

KEAUSAN PADA KONTAK LUNCUR *PIN-ON-DISC*: SEBUAH TINJAUAN PUSTAKA

Imam Syafa'at¹⁾

Staf Pengajar Fakultas Teknik Universitas Wahid Hasyim
Jl. Menoreh Tengah X/22 Sampangan Semarang 50236, Telp. (024) 8505681, Fax. (024) 8505681.

Abstrak

Tribologi sebagai ilmu yang mempelajari tentang gesekan, keausan dan pelumasan sangat erat kaitannya dalam bidang engineering. Dalam hubungannya dengan pergerakan relatif dua buah permukaan benda yang saling kontak, jenis kontak dibedakan atas kontak statis dan dinamis. Dalam kontak dinamis, gerakan benda terbagi atas kontak luncur (*sliding contact*) dan kontak bergulir (*rolling contact*).

Fenomena keausan akibat gesekan menjadi kajian yang menarik untuk diteliti. Model yang dibangun dapat berupa data hasil eksperimen ataupun hasil simulasi dengan bantuan software. Paper ini mereview penelitian-penelitian yang menggunakan *finite element analysis (FEA)* untuk meneliti kedalaman aus pada *pin-on-disc*. Hasil review ini menunjukkan bahwa berbagai penelitian tentang keausan yang telah dilakukan pada umumnya berangkat dari model keausan yang dibangun oleh Archard. Meskipun membutuhkan waktu yang relatif lama, penggunaan simulasi *FEA* dengan bantuan software dalam merumuskan keausan perlu dilakukan karena simulasi ini membutuhkan biaya yang relatif lebih murah. Untuk penelitian ke depan, perlu dikembangkan penelitian tentang kedalaman keausan pada kontak luncur dengan *FEA*.

Kata kunci: *sliding wear, pin-on-disc, keausan Archard, FEA*

1. PENDAHULUAN

Tribologi adalah ilmu yang membahas tentang gesekan, keausan, pelumasan pada permukaan dalam gerak relatif benda. Mulai zaman dulu hingga muncul dan berkembangnya ilmu dalam bidang rancang bangun, fisika, kimia, geologi serta biologi seperti sekarang ini, keberadaan ilmu ini tetap ada [1]. Tribologi adalah masalah krusial dalam pemesinan yang melibatkan proses *sliding* dan *rolling*. Ilmu ini termotivasi dari sisi ekonomi sehingga finansial dapat dihemat sampai sebesar US\$16 milyar di Negara Amerika dan £500 juta di Inggris jika tribologi diterapkan dengan semestinya. Hal ini bisa dilihat dari laporan H.P. Jost, Menteri Pendidikan Inggris pada tahun 1966. Dia memberikan laporan yang mengejutkan kepada parlemen tentang besarnya energi yang terbuang karena gesekan. Dalam laporannya yang terkenal dengan nama *The Jost Report*, pemborosan terutama disebabkan oleh keausan karena gesekan, munculnya panas akibat gesekan sehingga mengakibatkan material menjadi lunak dan memungkinkan rusak pada kontak permukaannya. Karena itu, prediksi yang akurat dari perubahan yang cepat pada proses kontak gesekan dan pengendalian terhadap hal tersebut adalah hal yang sangat penting dari sisi ekonomi [2].

Mekanika kontak adalah ilmu yang membahas tentang pergerakan relatif, gaya interaktif dan perilaku tribologi dari dua benda *rigid* atau *deformable* yang hanya bersentuhan ataupun sampai terlepas dan hilang-

nya permukaan material antara yang satu dengan yang lainnya selama batas waktu tertentu. Persinggungan atau kontak yang terjadi dapat berupa statis ataupun dinamis [3]. Pada permulaan kontak dinamis, jumlah titik kontak asperiti berkurang dan titik kontak akan nampak membesar. Partikel yang aus akan bergerak menuju permukaan yang lain sebagai akibat dari interaksi mekanis antar asperiti. Keausan karena gerakan *sliding* inilah yang dikenal sebagai *sliding wear*. Dari masa ke masa, keausan adalah sebuah fenomena yang sangat menarik untuk diteliti. Adanya temuan-temuan terbaru oleh para peneliti membuat semakin beragamnya teori tentang keausan. Oleh karena itulah diperlukan sebuah tinjauan pustaka untuk mengetahui teori-teori yang telah ada dan teori mana yang perlu dikembangkan lebih lanjut.

