

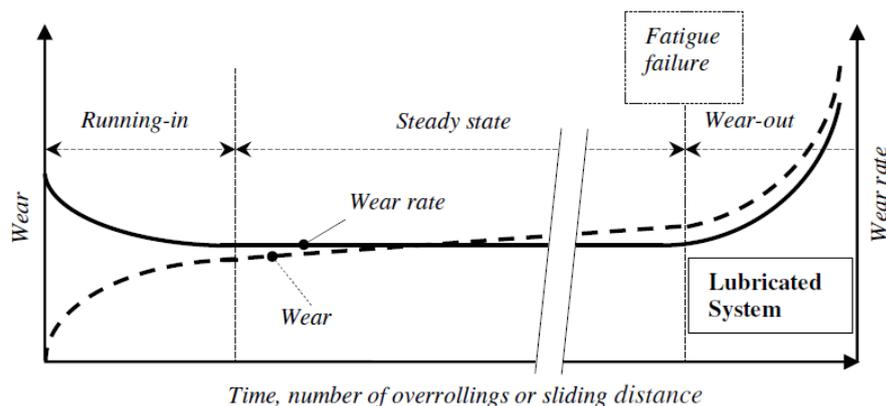
BAB II

TEORI *RUNNING-IN* PADA KONTAK *ROLLING-SLIDING*

2.1 Pengertian *running-in*

Ketika dua permukaan saling kontak di bawah kondisi pembebanan dan bergerak secara relatif antara satu dengan yang lain, maka akan terjadi perubahan kondisi permukaan. Kadang-kadang perubahan ini terdeteksi sebagai perubahan gesekan. Setelah kondisi awal terjadi, gaya gesek akan mencapai sebuah kondisi yang disebut *steady state*, dimana berbagai pengaruh dalam gesekan mencapai kesetimbangan. Perubahan yang terjadi antara *start-up* dengan *steady state* disebut dengan istilah *running-in* [4]. Selain gaya gesek, suatu hal yang tidak dapat dihindari adalah terjadinya keausan. Sama halnya dengan gesekan, keausan juga akan mencapai kesetimbangan pada *steady state* setelah sebelumnya terjadi perubahan keausan secara signifikan.

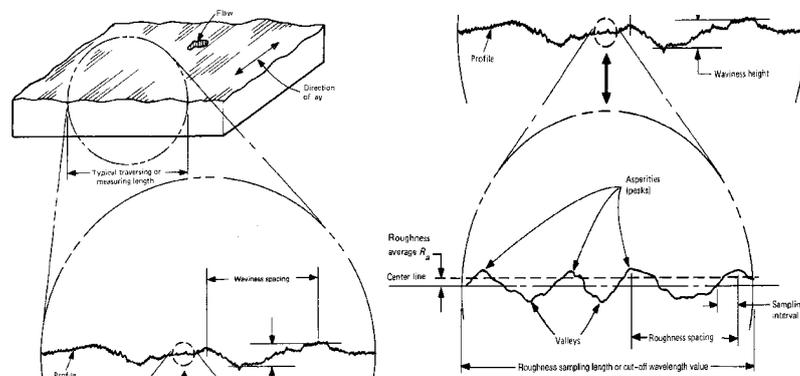
Running-in merupakan salah satu tahap yang harus dilalui suatu komponen permesinan yang mengalami kontak, dimana komponen tersebut akan mengalami gesekan dan keausan. Perilaku keausan suatu komponen permesinan terhadap waktu, jumlah *overrolling* atau jarak *sliding* ditunjukkan oleh Gambar 2.1.



Gambar 2.1. Skema perilaku keausan terhadap waktu, jumlah *overrolling* atau jarak *sliding* [2].

