

PEMODELAN KEAUSAN KONTAK *Sliding* ANTARA SILINDER DENGAN BIDANG DATAR

*¹⁾ I. Syafa'at, ²⁾ Jamari, ²⁾ S.A. Widyanto, ²⁾ R. Ismail

¹⁾ Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Wahid Hasyim

Jl. Menoreh Tengah X/22 Sampangan Semarang 50236, Telp. (024) 8505681

²⁾ Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Diponegoro

^{*)} e-mail: immsyaf@yahoo.co.id

Abstrak

Telah lama para peneliti mempelajari keausan yang terjadi karena kontak dua buah benda, baik secara analitik dan numeris untuk menganalisa secara tepat dalam komponen permesinan. Paper ini membahas tentang pemodelan keausan silinder pada bidang datar menggunakan pendekatan analitik dan simulasi elemen hingga. Pemodelan keausan dikembangkan dari model Hegadekatte untuk kasus *line contact* secara analitik. Dengan *updated geometry* dari simulasi *software* ANSYS, nilai tegangan maksimal yang diperoleh, digunakan untuk menghitung keausan Archard. Hasil kajian ini menunjukkan model analitik dan simulasi elemen hingga memiliki hasil yang bagus.

Over the years, many researchers have conducted some studies analytically and numerically dealing with wear on two contacting surfaces due to its important in reliability analysis on mechanical components. This paper presents analytical and numerical wear modeling of sliding contact between a cylinder against flat. The development of Hegadekatte's analytical model for line contact is obtained to model the wear of the cylinder. The updating geometry is used in finite element software, ANSYS to predict the geometry change of the cylinder due to wear. The prediction is made by using the contact pressure, resulted from finite element simulation as an input in Archard wear equation. The comparison between the analytical and finite element simulation result performs good agreement.

Kata kunci: kontak *sliding*, keausan, silinder

1. Pendahuluan

Keausan adalah sebuah fenomena yang sering terjadi dalam *engineering*. Keausan didefinisikan oleh *ASTM* sebagai kerusakan permukaan benda yang secara umum berhubungan dengan peningkatan hilangnya material yang disebabkan oleh pergerakan relatif benda dan sebuah substansi kontak [1]. Keausan sebagai fenomena yang sulit dihindari dalam aplikasi di *engineering*, mulai diteliti oleh Archard [2]. Archard mengemukakan sebuah model fenomenal untuk menjelaskan tentang *sliding wear*. Dalam modelnya diasumsikan bahwa parameter kritis dalam *sliding wear* adalah tegangan pada kontak dan jarak *sliding* antara permukaan kontak.

Seiring dengan berkembangnya teknologi, penggunaan perangkat lunak mulai dikembangkan, khususnya model [2]. Strömberg [3] menggunakan simulasi analisa elemen hingga (FEA) untuk keausan thermoelastis, de Saracibar dan Chiumenti [4] menampilkan sebuah model numeris untuk mensimulasikan perilaku keausan gesek dalam kondisi nonlinear kinematis. Molinari dkk. [5] memodifikasi model [2] pada kekerasan dari material yang lebih lunak dengan fungsi suhu. Komputasi ini dengan mensimulasikan kontak yang sederhana dari sebuah kotak yang meluncur di atas piringan. Podra dan Andersson [6] melakukan eksperimen *pin-on-disc* dengan asumsi bahwa aus hanya terjadi pada pin saja. Dengan membandingkan model FEA, bahwa akurasi FEA tergantung pada diskritisasi model. *Meshing* yang halus akan memberikan hasil yang lebih baik.

Hegadekatte [7] menampilkan *Global Incremental Wear Model* (GIWM) dengan pin yang diputar pada piringan (*pin-on-disc*) untuk kasus *point contact*. Keausan pin dan keausan piringan dihitung dengan model [2]. Perhitungan keausan piringan menggunakan asumsi evolusi daerah kontak ellips dimana panjang kontak terus

menurun ketika lebar bekas keausan mengalami peningkatan. Permulaan untuk mencari keausan piringan menggunakan jari-jari kontak awal dengan formula dari Hertz [8]. Hasil analitik GIWM dan FEA memperlihatkan hasil yang bagus. Metode GIWM ini juga dapat memprediksi kedalaman aus yang melibatkan variasi parameter dalam eksperimen dengan tribometer piringan kembar [9].

