
PEMODELAN KEAUSAN PADA KONTAK SLIDING ANTARA A RIGID SMOOTH HEMISPHERE AGAINST A ROUGH SURFACE

Qomaruddin

Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Muria Kudus
Gondangmanis PO. Box 53 - Bae, Kudus, telephone 0291 4438229 – 443844, Fax 0291 437198
E-mail: qomaruddin71@gmail.com

Abstrak

Kualitas kekasaran permukaan memiliki peranan yang sangat penting dalam manufaktur. Hal ini penting untuk mempertahankan kekasaran permukaan yang diinginkan selama proses pemotongan. Sejalan dengan hal tersebut diperlukan model-model yang dapat digunakan untuk memprediksi kekasaran permukaan sesuai dengan parameter teknologi yang digunakan. Pemodelan bentuk kontak yang terjadi pada setengah lingkaran permukaan halus dan kaku terhadap kekasaran permukaan menggunakan metode elemen hingga dengan software Abaqus 6.5.1. Penggunaan pemodelan keausan kontak ini mempunyai manfaat terhadap prediksi luluhnya material yang merupakan awal dari proses keausan yang dapat mendekati kenyataan yang sesungguhnya. Manfaat penelitian secara umum adalah dengan diketahuinya prediksi keausan yang terjadi maka usaha pencegahan keausan dapat lebih efektif. Prediksi luluhnya material yang merupakan awal dari proses keausan akan dapat mendekati kenyataan yang sesungguhnya. Tujuan penulisan ini untuk mengetahui deformasi yang terjadi pada daerah, yaitu elastis-plastis. Dalam hal ini tekanan kontak maksimum dan jari-jari permukaan kontak yang terjadi adalah antara a rigid smooth hemisphere against a rough surface. Dari hasil pemodelan kemudian dilakukan perhitungan dengan pendekatan teori keausan milik Archard (1953). Pada analisa pemodelan digunakan dua buah material yang diantaranya: Copper spheres ($H = 1.2 \text{ GPa}$, $E = 120 \text{ GPa}$, $\nu = 0.35$ dengan Steel $E = 200 \text{ GPa}$, Poisson's ratio $\nu = 0.32$ dan tegangan luluh $S_y = 0.9115 \text{ GPa}$. Serta Pembebanan berupa interference (ω) pada hemisphere bagian atas dan hemisphere bagian bawah di-fixed.

Kata kunci: pemodelan, keausan, kontak, sliding, hemisphere.

Pendahuluan

Kualitas kekasaran permukaan memiliki peranan yang sangat penting dalam manufaktur. Hal ini penting untuk mempertahankan kekasaran permukaan yang diinginkan selama proses pemotongan. Sejalan dengan hal tersebut diperlukan model-model yang dapat digunakan untuk memprediksi kekasaran permukaan sesuai dengan parameter teknologi yang digunakan. *Cutting parameter* adalah variabel yang non-linear, interdependen atau sulit untuk mengukur dengan presisi yang memuaskan. Model seperti itu akan meningkatkan pemahaman tentang pembentukan kekasaran permukaan berbagai proses sesuai dengan parameter teknologi yang digunakan. Pada hampir semua proses dan peralatan mekanik terutama saat komponennya bekerja, terjadi kontak satu sama lain yang dapat berupa kontak statis (*static contact*), *sliding contact*, atau *rolling contact*. Dalam skala kecil kita dapat mengetahui bahwa *asperity* terdeformasi selama terjadi kontak atau ketika dua permukaan benda ditekan bersamaan. Dalam skala besar informasi ini mungkin berguna dalam menganalisa gesekan (*friction*), keausan (*wear*), pelumasan (*lubrication*), dan sebagainya.

Ilmu mekanika kontak (*contact mechanics*) merupakan bagian dari ilmu tribologi yang membahas mengenai deformasi dan tegangan dua benda yang bersinggungan satu sama lain. Kontak yang terjadi antara dua benda dapat berupa titik (*point*), garis (*line*) ataupun permukaan (*surface*). Jika kontak yang terjadi diteruskan dengan dikenai suatu beban kontak, maka kontak yang awalnya berupa suatu titik dapat berubah menjadi bentuk ataupun permukaan yang lain.