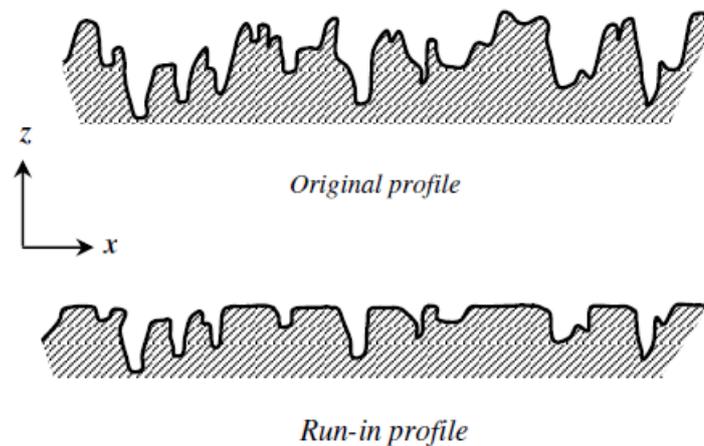
Menurut Jamari, perilaku keausan terhadap waktu, jumlah *overrolling* atau jarak *sliding* dibagi dalam tiga tahap, yaitu *running-in*, *steady state* dan *wear-out*. Pada tahap *running-in* keausan meningkat secara signifikan sedangkan laju keausan mengalami penurunan. Hal ini terjadi sampai tahap *steady state* yang mana merupakan tahap selanjutnya setelah *running-in*. Pada tahap *steady state*, keausan masih meningkat tetapi tidak sebesar tahap sebelumnya. Laju keausan mencapai kestabilan pada tahap ini. Kondisi ini berakhir ketika terjadi *fatigue failure* sebagai awal berlangsungnya tahap *wear-out*. Pada tahap *wear-out*, keausan dan laju keausan mengalami peningkatan yang signifikan sampai komponen mengalami kerusakan total [2].

Menurut GOST (Standar Rusia) standar 16429-70 definisi *running-in* adalah “*The change in the geometry of the sliding surfaces and in the physicomechanical properties of the surface layers of the material during the initial sliding period, which generally manifests itself, assuming constant external conditions, in a decrease in the frictional work, the temperature, and the wear rate*” (perubahan dalam geometri dari permukaan yang mengalami *sliding* dan dalam sifat *physicomechanical* dari lapisan permukaan material selama tahap permulaan *sliding*, yang umumnya terjadi pada permukaan itu sendiri, dengan mengasumsikan kondisi eksternal konstan, penurunan gesekan, temperature, dan laju keausan) [5]. Menurut *Ensiklopedia of Tribology* definisi *running-in* adalah “*The process by which machine parts improve in conformity, surface topography and frictional compatibility during the initial stage of use*” (proses dimana komponen mesin meningkat kesesuaiannya, topografi permukaan dan gesekan mengalami penyesuaian selama tahap awal penggunaan) [6].



Gambar 2.2. Kondisi suatu permukaan yang diperbesar [7].

Sebelum *running-in*, permukaan yang saling kontak, misalnya komponen mesin baru, belum memiliki kesesuaian permukaan yang baik. Sebagai akibat dari proses permesinan, kondisi permukaan komponen tersebut masih terdapat *asperity* yang menjadikan *clearances* (jarak ruang) antar permukaan kecil, dapat dilihat pada Gambar 2.2. Hal ini menyebabkan aliran minyak pelumas lambat dan terjadi gesekan yang tinggi sehingga temperatur operasional menjadi lebih tinggi dibandingkan dengan kondisi normal. Selama tahap *running-in*, jumlah *asperity* akan berkurang dan kontak antar permukaan menjadi lebih sesuai. Temperatur yang lebih tinggi biasanya menimbulkan laju keausan yang lebih tinggi pula tetapi permukaan akan menjadi lebih halus dan *asperity* yang menonjol diratakan. Selanjutnya laju keausan akan konstan pada tahap *steady state*. Kondisi permukaan sebelum dan setelah tahap *running-in* dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3. Pengaruh *running-in* terhadap topografi permukaan [8].

2.2 Faktor *running-in*

Perilaku *running-in* dipengaruhi oleh kondisi operasional dan sifat material. Dalam hal ini kondisi operasional adalah beban normal, kecepatan *rolling*, kecepatan *sliding* dan kekasaran permukaan awal sedangkan sifat material meliputi kekerasan dan modulus elastisitas. Selain itu, *running-in* juga dipengaruhi oleh topografi permukaan.

