

TRIBOLOGI, DAERAH PELUMASAN DAN KEAUSAN

I. Syafa'at

Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknik
Universitas Wahid Hasyim
Semarang
JI Menoreh Tengah X/22
Semarang

Tribologi ialah ilmu yang mempelajari gesekan, aus dan pelumasan. Dengan tribologi pemborosan energi dapat dihemat. Seiring dengan peradaban manusia yang makin meningkat maka perkembangan ilmu ini juga meningkat. Dimulai dari bangsa Mesir sampai dengan peneliti-peneliti sekarang. Daerah pelumasan dibagi menjadi 3 rejim, yaitu: (Elasto) Hydrodynamic Lubrication, Boundary Lubrication, Mixed Lubrication. Proses aus terjadi pada Boundary lubrication. Keausan terdiri atas keausan adesif, keausan abrasif, keausan lelah permukaan dan keausan kimiawi. Usaha yang dilakukan untuk mengurangi aus diantaranya dengan pelumasan dan coating atau pelapisan logam pada permukaan.

Kata kunci : tribologi, pelumasan, keausan.

Pendahuluan

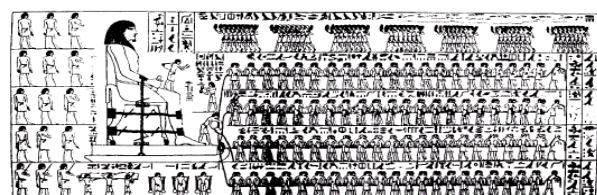
Jikalau dua benda bersentuhan sambil bergerak maka akan timbul gesekan. Orang juga dengan mudah mengerti bahwa akibat yang ditimbulkan gesekan bisa bermacam-macam misalnya bunyi mencicit, kenaikan suhu permukaan atau ausnya permukaan. Aktifitas manusia sehari-harinya juga tak luput dari gesekan ini, apalagi pada dunia industri. Mulai dari bangun tidur dengan menggeliat maka sendi-sendi bergesekan, mandi dengan menggosok sabun, menyikat gigi, jalan kaki, naik kendaraan, berputarnya roda, berputarnya bantalan dan masih banyak lagi.

Pada tahun 1966 di negeri pelopor industri modern Inggris, menteri pendidikan waktu itu H.P. Jost memberikan laporan yang mengejutkan kepada parlemen tentang besarnya energi yang terbuang karena gesekan. Dalam laporannya yang terkenal dengan nama The Jost Report disebutkan bahwa energi yang hilang di Inggris karena gesekan bila dikonversi setara dengan 1,3 NP Inggris waktu itu, atau sekitar 500 juta poundsterling [1]. Dari laporan Host inilah muncul istilah baru untuk ilmu tentang gesekan dan cara menguranginya yaitu, Tribologi. Negara-negara industri maju terkejut atas laporan Jost dan mulai mengadakan investigasi di negaranya masing-masing. Jepang yang baru saja menjadi negara industri segera mengadakan penelitian besar-besaran untuk mengurangi gesekan. Pada tahun 1971, pemerintah Jepang mengumumkan bahwa besar energi yang telah dihemat berdasarkan hasil penelitian mengenai tribologi setara dengan 2.6 NP atau sekitar 2 triliyun yen. Meski relatif terlambat, beberapa tahun kemudian Amerika Serikat mengumumkan bahwa penghematan energi berkat tribologi mencapai 0.9 NP atau sekitar enam persen dari konsumsi energi AS saat itu. Di era tahun delapan puluhan, di negara Jepang penghematan anggaran bisa mencapai 800 miliar sampai 1 triliyun yen tiap tahunnya pada industri dari sisi tribologi [2].