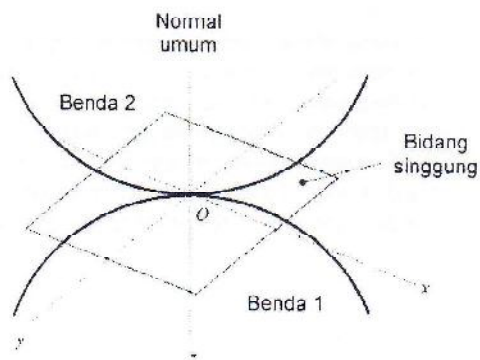
2. KONTAK PERMUKAAN

Dalam hubungannya dengan pergerakan relatif pada permukaan, jenis kontak permukaan yang terjadi dapat berupa *sliding*, *rolling* dan *spining* [4]. *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 1. *Rolling* ialah kecepatan sudut relatif (*relative angular velocity*) dari dua benda tentang *axis lying* dalam bidang singgung. Sedang *Spinning* adalah kecepatan sudut relatif tentang normal umum yang melewati titik kontak *O* antara dua benda yang bersentuhan dalam bidang singgung.

¹⁾ e-mail: immsyaf@yahoo.co.id

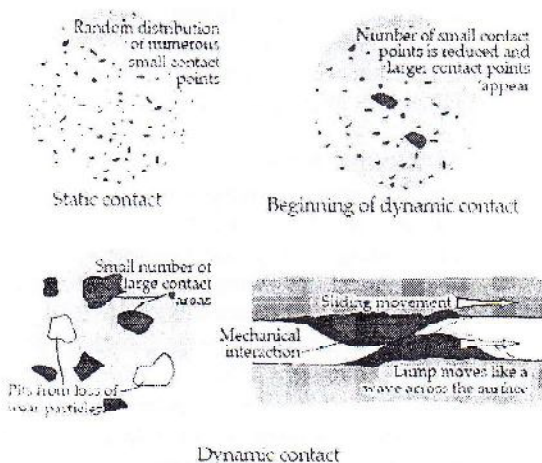
2.1. KONTAK STATIS

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.* [5] dapat berupa elastis, elastis-plastis atau plastis. Rejim elastis mengacu pada ketiadaan deformasi plastis.



Gambar 1. Kontak dua permukaan.

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. Dan 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.



Gambar 2. Perbedaan kontak statis dan dinamis [3].

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, terlihat jelas perbedaan antara keduanya. 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.

Penelitian dengan kondisi statis mulai dilakukan oleh Hertz (1882). Teori Hertz membahas tentang kontak elastis [6]. Perkembangan ilmu ini agak lambat pada awalnya. Temuan Abbot and Firestone [7] tentang model *profilometric* atau model *surface micro-geometry* di tahun 1933 telah mendasari tentang prinsip-prinsip mekanika kontak plastis. Berikutnya barulah Greenwood [8] mengembangkan temuan Hertz. Hertz memperkenalkan *interference* ω sebagai variabel yang penting untuk mengetahui deformasi elastis. Chang *et al.* [9] mengembangkan model kontak dalam dua rejim yaitu kontak elastis dan plastis. Dalam temuannya tidak ada daerah peralihan dari elastis ke plastis. Zhao *et al.* [10] mulai mengembangkan kontak elastis-plastis secara analitik dalam tiga kondisi yaitu kontak elastis, elastis-plastis dan plastis.

Kontak model elips yang dibangun berdasar eksperimen oleh Jamari [11] menghasilkan persamaan empiris dengan mengembangkan model [10] bahwa daerah kontak pada kondisi elastis-plastis A_{ep} sebagai:

$$A_{ep} = 2\pi R_m \omega \frac{\alpha}{\beta} + \left(2\pi \sqrt{R_x R_y} \omega - 2\pi R_m \omega \frac{\alpha\beta}{\gamma} \right) \left[3 \left(\frac{\omega - \omega_1}{\omega_2 - \omega_1} \right)^2 - 2 \left(\frac{\omega - \omega_1}{\omega_2 - \omega_1} \right)^3 \right] \quad (1)$$

dimana ω ialah *interference*, angka kecil 1 dan 2 masing-masing menunjukkan material 1 dan 2, α dan β merupakan *semi-axis* dari kontak elips masing-masing dalam arah sumbu x dan sumbu y, γ *interference* dari kontak elips (besaran tanpa satuan). Radius efektif rata-rata R_m dicari dengan perhitungan yang melibatkan radius dalam arah sumbu x dan y. Dengan menurunkan persamaan Lin [12], beban kontak P_{ep} dapat dihitung dengan menggunakan faktor tekanan kontak maksimum K_v . Sehingga nilai beban kontak P_{ep} dihitung dengan memasukkan Persamaan (1) yaitu:

$$P_{ep} = A_{ep} \left[c_h H - H \left(c_h - \frac{2}{3} K_v \right) \frac{\ln \omega_2 - \ln \omega_1}{\ln \omega_2 - \ln \omega_1} \right] \quad (2)$$

