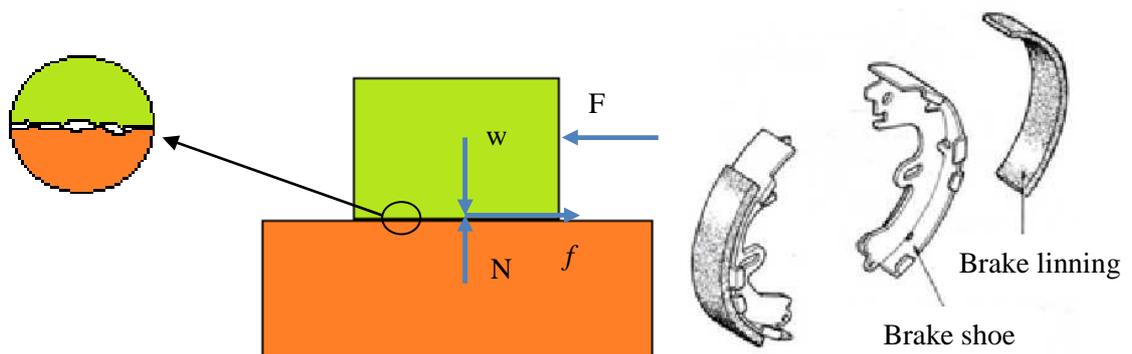


BAB II DASAR TEORI

2.1 Gesekan

Ketika dua benda saling bersinggungan satu dengan yang lainnya, apabila diamati pergerakannya seperti dilawan oleh suatu gaya. Fenomena ini adalah gesekan (*friction*); sedangkan gaya yang bekerja di dalamnya disebut gaya gesek (*friction force*). Gesekan atau *friction* adalah bentuk dari hilangnya energi yang terjadi diantara dua permukaan yang saling kontak dan bergerak relatif, dan sering dinyatakan sebagai gaya yang melawan. Gesekan diuraikan dengan koefisien gesek (μ). Koefisien gesek adalah suatu fungsi area kontak antara dua permukaan, sifat dan kekuatan yang saling mempengaruhi. Adapun mekanisme gesekan antara dua permukaan dapat diilustrasikan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Mekanisme gesekan dan aplikasinya di dunia nyata [3].

Gesekan juga dipengaruhi oleh beban dan kondisi permukaan. Topografi permukaan suatu material sebenarnya jika dilihat secara mikro adalah tidak rata. Koefisien gesek antara permukaan secara normal meningkat dengan meningkatnya temperatur dan menurunnya beban. Hilangnya energi pada gesekan dapat mendorong ke arah meningkatnya temperatur atau deformasi kontak area. Pada hampir semua kasus koefisien gesek rendah akan mendorong ke arah menurunnya laju keausan.

The Laws of Friction (Hukum Amonton):

1. Gaya gesek (*tangential*) secara langsung sebanding gaya normal.
2. Gaya gesek tidak tergantung kontak *area*.
3. Gesekan kinetis tidak tergantung kecepatan *sliding*.

Gesekan dipengaruhi oleh:

1. Adanya partikel keausan (*wear*) dan partikel dari luar pada arena luncur (*sliding interface*).
2. Kekerasan relatif material pada daerah kontak.
3. Gaya luar dan perpindahan sistem.
4. Kondisi lingkungan dan suhu pelumasan.
5. Topografi permukaan.
6. Struktur mikro dan morfologi dari material.
7. Kinematik dari permukaan kontak.