Sejarah Tribologi

Tribologi berasal dari bahasa Yunani, *tribos* yang artinya menggaruk (*rubbing*) atau mendorong

(*sliding*). Istilah ini dimunculkan oleh komite dari Organisasi untuk Kerjasama Ekonomi dan Pengembangan (*Organization for Economic Cooperation and Development*) di tahun 1967 [3]. Tribologi adalah ilmu dan teknologi yang interdisipliner tentang interaksi permukaan dalam pergerakan relatifnya. Dengan kata lain tribologi adalah pengetahuan tentang gesekan (*friction*), pelumasan (*lubrication*) dan aus (*wear*) [3-5]. Definisi dan istilah ini tidak terlalu mengikat dan baku, bahkan para ilmuwan Cina lebih senang memakai istilah *friction engineering* daripada Tribologi [1]. Sejarah tribologi berkembang terus seiring dengan semakin pesatnya peradaban manusia. Pembuatan roda kemungkinan berawal sekitar 6000 tahun yang lalu. Bangsa Inca yang telah maju peradabannya pun belum menggunakan prinsip roda [5]. Penggunaan tribologi yang lain muncul dari permulaan sejarah manusia sejak penggunaan alat pemantik api yang terbuat dari alat sejenis gerudi panah.



Gambar 1. Bangsa Mesir memindahkan Colossus pd tahun 1880 SM. Lukisan di dalam sebuah gua di El Bersheh [5].

Usaha pemindahan colossus pada Gambar 1, telah membawa bangsa Mesir kepada perkembangan tribologi yang besar. Ilustrasi dalam bentuk ukiran menggambarkan penggunaan rol dan alur untuk mengangkut bongkahan batu besar dan patung Colossus. Dengan 172 orang yang sedang menarik patung besar yang mempunyai berat kurang lebih 6×10^5 N di sepanjang laluan kayu. Patung tersebut ditumpu oleh papan lurus. Kalau dilihat lebih teliti, gambar itu menunjukkan seorang yang sedang berdiri di depan peluncur yang memberikan semacam pelicin di atas tempat peluncur tersebut. Misalkan setiap

orang menarik dengan daya 800 N sekali geser, maka bisa dihitung koefisien geseknya adalah

$$\mu = \frac{\text{jumlah orang} \times \text{daya perorang}}{\text{berat patung}} = \frac{172 \times 800}{6 \times 10^5} = 0,23$$

Jadi monumen Colossus yang memiliki tinggi 59 kaki atau sekitar 21 meter ini adalah salah satu bukti sejarah tentang adanya tribologi pada masa dahulu. Sebuah benang merah dalam akar sejarah tribologi adalah timbulnya gesekan dari dua permukaan yang bersentuhan. Dari adanya gesekan ini timbulah ide untuk melakukan pelumasan agar suatu benda bergerak lebih mudah.

Gesekan dan Misterinya

Karena tribologi dan gesekan tidak bisa dipisahkan, penting untuk menelusuri sejarah manusia modern mencoba membedah fenomena gesekan. Adalah si jenius Leonardo da Vinci (1452-1519) yang mula-mula merumuskan cara mengurangi gesekan dalam bentuk yang riil dan terstruktur. da Vinci meninggalkan sketsa *ball bearing* kayu yang sangat mirip dengan *ball bearing* logam yang dipakai saat ini. Di dunia modern sekarang, hampir semua alat yang bergerak memakai bantalan.

Dililhami oleh da Vinci, hukum-hukum fisika mengenai gesekan dirumuskan oleh dua ilmuwan secara terpisah yaitu Amontons (1699) dan selanjutnya Coulomb (1751) dan disebut Hukum Gesekan Amontons-Coulomb. Hukum ini sederhana dan berisi empat butir postulat [1]:

- 1) Gaya gesekan pada permukaan yang bersentuhan berbanding lurus dengan gaya tegak lurus pada permukaan tersebut.
- 2) Gaya gesekan tidak bergantung pada luas proyeksi permukaan yang bersentuhan.
- 3) Gaya gesekan tidak berhubungan dengan kecepatan sliding permukaan.
- 4) Gaya gesekan statis lebih besar daripada gaya gesekan dinamis

Postulat 1 dan 2, terbukti melalui penelitian (*empirically proved*) akurat untuk gesekan benda padat. Sementara itu, postulat 3 dan 4 dalam beberapa kasus tidak sesuai dengan hasil percobaan. Selama lebih dari dua ratus tahun hukum gesekan di atas (terutama hukum 1 dan 2) dipakai secara luas dan hampir semua disain alat mekanik modern menerapkan hukum ini. Yang unik, Hukum Amontons-Coulomb tidak memiliki pembuktian ilmiah yang akurat. Kehebatan hukum ini terletak pada hasilnya yang sesuai dengan eksperimen pada banyak kasus. Seolah-olah dua orang ilmuwan itu berkata, "Kami memang tidak tahu apa yang sebenarnya terjadi. Tapi buktinya hukum ini sesuai dengan percobaan".