Melihat dari berbagai penelitian di atas, keausan Archard [2] merupakan model yang sering digunakan sebagai acuan. Hegadekatte [7] hanya pada kasus *point contact* saja. Sampai sekarang belum terlihat adanya model keausan silinder pada bidang datar (*flat*) yang dikenai beban. Baik model secara analitik, FEA maupun eksperimen. Padahal jika melihat aplikasi bidang rekayasa, masalah ini cukup banyak ditemui. Tujuan penelitian ini adalah untuk menghitung keausan yang timbul pada silinder akibat *sliding* pada bidang datar. Penelitian ini merupakan pengembangan dari model [2] dan [7] untuk kasus *line contact* berdasar *updated geometry*.

2. Dasar Teori

Dalam model Archard [2], diasumsikan bahwa parameter kritis dalam *sliding wear* adalah tegangan pada kontak dan jarak *sliding* antara permukaan kontak. Persamaan klasik model ini ialah:

$$\frac{V}{s} = K \frac{F_N}{H} \quad (1)$$

dimana V adalah volume material yang hilang, s adalah jarak *sliding*, F_N adalah beban normal tiap daerah kontak, H adalah kekerasan dari material yang lebih lunak, K adalah koefisien aus. Dalam penelitian tentang keausan, kedalaman aus lebih penting daripada kajian tentang volume yang hilang. Sehingga Pers. (1) dapat ditulis menjadi

$$\frac{hA}{s} = K \frac{F_N}{H} \quad (2)$$

dengan membagi sisi kanan dan sisi kiri dengan daerah kontak yang sesungguhnya dan K/H diganti sebagai koefisien aus k_D , maka Pers. (2) menjadi:

$$\frac{h}{s} = k_D \cdot p \quad (3)$$

dimana dalam Pers. (3), p adalah tegangan kontak dan h adalah kedalaman aus. Persamaan ini dipergunakan sebagai ukuran besarnya keausan dengan h/s sebagai laju keausan pada jarak tertentu.

Proses keausan sesungguhnya tergantung pada waktu. Laju keausan yang dihasilkan akan berubah seiring dengan jarak *sliding* s yang ditempuh. Sehingga bentuk persamaan diferensial dari Pers. (3) menjadi

$$\frac{dh}{ds} = k_D \cdot p(s) \quad (4)$$

dimana jarak *sliding* menjadi pertimbangan dalam proses kedalaman aus dan perubahan nilai tegangan kontak selama proses keausan berlangsung. Jadi parameter penting kedalaman aus adalah tergantung pada koefisien aus k_D dan tegangan kontak p . Dalam penelitian ini, tegangan kontak p diperoleh dari simulasi FEA dengan *software ANSYS®*. Sedangkan nilai koefisien aus k_D diambil dari [10].

3. Pemodelan

3.1. Pemodelan Analitik

Pendekatan model keausan secara analitik telah dimodelkan oleh Hegadekatte [10] dalam keausan *pin-on-disc* pada kasus *point contact*. Keausan linear (h^w) dapat dicari dengan Pers. (5), dimana F_N adalah beban normal, R adalah radius pin, k_D adalah koefisien aus serta s adalah jarak *sliding*.

$$h^w = \sqrt{\frac{F_N}{\pi \cdot R} \cdot k_D \cdot s} \quad (5)$$

Untuk kasus *line contact*, tegangan rata-rata (P_a) dapat dicari dengan mengambil nilai tegangan maksimal (P_o) dengan persamaan (lihat Johnson [10]):

$$P_a = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot P_o \quad (6)$$

Dalam pemodelan [7], diformulasikan bahwa tegangan maksimal (P_o) sebagai

$$P_o = \frac{2 \cdot F_N}{\pi \cdot a} \quad (7)$$

dengan mengacu pada Pers. (4) dan jari-jari kontak (a) sebagai

$$a \approx \sqrt{2 \cdot R \cdot h^w} \quad (8)$$

maka Pers. (8) menjadi

$$\frac{dh^w}{ds} = \frac{1}{2} \cdot k_D \cdot F_N \cdot (2 \cdot R \cdot h^w)^{-\frac{1}{2}} \quad (9)$$

dengan mengintegrasikan, maka Pers. (9) menjadi

$$h^w = \left(\frac{3}{4} \cdot k_D \cdot F_N \cdot (2 \cdot R)^{-\frac{1}{2}} \cdot s \right)^{\frac{2}{3}} \quad (10)$$