Banyak teori tentang analisa kontak yang telah dibahas dalam beberapa penelitian salah satunya teori Hertz yang membahas tentang kontak elastis. Salah satu model awal tentang kontak elastis telah dikembangkan oleh Greenwood dan Williamson pada tahun 1966. Pada tahun 2002 L. Kogut dan Etsion menganalisa model kontak dalam rejim elastis-plastis antara bola dengan plat kaku menggunakan metode elemen hingga. Kemudian teori kontak elastis untuk bentuk *ellipsoid* dibangun berdasar eksperimen oleh Jamari dan Schipper (*JS model*) pada tahun 2006 mengacu pada teori Hertz.

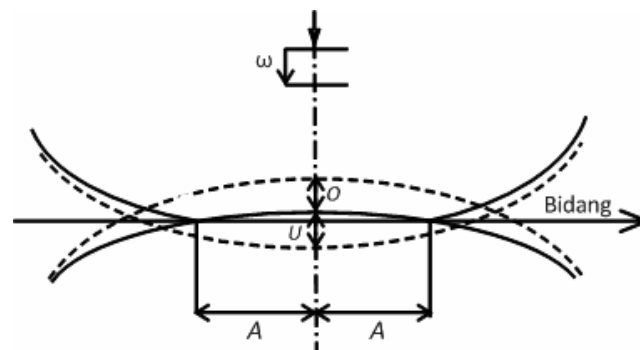
Metodologi

2.1. Kontak Permukaan

Ketika dua permukaan benda, yang kasar jika diamati dalam skala mikro, ditekan (kontak) dan diberi beban bersama-sama maka akan terjadi deformasi pada kedua permukaannya. Dalam hubungannya dengan pergerakan relatif pada permukaan, jenis kontak permukaan yang terjadi dapat berupa *sliding*, *rolling* dan *spining* (Johnson, 1985). *Sliding* adalah pergerakan benda dengan kecepatan relatif antara dua benda yang bersentuhan/kontak pada titik kontak O dalam bidang singgung (tangent plane) seperti terlihat dalam Gambar 2.1. *Rolling* ialah kecepatan sudut relatif (*relative angular velocity*) dari dua benda tentang axis lying dalam bidang singgung. Sedangkan *spinning* adalah kecepatan sudut relatif tentang normal umum yang melewati titik kontak O antara dua benda yang bersentuhan dalam bidang singgung. Bagian ini akan mengulas masalah kontak statis dan dinamis. Secara umum, pada kontak statis terdapat penyebaran secara acak adanya titik kontak yang kecil. Ketika permulaan kontak dinamis dimulai, jumlah titik kontak asperiti berkurang dan titik kontak akan nampak membesar. Gumpalan partikel yang aus (*debris*) akan bergerak menuju permukaan yang lain sebagai akibat dari interaksi mekanis antar asperiti sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 2.2, terlihat jelas perbedaan antara keduanya. Berikut ini akan dibahas masalah kontak statis dan dinamis dilihat dari temuan para peneliti yang telah dipublikasi.

2.1.1. Kontak Statis

Kontak statis bermula ketika beban dikenakan pada benda. Dalam skala mikro, surface yang merupakan sekumpulan dari asperiti-asperiti akan mengalami deformasi. Daerah kontak akan bertambah banyak seiring dengan meningkatnya jumlah asperiti yang saling kontak karena peningkatan beban. Akibat selanjutnya adalah muncul fenomena deformasi. Deformasi yang terjadi karena beban vertikal yang didefinisikan Jackson et al. (2005) dapat berupa elastis, elastis-plastis atau plastis. Rejim elastis mengacu pada ketiadaan deformasi plastis.

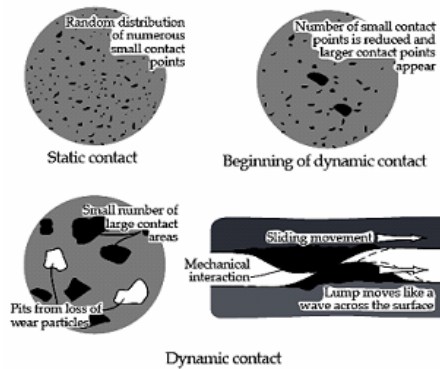


Gambar 2.1. Geometri kontak pada *hemisphere*.

Yaitu ketika beban yang dikenakan pada benda dihilangkan, maka benda tersebut dapat kembali ke bentuk asal. Rejim Elastis-plastis ialah keadaan transisi dari elastis ke plastis. Dalam rejim ini, benda terdeformasi plastis tetapi daerah kontak masih berada pada daerah elastis serta kondisi ketiga adalah kondisi plastis (*fully plastic*). Kondisi ini terjadi bilamana daerah kontak telah terjadi luluh sepenuhnya, yaitu nilai modulus elastisitas suatu material sudah terlewati.

