

# PEMODELAN KEAUSAN STEADY STATE : ANALITIK, FEA, DAN EKSPERIMEN

I. Syafa'at<sup>1)</sup>, S.A. Widyanto<sup>2)</sup>, Jamari<sup>2)</sup>, dan R. Ismail<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Wahid Hasyim Semarang  
Jln. Menoreh Tengah X/22 Sampangan, Semarang, 50236

<sup>2)</sup>Jurusan Teknik Mesin Universitas Diponegoro, Semarang  
Jln. Prof. Sudarto S.H. Tembalang, Semarang 50275

\*email: i.syafaat@gmail.com

## Abstrak

Kontak permukaan antara dua benda dalam permesinan sangat lazim terjadi. Kontak ini dapat mengakibatkan keausan. Para ilmuwan membagi tahapan keausan dalam hubungannya dengan umur pakai ada tiga macam, yaitu: *running-in*, *steady state*, dan *wear out*. Paper ini membahas tentang pemodelan keausan *steady state*. Pemodelan dibangun dengan model analitik dan pemodelan berbasis FEA. Model keausan secara analitik dikembangkan dari Model Archard. Pemodelan FEA dengan bantuan software ANSYS digunakan untuk memprediksi keausan pin pada simulasi *pin-on-disc*. Simulasi ini berupa kontak *sliding* yang dilakukan untuk mengetahui besarnya keausan yang terjadi pada pin. Untuk memvalidasi kedua model, eksperimen *ball-on-disc* juga dilakukan. Hasil pemodelan analitik dan FEA menunjukkan keausan mengalami peningkatan sangat signifikan pada tahap awal, kemudian mencapai kestabilan seiring dengan bertambahnya jarak *sliding*. Laju keausan mengalami penurunan yang sangat signifikan pada tahap *running-in* dan stabil pada fase *steady state*. Hasil eksperimen memperlihatkan permukaan telah konformal pada saat *steady state*. Ketiga present model menunjukkan hasil yang sangat baik dalam memprediksi keausan.

**Kata kunci:** "keausan", "steady state", "FEA", "pin-on-disc", "ball-on-disc".

## 1. Pendahuluan

Ketika dua permukaan mengalami kontak di bawah pembebanan dan bergerak relatif terhadap yang lain, maka perubahan kondisi permukaan akan terjadi. Terkadang perubahan ini terdeteksi seperti perubahan dalam gesekan. Setelah keadaan awal ini berlangsung, gaya gesek akan mencapai sebuah kondisi yang disebut dengan *steady state* (fase tunak), dimana berbagai pengaruh dalam gesekan mencapai sebuah keseimbangan. Perubahan yang terjadi antara keadaan saat awal perkontakan dengan *steady state* disebut *running-in* (Blau, 1989).

Para peneliti membagi tahapan keausan dalam hubungannya dengan waktu pakai terdiri atas tiga tahap. Tahap pertama adalah tahap *running-in* dimana keausan meningkat secara signifikan tetapi laju keausan berkurang seiring dengan bertambahnya waktu ataupun *rolling* maupun jarak *sliding*. Tahap kedua adalah *steady state* dimana keausan masih meningkat

tetapi tidak sebesar saat tahap pertama. Laju keausan (*wear rate*) telah mengalami kestabilan linear atau konstan dan tidak berubah dengan berjalannya waktu ataupun jarak *sliding*. Sedangkan tahap selanjutnya adalah *wear-out*, dimana keausan dan laju aus mengalami peningkatan tajam, sampai akhirnya sebuah permukaan tersebut rusak. Pada tahap inilah kegagalan lelah mulai berawal (Jamari, 2006).