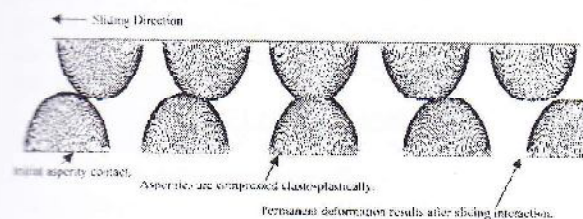
dimana c , ialah faktor kekerasan, H adalah kekerasan material, ω ialah *interference*, angka kecil 1 dan 2 masing-masing adalah menunjukkan material 1 dan 2. Catatan penting dalam model kontak elastis-plastis yang divalidasi dengan data eksperimennya bahwa prediksi *surface topography* setelah *running-in* of *sliding contact* menunjukkan hasil yang akurat antara model yang dibangun dengan data hasil eksperimen.

2.2. KONTAK DINAMIS

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

2.2.1. KONTAK LUNCUR (SLIDING CONTACTS)

Sliding contact dalam analisa Jackson *et al.* [13] menggunakan dua metode pendekatan. Dua pendekatan tersebut adalah secara semi analitis dan simulasi elemen hingga. Kedua analisa tersebut digunakan untuk membangun persamaan formula empiris yang diperoleh dari gaya tengensial rata-rata dan gaya normal selama proses *sliding* antar asperiti dalam rejim elastis-plastis. Gaya normal dan gaya tangensial yang terjadi dihitung saat kenaikan *tangential displacement*. Kemudian nilai rata-rata dari gaya yang dibutuhkan untuk meluncurkan asperiti dihitung. Persamaan empiris dari asperiti tunggal yang telah diperoleh dengan model semi analitis dan hasil simulasi elemen hingga, kemudian disubstitusi ke dalam model statistik, *fractal* atau model *Fast Fourier Transform (FFT)* untuk mengetahui gesekan antara dua *rough surface* yang meluncur. Gambar model asperiti yang mengalami proses *sliding* pada saat awal kontak sampai hilangnya puncak asperiti karena deformasi dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Proses meluncurnya asperiti dan penekanan sampai terjadi deformasi pada model [13].

Dari simulasi dihasilkan bahwa besaran energi yang hilang antar puncak asperiti akan meningkat sebagaimana meningkatnya deformasi plastis yang terjadi. Deformasi plastis pada *sphere* juga meningkat seiring dengan bertambahnya nilai modulus elastisitas dan meningkatnya *interference* atau beban normal antar *surface*.

Peneliti berikutnya adalah Vijaywargiya [14] yang mempergunakan *Finite Element Analysis (FEA)* untuk mensimulasikan *sliding* dalam 2D dan 3D. Deformasi, gaya reaksi, tegangan dan energi yang hilang sebagai fungsi dari jarak *sliding* adalah hasil

yang ditemukan dengan menggunakan pendekatan Green [15]. Hasil simulasi 3D memiliki tren yang sama dengan model 2D dalam hal *frictionless sliding* pada rejim elastis-plastis dengan gaya reaksi horisontal dan vertikal.

Moody [16] meneliti *vertical interference* dalam hubungannya dengan deformasi, gaya reaksi, tegangan dan energi yang hilang dengan model 3D. Hasil plot dari tegangan von Mises dipergunakan untuk menunjukkan adanya formasi dan distribusi tegangan seiring dengan meningkatnya deformasi plastis atas proses *sliding* yang terjadi. Ditemukan juga adanya peningkatan deformasi plastis dengan energi yang hilang selama *sliding* serta *residual deformations* sebagai fungsi dari *interference*.

2.2.2. KONTAK BERGULIR (ROLLING CONTACTS)

Gerakan dalam *rolling contact* diklasifikasikan menjadi [17]: (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).