2.1.1 Gaya Gesek Statis

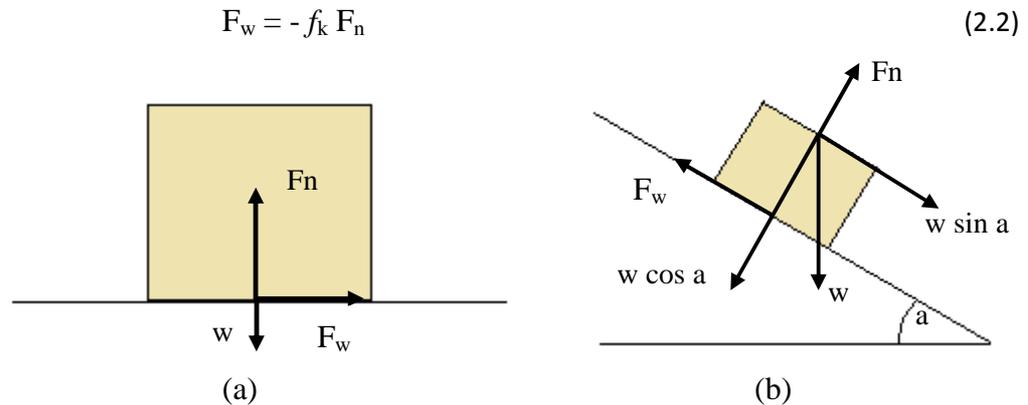
Gaya gesek statis adalah gesekan antara dua benda padat yang tidak bergerak relatif satu sama lainnya. Sebagai contoh, gesekan statis dapat mencegah benda meluncur ke bawah pada bidang miring. Koefisien gesek statis umumnya dinotasikan dengan f_s , gaya gesek dinotasikan dengan F_w (*friction of weight*) dan gaya normal dinotasikan dengan F_n (*friction of normal*). Gaya gesek statis dihasilkan dari sebuah gaya yang diaplikasikan tepat sebelum benda tersebut bergerak. Gaya gesekan maksimum antara dua permukaan sebelum gerakan terjadi adalah hasil dari koefisien gesek statis dikalikan gaya normal.

$$F_w = -f_s F_n \quad (2.1)$$

Ketika tidak ada gerakan yang terjadi, gaya gesek dapat memiliki nilai dari nol hingga gaya gesek maksimum. Setiap gaya yang lebih kecil dari gaya gesek maksimum yang berusaha untuk menggerakkan salah satu benda akan dilawan oleh gaya gesekan yang setara dengan besar gaya tersebut namun berlawanan arah. Setiap gaya yang lebih besar dari gaya gesek maksimum akan menyebabkan gerakan terjadi [4].

2.1.2 Gaya Gesek Kinetis

Gaya gesek kinetis (atau dinamis) terjadi ketika dua benda bergerak relatif satu sama lainnya dan saling bergesekan. Koefisien gesek kinetis umumnya dinotasikan dengan f_k dan pada umumnya selalu lebih kecil dari gaya gesek statis untuk material yang sama. Gambar 2.2 menunjukkan skema gaya gesek kinetis yang bekerja pada bidang datar dan bidang miring. Gaya gesek kinetis dapat dirumuskan sebagai berikut:

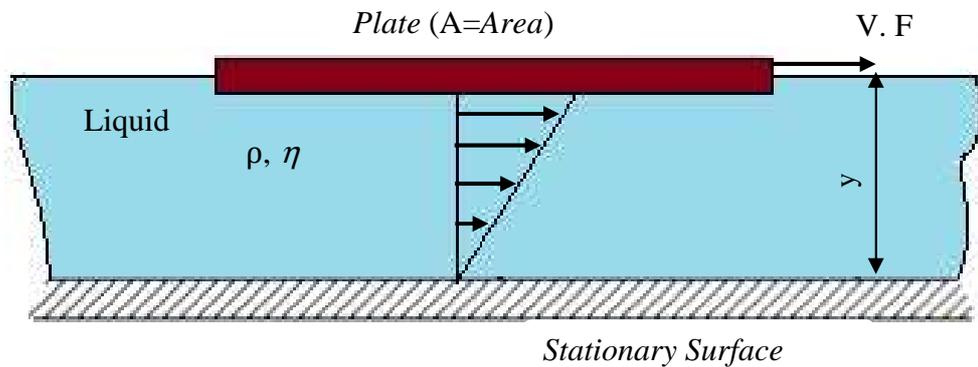


Gambar 2.2 Gaya gesek: (a) Pada bidang datar, (b) Pada bidang miring.