Pada kenyataannya, sampai sekarang tak seorangpun yang berhasil menguak misteri yang terjadi di lapisan molekul dua permukaan yang

bergesekan. Misalnya pada fenomena anomali kekasaran permukaan (*surface roughness*) dan gaya gesekan. Secara sederhana kita akan mengambil kesimpulan bahwa semakin kecil kekasaran permukaan, artinya permukaan semakin licin, semakin kecil pula gaya gesekan yang timbul. Namun ternyata, bila kekasaran permukaan dikurangi terus sampai lebih kecil dari nilai kekasaran tertentu (kira-kira 0.5 micron,) gaya gesekan berbalik menjadi lebih besar. Fenomena ini gagal dijelaskan oleh hukum Amontons-Coulomb.

Penggunaan pelumas sudah sejak lama, tetapi Newton merupakan orang pertama yang mengkaji tentang hal ini. Di awal abad ke-19, Beauchamp Tower (1899), Osborne Reynolds (1886), Stokes serta Petrof juga ikut berperan dalam perkembangan tribologi. Hal ini tidak lain karena semakin maju peradaban manusia dengan ditandainya perkembangan di dunia industri. Selain hukum Amontons-Coulomb, teori modern tentang friksi dikembangkan oleh Bowden dan Tabor dengan teorinya yang disebut *Adhesive Friction Theory*. Teori ini menjelaskan secara ilmiah hukum 1 dan 2 dari teori Amontons-Coulomb tetapi tetap saja gagal menjelaskan fenomena gesekan secara tuntas. Hasilnya, gesekan yang merupakan sistem sangat sederhana (hanya melibatkan dua permukaan) tetap menjadi misteri yang membuat peneliti terus mengembangkan model-model yang telah dan akan diciptakan untuk mengungkap misteri tersebut.

Rejim Pelumasan

Pada awal permulaan abad ini perilaku gesekan dalam sistem tribot telah diselidiki oleh para ahli, diantaranya Stribeck (1902), Hersey (1915), dan McKee (1927). Biasanya gaya gesek dalam sistem pelumasan di tribologi digambarkan sebagai fungsi dari satu atau lebih parameter operasional. Daerah pelumasan terbagi dalam 3 bagian. Yaitu:

1. *(Elasto) Hydrodynamic Lubrication ((E)HL);*
2. *Boundary Lubrication (BL);*
3. *Mixed Lubrication (ML).*

Uraian berikut ini akan membahas tentang ketiga daerah tersebut berdasar hasil penemuan Stribeck dan pengembangan oleh peneliti lainnya.

1. *(Elasto) Hydrodynamic Lubrication ((E)HL)*

Di daerah ini tidak ada kontak antar permukaan. Beban yang ada ditahan semuanya oleh lapisan pelumas diantara dua permukaan yang bersinggungan. Koefisien gesek (μ) bernilai 0,01. Untuk kasus ini, penggunaan teori tentang dinamika fluida bisa diterapkan, diantaranya dengan persamaan Navier-Stokes atau persamaan Reynolds (1886) untuk menghitung tekanan dan ketebalan lapisan pelumas. Banyak peneliti telah mengembangkan tentang pengujian algoritma untuk memecahkan persamaan dalam semua model yang berhubungan dengan masalah lapisan pelumas. Pelumasan hidrodinamik