2.1.1 Faktor pembebanan

Pembebanan merupakan salah satu kondisi operasional yang dialami oleh benda yang berkontak. Pembebanan memiliki efek yang signifikan terhadap *running-in*. Dengan peningkatan beban selama kondisi awal *running in* besarnya deformasi plastis yang terjadi juga semakin meningkat [5]. Pengaruh pembebanan terhadap kondisi permukaan dapat adalah semakin besar beban yang diberikan semakin kecil nilai Ra , atau dengan kata lain semakin halus permukaan yang dihasilkan. Kondisi permukaan dengan nilai Ra yang lebih kecil menunjukkan lebih banyak *asperity* yang diratakan [9].

2.1.2 Faktor kecepatan

Menurut Wang dkk., selama fase *running-in* perubahan kekasaran permukaan tidak berubah secara monoton terhadap perubahan rasio kecepatan *sliding/rolling*. Ketika nilai kecepataannya rendah perubahan kekasaran permukaan meningkat dengan meningkatnya rasio *sliding/rolling*, sedangkan untuk nilai kecepatan yang tinggi nilai kekasaran permukaan berkurang saat terjadi peningkatan rasio kecepatan *sliding/rolling* [9]. Sedangkan untuk pengaruh kecepatan *rolling* adalah semakin tinggi kecepatan *rolling* maka semakin kecil perubahan Ra sehingga keausan juga lebih kecil.

2.1.3 Faktor sifat mekanis material

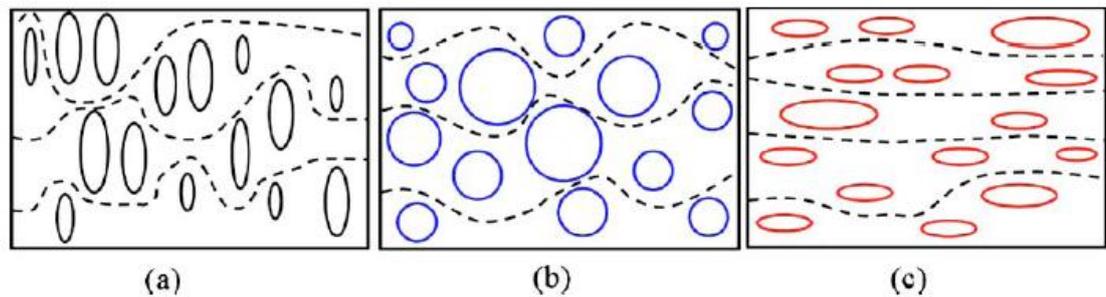
Sifat mekanis material yang berpengaruh pada fase *running-in* adalah modulus elastisitas dan kekerasan. Semakin tinggi modulus elastisitas material, gaya yang diperlukan untuk menyebabkan deformasi semakin besar sehingga semakin sulit terjadi perubahan bentuk permukaan. Hal ini menyebabkan durasi *running-in* yang lebih lama untuk mencapai kondisi *steady*. Kekerasan suatu material berpengaruh terhadap terjadinya deformasi selama fase *running-in*. Semakin tinggi tingkat kekerasan material akan menyebabkan deformasi yang terjadi semakin kecil sehingga keausan yang terjadi juga lebih kecil dibandingkan dengan material yang memiliki kekerasan rendah.

2.1.4 Faktor kekasaran permukaan awal

Kekasaran permukaan yang biasanya didefinisikan sebagai Ra yang dihasilkan setelah fase *running-in* dipengaruhi oleh kondisi kekasaran permukaan awal. Nilai kekasaran permukaan awal yang berbeda akan menghasilkan nilai kekasaran permukaan

akhir yang berbeda pula. Jika kekasaran permukaan awal yang besar, kekasaran akhir yang dihasilkan juga besar [9].

2.1.5 Faktor topografi permukaan



Gambar 2.4. Perbedaan *surface pattern* (a) *transverse* (b) *isotropic* dan (c) *longitudinal* [10].

