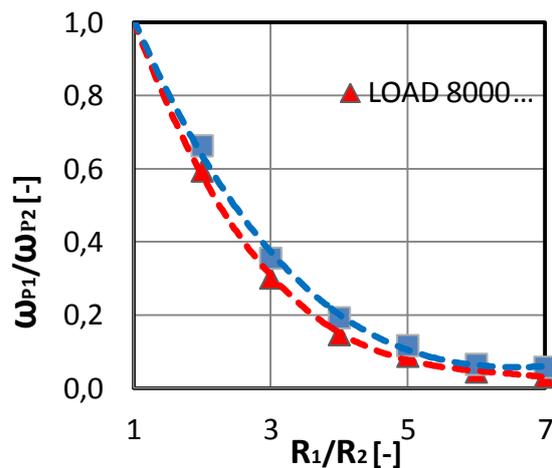
Gambar 5. Hasil simulasi dengan load 8000 N saat loading

Gambar 6 memperlihatkan salah satu hasil simulasi elemen hingga untuk sistem kontak dengan perbandingan geometri $R_1/R_2 = 3$. Di sini ditunjukkan cara membaca distribusi tegangan von Mises dan besarnya deformasi plastis yang terjadi, ω_p , baik pada hemisphere yang satu maupun pasangannya. Besarnya deformasi plastis dihitung dengan cara melepaskan kontak atau unloading pada model [11].



Gambar 6. Distribusi tegangan von Mises dan pembacaan deformasi plastis untuk $R_1/R_2 = 3$.

Gambar 7 menunjukkan grafik perbandingan deformasi plastis antara hasil simulasi untuk kasus loading dengan hasil unloading untuk beban 8000 N tanpa gesekan. Perbandingan besarnya deformasi plastis yang terjadi diplot terhadap rasio jari-jari hemisphere.



Gambar 7. Grafik ω_{p1}/ω_{p2} terhadap R_1/R_2 untuk beban 8000 N tanpa gesekan (hasil simulasi dan eksperimen).

Titik-titik kotak merupakan hasil simulasi elemen hingga loading sedangkan titik-titik segitiga

merupakan hasil simulasi elemen hingga saat unloading. Garis penuh merupakan kurva fitting. Semakin tinggi rasio radius semakin kecil perbedaan antar rasio deformasi plastis loading dan unloading. Ini dikarenakan semakin tinggi rasio radius maka kondisi kontak akan semakin jauh berada pada daerah fully plastic sehingga elastic recovery atau elastic springback semakin kecil. Selain itu rasio deformasi plastis cenderung turun ketika rasio radius meningkat. Hal ini menunjukkan bahwa deformasi plastis dari kontak antar dua asperiti dipengaruhi oleh faktor geometri. Dengan demikian, hasil ini tidak sependapat dengan kesimpulan Johnson dan Shercliff [12] yang menyatakan bahwa deformasi plastis tidak dipengaruhi oleh geometri untuk asperiti yang berbahan sama.

KESIMPULAN

Perubahan geometri permukaan yang berkontak selama proses running-in telah dibahas dalam penelitian ini. Sebuah asperiti yang diwakili oleh bentuk setengah bola (*hemisphere*) dipilih untuk memodelkan fenomena *running-in* pada gerakan rolling sempurna. Analisa kontak antar hemisphere dilakukan dengan perhitungan numerik berbasis elemen hingga. Dua *hemisphere* dari bahan brass dengan tujuh rasio radius yang berbeda (R_1/R_2) dikontakkan dengan beban 8000 N tanpa gesekan.

Hasil menunjukkan bahwa deformasi plastis cenderung turun ketika rasio radius meningkat. Hal ini menunjukkan bahwa deformasi plastis dari kontak antar dua asperiti dipengaruhi oleh geometri. Penemuan ini tidak sependapat dengan kesimpulan dari Johnson dan Shercliff yang menyatakan bahwa deformasi plastis tidak dipengaruhi oleh geometri untuk asperiti yang berbahan sama.

NOTASI

P	beban	[N]
R	radius	[m]
Y	kekuatan luluh	[Pa]

E	modulus elastisita	[Pa]
x, y	koordinat	[m]
ω_p	deformasi plastis	[m]

DAFTAR PUSTAKA

1. V. Hegadekatte, N. Huber, O. Kraft, Finite element based simulation of dry sliding wear, Tribology Letters 24 (2006) 51-60.
2. D. Dowson, History of Tribology, Professional Engineering Publishing, London (1998).
3. P.J. Blau, Friction and Wear Transitions of Materials, Noyes Park Ridge, NJ (1989).
4. J.A. Williams, Engineering Tribology, Oxford University Press, Oxford (1994).
5. Jamari, Running-in of Rolling Contacts, Disertasi, University of Twente, The Netherlands (2006).
6. V. Kraghelsky, M.N. Dobychun, and V.S. Kombatov, Friction and Wear Calculation Methods, Pergamon Press, Oxford (1982).
7. L. Kogut, and I. Etsion, Elastic-Plastic Contact Analysis of a Sphere and a Rigid Flat, ASME Journal of Applied Mechanics, 69 (2002) 657-662.
8. Abaqus v6.5-1, Hibbit, Karlsson, and Sorensen Inc., Providence, RI, USA (2004).
9. K. L. Johnson, Contact Mechanics, Cambridge University Press, Cambridge (1987).
10. D. Tabor, A Simple Theory of Static and Dynamic Hardness, Proc. Royal Society London, A192 (1948) 247-274.
11. L.-Y. Li, C.-Y. Wu, and C. Thornton, A Theoretical Model for the Contact of Elastoplastic Bodies, Proc. Instn. Mech. Engrs. C216 (2002) 421-431.
12. K.L. Johnson, and H.R. Shercliff, Shakedown of 2-Dimensional Asperities in Sliding Contact, Int. Journal of Mech. Sciences 34 (1992) 375-394.