Gesekan karena *rolling* adalah resistansi terhadap gerakan yang berlangsung ketika sebuah permukaan bergulir terhadap permukaan yang lain. Terminologi gesekan *rolling* umumnya terbatas pada benda dengan bentuk yang mendekati sempurna dengan tingkat kekasaran permukaan yang relatif kecil. Pada material yang keras, koefisien gesek *rolling* antara sebuah silinder dan benda hulat atau dengan benda datar adalah berkisar antara 10^{-5} sampai 5×10^{-3} . Koefisien dari *sliding friction* pada kondisi benda tanpa pelumas dari 0,1 sampai lebih besar dari 1 [18]. Jika kontak dari dua buah benda *non-conformal* adalah jenis titik, keadaan *rolling* murni berlaku di sini. Gesekan karena gerakan gulir dapat disebabkan oleh berbagai kasus, tetapi walau bagaimanapun, *slipping/sliding* lebih dominan sebagai penyebabnya [19]. Kekasaran adalah sebuah parameter penting dalam kontak bergulir dalam hubungannya dengan gesekan dan aus. Kesempurnaan geometri *rolling* dapat dikurangi dengan kekasaran sehingga *microslip* yang terjadi pada tingkat kekasaran saja. Deformasi plastis pada asperiti juga dapat menyebabkan hilangnya energi selama gerakan bergulir. Ditinjau dari sisi gaya gesek, permukaan yang halus mempunyai gaya gesek yang lebih kecil jika dibandingkan permukaan yang kasar. Hampir setiap kasus gesekan pada *rolling contact*, gaya gesek akan mengalami penurunan saat *running-in*.

3. KONTAK PERMUKAAN DAN KEAUSAN

Kausan adalah sebuah fenomena yang sering terjadi dalam *engineering*. Kausan 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 [20]. Mekanisme aus terbagi menjadi dua kelompok. Yaitu keausan karena perilaku mekanis dan keausan karena perilaku kimiawi [21]. Keausan mekanis terbagi atas: (1) *Sliding wear*, (2) *Fretting wear*, (3) *Abrasive wear*, (4) *Erosive wear*, dan (5) *Fatigue wear*. Sedangkan keausan karena adanya reaksi kimia yaitu: (1) *Solution wear*, (2) *Difusive wear*, (3) *Oxidative wear*, dan (4) *Corrosive wear*.

Keausan sebagai fenomena yang sulit dihindari dalam aplikasi di *engineering*, sebagaimana tersebut di atas, mulai diteliti oleh Archard [22]. 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. Persamaan klasik model ini ialah:

$$\frac{V}{s} = k \frac{F_N}{H} \quad (3)$$

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. Dengan membagi sisi kanan dan sisi kiri dengan daerah kontak yang sesungguhnya, maka Persamaan (3) menjadi:

$$\frac{h}{s} = k \cdot p \quad (4)$$

Dalam persamaan ini, p adalah tekanan dan h adalah *linear wear*. Persamaan ini dipergunakan sebagai ukuran besarnya keausan. Sangatlah sulit untuk mengukur secara akurat volume aus karena batas dari lintasan aus dibangun berdasar subjektivitas [23]. Dalam perkembangan model ini, koefisien aus k diinterpretasikan dalam beragam konsep. Koefisien aus sebagai kemungkinan tentang adanya kontak asperiti yang menghasilkan partikel keausan, koefisien aus sebagai pecahan dari partikel aus yang luluh asperitinya, koefisien aus sebagai perbandingan antara volume hasil aus dan volume yang terdeformasi, koefisien aus sebagai faktor pembanding terbalik dengan besaran kritis keausan yang berulang-ulang, dan koefisien aus sebagai faktor ke-tidakefisien-an yang berhubungan dengan berbagai proses dalam menghasilkan partikel keausan. Konsep-konsep tersebut di atas menunjukkan betapa kompleks dan rumitnya permasalahan keausan [24].

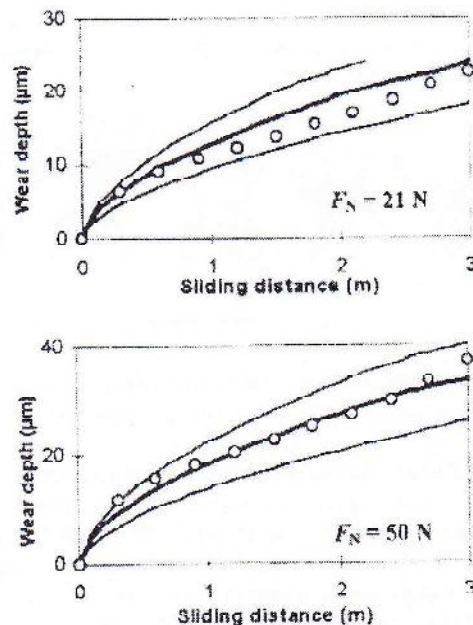
Pengembangan model yang dibangun Archard tentang hubungan antara koefisien gesek dan keausan dilakukan oleh Sarkar [25]. Dalam modelnya, volume material yang hilang dengan koefisien gesek dapat dihitung dengan persamaan:

