
STUDI PERILAKU TEKANAN KONTAK PADA PEMODELAN KEAUSAN *RUNNING-IN* DAN *STEADY STATE* DENGAN PENGUJIAN *PIN-ON-DISC*

Imam Syafa'at^{*1)}, Jamari²⁾, Susilo Adi Widyanto²⁾ dan Rifky Ismail²⁾

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

²⁾ Jurusan Teknik Mesin Universitas Diponegoro, Semarang
Jln. Prof. Sudarto S.H. Tembalang, Semarang 50275
email: immsyaf@yahoo.co.id

Abstrak

Dalam perancangan rekayasa, tribologi adalah kajian penting dalam kontribusinya terhadap kehandalan dan efisiensi suatu komponen permesinan, termasuk diantaranya kajian tentang keausan. Dalam kontak sliding, para peneliti membagi keausan menjadi tiga fase, yaitu: *running-in*, *steady state* (fase tunak) dan *wear out*. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui perilaku tekanan kontak (*contact pressure*) pada fase *running-in* dan *steady state* dengan pemodelan numerik menggunakan pin yang diputar pada disc. Pin dari baja dengan modulus elastisitas 213 GPa yang berujung bentuk setengah bola dengan radius 5 mm diberi beban 15 N. Simulasi *finite element analysis* (FEA) dengan software ANSYS[®] dilakukan untuk mengetahui tekanan kontak ini. Pembuatan geometri, kondisi batas, sifat-sifat material dan pemberian beban awal digunakan sebagai masukan awal dalam simulasi FEA. Dari sini perilaku tekanan kontak selama proses sliding akan diteliti. Hasil pemodelan FEA menunjukkan bahwa perilaku tekanan kontak pada daerah kontak dalam fase *running-in* mengalami penurunan sampai tercapai kestabilan dalam fase *steady state* pada kisaran 63,82 MPa saat jarak sliding 80405 mm. Kestabilan ini tetap terjaga meskipun terjadi peningkatan jarak sliding.

Kata kunci: *running-in*, *steady state*, tekanan kontak, *pin-on-disc*, FEA.

1. PENDAHULUAN

Dewasa ini penggunaan teknologi dengan bantuan perangkat lunak semakin sering dipakai dalam mereduksi kerugian-kerugian dalam sistem rekayasa, peningkatan efisiensi energi serta penentuan umur pakai sebuah komponen, khususnya untuk komponen dengan pembebanan gaya yang besar dan pergerakan yang cepat. 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 perkontak 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).

Menurut GOST (Standar Rusia) standar 16429-70, definisi *running-in* adalah perubahan dalam geometri dari permukaan yang di-*sliding* dan perubahan sifat fisik-mekanis permukaan lapisan pada material selama tahap permulaan *sliding*, yang umumnya terjadi pada permukaan itu sendiri, dengan asumsi kondisi eksternal yang konstan, penurunan gesekan, suhu, dan laju keausan (Kraghelsky dkk., 1982). 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) adalah kondisi dalam sistem tribologi dimana telah tercapai dan terjaganya keadaan yang relatif konstan pada besaran rata-rata koefisien gesek kinetik, laju keausan, dan beberapa parameter tertentu lainnya.

Penggunaan simulasi analisa elemen hingga (FEA) untuk kajian keausan telah dilakukan Podra dan Andersson (1999). Mereka melakukan penelitian keausan dengan FEA dan eksperimen *pin-on-disc* dengan asumsi bahwa aus hanya terjadi pada pin saja. Sedangkan Öqvist (2001) memodelkan sebuah kontak antara *roller* silindris dengan *plate*. Hegadekatte (2008) menampilkan *Global Incremental Wear Model* (GIWM). Dalam penelitiannya, permulaan untuk mencari keausan *disc* menggunakan jari-jari kontak awal dengan formula dari Hertz (1882).