Blau (1989) mendefinisikan *run-in* serangkaian proses yang terjadi sebelum *steady state* ketika dua permukaan di bawah pembebanan dan bergerak relatif terhadap yang lain. Proses ini umumnya diikuti dengan perubahan gaya gesek dan laju keausan. Selama *running-in*, sistem melakukan penyesuaian untuk mencapai kondisi tunak antara tekanan kontak, kekasaran permukaan, permukaan *layer*, dan pelapisan pelumas yang efektif pada permukaan. Penyesuaian-penyesuaian tersebut meliputi konformalitas permukaan, formasi lapisan oksida, perpindahan material, produk reaksi

pelumas, transformasi fasa martensit, dan reorientasi struktur mikro pada *subsurface* (Hsu dkk., 2005). Sedangkan *steady state* menurut Blau (1989) “*that condition of a given tribosystem in which the average kinetic friction coefficient, wear rate, and other specified parameters have reached and maintained a relatively constant level*”.

Penggunaan simulasi analisa elemen hingga (FEA) untuk kajian keausan telah dilakukan Podra dan Andersson (1999) dan Öqvist (2001). Peneliti lain seperti Strömberg (1999) menggunakan formulasi elemen hingga untuk keausan thermoelastis, de Saracibar dan Chiumenti (1999) menampilkan sebuah model numeris untuk mensimulasikan perilaku keausan gesek dalam kondisi nonlinear kinematis. Molinari dkk. (2001) menampilkan simulasi kontak yang sederhana dari sebuah kotak yang meluncur di atas piringan. Kónya dkk. (2005) meneliti proses keausan dengan mempertimbangkan suhu. Sedangkan kontak osilalasi oleh Kim dkk. (2005) telah dikembangkan juga oleh Mukras dkk. (2009). Hegadekatte dkk. (2008) menampilkan *Global Incremental Wear Model* (GIWM) yang juga pengembangan dari temuan dia sebelumnya pada Hegadekatte dkk. (2006). Dalam penelitiannya, permulaan untuk mencari keausan *disc* menggunakan jari-jari kontak awal dengan formula dari Hertz (1882).

Dari studi literatur tentang keausan yang telah disebut atas, belum terlihat kajian tentang pemodelan keausan *steady state* (*modeling a steady state mild wear*) secara tiga model. Untuk itu penulis akan membahas secara mendalam fase keausan *steady state* (fase tunak) dengan model analitik hasil pengembangan GIWM, model berbasis FEA (*finite element analysis*), serta validasi kedua model dengan eksperimen.

## 2. Pemodelan Analititk

Perhitungan keausan pin menurut GIWM Hegadekatte dkk. (2006) menganggap sebuah daerah tekanan *axisymmetric*. GIWM sebagai

bentuk pengembangan model Archard (1953) dimulai dengan sebuah persamaan klasik:

$$\frac{V}{s} = k \frac{F_N}{H} \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{V}{s} = k_D F_N$$

dimana  $V$  adalah volume material yang hilang,  $s$  adalah jarak *sliding*,  $F_N$  adalah beban normal,  $H$  adalah kekerasan (material yang lebih lunak),  $k$  adalah koefisien aus tak-berdimensi (tidak memiliki satuan),  $k_D$  adalah koefisien aus berdimensi. Dengan membagi sisi kanan dan sisi kiri dengan daerah kontak yang sesungguhnya, maka Pers. (1) menjadi

$$\frac{h}{s} = k_D \cdot p \dots\dots\dots (2)$$

dimana  $h$  adalah keausan linear dan  $p$  adalah tekanan kontak. Langkah selanjutnya adalah membuat persamaan diferensial dari Pers. (2), menjadi

$$\frac{dh^w}{ds} = k_D p \dots\dots\dots (3)$$

Substitusi untuk  $p$  dengan menggunakan model Hertz (1882) (lihat Johnson, 1985) dan selanjutnya substitusi untuk jari-jari kontak dengan persamaan