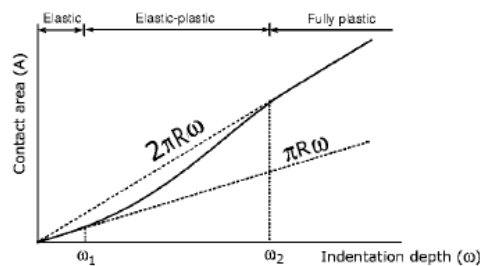
Untuk mempermudah dalam menganalisa kontak, para peneliti membangun sebuah model. Model dapat berupa formula matematis ataupun bentuk asperiti. Bentuk asperiti dapat disederhanakan dengan memodelkannya dalam bentuk bola (*sphere*), setengah bola (*hemisphere*), elips (*ellips*) ataupun bentuk datar (*flat*). Pendekatan model ini dapat diperoleh dengan *finite element* dan juga data hasil percobaan.

Fenomena beralihnya keadaan dari elastis menuju plastis pada tingkat asperiti, sangat menarik untuk dikaji. Zhao et al. (2000) menggunakan parameter ω sebagai kedalaman penetrasi untuk menganalisanya. Diagram kedalaman indentasi sebagai fungsi daerah kontak seperti terlihat dalam Gambar 2.3. Keadaan ini yang dikenal sebagai elastis-plastis. Dalam analisisnya, model ini mengidentifikasi bahwa kondisi plastis akan terjadi ketika asperiti terdeformasi lebih besar 54 kali dari permulaan luluh (lihat Pers. 3).



Gambar 2.2. Perbedaan kontak statis dan dinamis (Stachowiak, 2000).

Tetapi Kogut dan Etsion (2002) dengan pemodelan elemen hingga, besaran konstanta peralihan ini berbeda dengan Zhao et al. (2000), yaitu 110. Jadi kondisi plastis (*fully plastic*) terjadi ketika identasi dalam keadaan elastis ditingkatkan sampai 110 kalinya.



Gambar 2.3. Daerah kontak sebagai fungsi kedalaman identasi pada kondisi elastis-plastis yang dikembangkan oleh Zhao et al. (2000).

Penelitian dengan kondisi kontak statis mulai dilakukan oleh Hertz (1882). Teori Hertz membahas tentang kontak elastis. Daerah kontak elastis sebagai fungsi kedalaman identasi seperti terlihat dalam Pers. (1).

$$A_e = \pi R \omega \dots \dots \dots [1]$$

Perkembangan ilmu ini agak lambat pada awalnya. Temuan Abbot dan Firestone (1933) tentang model profilometric atau model surface micro-geometry telah mendasari tentang prinsip-prinsip mekanika kontak plastis. Tabor (1951) mengemukakan bahwa dalam kondisi plastis, kekerasan material H adalah sebesar tiga kali tegangan luluhnya. Sedangkan Williams (1994) besaran H adalah 2.83 kali tegangan luluh. Berikutnya barulah Greenwood (1966) mengembangkan temuan Hertz. Hertz memperkenalkan interference ω sebagai variabel yang penting untuk mengetahui deformasi elastis. Chang et al. (1987) mengembangkan model kontak dalam dua rejim yaitu kontak elastis dan plastis. Dalam temuannya tidak ada daerah peralihan dari elastis ke plastis. Zhao et al. (2000) mulai mengembangkan kontak elastis-plastis secara analitik dalam tiga kondisi yaitu kontak elastis, elastis-plastis dan plastis seperti terlihat dalam Gambar 2.4. Dari daerah kontak elastis (A_e) dalam Pers. (1) yang menggunakan model Hertz (1882) dan daerah kontak plastis (A_p) dari Abbot dan Firestone (1933) dalam Pers. (2), dikembangkanlah teori elastis-plastis. Parameter penting model elatis-plastis Zhao et al. (2000) adalah titik awal luluh sebagai fungsi kedalaman identasi seperti dalam Pers. (3).

$$A_p = 2\pi R \omega \dots \dots \dots [2]$$

$$\omega_2 = 54 \omega_1 \dots \dots \dots [3]$$

Dalam Pers. (1), (2) dan (3), A_e adalah daerah kontak elastis model Hertz, A_p adalah daerah kontak plastis model Abbot dan Firestone, R adalah jari-jari kontak, ω adalah kedalaman identasi, ω_1 adalah kedalaman identasi kondisi elastis, dan ω_2 adalah kedalaman identasi kondisi plastis. Kedalaman identasi (ω) di sini adalah sebuah sistem yang melibatkan besaran tekanan kontak, kekerasan, modulus elastisitas material serta jari-jari *asperity*.