Melihat dari berbagai penelitian di atas, belum terlihat kajian tentang perilaku tekanan kontak maupun tekanan kontak rata-rata dalam dalam fase *running-in* dan *steady state* dengan menggunakan FEA. Hsu dkk. (2005) hanya menyebut dalam pernyataannya mengenai penyesuaian tekanan kontak tetapi tidak terlihat apakah bentuk hasil penelitian ini dari model analitik, FEA ataupun eksperimen. Untuk penentuan jarak *sliding* dalam kajian ini menggunakan pendekatan Hegadekatte (2006) dengan formula yang sederhana.

2. DASAR TEORI

Studi tentang distribusi tekanan kontak dalam bidang mekanika kontak seperti dirumuskan oleh Hertz (1882) yaitu (lihat Johnson (1985) hal. 60):

$$p(x) = \left[\frac{p_o (a^2 - x^2)^{0.5}}{a} \right] \quad (1)$$

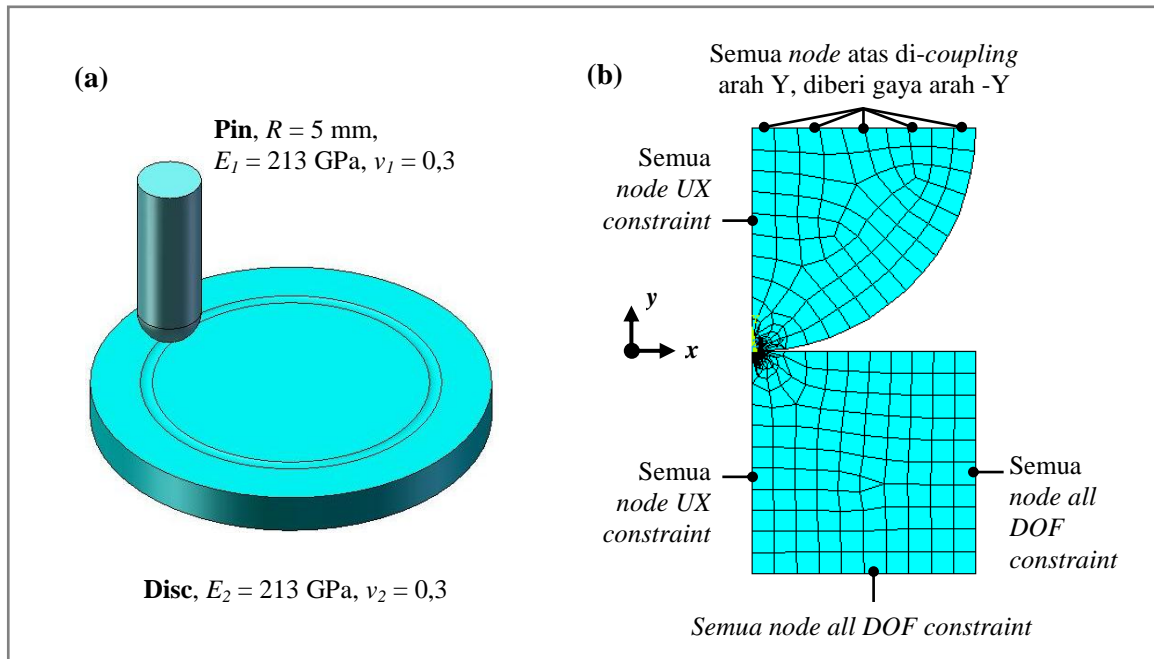
dimana $p(x)$ adalah tekanan kontak saat jarak x , p_o adalah tekanan kontak maksimal, a adalah jari-jari kontak, dan x adalah jarak dari pusat. Perhitungan ini digunakan untuk mengetahui distribusi tekanan kontak pada masing-masing *node* yang memiliki jarak x terhadap pusat ujung pin. Yang mana titik pusatnya berimpit dengan sumbu y pada pemodelan FEA (lihat Gambar 1(a)). Prosedur simulasi dalam penyelesaian keausan *running-in* dan *steady state* dengan analisa elemen hingga yang menggunakan Pers. (2) dari model Archard (1953) dengan menambahkan peningkatan jarak *sliding* untuk setiap iterasi.