2.2 Viskositas

Viskositas merupakan sifat yang paling utama dari sebuah bahan pelumas karena sifat ini secara garis besar menunjukkan kemampuan melumasi sesuatu [5]. Atau dengan kata lain bahwa viskositas adalah kemampuan dari bahan pelumas untuk melawan tegangan geser yang terjadi pada waktu bergerak. Viskositas minyak pelumas berubah-ubah menurut perubahan temperatur. Dengan sendirinya minyak pelumas yang baik tidak terlalu peka terhadap perubahan temperatur, sehingga dapat berfungsi sebagaimana mestinya, baik dalam keadaan dingin pada waktu mesin mulai bekerja maupun pada saat temperatur kerja. Bahan harus mengalir ketika suhu mesin atau temperatur yang berubah-ubah. Mengalir secara cukup agar terjamin pasokannya ke komponen-komponen yang bergerak. Semakin kental bahan pelumas, maka lapisan yang ditimbulkan menjadi lebih kental. Lapisan halus pada pelumas kental memberi kemampuan ekstra menyapu atau membersihkan permukaan logam yang terlumasi. Sebaliknya pelumas yang terlalu tebal akan memberi resistensi berlebih mengalirkan pelumas pada temperatur rendah sehingga mengganggu jalannya pelumasan ke komponen yang dibutuhkan. Untuk itu, pelumas harus memiliki kekentalan lebih tepat pada temperatur tertinggi atau temperatur terendah ketika mesin dioperasikan.

Hukum Newton tentang aliran *viscous* menyatakan bahwa tegangan geser di dalam fluida adalah berbanding lurus dengan perubahan kecepatan. Gambar 2.3 menunjukkan penjelasan dari definisi viskositas melalui hukum Newton.



Gambar 2.3 Definisi viskositas melalui hukum Newton.

Jadi viskositas menurut hukum Newton dapat didefinisikan sebagai berikut:

$$\tau = \eta \frac{du}{dy} = \eta \frac{u}{h} \quad (2.3)$$

dimana: τ = tegangan geser fluida (N/m^2)

η = viskositas dinamik (Poise, P)

u = kecepatan relatif permukaan (m/s)

h = tebal lapisan pelumasan (m)

Sehingga viskositas dinamik dapat ditulis:

$$\eta = \frac{\tau}{du/dy} \quad (2.4)$$

Viskositas dinamik disebut juga dengan viskositas absolut, sementara kadar geseran adalah du/dy . Jika viskositas dinamik dibagi dengan rapat massa pada temperatur yang sama hasilnya disebut viskositas kinematik [6]. Secara matematis ditulis:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (2.5)$$

dimana: ν = viskositas kinematik (Stoke, S)

ρ = rapat massa (gram/cm^3)

2.2.1 Indeks Viskositas

Kemampuan minyak pelumas untuk mengatasi perubahan nilai viskositas terhadap perubahan suhu dikenal dengan istilah indeks viskositas, yaitu menyatakan perbandingan relatif antar minyak pelumas yang dinyatakan dengan persen. Nilai

indeks viskositas yang tinggi menyatakan bahwa minyak pelumas tersebut mengalami perubahan nilai viskositas yang kecil pada rentang suhu tertentu, yang berarti bahwa mutu minyak pelumas tersebut semakin baik. Indeks Viskositas dapat dicari dengan rumus berikut [6]:

$$VI = \frac{(L-U)}{(L-H)} \times 100 \quad (2.6)$$

dimana: VI = indeks viskositas

L = Viskositas minyak pelumas referensi (100°C)

U = Viskositas minyak pelumas spesimen (40°C)

H = Viskositas minyak pelumas referensi (100°C)

Karakteristik L dan H dari pelumas referensi ada di lampiran [6].

2.2.2 Klasifikasi Viskositas SAE

Sistem klasifikasi ini disusun oleh SAE (*Society of Automotive Engineers*), dalam SAE J300 pertama kali dilaporkan *Miscellaneous Division*, disetujui pada Juni 1911, dan direvisi kembali oleh suatu komite September 1980. Walaupun sistem kekentalan ini disusun oleh SAE, klasifikasi kekentalan minyak pelumas bukan hanya untuk otomotif, melainkan semua tipe penggunaan minyak pelumas termasuk industri, kapal laut dan pesawat [7].