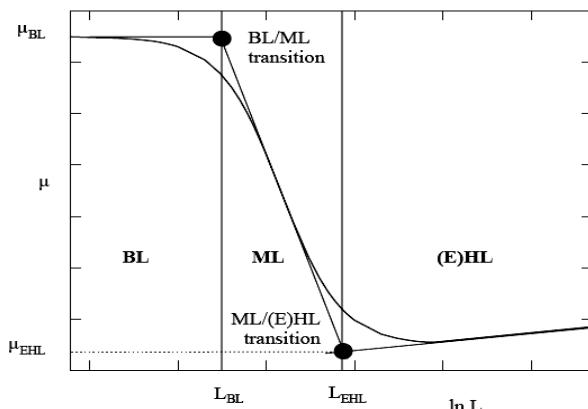
pada pelat dengan proses pengrajin diselidiki oleh Cheng (1970), Atkins (1970), Wilson and Walowitz (1971) dan Lught (1992). Garis kontak dan titik kontak pada pelumasan hidrodinamik diselidiki oleh Lubrecht (1987) dan Venner (1991). Bagaimanapun, masih banyak masalah praktik di lapangan yang harus dilakukan dengan kontak fisik secara eksperimental yang tidak dapat diselesaikan dengan teknik yang berdasar pada pelumasan lapisan secara penuh (full film lubrication).

2. Boundary Lubrication (BL)

Pada daerah ini terjadi kontak fisik antara permukaan yang saling berinteraksi. Beban yang ada ditanggung oleh puncak dari kekasaran permukaan atau asperiti yang saling bersinggungan. Koefisien gesek di rejim BL dengan besaran $0.1 < \mu < 0.3$. Pada daerah ini aus akan terjadi.

3. Mixed Lubrication (ML)

Rejim ML adalah daerah yang terletak antara BL dan (E)HL. Beban kontak ditanggung sebagian oleh pelumas dan sebagian lagi oleh interaksi puncak kekasaran permukaan. Besaran koefisien gesek yaitu $0.01 < \mu < 0.1$. Di tahun 1988 Schipper telah membuat model berdasar daerah mixed lubrication. Kebanyakan model adalah kombinasi dari dua daerah/rejim walaupun dalam kenyataannya prediksi gesekan dari operasi yang bekerja di bawah kondisi ML masih perlu penelitian lebih lanjut [6].

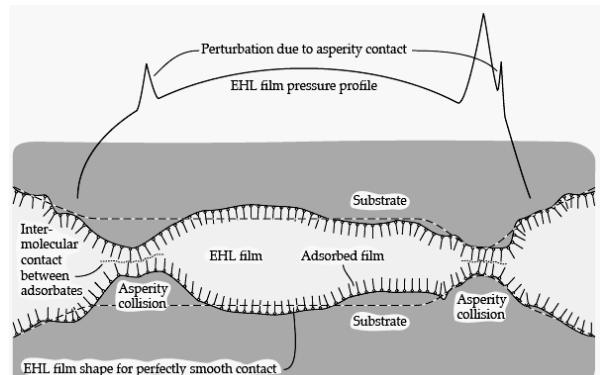


Gambar 2. Generalisasi kurva Stribeck [6].

Pada penyelidikan Stribeck (1902) tentang koefisien gesek dalam kecepatan poros pada bantalan, kurva yang dihasilkan terkenal dengan sebutan "Kurva Stribeck". Dalam kurva ini hubungan antara μ dan kecepatan poros seperti terlihat dalam Gambar 2. Peneliti berikutnya yaitu Schipper membuat model yang dibangun berdasar koefisien gesek sebagai fungsi dari kombinasi dari parameter $H = \eta_i \cdot v^+ / \bar{p}$. Dimana H diturunkan dari bilangan $(Z \cdot N / p_{proj})$ yang sebelumnya telah diperkenalkan pertama kali oleh Harsay (1915) dalam penelitiannya

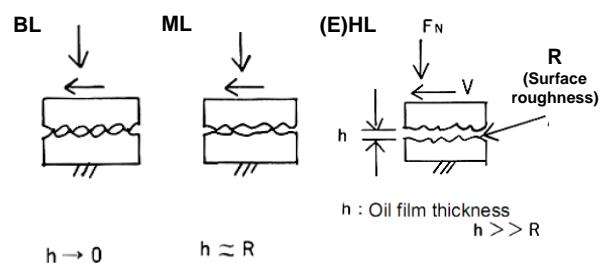
tentang bantalan jurnal. Di sini Z adalah viskositas dari pelumas dalam cP (centi Poise), n adalah besar putaran poros tiap menit dan p_{proj} adalah beban per unit pada daerah proyeksi dalam lbs/inch².