$$\frac{V}{s} = k \frac{F_N}{H} \sqrt{1 + 3\mu^2} \quad (5)$$

dimana μ dalam Persamaan (5) adalah koefisien gesek, V adalah volume material yang hilang, s adalah jarak *sliding*, F_N adalah beban normal, H adalah kekerasan (material yang lebih lunak), dan k adalah koefisien aus. Jika diasumsikan semua variabel adalah konstan kecuali μ dan V , maka kondisi adalah tanpa gesekan. Hal ini sangat kontradiktif karena gesekan nol berarti tidak ada kontak fisik dan juga berarti tanpa keausan.

Seiring dengan berkembangnya ilmu pengetahuan dan teknologi, penggunaan perangkat lunak dalam komputer untuk mensimulasikan keausan mulai dikembangkan, khususnya model Archard. Strömberg [26] menggunakan formulasi elemen hingga untuk keausan thermoelastis, de Saracibar dan Chiumenti [27] menampilkan sebuah model numeris untuk mensimulasikan perilaku keausan gesek dalam kondisi nonlinear kinematis. Molinari [28] memodifikasi model Archard pada kekerasan dari material yang lebih lunak dengan kelonggaran dari sisi fungsi suhu, evolusi permukaan karena aus dan adanya kontak gesekan. Komputasi yang dilakukan Molinari adalah dengan mensimulasikan kontak yang sederhana dari sebuah kotak yang meluncur di atas piringan.

Podra [29] melakukan eksperimen dengan beban normal F_N 21N dan 50N pada *pin-on-disc* dengan asumsi bahwa aus hanya terjadi pada pin saja (lihat Gambar 4).



Gambar 4. Hasil simulasi FEA pada *sphere-on-plane* dengan koefisien aus $k = (1.33 \pm 0.54) \times 10^{-13} \text{ Pa}^{-1}$ (garis lurus, garis tebal adalah rata-rata) dibandingkan dengan data hasil eksperimen (lingkaran) [29].

Untuk membandingkannya, dilakukan juga dengan membangun model berdasar *FEA*. Hasilnya bahwa akurasi *FEA* tergantung pada diskritisasi model (*model discretisation*). *Meshing* yang halus akan memberikan hasil yang lebih baik, tetapi hal ini membutuhkan waktu komputasi yang lama dan penggunaan kapasitas komputer yang besar juga. Tahapan waktu (*integration time step*) adalah sebuah parameter yang krusial dalam memberikan hasil simulasi yang akurat. Jika terlalu panjang tahapannya, akan menyebabkan hasil yang tidak menentu dan kemungkinan tidak konvergen. Namun jika terlalu pendek intervalnya, maka waktu yang dibutuhkan untuk simulasi menjadi terlalu lama. Prosedur penelitian ini diawali dengan menentukan parameter awal untuk ukuran model, beban, *constraints*, besaran koefisien aus serta jenis materialnya. Setelah simulasi dijalankan dengan *structural static analysis*, maka diperoleh tekanan kontak. Dengan tekanan kontak ini, kemudian dihitung keausan pada *node* secara iteratif berdasar kedalaman keausan pada waktu tertentu. Hasil dari langkah ini adalah perubahan ukuran model. Selain kedalaman aus sebagai fungsi jarak luncur (*sliding distance*), temuan lainnya adalah bahwa besaran koefisien gesek dan koefisien aus berbanding lurus dengan jarak luncur. Sedangkan pada tekanan kontak, hasilnya berbanding terbalik terhadap jarak luncur.

Simulasi keausan yang lain juga dilakukan oleh Kónya [30] dengan dasar pijakan dari model [22] dan menerapkannya sebagai *post-processor* dalam elemen hingga. Asumsi-asumsi yang dipergunakan antara lain: (i) penyederhanaan model dalam dua dimensi, (ii) proses *re-meshing* dengan pembatasan pada keausan maksimal oleh ketinggian permukaan elemen dan (iii) penentuan keausan hanya pada salah satu permukaan sebagaimana hasil dari kontak *finite element*, atau penggunaan pasangan kontak (*contact pairs*) dengan pembuatan kontak simetris untuk mendapatkan hasil dari kontak *finite element* untuk semua kontak permukaan [31].