Pada Tabel 2.1, kolom 2 menunjukkan viskositas dinamik dan kolom 3 menunjukkan viskositas kinematik. Viskositas suhu rendah merupakan indikator kemampuan pada saat cuaca awal dingin. Viskositas pada temperatur 100°C adalah saat temperatur operasi normal dari mesin. Minyak tanpa akhiran W disebut dengan *monograde* karena hanya ada satu kelas SAE. Minyak dengan akhiran W yang merupakan singkatan dari *Winter* disebut *multigrade* yang memiliki kemampuan baik saat mesin masih dingin. Pada saat suhu rendah dibawah 0° C, viskositas dapat rendah pada suhu awal. Minyak *multigrade* mempunyai indeks viskositas yang lebih tinggi daripada minyak *monograde* [6]. Minyak pelumas SAE 15W-40 artinya minyak pelumas ini mempunyai indeks viskositas multigrade dimana pada suhu rendah dapat bekerja pada temperatur -15 °C sampai 20 °C dan pada temperatur tinggi dapat bekerja pada temperatur mencapai 150 °C.

Tabel 2.1 Klasifikasi SAE [6]

SAE viscosity grade	Viscosity [sP] at temp [°C] max		Kinematic viscosity [cS] at 100°C	
	Cranking	Pumping	Min	max
0 W	3250 at -30	30000 at -35	3,8	-
5 W	3500 at -25	30000 at -30	3,8	-
10 W	3500 at -20	30000 at -25	4,1	-
15W	3500 at -15	30000 at -20	5,6	-
20 W	4500 at -10	30000 at -15	5,6	-
25 W	6000 at -5	30000 at -10	9,3	-
20			5,6	< 9,3
30			9,3	< 12,5
40			12,5	< 16,3
50			16,3	< 21,9
60			21,9	< 26,1

2.3 Pelumasan

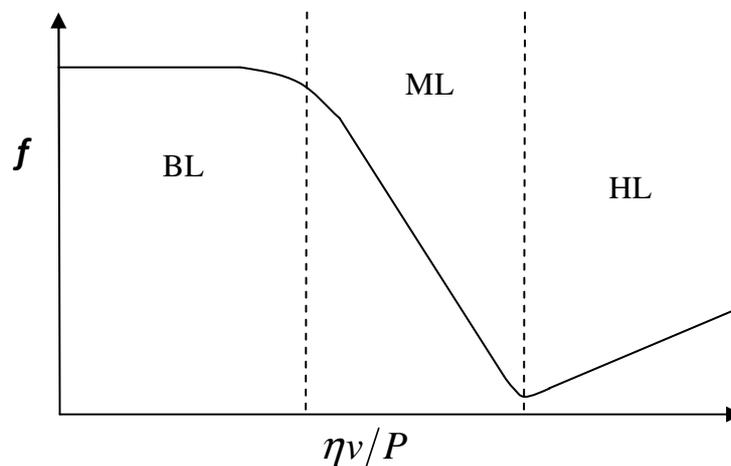
Salah satu hal yang penting dalam bekerjanya mesin adalah pelumasan, karena pelumasan efektif mengurangi gesekan dan keausan. Aplikasi dari pelumasan kebanyakan mempunyai harapan yang ingin dicapai adalah gesekan yang terjadi kecil saat terjadi kontak antara dua permukaan. Contohnya adalah kontak roda gigi dan *bearing*.

Pertanyaan yang sering muncul adalah “Berapakah koefisien gesek dari sistem ini.” Hal yang paling penting harus diketahui untuk menjawab pertanyaan ini adalah apakah sistem itu menggunakan pelumas atau tidak. Selanjutnya apabila sistem itu menggunakan pelumas, karakteristik dari pelumas menjadi hal yang harus diketahui. Gaya yang diberikan pada permukaan kontak dan kecepatan gesekan adalah faktor yang juga harus diketahui untuk menentukan koefisien gesek.

Pada tahun 1902 Stribeck mempresentasikan makalahnya tentang pengaruh kecepatan interaksi permukaan dan tegangan terhadap koefisien gesek untuk *journal bearing* dan *roller bearing*. Pelumasan dapat dibedakan menjadi tiga *regime*, *Boundary Lubrication*, *Mixed Lubrication*, dan *Hydrodynamic Lubrication*. Tiga *regime* ini dapat ditemukan dalam kurva Stribeck [8].

2.3.1 Kurva Stribeck

Kurva Stribeck adalah kurva hubungan antara koefisien gesekan dan nomor pelumasan, kurva Stribeck ditunjukkan oleh Gambar 2.4. Sumbu vertikal adalah koefisien gesek yang didapat dari pembagian gaya gesek dan gaya normal. Sedangkan sumbu horizontal adalah nomor pelumasan, di berbagai literatur yang ada menunjukkan banyak definisi dari nomor pelumasan. Ada yang mendefinisikan nomor pelumasan sebanding dengan kecepatan sudut, kecepatan luncur, viskositas pelumas, dan terakhir kekasaran permukaan dimasukkan dalam parameter nomor pelumasan [9]. Akan tetapi parameter yang sering digunakan adalah kecepatan, tekanan, dan viskositas pelumas.