$$h_j = h_{j-1} + k_D \cdot p_j \cdot \Delta s_j \quad (2)$$

dalam Pers. (2) h_j adalah kedalaman aus saat iterasi ke- j , h_{j-1} adalah kedalaman aus saat iterasi sebelumnya, k_D adalah koefisien aus, p_j adalah tekanan kontak saat iterasi ke- j dan Δs_j adalah peningkatan (*increment*) jarak *sliding* saat iterasi ke- j . Dalam penelitian ini, tekanan kontak rata-rata p_a diperoleh dari simulasi FEA dengan *software* ANSYS®. dan perhitungan model Hertz (1882) untuk inisial *sliding* sebagai pembandingnya dengan model terdahulu.

3. PEMODELAN FEA

Pemodelan FEA untuk pengujian keausan *pin-on-disc* dibuat dengan penyederhanaan geometri *pin* dan *disc* (piringan), lihat skema ilustrasi pada Gambar 1(a). Pin dengan ujung berbentuk bola yang diputar di atas *disc*, dimodelkan dalam bentuk seperempat lingkaran *axisymmetric*. Pemodelan geometri, *meshing* serta penentuan kondisi batas dapat dilihat pada Gambar 1(b), Tipe elemen yang digunakan ialah PLANE82 dengan 8 *node*, elemen target TARGE169, elemen kontak CONTA175 (ANSYS, 2006). Diskritisasi model ini terdiri dari 5757 elemen dan 16999 *node*. Sedangkan jumlah *node* yang kontak sebanyak 16 buah saat permulaan simulasi. Untuk menghemat waktu proses iterasi, dengan tidak mengesampingkan keakuratan data, *mesh* pada daerah kontak saja yang dibuat lebih halus.



Gambar 1. (a) Skema ilustrasi *pin-on-disc* dan (b) Pemodelan FEA dan kondisi batasnya.

Pembebanan dengan (F_N) 15 N serta radius pin (R) 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* ν_1 dan ν_2 0,3. Simulasi ini menggunakan koefisien gesek 0. Verifikasi model dengan Hertz (1882) menunjukkan deviasi di bawah 2% untuk tekanan kontak maksimal (p_o) dan jari-jari kontak (a).