Schipper juga memperkenalkan bilangan $L = \eta_i \cdot v^+ / (\bar{p} \cdot R_a) = H / R_a$. Dengan bilangan L ini, efek kontak pelumasan dari kekasaran permukaan dalam aspek tribologi bisa tercakup. Penggunaan dari L sebagai penggantian H dihasilkan dalam "generalisasi" kurva Stribeck. Pada Gambar 2 generalisasi kurva tersebut dapat dilihat tiga rejim. Rejim batas (*boundary regime*) adalah keadaan di bagian sebelah kiri kurva. Koefisien gesek di sini disebut μ_{BL} . Di sebelah kanan dari kurva adalah bagian (*elasto*) *hydrodynamic*. Daerah diantara kedua rejim tersebut adalah daerah campuran (*mixed regime*). Dalam daerah ini koefisien gesek tergantung pada besarnya bilangan L . Pada gambar tersebut garis titik-titik merupakan transisi antara rejim pelumasan, masing-masing adalah transisi BL/ML pada L_{BL} dan transisi ML/(E)HL pada L_{EHL} .



Gambar 3. Model dari mixed lubrication [3].

Model dari ML seperti terlihat dalam Gambar 3. Pada keadaan ini ketebalan lapisan film lebih kecil dibandingkan dengan (E)HL. Pengurangan ketebalan ini seiring dengan berkurangnya beban dan tekanan kontak. Profil tekanan film dalam (E)HL memiliki bentuk runcing yang disebabkan oleh benturan kontak antar asperiti. Jika dilihat secara detail maka kontak terjadi secara intermolekul. Bentuk gambaran kasar asperiti yang berada dalam ketiga rejim seperti terlihat pada Gambar 4.



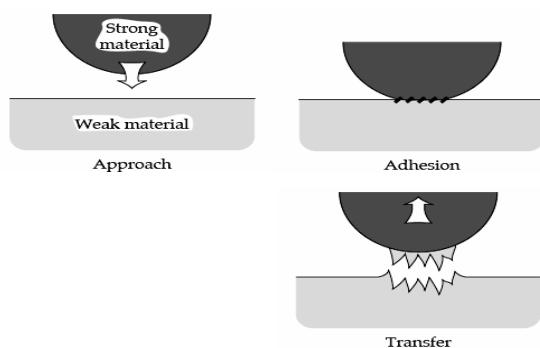
Gambar 4. Bentuk asperiti pada ketiga rejim pelumasan [2].

Keausan dalam Boundary Lubrication

Tribologi adalah aspek yang berkenaan dengan gesekan, aus dan pelumasan. Secara prinsip, pelumasan berfungsi untuk mencegah keausan yang disebabkan oleh gesekan antar benda yang bergerak relatif. Disamping fungsi pelumas di atas, kegunaan yang lain adalah untuk mengurangi gesekan, sebagai seal kompresi, mengurangi noise, sebagai media pendingin komponen mesin, mengurangi karat, serta menjaga benda agar tetap bersih. Sebagai akibat dari hilangnya pelumas pada daerah boundary lubrication, maka keausan menjadi suatu hal yang tidak bisa dihindari. Aus yang terjadi antara lain: *adhesive wear*, *abrasive wear*, *surface fatigue wear* dan *tribo chemical wear* [4]. Berikut ini penjelasan singkat tentang jenis-jenis aus.

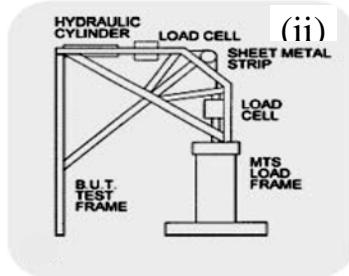
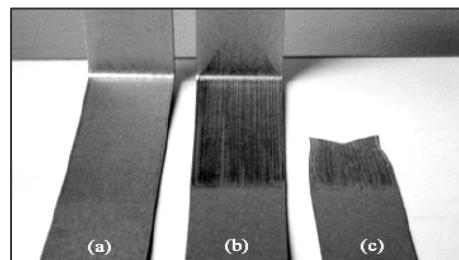
a. Adhesive wear