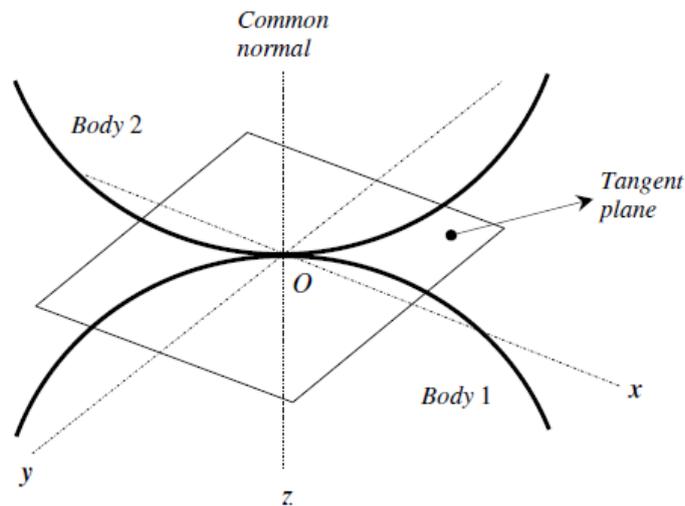
Untuk mempelajari pengaruh *surface pattern* terhadap *running-in* dimodelkan tiga jenis *surface pattern*. Ketiga model *surface pattern* adalah *transverse*, *isotropic* dan *longitudinal*, dapat dilihat pada Gambar 2.4. Penggolongan suatu permukaan menjadi model *surface pattern* yang berbeda berdasarkan perbandingan korelasi panjang dalam arah x dan y permukaan. *Surface pattern* merupakan orientasi dari *asperity* permukaan yang bergantung pada proses manufaktur yang digunakan pada proses *finishing* permukaan.

Ilustrasi aliran pelumas juga dapat dilihat Pada Gambar 2.4 yang ditunjukkan dengan garis putus-putus. Pada *transverse surface*, orientasi *asperity* menghambat laju aliran fluida, hal ini menyebabkan semakin banyak kontak antar *asperity* yang terjadi sehingga semakin besar beban yang diterima oleh *asperity*. Keausan yang terjadi akan semakin besar karena beban yang diterima juga besar.

2.3 Kontak *rolling*, *sliding* dan *rolling-sliding*

Ketika dua benda saling kontak pada titik O, lihat Gambar 2.5, selama *rolling* antara permukaan benda tersebut, gerak relatif dapat dianggap sebagai kombinasi dari *sliding*, *spinning* and *rolling*. *Sliding* atau *slip* adalah kecepatan relatif antara dua benda atau permukaan pada titik kontak O pada *tangent plane*. *Spinning* adalah kecepatan

sudut relatif antara dua benda terhadap garis normal yang melalui titik O . *Rolling* adalah kecepatan sudut relatif antara dua benda terhadap suatu axis pada *tangent plane* [11].

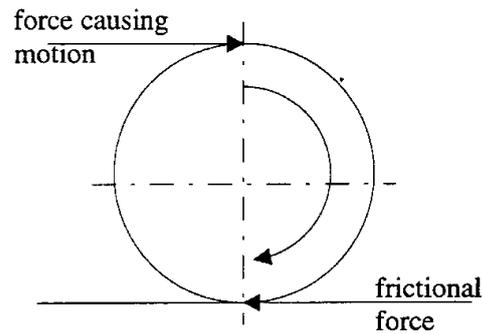


Gambar 2.5. Kontak permukaan *non-conform* di titik O [2].

Kontak *rolling* atau sering disebut *pure rolling* terjadi pada kontak dimana kedua benda yang berkontak memiliki kecepatan yang sama. *Sliding* adalah gerakan antara dua benda yang bergerak relatif yang mana kecepatan permukaannya pada daerah kontak berbeda besarnya atau arahnya [6].