4. PROSEDUR SIMULASI KEAUSAN

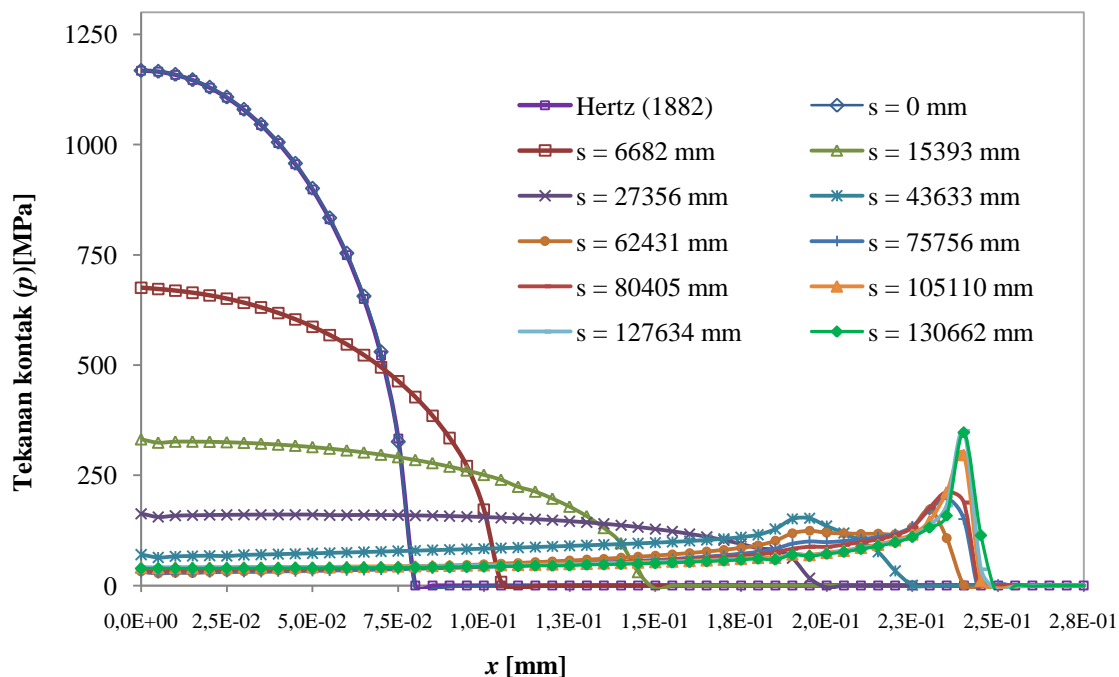
Prosedur pemodelan diawali dengan pembuatan geometri model yang disederhanakan. Pembuatan ini membutuhkan sifat-sifat material seperti modulus elastisitas (E) dan *Poisson's ratio* (ν). Setelah langkah ini dilakukan, dibuatlah diskritisasi model dengan membagi menjadi elemen-elemen kecil yang disebut dengan *meshing*. Langkah kedua yaitu menentukan jenis perkontakan, pemberian kondisi batas dan pembebanan. Pemberian kondisi batas ini seperti terlihat dalam Gambar 1(b). Langkah selanjutnya adalah pembebanan berupa gaya. Setelah berhasil simulasi dengan sejumlah iterasi, akan diperoleh tekanan kontak rata-rata (p_a). Tekanan kontak rata-rata ini diperoleh dengan menjumlahkan nilai tekanan kontak pada masing-masing *node* kemudian membaginya dengan jumlah *node* yang saling kontak. Hasil p_a ini kemudian dijadikan input untuk menghitung keausan Archard (1953) dalam Pers.2.

Langkah berikutnya setelah mendapatkan besaran keausan (h^w) adalah membuat simulasi lagi dengan penekanan berupa beban *displacement* (UY). Besarnya *displacement* ini sesuai dengan besarnya keausan (h^w) dengan memperhitungkan jari-jari kontak (a). Hasil deformasi ini kemudian disimpan untuk kemudian diambil lagi pada simulasi berikutnya. Demikian langkah-langkah tersebut dilakukan secara berulang hingga mencapai jarak *sliding* yang diinginkan dan mendapat nilai keausan yang diharapkan. Kondisi batas dan pembebanan dalam setiap simulasinya sama dengan saat simulasi awal. Untuk diketahui bahwa pada setiap simulasi, geometri *disc* masih utuh seperti pada keadaan awal simulasi. Disini diasumsikan bahwa geometri pin saja yang hanya mengalami keausan, sehingga *updating geometry* dilakukan hanya pada pin saja. Prosedur simulasi ini serupa dengan apa yang dilakukan oleh Ismail dkk. (2010).