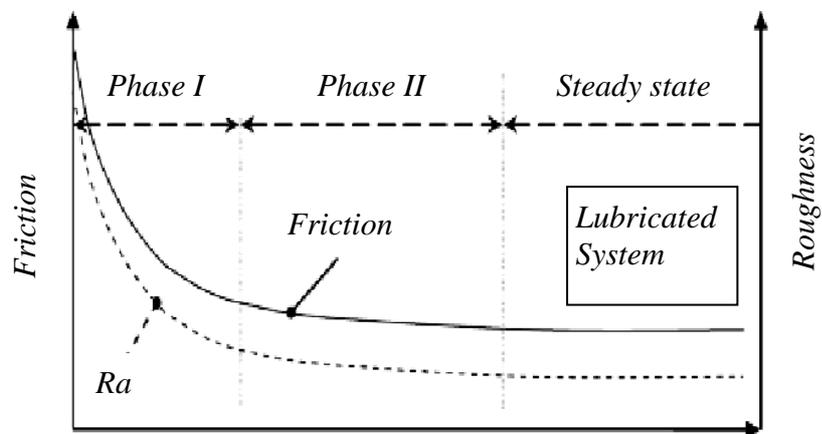


Gambar 2.4 Kurva Stribeck.

2.3.2 Pengaruh *Running-in* terhadap Kurva Stribeck

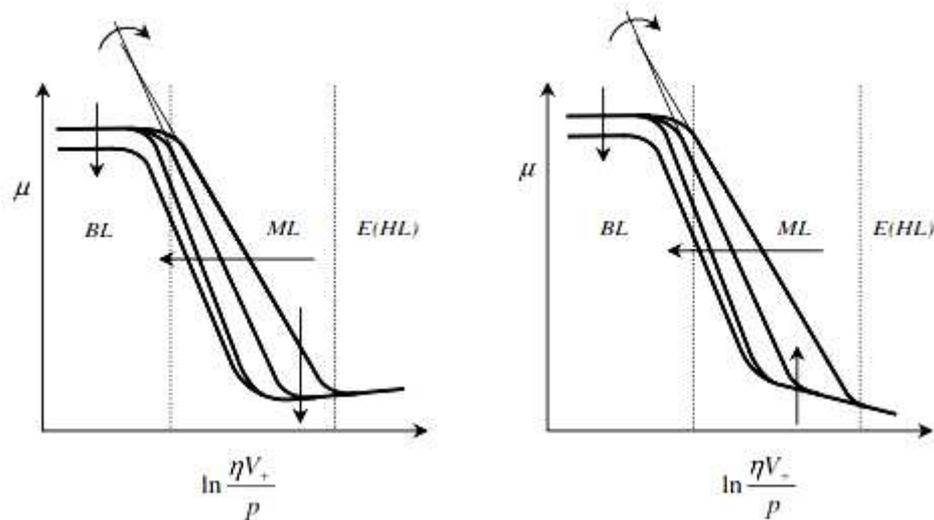
Ketika dua permukaan diberi pembebanan untuk pertama kalinya dan terjadi gerak relatif antar permukaan maka terjadi perubahan kondisi pada tiap permukaan tersebut. Perubahan ini biasanya disebabkan oleh berbagai hal, antara lain keselarasan sumbu gerak, perubahan bentuk, perubahan kekasaran permukaan, dan keseimbangan berbagai sifat mekanis dan sifat kimiawi diantara kedua permukaan yang bersinggungan (kontak) seperti kekerasan mikro, yang disebabkan oleh proses pengerasan atau pembentukan lapisan oksida pada lapisan batas kontak. Perubahan ini secara alamiah bertujuan untuk meminimalisir aliran energi yang terjadi, baik energi mekanis maupun energi kimiawi [10]. Perubahan tersebut awalnya dalam jumlah besar yang kemudian menjadi sedikit sampai akhirnya menjadi relatif tetap. Perubahan yang terjadi mulai dari kondisi awal menuju tetap atau kondisi tunak (*steady state*) disebut sebagai *running-in*.