2.3.1 Kontak *rolling*

Rolling adalah kecepatan sudut (*angular*) relatif antara dua benda terhadap suatu *axis* yang berada dalam suatu bidang tangensial yaitu fenomena terjadinya perpindahan (*displacement*) secara rotasi pada suatu titik, yang diakibatkan adanya perbedaan ω . Pada problem 2-D untuk dua buah silinder, kontak yang terjadi berjenis *line contact*. *Rolling contact* sesungguhnya hanya dapat terjadi jika terdapat gesekan, sehingga gaya tangensial yang dipindahkan akan selalu lebih kecil dari gaya normal. Jika gesekan dihilangkan, maka hanya terjadi perubahan sudut tanpa diikuti perpindahan. Ilustrasi kontak *rolling* dapat dilihat pada Gambar 2.6.

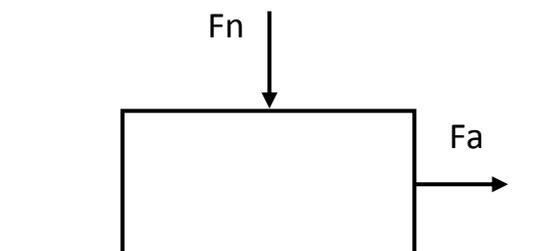


Gambar 2.6. Kontak *rolling*.

2.3.2 Kontak *sliding*

Gesekan biasanya terjadi di antara dua permukaan benda yang bersentuhan, baik terhadap udara, air atau benda padat. Ketika sebuah benda bergerak di udara, permukaan benda tersebut akan bersentuhan dengan udara sehingga terjadi gesekan antara benda tersebut dengan udara. Demikian juga ketika bergerak di dalam air. Gaya gesekan juga selalu terjadi antara permukaan benda padat yang bersentuhan, sekalipun benda tersebut sangat licin. Permukaan benda yang sangat licin pun sebenarnya sangat kasar dalam skala mikroskopis (*asperity*).

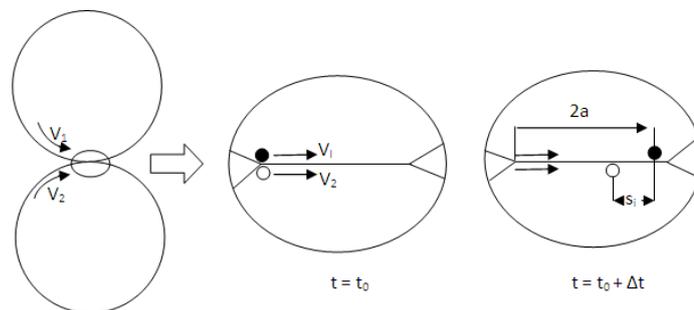
Jika permukaan suatu benda bergeseran dengan permukaan benda lain, masing-masing benda tersebut melakukan gaya gesekan antara satu dengan yang lain. Gaya gesekan pada benda yang bergerak selalu berlawanan arah dengan arah gerakan benda tersebut. Selain menghambat gerak benda, gesekan dapat menimbulkan aus dan kerusakan. Kontak *sliding* sangat erat kaitannya dengan gesekan karena terjadi perbedaan kecepatannya antara kedua permukaan yang saling kontak sehingga seperti ada pergeseran suatu permukaan terhadap permukaan yang lainnya. Ilustrasi kontak *sliding* dapat dilihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7. Kontak *sliding*.

2.3.3 Kontak *rolling sliding*

Rolling contact dapat diartikan adanya kontak antara dua buah benda dimana benda mengalami rotasi dan adanya pembebanan untuk benda tersebut sehingga terjadinya kontak. ketika dua buah benda tersebut mengalami rotasi yang sama dapat dikatakan bahwa benda tersebut mengalami *rolling* sempurna. Namun dalam kenyataannya kondisi *rolling* sempurna sangat sulit ditemui.



Gambar 2.8. Kontak *rolling sliding*.