$$a = \sqrt{2 R_p h^w} \dots\dots\dots (4)$$

Berikutnya masukkan ke dalam Pers. (3), sehingga didapatkan

$$\frac{dh^w}{ds} = \frac{F_N}{2 \pi R_p h^w} k_D \dots\dots\dots (5)$$

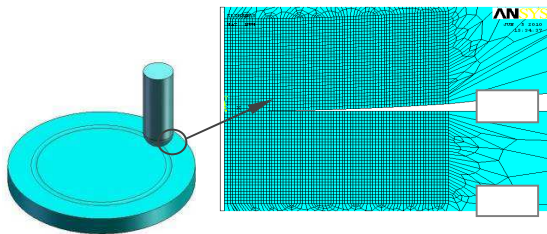
Dengan mengintegalkan  $h^w$  terhadap  $s$ , akan diperoleh

$$h^w = \sqrt{\frac{F_N k_D s}{\pi R_p}} \dots\dots\dots (6)$$

Pers. (6) inilah yang dipergunakan untuk menghitung keausan pin. Dimana  $h^w$  adalah keausan pin,  $k_D$  adalah koefisien aus berdimensi,  $F_N$  adalah beban,  $R_p$  adalah radius pin dan  $s$  adalah jarak *sliding*.

### 3. Pemodelan Berbasis FEA

Pemodelan FEA untuk pengujian keausan *pin-on-disc* antara baja dengan baja dibuat dengan penyederhanaan geometri *pin* dan *disc* (piringan) dengan model 2D, seperti terlihat dalam Gambar 1. Untuk menghemat waktu proses iterasi, dengan tidak mengesampingkan keakuratan data, *mesh* pada daerah kontak saja yang dibuat lebih halus. Pin dengan ujung berbentuk bola yang diputar di atas *disc*, dimodelkan dalam bentuk seperempat lingkaran *axisymmetric*. Tipe elemen yang digunakan ialah PLANE82 dengan 8 *node*, elemen target TARGE169, elemen kontak CONTA175 (ANSYS, 2006).

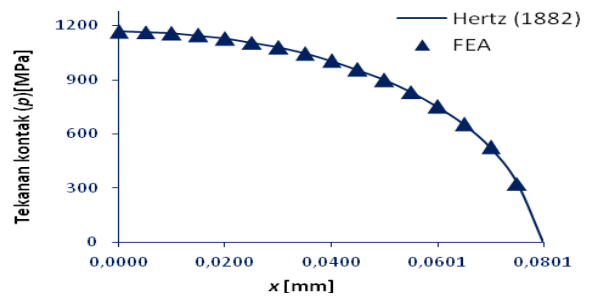


**Gambar 1.** Pemodelan *pin-on-disc* dan pembesaran daerah kontak dengan *meshing* yang lebih halus.

Diskritisasi model ini terdiri dari 5757 elemen dan 16999 *node*. Sedangkan jumlah *node* yang kontak sejumlah 16 buah saat permulaan simulasi kontak (lihat Gambar 1). Pembebanan dengan ( $F_N$ ) 15 N serta radius pin ( $R_p$ ) adalah 5 mm. Baik material pin (notasi angka subskrip 1) maupun *flat* (notasi angka subskrip 2) mempunyai modulus elastisitas sama,  $E_1$  dan  $E_2$  sebesar 213 GPa, *Poisson's ratio*  $\nu_1$  dan  $\nu_2$  0,3. Simulasi ini menggunakan koefisien gesek 0. Hasil validasi pemodelan berbasis FEA terhadap tekanan kontak dengan model Hertz 1882 terlihat sangat baik dan berhimpit antara keduanya, seperti ditunjukkan dalam Gambar 2. Verifikasi model dengan Hertz (1882) menunjukkan deviasi di bawah 0,01% untuk tekanan kontak maksimal ( $p_o$ ) dan 1,03% untuk jari-jari kontak ( $a$ ).