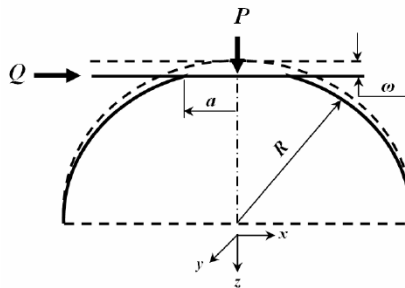
2.1.2. Kontak Dinamis

Kontak dinamis terbagi menjadi dua bagian. Bagian pertama tentang kontak luncur (*sliding contact*) dan yang kedua tentang kontak bergulir (*rolling contact*).

2.1.2.1. Kontak Luncur (*Sliding Contacts*)

Kontak ini terjadi karena adanya beban tangensial sehingga gerakan luncur bisa terjadi. Sedangkan pada kontak statis hanya ada gaya normal saja. Beberapa peneliti mengkombinasikan antara kedua beban tersebut. Karena pada kenyataannya gerakan sliding yang merupakan awal terjadinya gesekan, bermula dari kontak statis.

Pemodelan dengan menggunakan deformable sphere dan rigid flat untuk menganalisa permulaan sliding dengan elemen hingga telah dikembangkan oleh Kogut (2003) untuk mengevaluasi beban tangensial maksimum (Gambar 2.4). Dalam penelitiannya, ditemukan dua model kegagalan saat permulaan *sliding*. Yaitu pada daerah kontak dan daerah di bawah kontak.



Gambar 2.4. Model kontak antara deformable sphere dan rigid flat pada kombinasi beban normal P dan beban tangensial Q (Kogut, 2003).

2.1.2.2. Kontak Bergulir (*Rolling Contacts*)

Gerakan dalam rolling contact diklasifikasikan menjadi (Halling, 1976): (i) Bergulir bebas (*free rolling*), (ii) Bergulir dengan tujuan untuk *traction* (*rolling subjected to traction*), (iii) Bergulir dalam alur *conforming* (*rolling in conforming grooves*) dan (iv) Bergulir di sekitar kurva (*rolling around curves*). Setiap gerakan yang bergulir, jenis *free rolling* pasti terjadi, sedangkan jenis (ii), (iii) dan (iv) terjadi secara terpisah atau dapat juga kombinasi, tergantung pada situasinya. Kasus berputarnya roda mobil adalah melibatkan gerakan (i) dan (ii).

2.1.3. Model-Model Keausan

Pengertian keausan secara umum adalah hilangnya bagian material pada suatu benda karena berbagai faktor. Banyak faktor yang menyebabkan keausan pada suatu permukaan, salah satunya adalah keausan yang diakibatkan oleh permukaan yang saling bergesekan satu sama lain.

2.1.3.1. Model keausan Archard

Archard (1953) mengusulkan suatu model pendekatan untuk mendeskripsikan keausan *sliding*. Dia berasumsi bahwa parameter kritis dalam keausan *sliding* adalah medan tegangan di dalam kontak dan jarak *sliding* yang relatif antara permukaan kontak. Model ini sering dikenal sebagai hukum keausan Archard (*Archard's wear law*).

$$\frac{V}{s} = k \cdot \frac{F_N}{H} \quad \text{atau} \quad V = k_D \cdot F_N \cdot s \quad \dots \dots \dots [4]$$

dimana V adalah volume material yang hilang akibat keausan, s adalah jarak *sliding*, F_N adalah beban normal, H adalah kekerasan dari material yang mengalami keausan, k adalah koefisien keausan tak berdimensi, k_D adalah koefisien keausan yang berdimensi. Koefisien keausan k , merupakan satu konstanta yang disediakan untuk mencocokkan perhitungan antara teori dan percobaan.

Untuk aplikasi *engineering*, kedalaman atau ketinggian keausan memiliki lebih banyak keuntungan, dibanding volume keausan. Maka Archard membagi kedua sisi dari persamaan (5) dengan daerah kontak yang nyata A , sehingga,

$$\frac{h^w}{s} = k_D \cdot p \dots \dots \dots [5]$$

dimana h^w adalah tinggi keausan, dan p adalah tekanan kontak (*contact pressure*).