Ketika benda tersebut berputar sehingga titik kontak bergerak ke permukaan benda, kemudian ada dua berbagai kemungkinan dimana kecepatan V_1 dari titik kontak pada permukaan benda satu sama dengan kecepatan V_2 dari titik-kontak di atas permukaan benda dua, atau tidak. Dalam kasus ini (kecepatan yang sama) orang menyebutnya *rolling*, kemudian kasus tentang dorongan dinamakan *sliding*, atau *rolling* dengan *sliding*.

Kontak *rolling* kombinasi *sliding* atau sering disebut *rolling sliding* terjadi ketika dua permukaan yang saling kontak memiliki kecepatan yang berbeda, dapat dilihat pada Gambar 2.8. Dalam kontak *rolling sliding* dikenal istilah kecepatan *rolling*, *slip*, *slide to roll ratio* dan *creep*. Istilah-istilah tersebut dijelaskan sebagai berikut:

a. Kecepatan *rolling*

Kecepatan *rolling* merupakan kecepatan *rolling* rata-rata dari dua benda yang saling kontak [12]. Kecepatan *rolling* dirumuskan:

$$U_{roll} = \frac{u_1 + u_2}{2} \quad (2.1)$$

b. *Slip*

Slip merupakan perbandingan antara selisih kecepatan dua benda yang berkontak dengan kecepatan benda yang menjadi acuannya [13]. *Slip* dirumuskan:

$$slip = \frac{u_1 - u_2}{u_1} \quad (2.2)$$

c. *Slide to roll ratio*

Slide to roll ratio adalah perbandingan antara selisih kecepatan benda yang berkontak dengan kecepatan *rolling*. *Slide to roll ratio* dirumuskan:

$$sr = \frac{(u_1 - u_2)}{\left(\frac{u_1 + u_2}{2}\right)} = \frac{2(u_1 - u_2)}{(u_1 + u_2)} \quad (2.3)$$

d. *Creep*

Ketika gerak *rolling* terjadi tanpa *sliding* atau *spin*, hal ini disebut sebagai “gerak *rolling* murni”. Pada saat roller ini mengalami kecepatan sudut yang sama, tidak terjadi *sliding* dan *spin*, akan tetapi tetap terjadi perbedaan distribusi tekanan. Sedikit review mengenai deformasi elastis pada kontak *rolling*. Pertama, gaya normal menyebabkan terjadinya kontak dengan luas area tertentu seperti yang dijelaskan pada teori kontak Hertz. Istilah *sliding* juga tidak sepenuhnya terjadi karena ada bagian yang ‘*slip*’ dan ada juga bagian yang ‘*stick*’. Hal ini berpengaruh pada tegangan tangensial, dimana terjadi perbedaan tekanan tangensial pada permukaan yang mengalami ‘*stick*’ yang menyebabkan terbentuknya sedikit ‘*slip*’, fenomena ini disebut dengan *creep* [11].

Perbedaan ini, dapat diartikan permukaan mengalami tegangan yang lebih besar, sama halnya jika permukaan itu mengalami *slip* yang lebih banyak. Istilah *creep ratio* kemudian berkembang, dimana permukaan itu mengalami jarak yang lebih besar daripada batas yang dialami. Misal kontak roller memiliki *creep ratio* 10%, hal ini berarti besarnya jarak yang ditempuh roller 10% lebih banyak daripada besar jarak tempuh yang sebenarnya karena adanya fenomena *creep* tersebut.

Berikut ini adalah persamaan *creep* pada dua buah roller, masing-masing memiliki kecepatan rotasi Ω_1 dan Ω_2 dan memiliki radius R_1 R_2 .

$$creep = \frac{R_1\Omega_1 - R_2\Omega_2}{0.5(R_1\Omega_1 + R_2\Omega_2)} \quad (2.4)$$

Untuk roller dengan kecepatan sudut yang sama, maka persamaannya menjadi:

$$creep = \frac{2(R_1 - R_2)}{R_1 + R_2} \quad (2.5)$$

Penggunaan istilah *creep ratio*, umumnya digunakan pada kontak dimana kedua benda/roller memiliki kecepatan sudut yang sama.