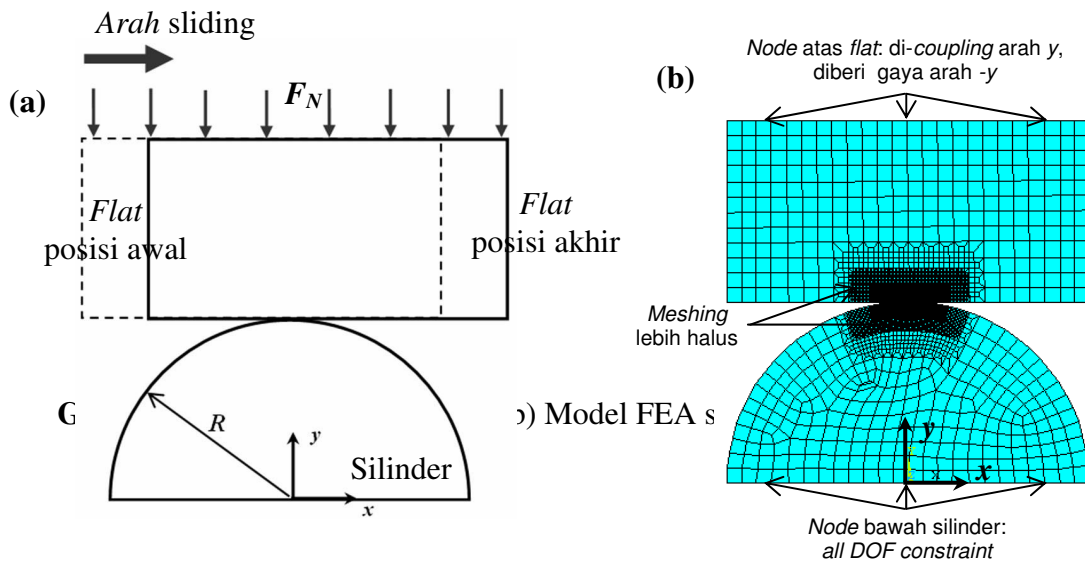
dimana h^w adalah keausan, F_N adalah beban normal, R adalah radius pin, k_D adalah koefisien aus serta s adalah jarak *sliding*. Dengan Pers. (10) keausan silinder dapat diperoleh.

3. 2. Pemodelan FEA

Pemodelan silinder adalah bentuk setengah lingkaran. Skema ilustrasi tentang arah *sliding*, pembebanan yang merata pada *flat* serta silinder dapat dilihat pada Gambar 1. (a). *Node* silinder bagian bawah di-*constraint* terhadap sumbu x dan sumbu y (*all DOF*), *node* atas *flat* di-*coupling* arah y serta diberi beban arah $-y$. Tipe elemen yang digunakan ialah PLANE82, TARGE169, CONTA175 yang terdiri dari 26851 elemen dan 78200 *node* sebagaimana terlihat dalam Gambar 1 (b). Radius silinder (R) adalah 15 mm. Baik material silinder maupun *flat* mempunyai modulus elastisitas sama, E_1 dan E_2 sebesar 207 GPa, tegangan luluh sama, Sy_1 dan Sy_2 sebesar 911.5 MPa, *poisson's ratio* ν_1 dan ν_2 0.32. Nilai E , Sy dan ν diambil dari [11].

Sedangkan koefisien aus (k_D) antara baja dengan baja sebesar $12E-8 \text{ mm}^3/\text{Nm}$ diambil dari [7]. Simulasi ini menggunakan koefisien gesek 0. Validasi model dengan Hertz [8] menunjukkan deviasi di bawah 5%, seperti ditunjukkan dalam Tabel 1.