5. HASIL DAN PEMBAHASAN

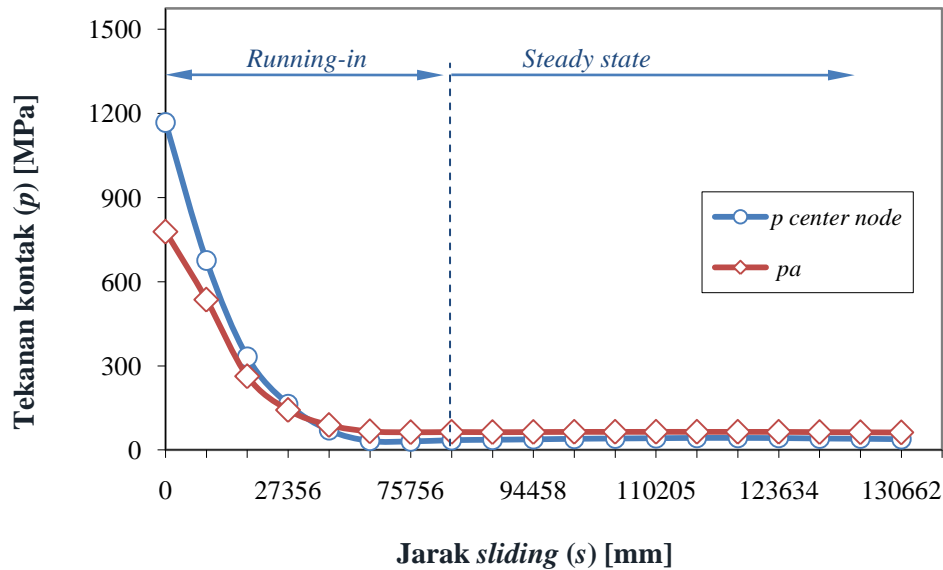
Hasil pemodelan dengan simulasi FEA pada studi *pin-on-disc* dengan metode kontak statis memperlihatkan distribusi tekanan kontak seperti pada Gambar 2. Pada inisial *sliding*, hasil plot distribusi tegangan arah y sangat berhimpit dengan kontak elastis Hertz (1882) pada Pers. 2, dimana tekanan kontak maksimal $p_o = 1167,70$ MPa. Pada jarak *sliding* $s = 80405$ mm konsentrasi

tegangan bergeser ke tepi daerah kontak. Hal ini terjadi sampai pada $s = 130662$ mm. Munculnya pergeseran pusat tegangan dan munculnya tegangan maksimal pada tepi daerah kontak ini juga dapat ditemukan oleh para peneliti sebelumnya, yaitu Jamari dkk. (2010) dan Saputro (2010) meskipun menggunakan *software* yang berbeda. Sedangkan dengan *software* ANSYS juga dapat ditemui dalam penelitian Zakariya (2010) serta Syafa'at dkk. (2010). Hasil yang sama juga dapat dilihat pada Hegadekatte dkk. (2005). Hal ini sangat realistis karena permukaan di luar daerah kontak mengalami kecenderungan mempertahankan posisi semula akibat dari penerapan kontak statis yang berulang pada model FEA sehingga konsentrasi tegangan muncul pada daerah ini. Tetapi munculnya tegangan maksimal tersebut tidak terlihat pada hasil simulasi FEA Hegadekatte dkk. (2006) karena jarak *sliding* yang ditempuh masih relatif kecil, yaitu di bawah 80 mm. Hasil studi ini juga memperlihatkan konformalitas permukaan yang dapat diidentifikasi melalui kontur sebaran tegangan yang semakin mengecil pada ujung pin. Fenomena pergeseran tegangan ini juga diikuti dengan semakin lebarnya daerah kontak.



Gambar 2. Distribusi tekanan kontak

Perilaku tekanan kontak memperlihatkan pada saat inisial *sliding*, tekanan mencapai 1167,70 MPa (lihat Gambar 3) kemudian secara gradual mengalami penurunan sampai keadaan stabil tercapai, meskipun terjadi peningkatan jarak *sliding*. Pada jarak sampai dengan $s = 43633$ mm, tekanan maksimal berada pada ujung pin. Setelah jarak tersebut terlewati, terjadi perbedaan yang signifikan antara tekanan maksimal dan tekanan pada ujung pin. Pada Gambar 3 juga terlihat tekanan kontak rata-rata mulai mengalami kestabilan pada kisaran 63,82 MPa pada jarak sliding $s = 80405$ mm. Fluktuasi antara tekanan sebelum dan sesudahnya hanya berkisar di bawah 3%. Sesungguhnya disinilah berakhirnya tahap *running-in* dan dimulainya *steady state* (lihat Hsu dkk. (2005) dalam definisi *steady state*).