Salih *et al.* [32] mengembangkan sebuah model untuk keausan adesif pada saat permulaan *sliding*. Model tersebut dapat memprediksi volume dari partikel yang berpotensi aus. Koefisien aus k , sebagai parameter yang penting didapat dengan sebuah Persamaan (6), yaitu:

$$k = \frac{(22.8 \nu + 9.9)}{(67.3 \nu - 19)} \cdot (P^*)^{-0.055} \exp[4 \times 10^{-6} (\frac{E}{Y_0})^2] \quad (6)$$

dimana k ialah koefisien aus, ν adalah Poisson's ratio, P^* adalah *dimensionless normal load*, E adalah *Young's modulus* dan Y_0 adalah *yield strength*. Beberapa jenis material dalam eksperimennya dalam membangun persamaan di atas, dibandingkan dengan nilai k dari Archard [33]. Meski hasil k temuannya lebih kecil dari percobaan Archard, tetapi hal ini bisa diterima karena model ini terbatas pada prediksi

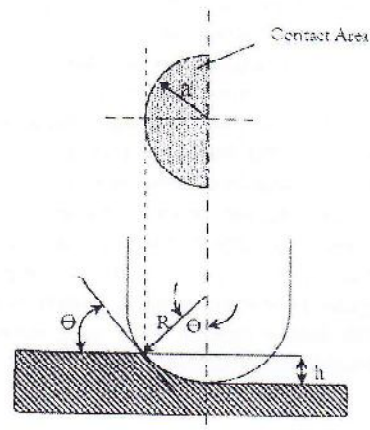
potensi partikel yang aus, bukan partikel aus yang sebenarnya. Dari model di atas, terlihat bahwa sifat dari material, seperti *Poisson's ratio*, *Young's modulus* dan *yield strength* sangat berpengaruh dalam memperkirakan keausan secara adesif.

Zhu *et al.* [34] menampilkan rejim *mixed lubrication* untuk mensimulasikan *sliding wear* dalam tiga model kontak. Penelitian ini menggunakan pendekatan numeris berdasar pada rejim *elastohydrodynamic lubrication* (EHL) yang sebelumnya telah dikembangkan oleh Zhu dan Hu [35]. Tiga simulasi kontak dalam rejim EHL adalah: (1) kontak antara permukaan bola halus yang meluncur dengan permukaan rata yang memiliki kekasaran sinusoidal, (2) kontak antara sebuah bidang datar pada landasan (*ground*) dengan bola yang keduanya saling berputar, dan (3) kontak antara bola pada piringan (*ball-on-disc*). Ditemukan bahwa pada simulasi 500 putaran pertama, tidak terjadi keausan pada ketiga jenis kontak, artinya bahwa pada tahap ini tidak dihasilkan volume keausan. Setelah itu terjadi peningkatan keausan secara cepat yang signifikan pada ketiga kasus, khususnya pada permukaan sinusoidal. Hasil ini adalah konsisten dengan pengamatan eksperimen pada tahap *running-in*. Peningkatan keausan secara cepat dan variasi intensitas dengan kondisi operasi yang berbeda juga dilakukan oleh Sugimura [36].

Hokkirigawa [37] dalam penelitian keausan *sliding hemispherical pin* pada permukaan datar (*flat*) menggunakan variasi material. Percobaan ini menggunakan spesimen piringan (*disc*) yang berputar pada *hemisphere pin* yang terbuat dari baja yang dikuens. Dalam penelitiannya diperkenalkan "Derajat Penetrasi" D_p sebagai indeks severitas luncur (*severity index of sliding*). Persamaan (7) memperlihatkan perhitungan D_p yaitu:

$$D_p = \frac{h}{a} \quad (7)$$

dimana h adalah kedalaman aus seperti terlihat dalam Gambar 5 dan a adalah radius kontak.



Gambar 5.5 kema kontak antara sebuah *hemispherical pin* dan *flat* dalam proses *sliding* [37].

Catatan menarik dari penelitian ini adalah bahwa derajat penetrasi dan tegangan geser sebagai indikator penting dalam penentuan keausan abrasif. Selama *sliding* berlangsung, keausan abrasif ditentukan oleh sejauh mana material bertahan terhadap proses abrasi yang berlangsung. *Wear rate value* dalam eksperimen ini adalah sebanding terhadap daerah kontak yang sesungguhnya, dimana hal ini ditentukan oleh kekerasan dari material yang lebih lunak dan besaran beban yang dikenakan, seperti apa yang telah dilakukan oleh Kruschov [38].