Simulasi FEA ini menggunakan *updating geometry*. Dalam perhitungan keausan setiap

interval jarak *sliding*, dibutuhkan dua kali simulasi. Simulasi pertama menghasilkan tekanan kontak rata-rata ( $p_a$ ) dan simulasi kedua dengan menekan model sebesar *displacement* yang diperoleh dari simulasi pertama. Simulasi kedua inilah yang disebut *updating geometry* (lihat Ismail dkk. (2010) untuk metode *update*). Simulasi ini berupa pemberian beban *displacement* pada *disc*. Besarnya *displacement* ini dengan memperhitungkan besarnya jari-jari kontak ( $a$ ). Pembaca dapat melihat pemodelan berbasis FEA secara lengkap termasuk bahasa pemrograman APDL dalam paper Syafa'at dkk. (2011).



**Gambar 2.** Validasi pemodelan FEA dengan Hertz (1882).

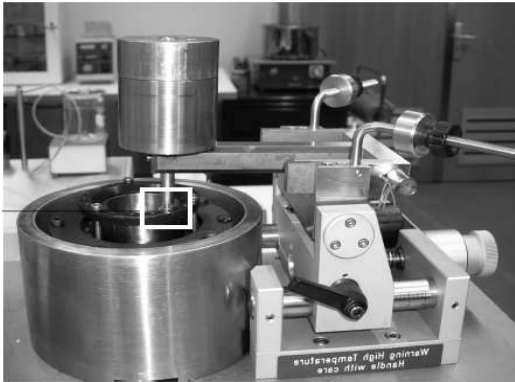
### 4. Susunan Eksperimen

Studi tentang pemodelan keausan fase tunak ini menggunakan pengujian eksperimen *ball-on-disc* dengan material yang sama antara bola dan piringan. Secara prinsip eksperimen ini serupa dengan pemodelan berbasis FEA *pin-on-disc*. Perbedaan hanya pada bentuk pin dan bola, sedangkan keduanya memiliki kesamaan pada permukaan kontak yang sama-sama berbentuk bola.

**Tabel 1.** Spesifikasi material *steel ball* dan *disc*

| Material                   | AISI 52100           |
|----------------------------|----------------------|
| Kekerasan                  | 7,55 GPa (58-63 HRC) |
| Modulus elastisitas        | 213 GPa              |
| <i>Poisson's ratio</i>     | 0,3                  |
| Radius <i>steel ball</i>   | 5 mm                 |
| Diameter luar <i>disc</i>  | 46 mm                |
| Diameter dalam <i>disc</i> | 30 mm                |
| Produsen                   | SKF®                 |

Bola baja dan piringan, masing-masing terbuat dari material yang sama, yaitu AISI 52100 dengan nilai kekerasan 7,55 GPa, serta memiliki modulus elastisitas 213 GPa. Beban yang dikenakan pada bola sebesar 15 N. Spesifikasi material dapat dilihat pada Tabel 1.



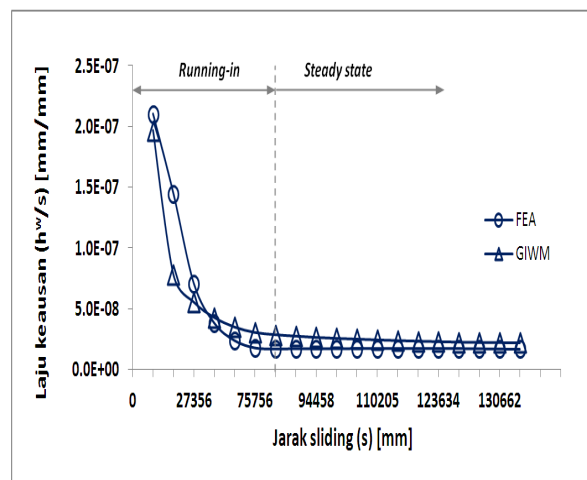
**Gambar 3. Mesin pengujian ball-on-disc (Jamari, 2006).**

Selama penelitian menggunakan pelumas oli transmisi mesin dengan kecepatan perputaran piringan  $v$  0,005 m/detik. Mesin pengujian ball-on-disc seperti terlihat dalam Gambar 3. Temperatur ruangan yang dipakai berkisar antara 20 sampai 23 °C. Penelitian ini tidak mengukur keausan pada piringan. Keseluruhan eksperimen ini dilakukan di *Laboratory for Surface Technology and Tribology* di University of Twente, Enschede, Belanda.