Metodologi penelitian ini diawali dengan pembuatan model 2D kemudian diberi beban secara merata (F_N) 100 N pada permukaan *flat* bagian atas. Simulasi perkontakan ini menghasilkan tegangan maksimal. Dari nilai tegangan maksimal ini kemudian dapat dicari tegangan rata-rata berdasar Pers. (6). Besaran aus didapatkan dengan Pers. (3). Demikian simulasi terus berlanjut dengan *updated geometry* pada setiap simulasi (*step updated*) dengan beban sama yang berulang-ulang, sampai linearitas nilai tegangan maksimal tercapai.



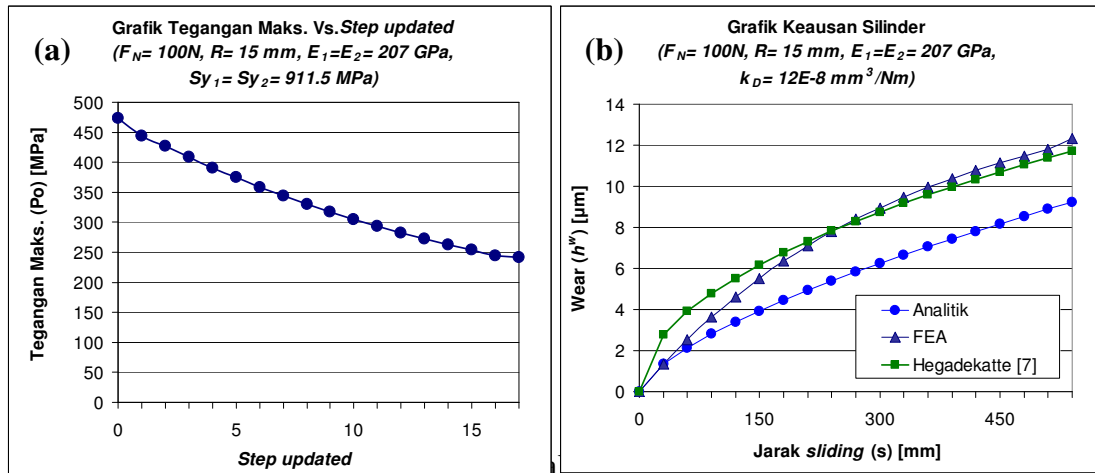
Tabel 1. Validasi model

Perbandingan	Hertz [8]	FEA	Deviasi (%)
Teg. maks (P_o) [Mpa]	494.79	472.91	4.4
Jari-jari kontak (b) [mm]	0.1287	0.1295	0.6

Hasil ini kemudian diterapkan terhadap jarak *sliding* untuk menghitung keausan. Asumsi yang digunakan dalam penelitian ini antara lain ialah keausan hanya terjadi pada silinder saja, tidak pada *flat*. Linearitas tegangan maksimal yang dihasilkan sebagai akibat perkontakan yang berulang kali, nilai perubahannya adalah di bawah 2% dari *step updated* sebelumnya. Dengan kata lain bahwa, nilai tersebut tidak berdampak signifikan terhadap perubahan keausan yang terjadi.

4. Hasil dan Pembahasan

Dari simulasi yang telah dilakukan, terlihat nilai tegangan maksimal mengalami penurunan seiring dengan semakin meningkatnya *step updated* seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.(a). Tegangan maksimal di awal *step updated* sebesar 472.91 MPa menjadi 242.05 MPa di akhir *step updated*. Tegangan maksimal mengalami linear pada *step updated* ke-17 dimana penurunan tegangan dari *step updated* sebelumnya hanya sebesar 1.2 %. Hal ini menunjukkan bahwa tegangan maksimal (P_o) yang dihasilkan pada silinder, lama kelamaan akan mengecil seiring dengan semakin lebarnya jari-jari kontak (b) dari permukaan yang bersinggungan. Pemodelan FEA menunjukkan hasil yang relatif berhimpit dengan model Hegadekatte [7]. Keausan makin lama makin meningkat seiring dengan jarak *sliding*. Hanya pada jarak lebih kecil dari 270 mm, keausannya relatif lebih rendah. Keausan yang terjadi pada jarak ini adalah sebesar 8.4 μm untuk analitik dan 8.3 μm pada model [7]. Setelah itu *gap* yang terjadi memiliki nilai yang relatif konstan dan sama trennya seperti terlihat dalam Gambar 2.(b). Terlihat juga bahwa model [7] dalam tahap awal *sliding* dengan menggunakan *updated geometry* terbukti lebih mendekati model analitik, baru kemudian berhimpit dengan model FEA. Sehingga untuk jarak yang pendek, hasil analitik dan FEA relatif sama.