Keausan adhesif adalah salah satu jenis keausan yang disebabkan oleh terikat dan berpindahnya partikel dari suatu permukaan material yang lemah ke material yang lebih keras. Pada Gambar 5 proses itu bermula ketika benda dengan kekerasan yang lebih tinggi menyentuh permukaan yang lemah kemudian terjadi pengikatan. Pengikatan ini terjadi secara spontan dan dapat terjadi dalam suhu yang rendah atau moderat. Adhesive wear sering juga disebut *galling*, *scoring*, *scuffing*, *seizure*, atau *seizing* [4,7].



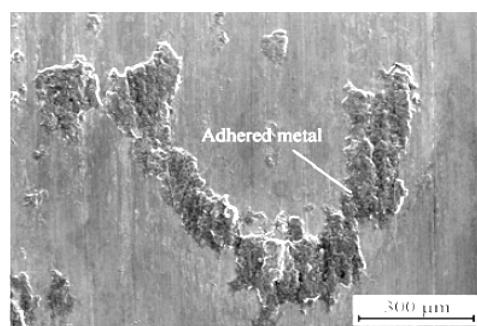
Gambar 5. Proses perpindahan dari logam secara adhesi [3].

Hasil pengujian terhadap *galling* yang dilakukan oleh Carlsson (2005) memperlihatkan bahwa terjadi perbedaan yang signifikan antara ketebalan coating 55%Al-Zn pada permukaan pelat dengan perilaku *fracture*. Pengujian ini dilakukan dengan metode *Bending Under Tension* (BUT). Spesimen yang digunakan adalah strip pelat ukuran 650 x 50 x 1 mm yang di-stretch 90° di atas silinder dengan radius 5,0 mm.



Gambar 6.(i) Perbedaan coating yang baik dan buruk [4] dan (ii) skematis alat pengujian BUT [7].

Hasil pengujian terlihat dalam Gambar 6.i Gambar ini memperlihatkan tiga buah spesimen tersebut. Gambar 6.i (a) adalah performa *coating* yang baik, (b) hilangnya warna pada permukaan akibat tingginya derajat *scratching* karena *galling* dan (c) *fracture* karena tingginya gaya gesek yang disebabkan *galling*. Di bagian sebelah bawah, Gambar 6.ii ialah gambar skematis alat uji. Gambar 7 memperlihatkan berpindahnya metal coating ke permukaan *tool* karena *galling*.



Gambar 7. Hasil SEM pada permukaan *tool* dengan pengujian BUT yang memperlihatkan kecenderungan *galling* yang tinggi [4].

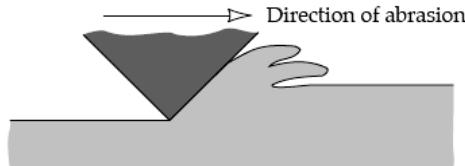
b. Abrasive wear

Keausan abrasif disebabkan oleh hilangnya material dari permukaan sebuah benda oleh material lain yang lebih keras. Ada dua kategori keausan ini, yaitu:

1. Two body abrasion

Keausan ini disebabkan oleh hilangnya material karena proses *rubbing* (penggarukan) oleh material lain yang lebih keras dibanding material yang lain. Sehingga material yang lunak akan terabrasif.

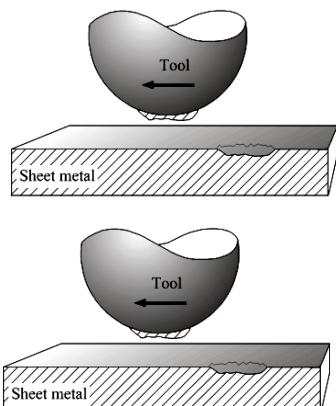
Contohnya pada proses permesinan, antara lain *cutting*, atau *turning* seperti pada Gambar 8.



Gambar 8. Proses cutting [3].