## 5. Hasil Pemodelan

Pemodelan analitik memperlihatkan hasil keausan yang meningkat tajam pada tahap-tahap awal, kemudian diikuti fase yang relatif konstan pada pada tahap berikutnya. Jika melihat tren keausan, penentuan dimulainya *steady state* akan mengalami kesulitan jika hanya melihat keausan yang terjadi. Cara termudah untuk menentukan *steady state* adalah dengan melihat kestabilan laju keausan yang terjadi. Laju keausan yang dihitung berdasar kedalaman keausan tiap jarak *sliding* memperlihatkan besaran yang relatif konstan

dimulai pada jarak *sliding* sekitar 80000 mm seperti diperlihatkan dalam Gambar 4. Pada jarak *sliding* tersebut, laju keausannya ( $h^w/s$ ) mencapai  $2,87E-08$  mm/mm dengan persentase penurunan laju aus 4,05% setelahnya. Secara umum, kisaran laju keausan sebesar  $2,44E-08$  mm/mm dengan fluktuasi di bawah 15%. Dari Gambar 4 juga terlihat penurunan drastis laju keausan dalam tahap *running-in* dan relatif stabil setelah tahap *steady state*. Di sini juga diperlihatkan hasil pemodelan FEA yang juga mengalami kecenderungan yang serupa.

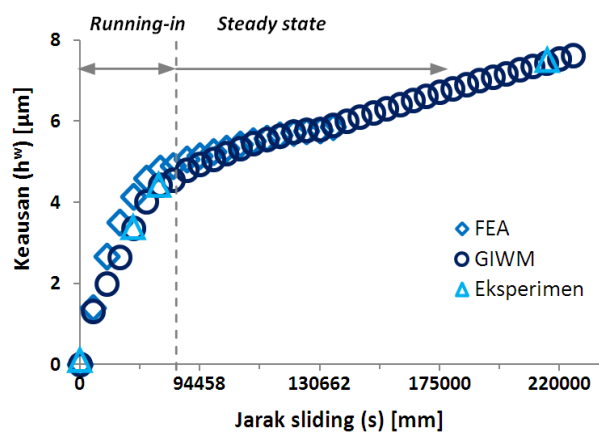


**Gambar 4. Laju keausan versus jarak sliding pada pemodelan keausan steady state**

Hasil pemodelan FEA memperlihatkan konformalitas permukaan yang dapat diidentifikasi melalui kontur sebaran tegangan yang semakin mengecil pada ujung pin. Fenomena pergeseran tegangan ini juga diikuti dengan semakin bertambah besar jari-jari kontak ( $a$ ). Kondisi ini sangat realistis ketika bentuk pin yang makin lama makin tumpul karena pengaruh gesekan pada proses *sliding*, sehingga daerah kontak juga semakin membesar yang ditandai dengan bertambah besarnya jari-jari kontak ( $a$ ). Pada tahap-tahap awal, tekanan kontak mengalami penurunan sangat signifikan. Kestabilan tekanan kontak mulai terlihat setelah menempuh jarak *sliding* 80405 mm. Keausan yang terjadi pada ujung

pin mengalami peningkatan pada tahap-tahap awal kemudian mengalami keadaan stabil setelah menempuh jarak *sliding* sejauh 80405 mm. Pada fase ini, tekanan kontak di sepanjang daerah kontak relatif seragam dan stabil. Keadaan ini yang dikenal dengan *steady state*.