2.1.3.2. Model keausan Sarkar

Pada tahun 1980, Sarkar memodifikasi model keausan Archard dengan pertimbangan adanya suatu koefisien gesek antara permukaan yang saling bergesekan. Seperti yang didiskusikan sebelumnya, hubungan antara koefisien gesek dan tingkat keausan lebih kompleks. Meskipun begitu, Sarkar telah memodifikasi suatu model keausan yang menghubungkan antara koefisien gesek dengan volume yang hilang dari bahan. Model keausan ini adalah pengembangan model keausan Archard, sehingga menjadi:

$$\frac{V}{s} = k \cdot \frac{F_N}{H} \cdot \sqrt{1 + 3\mu^2} \dots \dots \dots [6]$$

dimana μ adalah koefisien gesek, V adalah volume material yang hilang akibat keausan, s adalah jarak *sliding*, F_N adalah beban normal, H adalah kekerasan dari material yang mengalami keausan, k adalah koefisien keausan tak berdimensi.

2.1.3.3. Metode prediksi keausan Podra

Podra telah melakukan suatu perhitungan keausan dengan cara membandingkan antara hasil percobaan dengan simulasi menggunakan *Finite Element Method (FEM)*. Tugas utama dari *FEM* adalah untuk menghitung tekanan kontak (*contact pressure*). Perhitungan keausan memakai *FEM* melibatkan penyelesaian masalah kontak secara umum antara benda yang saling kontak dengan menggunakan model dua dimensi (2D).

2.1.3.4. Metode prediksi keausan Hegadekatte

2.1.3.4.1. Metode analitik

Global incremental wear model (*GIWM*) adalah sebuah metode pendekatan nilai keausan secara analitik yang ditawarkan oleh Hegadekatte. Istilah “*global*” digunakan untuk menunjukkan bahwa skema pemodelan keausan ini hanya mempertimbangkan jumlah secara menyeluruh (*global*), seperti tekanan kontak rata-rata dan bukan jumlah yang lebih spesifik pada suatu lokasi, misal tekanan kontak lokal. Metode perhitungannya meliputi: modulus elastis dari permukaan, penghitungan jari-jari kontak awal, bentuk (*deformasi*) karena kontak normal, dan kemudian jumlah keausan berikutnya dihitung untuk setiap kenaikan jarak *sliding*.

2.1.3.4.2. Metode elemen hingga

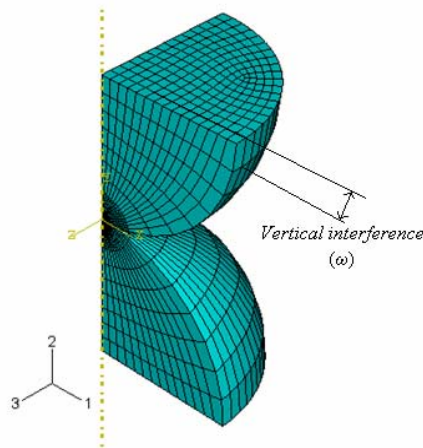
Hegadekatte telah membuat sebuah metode perhitungan keausan menggunakan metode elemen hingga yang merupakan pengembangan dari metode elemen hingga yang telah dilakukan oleh Podra. Perbedaan paling mendasar antara metode elemen hingga Hegadekatte dengan Podra adalah dalam pembuatan model geometrinya, kalau Podra menggunakan model dua dimensi (2D) sedangkan Hegadekatte menggunakan model tiga dimensi (3D).

Hasil dan Pembahasan

3.1. Kontak Statis Elastis Plastik

Langkah awal pada pendekatan keausan dengan *FEM* perlu dilakukan validasi awal, yaitu nilai *contact pressure* dari *FEM* dibandingkan dengan hasil perhitungan secara analitik dengan menggunakan teori kontak Hertz. Setelah dibandingkan, hasil seperti ditunjukkan pada gambar berikut:

Gambar 3.1, disamping merupakan model yang dibuat dengan *software* ABAQUS 6.5.1. Kedua *hemisphere* dengan bahan *steel* diberi beban kontak sebesar $\omega = 0.22143$ mm. Untuk mendapatkan hasil analisa yang mendekati kebenaran perlu dilakukan *refine mesh* untuk memperbanyak *element* dan *nodal* yang akan memberikan dampak waktu untuk *solving* cukup lama.