Gambar 2.5 menunjukkan gesekan dan kekasaran menurun sebagai fungsi waktu, jumlah kontak *rolling* dan jarak *sliding*. Dalam fase *running-in*, perubahan kekasaran permukaan dibutuhkan untuk meminimalisir aliran energi antara permukaan gerak [10]. Berdasarkan Gambar 2.5 fase I ditandai dengan penurunan kekasaran permukaan dan koefisien gesek. Dalam fase II, kontak yang berulang-ulang menyebabkan pengerasan benda, menghasilkan peningkatan kekerasan mikro dan tegangan sisa dalam permukaan. Selama fase ini penurunan koefisien gesek dan kekasaran permukaan terbatas.



Gambar 2.5 Perubahan koefisien gesek dan kekasaran sebagai fungsi waktu, jumlah kontak *rolling* atau jarak *sliding* [10].

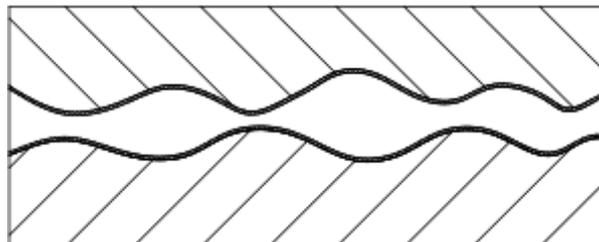
Running-in dapat meningkatkan beban daya dukung, contohnya meningkatkan tindakan hidrodinamik sehingga mengurangi gesekan pada kondisi operasional konstan. Untuk keadaan tekanan rendah (Gambar 2.6a), *running-in* dapat mengurangi nilai *lubrication number* (H) pada tahap *mixed lubrication* dan juga dapat mengurangi koefisien gesekan. Perubahan dalam mikro-geometri mempengaruhi koefisien gesekan pada *boundary lubrication* ke nilai yang lebih rendah. Pergeseran yang sama ditemukan untuk keadaan tekanan tinggi (Gambar 2.6b), kecuali pada koefisien gesekan minimum, saat transisi dari *mixed lubrication* ke *hydrodynamic lubrication* bergeser ke nilai yang lebih tinggi.



Gambar 2.6 Efek dari *running-in*: (a) tekanan rendah dan (b) tekanan tinggi [10].

2.3.3 Hydrodynamic Lubrication

Hydrodynamic lubrication terjadi ketika tidak ada kontak langsung antara dua permukaan material. Diantara permukaan ini seluruhnya dilapisi oleh lapisan pelumas. Pada Gambar 2.7 menunjukkan permukaan material yang mempunyai *asperity* yang kecil dan diantara kedua materil terdapat lapisan pelumas sehingga tidak terjadi kontak secara langsung.



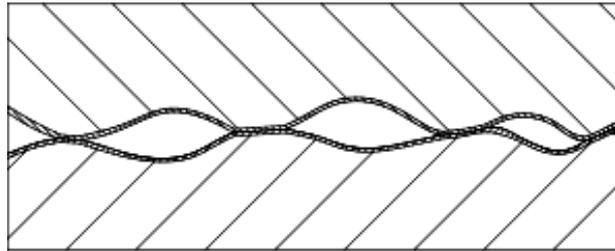
Gambar 2.7 *Hydrodynamic lubrication* [8].

Hydrodynamic lubrication terbentuk ketika geometri, gerak permukaan dan kecepatan pelumas berkombinasi dan menyebabkan meningkatnya tekanan pelumas sehingga dapat menahan beban yang diberikan.

2.3.4 Boundary Lubrication

Boundary lubrication terjadi ketika lapisan pelumas mempunyai ketebalan yang sama dibanding dengan kekasaran permukaan, sering terjadi pada permukaan yang mempunyai *asperity* yang tinggi pada kontak permukaan. Pada umumnya hal ini tidak

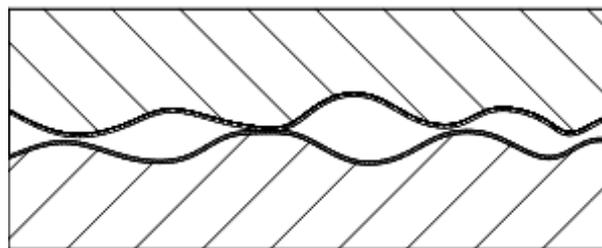
diinginkan dalam pengoperasian mesin karena akan meningkatkan gesekan, kerugian energi, dan keausan. Tetapi kebanyakan mesin akan mengalami kondisi *boundary lubrication*, khususnya pada saat awal nyala mesin, mematikan mesin, dan pengoperasian kecepatan rendah. Gambar 2.8 berikut ini menunjukkan peristiwa *boundary lubrication*.