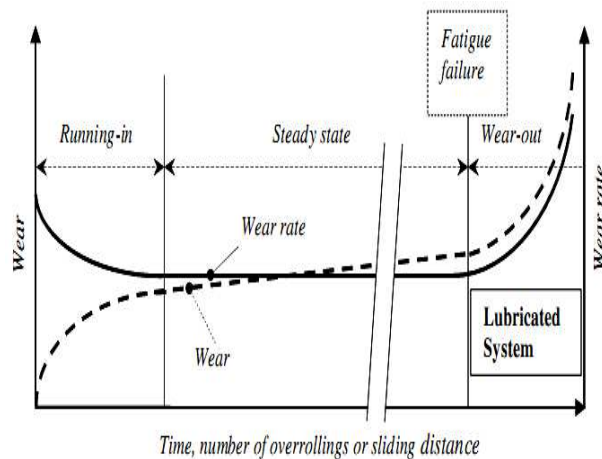
Pengujian *ball-on-disc* setelah 12 jam eksperimen menunjukkan hasil tren keausan yang sama dengan hasil prediksi pemodelan analitik GIWM. Hasil pengukuran kedalaman aus pada waktu 2 jam perputaran *disc* atau sejauh 36000 mm, GIWM menghasilkan aus 3,046  $\mu\text{m}$ , sedangkan hasil eksperimen 3,042  $\mu\text{m}$ . Pada jarak 216000 mm keausan keduanya 7,50  $\mu\text{m}$ . Jika melihat hasil pengukuran terhadap tinggi keausan pin, ternyata permukaan bola baja tidak serta merta langsung terpotong dengan hasil ujung permukaan yang datar sebagaimana asumsi dalam model analitik. Temuan ini juga berbeda dengan Öqvist (2001) yang berhasil membuat geometri silinder dalam penelitiannya berbentuk datar sejak simulasi FEA yang pertama sampai *wear step* yang terakhir. Karakteristik *steady state* diantaranya ditandai dengan konformalitas kedua permukaan kontak. Hasil eksperimen memperlihatkan bahwa meskipun topografi bola tidak benar-benar rata, namun awal dari sebuah fase tunak sudah dimulai. Pada jarak *sliding* 72000 mm atau perputaran selama 4 jam, sesungguhnya tahapan *running-in* telah berakhir dan dimulainya fase *steady state*. Konformalitas permukaan bola yang datar, sebagai hasil dari bentuk bidang yang datar, sudah "match" dengan permukaan *disc*.



**Gambar 5. Keausan versus jarak *sliding* pada pemodelan keausan *steady state*.**

Hasil plot keausan ( $h^w$ ) menunjukkan pada tahap *running-in*, keausan sangat tinggi dan kemudian relatif stabil pada fase tunak (*steady state*). Komparasi dengan model GIWM menunjukkan bahwa besaran keausan hasil FEA berada di atas GIWM (lihat Gambar 5). Hal ini bisa dimaklumi karena tekanan kontak rata-rata yang menjadi input pada pemodelan FEA diambil dari pendekatan kontak elastis. Hasil ini juga serupa dengan temuan Hegadekatte dkk. (2006). Sebuah kelebihan yang tidak diperoleh dari pemodelan analitik dan pemodelan FEA adalah bahwa dengan hasil eksperimen ini, geometri pin dapat diketahui. Dari model FEA juga dicatat bahwa tekanan kontak telah mengalami kestabilan setelah memasuki tahap *steady state*. Sedangkan dari hasil eksperimen menunjukkan bahwa permukaan kontak telah konformal. Secara umum, prediksi analitik GIWM, pemodelan FEA *fit* dengan hasil eksperimen.

Ketiga pemodelan memiliki kecenderungan yang serupa dengan kurva umur pakai komponen seperti dalam penelitian Jamari (2006), baik laju keausan maupun keausannya seperti terlihat dalam Gambar 6.



**Gambar 6. Kurva umur pakai komponen** (Jamari 2006).

## 6. Kesimpulan

Pemodelan secara analitik, pemodelan berbasis FEA, dan validasi dengan eksperimen telah ditampilkan. Pemodelan analitik hasil pengembangan keausan Archard (1953) telah berhasil mengidentifikasi pemodelan *steady state*. Pemodelan berbasis FEA juga memperlihatkan hal yang serupa. Untuk memvalidasi kedua pemodelan tersebut, eksperimen dengan pengujian *ball-on-disc* juga dilakukan. Pada tahap *running-in* terjadi peningkatan keausan secara tajam dan penurunan laju keausan yang signifikan. Mulai jarak *sliding* 80405 mm, karakteristik *steady state* yang berupa kestabilan keausan, kestabilan laju keausan, kestabilan tekanan kontak dan permukaan yang telah konformal dapat ditampilkan dengan bagus oleh ketiga *present model*.