Sedangkan pada pemodelan analitik dengan Pers. (10), keausan sebesar $1.3 \mu\text{m}$ sama dengan model [7] pada jarak 30 mm. Tetapi pada jarak *sliding* berikutnya, meskipun hasil pemodelan analitik mengalami peningkatan keausan, tetapi masih di bawah ke-2 model yang lain. Hal ini dikarenakan Pers. (10) menggunakan jari-jari kontak (a) secara pendekatan (lihat Pers. 8) dari model [7]. Jika melihat lebih jauh, sesungguhnya model analitik ini tergantung pada tiga parameter, yaitu: beban normal (F_N), radius pin (R) serta koefisien aus (k_D). jadi sifat-sifat fisik material seperti modulus elastisitas, tegangan luluh, *poisson's ratio* tidak menjadi pertimbangan penting. Padahal dalam mekanika kontak, kekerasan material sangat tergantung dari tegangan luluh [12]. Karena kekerasan material inilah yang memegang peranan penting dalam proses terjadinya keausan. Sebagai pembanding, memang model [7] adalah kasus *point contact*, yang tentunya berbeda dengan Pers.8 yang merupakan kasus *line contact*. Tetapi meskipun demikian dari kedua model tersebut memiliki tren yang sama.

5. Kesimpulan

Penelitian tentang keausan silinder pada bidang datar telah dibahas dalam bagian di atas, baik secara analitik maupun simulasi elemen hingga (FEA). Nilai tegangan maksimal yang diperoleh dari simulasi digunakan sebagai input untuk menghitung keausan Archard [2]. Dengan membandingkan model [7], hasil plot grafik terlihat bahwa keausan silinder memiliki hasil yang bagus. Perlu kiranya dilakukan penelitian eksperimen untuk menguji validitas model ini, dengan mempertimbangkan besaran koefisien aus serta penelitian dengan nilai tegangan rata-rata dari hasil simulasi.

Daftar Pustaka

- [1] Blau, P.J., Fifty years of research on the wear of metals, *Tribol. Int.*, **30**, 321-331, 1997
- [2] Archard, J. F., Contact and rubbing of flat surfaces, *J. Appl. Phys.*, **24**, 981-988, 1953
- [3] Strömberg, N., Finite element treatment of two-dimensional thermoelastic wear problems, *Comput. Methods Appl. Mech. Engg.*, **177**, 441-455, 1999
- [4] de Saracibar, C. A. and Chiumenti, M., On the numerical modeling of frictional wear phenomena, *Comput. Methods Appl. Mech. Engg.*, **177**, 401-426, 1999
- [5] Molinari, J. F., Ortiz, M., Radovitzky, R., and Repetto, E. A., Finite element modeling of dry sliding wear in metals, *Engg. Comput.*, **18**, 592-609, 2001

- [6] Podra, P. and Andersson, S., Simulating sliding wear with finite element method, *Tribol. Int.*, **32**, 71-81, 1999
- [7] Hegadekatte, V., Modelling and Simulation of Dry Sliding Wear for Micro-machine Applications, PhD Disertation, Universität Karlsruhe (TH) Kaiserstrasse, Germany, 2006
- [8] Hertz, H., Uber die berührung fester elastische korper und uber die harte (On the contact of rigid elastic solids and on hardness), *Verhandlungen des Vereins zur Beforderung des Gewerbefleisses*, Leipzig, 1882
- [9] Hegadekatte, V., Kuzenhäuser, S., Huber, N., and Kraft, O., A predictive modeling scheme for wear in tibometers, *Tribol. Intr.*, **41**, 1020-1031, 2008
- [10] Johnson, K. L., *Contact Mechanics*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1985
- [11] Vijaywargiya, R. and Green, I., A finite element study of the deformations, forces, stress formations, and energy losses in sliding cylindrical contacts, *Int. J. Non-Linear Mech.*, **42**, 914 – 927, 2007
- [12] Tabor, D., *The hardness of metal*, Oxford University Press, Oxford UK, 1951