Gambar 2.8 *Boundary lubrication* [8].

2.3.5 Mixed Lubrication

Mixed lubrication merupakan transisi antara *hydrodynamic lubrication* dengan *boundary lubrication*. Dalam kasus ini, beban yang diterima selama kontak dibagi oleh pelumas (*fluid film*) dan *asperity*. *Asperity* menerima sejumlah beban selama kontak terjadi, karena adanya gesekan, beban, dan gerakan relatif antar permukaan. Gambar 2.9 menunjukkan peristiwa *mixed lubrication*.



Gambar 2.9 *Mixed lubrication* [8].

2.4 Tribometer

2.4.1 Pengertian Tribometer

Tribometer adalah perangkat yang digunakan untuk mengukur gesekan dan keausan antara dua permukaan. Ada berbeda desain pada tribometer, tapi yang paling sering digunakan adalah permukaan datar atau bulat yang bergerak berulang-ulang di seluruh muka material lain. Sebuah material diberikan tepat pada bagian bergerak

selama tes. Pengukuran terakhir menunjukkan keausan pada bahan dan sering digunakan untuk menentukan kekuatan dan panjang umur. Tribometer merupakan bagian integral dari manufaktur dan rekayasa.

Dalam industri dan manufaktur, tribometer dapat digunakan untuk berbagai produk. Kebanyakan yang terkait dengan tribometer adalah pada pengujian bagian bagian mesin yang berkontak. Aplikasi lain yang sering dilakukan adalah pengujian pada implan medis dan pelumas [11].

2.4.2 Jenis-Jenis Tribometer

Jenis tribometer ada banyak, tiga diantara jenis tribometer yang sering digunakan adalah sebagai berikut:

2.4.2.1 Tribometer *Pin-on-Disc*

Tribometer *pin-on-disc* adalah tribometer yang menggunakan *pin* dan lempengan plat datar sebagai material yang bergesekan. *Disc* akan berotasi dan *pin* diberikan beban agar permukaan *pin* menekan pada permukaan *disc*. Pada sebagian tribometer, *pin* dikondisikan untuk diam tetapi pada tribometer yang lain juga ada yang menggerakkan *pin* ketika diberi beban agar terjadi *sliding*. Gambar 2.10 menunjukkan tribometer jenis *pin-on-disc*.



Gambar 2.10 Tribometer *pin-on-disc* [12].

2.4.2.2 Tribometer *Pin-on-Ring*

Tribometer *pin-on-ring* merupakan jenis tribometer yang menggunakan *ring* dan *pin* sebagai material yang berkontak. *Ring* melakukan rotasi sedangkan *pin* diberikan beban agar menekan *ring*. Sebagian tribometer *pin-on-ring*, pada bidang kontak dapat

diberikan pelumas untuk mengukur nilai dari karakteristik minyak pelumas yang akan diuji. Gambar 2.11 menunjukkan tribometer jenis *pin-on-ring*.



Gambar 2.11 Tribometer *pin-on-ring* [13].

2.4.2.3 Tribometer *Block-on-Ring*

Pada tribometer *block-on-ring* material yang digunakan sebagai spesimen adalah sebuah *block* dan *ring*. *Ring* melakukan rotasi sedangkan *block* diberikan beban agar menekan *ring*. Sebagian tribometer *block-on-ring*, pada bidang kontak dapat diberikan pelumas untuk mengukur nilai dari karakteristik minyak pelumas yang akan diuji. Pada tribometer jenis ini, untuk mengatur bagian yang akan berkontak relatif lebih susah karena permukaan kontakannya lebih besar. Gambar 2.12 menunjukkan tribometer jenis *block-on-ring*.



Gambar 2.12 Tribometer *block-on-ring* [14].