## 7. Daftar Pustaka

- ANSYS (2006), *ANSYS Contact Technology Guide Release 10.0*, ANSYS, Inc. Southpointe 275 Technology Drive, Canonsburg, PA 15317
- Archard, J. F. (1953), Contact and rubbing of flat surfaces, *J. Appl. Phys.*, 24, 981-988
- Blau, P.J. (1989), *Friction and Wear Transitions of Materials*, Noyes, Park Ridge, NJ
- de Saracibar, C. A. and Chiumenti, M. (1999) On the numerical modeling of frictional wear phenomena, *Comput. Methods Appl. Mech. Engg.*, 177, 401-426
- Hegadekatte, V., Huber, N. and Kraft, O. (2006), "Finite element based simulation of dry sliding wear", *Tribology Letters*, 24, 51-60
- Hegadekatte, V., Kuzenhäuser, S., Huber, N., and Kraft, O. (2008), A predictive modeling scheme for wear in tibometers, *Tribol. Intr.*, 41, 1020-1031
- Hertz, H. (1882), *Über die berührung fester elastische körper und über die harte* (On the contact of rigid elastic solids and on hardness), *Verhandlungen des Vereins zur Beförderung des Gewerbefleisses*, Leipzig
- Hsu, S.M., Munro, R.G., Shen, M.C., and Gates, R.S. (2005), "Boundary lubricated wear", in *Wear – Materials, Mechanisms and Practice*, ed. Stachowiak, G.W., John Wiley & Sons Ltd., England, 37 – 70
- Ismail, R., Tauviqirrahman, M., Syafa'at, I., Jamari, and Schipper, D.J. (2010), "The application of updating geometry model in finite element analysis for predicting the running-in wear on sliding contact", *8<sup>th</sup> ASEAN ANSYS Conference 2010*, Singapore, 12-13 October 2010

- Jamari (2006), Running-in of Rolling Contacts, PhD Thesis, University of Twente, Enschede, The Netherlands
- Johnson, K. L. (1985), *Contact Mechanics*, Cambridge University Press, Cambridge, UK
- Kim, N., Won, D., Burris, D., Holtkamp, B., Gessel, G.R., Swanson, P., and Sawyer, W.G. (2005), "Finite element analysis and experiments of metal/metal wear in oscillatory contacts", *Wear*, 258, 1787 – 1793
- Kónya, L., Váradi, K., and Friedrich, K. (2005), Finite element modeling of wear process of a peek-steel sliding pair at elevated temperature, *Periodica Polytechnica, Mechanical Engineering*, 49, 25-38
- Molinari, J. F., Ortiz, M., Radovitzky, R., and Repetto, E. A. (2001), Finite element modeling of dry sliding wear in metals, *Engg. Comput.*, 18, 592-609
- Öqvist, M. (2001), "Numerical simulations of mild wear using updated geometry with different step size approaches", *Wear*, 249, 6-11
- Podra, P. and Andersson, S. (1999), Simulating sliding wear with finite element method, *Tribol. Int.*, 32, 71-81
- Strömberg, N. (1999), Finite element treatment of two-dimensional thermoelastic wear problems, *Comput. Methods Appl. Mech. Engg.*, 177, 441-455
- Syafa'at, I., Widyanto, S.A., Jamari, dan Ismail, R. (2011), "Pemodelan keausan pin-on-disc dengan analisa elemen hingga", *Majalah Ilmiah Momentum FT. Unwahas – ISSN 0216.7395*, 7, No. 2, Oktober 2011, 1-6