Gambar 3. Perilaku tekanan kontak pada *center node* dan tekanan kontak rata-rata (p_a) dalam keausan fase *running-in* dan *steady state* (dipisahkan dengan garis putus-putus).

6. KESIMPULAN

Studi tentang perilaku tekanan kontak pada pemodelan keausan *running-in* dan *steady state* dengan pengujian *pin-on-disc* telah dilakukan. Pin dari baja dengan modulus elastisitas 213 GPa yang berujung bentuk setengah bola radius 5 mm diberi beban 15 N. Simulasi *finite element analysis* (FEA) dengan *software* ANSYS dilakukan untuk mengetahui tekanan kontak yang terjadi pada daerah kontak. Terlihat bahwa perilaku tekanan kontak pada saat inisial *sliding* mencapai 1167,70 MPa kemudian secara gradual mengalami penurunan sampai keadaan stabil tercapai, meskipun terjadi peningkatan jarak *sliding*. Tekanan kontak rata-rata mulai mengalami kestabilan pada kisaran 63,82 MPa pada jarak *sliding* $s = 80405$ mm. Pada saat inilah fase *running-in* berakhir dan dimulainya fase *steady state* dengan indikasi kestabilan tekanan kontak pada ujung pin (*center node*) dan juga kestabilan tekanan kontak rata-rata pada daerah kontak.

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.
- Hegadekatte, V. (2006), *Modelling and Simulation of Dry Sliding Wear for Micro-machine Applications*, PhD Dissertation, Universität Karlsruhe (TH) Kaiserstrasse, Germany.
- Hegadekatte, V., Huber, N. and Kraft, O., (2005), "Development of a simulation tool for wear in microsystems", in *Advanced Micro and Nano Systems - Micro-engineering in Metals and Ceramics Design Part II*, ed. Löhe, D., Haußelt, J.H. Balthes, H., Brand, O., Fedder, G.K., Hierold, C., Korvink, J.G. and Tabata, O., Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim, Germany, 605-624.
- Hegadekatte, V., Kuzenhäuser, S., Huber, N., and Kraft, O. (2008), "A predictive modeling scheme for wear in tribometers", *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., Tauviquirrahman, 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", *8th ASEAN ANSYS Conference 2010*, Singapore, 12-13 Oktober 2010.
- Jamari, Saputra, E., Ismail, R., Tauviquirrahman, M., and Schipper, D.J. (2010), "Surface topographical change due to sliding contact", *Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi FT. Unwahas* - ISBN 978.602.8273.25.1, Kel. D, 43-48.
- 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.
- Kraghelsky, V., Dobychn, M.N., and Kombalov, V.S. (1982), *Friction and Wear Calculation Methods*, Pergamon Press, Oxford.
- 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.
- Saputra, E. (2010), *Perhitungan Keausan Pin pada Sistem Kontak Sliding Pin-on-disc Menggunakan Metode Analitik dan Metode Elemen Hingga*, Tugas Sarjana, Universitas Diponegoro, Semarang.
- Syafa'at, I., Widyanto, S.A., Jamari, dan Ismail, R. (2010), "Pengaruh pemodelan tekanan kontak rata-rata terhadap model keausan kontak *sliding* antara silinder dengan bidang datar", *Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi FT. Unwahas* - ISBN 978.602.8273.25.1, Kel. D, 37-42.
- Zakariya, A. (2010), *Prediksi Keausan Pin pada Pin-on-Disc Sliding Contact System Menggunakan Metode Elemen Hingga*, Tugas Sarjana, Universitas Diponegoro, Semarang.