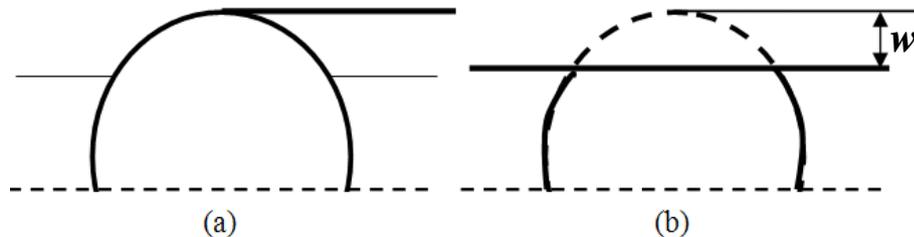
2.4 Keausan (*wear*) pada kontak *rolling sliding*

Keausan (*wear*) didefinisikan sebagai material yang hilang secara kontinyu dari satu atau dua permukaan yang berkontak karena gerakan relatif dari permukaan [6]. Keausan yang terjadi pada suatu material disebabkan oleh adanya beberapa mekanisme yang berbeda dan terbentuk oleh beberapa parameter yang bervariasi meliputi bahan, lingkungan, kondisi operasi, dan geometri permukaan benda yang terjadi keausan.

Mekanisme keausan diklasifikasikan menjadi dua kelompok, yaitu keausan yang penyebabnya didominasi oleh perilaku mekanis dari bahan dan keausan yang penyebabnya didominasi oleh perilaku kimia dari bahan [14]. Akan tetapi, menurut Koji Kato, tipe keausan terdiri dari tiga macam, yaitu *mechanical wear*, *chemical wear* dan *thermal wear* [15].

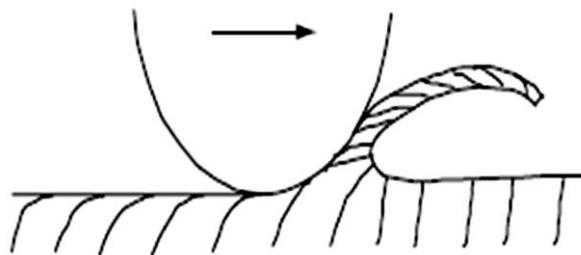
Kontak *rolling sliding* merupakan kombinasi dari gerak *rolling* dan gerak *sliding* sehingga faktor utama dari keausan yang terjadi merupakan pengaruh dari gerakan relatif yang terjadi antar permukaan, yaitu gerak *rolling* dan gerak *sliding* tersebut. Pada gerak *rolling*, keausan yang terjadi akan menimbulkan perubahan kekasaran permukaan. Dalam hal ini lebih dominan disebabkan karena deformasi plastis yang terjadi pada tingkat *asperity*. Ilustrasi dari fenomena perubahan kekasaran permukaan akibat

deformasi plastis pada *asperity* dapat dilihat pada Gambar 2.9, dimana w merupakan *interference* atau perubahan ketinggian *asperity*.



Gambar 2.9. Perubahan bentuk *asperity* akibat deformasi plastis (a) Kondisi awal
(b) deformasi akibat gerak *rolling*.

Pada gerak *sliding*, fenomena keausan yang terjadi lebih dominan disebabkan karena *abrasive wear*. Keausan ini terjadi jika partikel keras atau permukaan keras yang kasar menggerus dan memotong permukaan yang aus, atau yang lebih lunak [14,15]. Fenomena perubahan kekasaran permukaan akibat *abrasive wear* pada gerak *sliding* dapat dilihat pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10. *Abrasive wear* akibat gerak *sliding* [16].

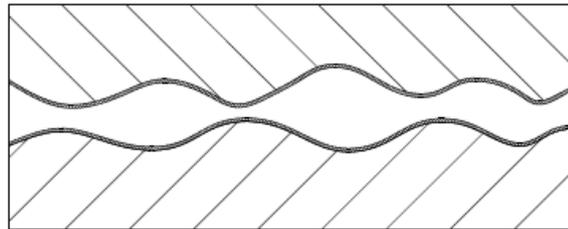
2.5 Jenis kontak berpelumas

Pada aplikasi kontak antar permukaan, dapat ditemukan gaya maupun gerakan yang ditransmisikan dari suatu benda yang berkontak kepada benda yang lainnya. Contohnya adalah roda gigi pada *gearbox* dan *roller bearings*. Kontak yang terjadi tersebut diberi pelumasan untuk mengurangi keausan dan untuk membuat gesekan lebih kecil antara dua permukaan yang berdekatan dan bergerak relatif.