2. Three body abrasion

Aus yang disebabkan proses galling sehingga serpihan hasil gesekan yang terbentuk (debris) mengeras serta ikut berperan dalam hilangnya material karena proses gesekan yang terjadi secara berulang-ulang. Jadi pengertian “tiga benda” disini adalah dua material yang saling bergesekan dan sebuah benda serpihan hasil gesekan. Sedangkan pada keausan “dua benda”, *debris* atau serpihan hasil gesekan tidak ada.

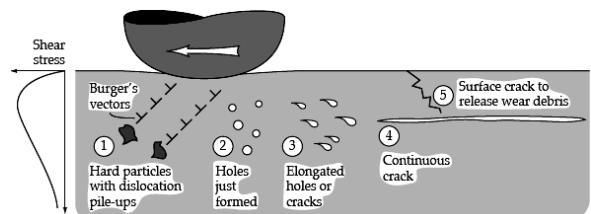


Gambar 9. Perpindahan material karena adhesive wear yang menghasilkan formasi penggarukan sehingga menyebabkan abrasif wear [4].

Debris berasal dari logam lembaran yang teradhesi pada permukaan alat cetak, kemudian karena proses pembentukan yang terjadi, serpihan ini akan menggaruk permukaan pelat, sehingga terjadilah keausan secara abrasif. Gambar 9 di atas adalah ilustrasi keausan jenis adhesif yang terjadi pada *sheet metal forming* antara *tool* dan logam lembaran yang berlanjut dengan keausan abrasif.

c. Surface fatigue wear

Keausan lelah pada permukaan pada hakikatnya bisa terjadi baik secara abrasif atau adhesif. Tetapi keausan jenis ini terjadi secara berulang-ulang dan periodik. Hal ini akan berakibat pada meningkatnya tegangan geser. Pada Gambar 10 mengilustrasikan tentang pertumbuhan retak pada permukaan benda. Ketidaksempurnaan dalam struktur material salah satu penyebabnya adalah lokasi yang kosong yang ada dalam susunan butir pembentuk material.

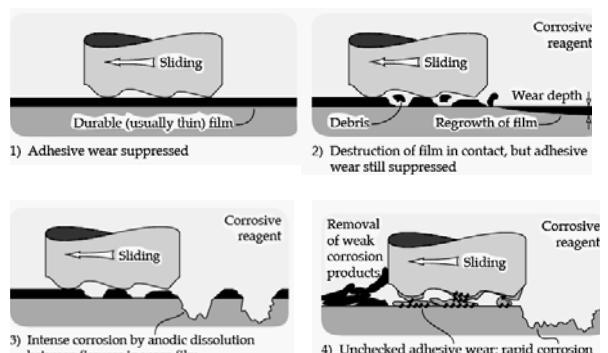


Gambar 10. Ilustrasi dari proses subsurface pertumbuhan retak [3].

Karena tekanan yang terjadi selama gesekan antara dua benda, maka lubang yang ada akan melebar. Proses berikutnya adalah menyatunya lubang yang telah melebar tadi menjadi alur retak sehingga perambatan retak yang terjadi akan mengakibat terlepasnya permukaan menjadi debris.

c. Tribocorrosion

Keausan kimiawi merupakan kombinasi antara proses mekanis dan proses termal yang terjadi pada permukaan benda serta lingkungan sekitarnya.



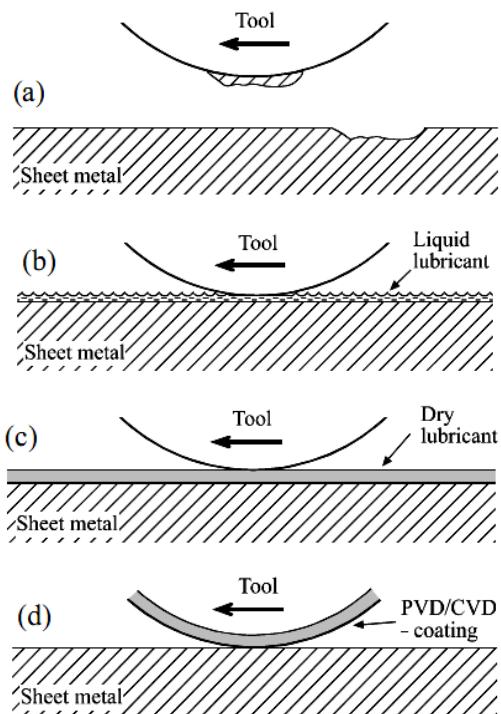
Gambar 11. Model interaksi antara agen korosif dan permukaan yang rusak [3].