Hegadckatic [39] menampilkan *Global Incremental Wear Model (GIWM)* dengan pin yang diputar pada piringan. Keausan pin dan keausan piringan dihitug dengan model [22]. Perhitungan keausan *disc* menggunakan asumsi evolusi daerah kontak elips [25] dimana panjang kontak (sumbu minor elips), terus menurun ketika lebar bekas keausan (sumbu mayor elips), mengalami peningkatan. Permulaan untuk mencari keausan *disc* menggunakan jari-jari kontak awal dengan formula dari [6]. Metode *GIWM* ini juga dapat memprediksi kedalaman aus yang melibatkan variasi parameter dalam eksperimen dengan piringan kembar (*win-disc*) tribometer [40].

Keausan dalam skala makro diteliti oleh Nilsson [41]. Dalam temuannya diketahui adanya kontaminasi dalam kontak *rolling/sliding* yang dapat menyebabkan kerusakan yang besar pada kontak permukaan. Penelitian ini tentang keausan *spherical roller thrust bearings*. Dari hasil *SEM* terlihat bahwa ditemukan partikel yang menempel secara permanen pada *washer*, tetapi tidak pada *rollers*. Partikel dalam minyak pelumas mempunyai pengaruh yang signifikan dalam menyebabkan keausan.

4. KESIMPULAN

Tinjauan pustaka terhadap berbagai penelitian tentang keausan pada kontak luncur *pin-on-disc* telah dibahas. Terlihat bahwa penelitian tentang keausan yang telah dilakukan pada umumnya berangkat dari model keausan yang dibangun oleh Archard. Meskipun membutuhkan waktu yang relatif lama, penggunaan simulasi *FEA* dengan bantuan *software* dalam merumuskan keausan ini membutuhkan biaya yang murah. Hal ini disebabkan simulasi *FEA* tanpa menggunakan seperangkat alat uji dan juga spesimen. Keunggulan yang lain adalah hasil analisa bisa langsung dilihat dengan simulasi. Sedangkan pada metode analitik yang berupa formulasi angka-angka, disamping membutuhkan pemahaman konsep-konsep dasar dan penguasaan rumus dalam menganalisa sebuah kasus, hasil plot tidak bisa langsung terlihat sebagaimana pada *FEA*. Untuk ke depan, perlu dikembangkan penelitian tentang kedalaman keausan pada kontak luncur dengan *FEA* yang berbasis pada geometri awal dan *updated geometry*.

DAFTAR PUSTAKA

1. Urbakh, M., Klafter, J., Gourdon, D., and Israelachvili, J., The nonlinear nature of friction, *Nature*, **430**, 525-528, 2004
2. Bhushan, B., *Handbook of Micro/Nanotribology*. CRC Press LLC, New York, 1999
3. Stachowiak, G.W. and A.W. Batchelor., *Engineering Tribology 2nd Ed.*, Butterworth-Heinemann, 2000
4. Johnson, K. L., *Contact Mechanics*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1985
5. Jackson, R.L., Chusoipin, I. dan Green, I., A finite element study of the residual stress and deformation in hemispherical contacts, *ASME J. Tribol.*, **127**, 484-491, 2005
6. 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, Nov 1882.
7. Abbott, E.J. and Firestone, F.A., Specifying surface quality - a method based on accurate measurement and comparison, *Mech. Eng. (Am. Soc. Mech. Eng.)*, **55**, 569-572, 1933
8. Greenwood, J. A. and Williamson, J. B. P., Contact of nominally flat surfaces, *Proc. R. Soc. London*, **295**, 300-319, 1966
9. Chang, W.R., Etsion, I. and Bogy, D.B., An elastic-plastic model for the contact of rough surfaces, *ASME J. Tribol.*, **109**, 257-263, 1987
10. Zhao, Y., Maietta, D. M. and Chang, L., An asperity microcontact model incorporating the transition from elastic deformation to fully plastic flow, *ASME J. Tribol.*, **109**, 86-93, 2000
11. Jamari, J., *Running-in of Rolling Contacts*, PhD Thesis, University of Twente, Enschede, The Netherlands, 2006
12. Lin, L.P. and Lin, J.F., An elastoplastic microasperity contact model for metallic materials, *ASME J. Tribol.*, **127**, 666-672, 2005
13. Jackson, R.L., Duvvuru, R.S., Meghani, H., and Mahajan, M., An analysis of elasto-plastic sliding spherical asperity interaction, *Wear*, **262**, 210-219, 2006
14. Vijay wargiya, R., *A Finite Element Investigation of the Deformations, Forces, Stress Formation, and Energy Losses in Elasto Plastic Sliding Contact*, Master Thesis, Georgia Institute of Technology, Georgia, 2006
15. Green, I., Poisson ratio effects and critical values in spherical and cylindrical hertzian contacts, *Inter. J. Appl. Mech*, **10**, 451-462, 2005
16. Moody, J., *A Finite Element Analysis of Elastic-Plastic Sliding of Hemispherical*, Master Thesis, Georgia Institute of Technology, Georgia, 2007
17. Halling, J., *Introduction to Tribology*, Wykeham Publication Ltd., London, 1976