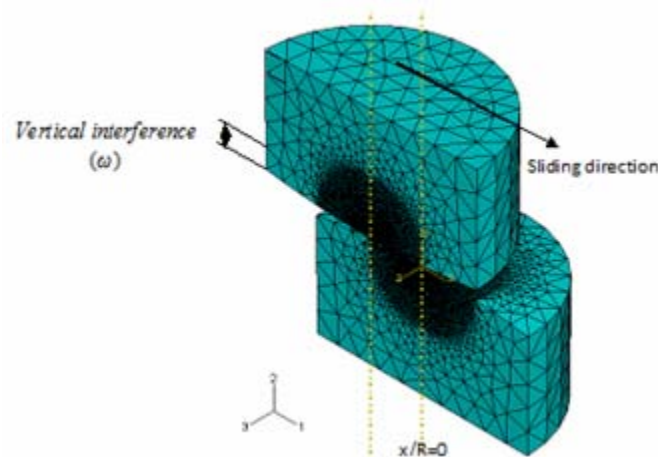


Gambar 3.1. Model kontak *hemisphere* dengan bahan *steel* diberi beban.

Kontak pada permukaan *hemisphere* menimbulkan tekanan pada tiap-tiap *nodal* dengan nilai dan arah yang berbeda. Tekanan tiap-tiap *nodes* pada luas permukaan kontak *hemisphere* dapat dinyatakan menurut teori Hertz.

3.2. Kontak *Sliding Elastis-Plastis*

Proses *sliding* antar *hemisphere* dimodelkan saat posisi awal berada pada titik singgung daerah $x/R < 0$ dan berakhir pada titik singgung daerah $x/R > 0$, dimana pada *hemisphere* atas memiliki *vertical interference* sebesar ω . Kasus *moving contact* ini disimulasikan sebagai proses *frictionless* dan tidak ada input koefisien gesek pada *present model*.



Gambar 3.2. Kasus *moving contact* ini beban *sliding* yang diberikan mulai dari posisi $x/R < 0$ sampai $x/R > 0$ memiliki nilai *interference* sama seperti pada saat kontak elastis plastis.

Kesimpulan:

1. Kontak pada permukaan *hemisphere* menimbulkan tekanan pada tiap-tiap *nodal* dengan nilai dan arah yang berbeda. Tekanan tiap-tiap *nodes* pada luas permukaan kontak *hemisphere* dapat dinyatakan menurut teori Hertz.
2. Nilai variabel *contact area* akan semakin meningkat seiring dengan meningkatnya jarak *sliding*. Sehingga nilai distribusi *contact pressure* dipastikan akan semakin mendekati rata sebanding dengan meningkatnya *contact area*

Daftar Pustaka

ABAQUS (2004), V 6.5. Hibbit, Karlsson and Sorensen Inc., Providence, RI, USA.
Archard, J. F. (1953), "Contact and rubbing of flat surfaces", J. Appl. Phys., 24, 981-988.

-
- Chang, W.R., Etsion, I. and Bogy, D.B. (1987), "An elastic-plastic model for the contact of rough surfaces", *ASME J. Tribol.*, 109, 257-263.
- Greenwood, J. A. and Williamson, J. B. P. (1966), "Contact of nominally flat surfaces", *Proc. R. Soc. London*, 295, 300-319.
- Hegadekotte, V. (2006), *Modelling and Simulation of Dry Sliding Wear for Micro-machine Applications*, PhD Disertation, Universität Karlsruhe (TH) Kaiserstrasse, Germany.
- 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 Beforderung des Gewerbefleisses*, Leipzig, Nov 1882.
- Jackson, R.L., Chusoipin, I. dan Green, I., (2005), "A finite element study of the residual stress and deformation in hemispherical contacts", *ASME J. Tribol.*, 127, 484-491.
- 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.
- Kogut, L. and Etsion, I. (2002), "Elastic-plastic contact analysis of a sphere and a rigid flat", *ASME J. Appl. Mech.*, 69, 657 – 662.
- Podra, P. and Andersson, S. (1999), "Simulating sliding wear with finite element method", *Tribol. Int.*, 32, 71-81.
- Sarkar, A. D. (1980), *Friction and Wear*, Academic Press, London.
- Stachowiak, G.W. and Batchelor, A.W. (2000), *Engineering Tribology 2nd Ed.*, Butterworth-Heinemann.
- Zhao, Y., Maietta, D. M. and Chang, L. (2000), "An asperity microcontact model incorporating the transition from elastic deformation to fully plastic flow", *ASME J. Tribol.*, 109, 86-93.