Sebagai contoh, proses oksidasi yang sering terjadi pada sistem kontak luncur (*sliding contact*) antar logam. Proses ini lama kelamaan akan menyebabkan perambatan retak dan juga terjadi abrasi. Peningkatan suhu dan perubahan sifat mekanis pada asperiti adalah akibat dari keausan kimiawi. Kausan jenis ini akan menyebabkan korosi pada logam. Interaksi antara agen korosif dan permukaan yang rusak seperti terlihat dalam Gambar 11. Korosi diawali dengan keausan adhesif yang merusak lapisan film. *Sliding* yang terus menerus akan menghilangkan lapisan. Karena adanya bahan yang reaktif maka korosi berlangsung dengan cepat.

Pengurangan Keausan

Untuk mengurangi keausan yang terjadi, ada berbagai konsep yang diterapkan para ahli tribologi selain dengan pemberian cairan pelumas pada permukaan yang bergesekan. Dalam proses pembentukan lembaran logam, *galling* yang terjadi

bisa diminimalisasi dengan perlakuan pada pelat ataupun pada alat pembentuknya.



Gambar 12. Skematis galling dalam SMF dan tiga konsep yang digunakan untuk mengurangi galling [4].

Gambar 12 menunjukkan tiga konsep yang berbeda untuk tujuan tersebut. Gambar (a) adalah ilustrasi *galling*; (b) adalah pemberian cairan pelumas pada permukaan pelat; (c) *dry lubricant* dengan proses pelapisan tipis pada pelat dengan logam paduan lain; dan (d) pelapisan pada alat pembentuk atau *tool*. Pelapisan ini bisa dengan metode *physical vapor deposition* (PVD) atau dengan cara *chemical vapor deposition* (CVD).

Penutup

Tribologi berasal dari bahasa Yunani yang berarti menggaruk atau mendorong. Tribologi ialah ilmu yang mempelajari gesekan, aus dan pelumasan. Dengan tribologi pemborosan energi dapat dihemat. Seiring dengan peradaban manusia yang makin meningkat maka perkembangan ilmu ini juga meningkat. Dimulai dari bangsa Mesir, Leonardo da Vinci, Stribeck sampai dengan peneliti-peneliti sekarang. Daerah pelumasan dibagi menjadi 3 rejim, yaitu: (*Elasto*) *Hydrodynamic Lubrication*, *Boundary Lubrication*, *Mixed Lubrication*. Proses aus terjadi pada *Boundary lubrication*. Keausan terdiri atas keausan adesif, keausan abrasif, keausan lelah permukaan dan keausan kimiawi. Usaha yang dilakukan untuk mengurangi aus diantaranya dengan pelumasan dan coating atau pelapisan logam pada permukaan.

Daftar Pustaka

- [1]<http://www.fisikanet.lipi.go.id/utama.cgi?artikel&1181306819&7>, 21/05/2008.
- [2]Hironaka, S. (1984). “*Boundary lubrication and lubricants*”. Three bond technical news. (9), 1-6.
- [3]Stachowiak, G.W. and A.W. Batchelor. (2000), *Engineering Tribology 2nd Ed.*, Butterworth-Heinemann.
- [4]Carlsson, P. (2005). “*Surface engineering in sheet metal forming*”. Digital comprehensive summaries of Uppsala dissertations from the faculty of science and technology 7, Uppsala Universitet, Uppsala, Sweden.
- [5]Halling, J. (1997). “*Pengenalan tribologi*”. Penerbit Universiti Teknologi Malaysia.
- [6]Ter Haar, R. (1996). “*Friction in sheet metal forming, the influence of (local) contact conditions and deformation*”. Ph.D. thesis, University of Twente, Enschede, the Netherlands.
- [7]Lindvall, F.W. (2007). “*Development of test method for measuring galling resistance*”. Master thesis, Karlstads Universitet, Sweden.