30. Bhushan, B., *Principles and Applications of Tribology*, John Wiley & Sons Inc., New York, 2000
31. Rabinowicz, E., *Friction and Wear of Materials*, John Wiley, New York, 1995
32. Bhui, P.J., Fifty years of research on the wear of metals, *Tribol. Int.*, **30**, 321-331, 1997
33. Sah, N. P., *Tribophysics*, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliff, New Jersey, 1986
34. Archard, J. F., Contact and rubbing of flat surfaces, *J. Appl. Phys.*, **24**, 981-988, 1953
35. Kalin, M. and Vizintin, J., Use of equations for wear volume determination in fretting experiments, *Wear*, **237**, 39-48, 2000
36. Rigney, D. A., The role of hardness in the sliding behavior of materials, *Wear*, **175**, 63-69, 1994
37. Sarkar, A. D., *Friction and Wear*, Academic Press, London, 1980
38. Strömberg, N., Finite element treatment of two-dimensional thermoelastic wear problems, *Comput. Methods Appl. Mech. Engg.*, **177**, 441-455, 1999
39. de Saracibar, C. A. and Chiumenti, M., On the numerical modeling of frictional wear phenomena, *Comput. Methods Appl. Mech. Engg.*, **177**, 401-426, 1999
40. 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
41. Podra, P. and Andersson, S., Simulating sliding wear with finite element method, *Tribol. Int.*, **32**, 71-81, 1999
42. Kónya, L., Váradi, K., and Friedrich, K., Finite element modeling of wear process of a peek-steel sliding pair at elevated temperature, *Periodica Polytechnica, Mechanical Engineering*, **49**, 25-38, 2005
43. AB AQUAS, V 6.5. Hibbit, Karlsson and Sorensen Inc., Providence, RI, USA, 2004
44. Salib, J., Kligerman, Y., and Etsion, I., A model for potential adhesive wear particle at sliding inception of a spherical contact, *Tribology Letter*, **30**, 225-233, 2008
45. Archard, J.F. and Hirst, W., The wear of metals under unlubricated conditions, *Proc. R. Soc. Lond. Ser. A*, **236**, 397-410, 1956
46. Zhu, D., Martini, A., Wang W., Hu, Y., Lisowsky, B., and Wang, Q.J., Simulation of sliding wear in mixed lubrication, *ASME J. Tribol.*, **129**, 545-552, 2007
47. Zhu, D., and Hu, Y. Z., A computer program package for the prediction of EHL and mixed lubrication characteristics, friction, subsurface stresses and flash temperatures based on measured 3-D surface roughness, *Tribol. Trans.*, **44**, 383-390, 2001
48. Sugimura, J., and Kimura, Y., Characterization of topographical changes during lubricated wear, *Wear*, **98**, 101-116, 1984
49. Hokkiri gawa, K. and Kato, K., An experimental and theoretical investigation of ploughing, cutting, and wedge formation during abrasive wear, *Tribol. Int.*, **21**, 51-57, 1988
50. Krusehov, M.M., Resistance of metal to wear by abrasion, as related to hardness, *Proc. Int. Conf. on Lubrication and Wear, I. Mech. E.*, London, 655-659, 1957
51. Hegadekotte, V., Modelling and Simulation of Dry Sliding Wear for Micro machine Applications, PhD Dissertation, Universität Karlsruhe (TH) Kaiserstrasse, Germany, 2006
52. Hegadekotte, V., Kuzenhäuser, S., Huber, N., and Kraft, O., A predictive modeling scheme for wear in tribometers, *Tribol. Int.*, **41**, 1020-1031, 2008
53. Nilsson, R., On Wear in Rolling/Sliding Contacts, PhD Thesis, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden, 2005