Pelumasan yang baik adalah pelumasan yang mampu memisahkan kedua permukaan yang saling berkontak secara sempurna. Pada kondisi ini, sifat dari pelumas

mempengaruhi terjadinya gesekan dan keausan dapat diabaikan. Akan tetapi, pada kondisi aktual, tekanan yang dihasilkan oleh pelumas tidak dapat menjamin kedua permukaan akan terpisah secara sempurna. Pemisahan yang terjadi tidak cukup besar untuk menghindari kontak antar *asperity* dari kedua permukaan. Hal ini biasa terjadi untuk kondisi awal, saat kondisi operasional dengan kecepatan rendah, beban normal yang besar dan temperatur yang tinggi. Ada 3 jenis pelumasan yang terjadi pada kontak yang terjadi antar dua permukaan, yaitu *hidrodynamic lubrication* (HL), *mixed lubrication* (ML), dan *boundary lubrication* (BL).

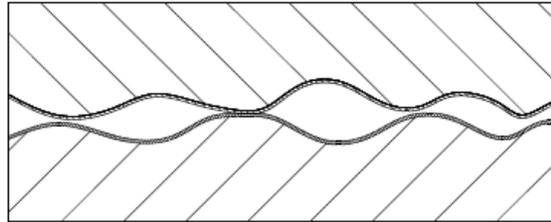
2.5.1 *Hidrodynamic lubrication* (HL)



Gambar 2.11. *Hidrodynamic lubrication* [17].

Dalam kasus *hidrodynamic lubrication* kedua permukaan yang berkontak dapat dipisahkan secara sempurna oleh pelumas, dapat dilihat pada Gambar 2.11. Selama terjadi gerakan, tidak terjadi kontak antara *asperities* karena permukaan yang berkontak terlapisi oleh *fluid film*. Hal ini menyebabkan koefisien gesekan yang terjadi semakin kecil. Pada kondisi kontak dimana tekanan pada *fluid film* relatif rendah dan pada material dengan modulus elastisitas yang tinggi, deformasi elastis yang terjadi dapat diabaikan. Bentuk *fluid film* yang terjadi ditentukan oleh geometri permukaan. Sedangkan pada kondisi tekanan tinggi atau ketika menggunakan material dengan modulus elastisitas rendah, deformasi elastis yang terjadi menjadi besar sesuai bentuk *fluid film* dan distribusi tekanan. *hidrodynamic lubrication* (HL) yang disertai dengan deformasi elastis disebut *elastohidrodynamic lubrication* ((E)HL) [18].

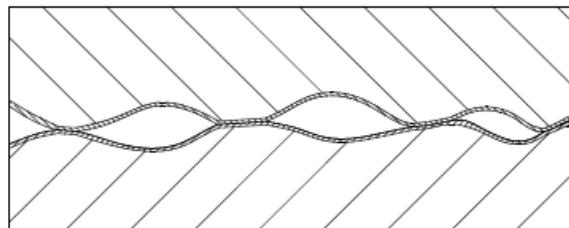
2.5.2 *Mixed lubrication (ML)*



Gambar 2.12. *Mixed lubrication* [17].

Mixed lubrication merupakan transisi antara *hydrodynamic lubrication* dengan *boundary lubrication*. Dalam kasus ini, pelumas tidak memisahkan kedua permukaan secara sempurna sehingga masih ada sebagian *asperity* yang berkontak, dapat dilihat pada Gambar 2.12. Beban yang diterima selama kontak ditahan oleh pelumas (*fluid film*) dan *asperity*. Pembagian distribusi beban menggunakan metode “*load sharing concept*”. *Asperity* menerima sejumlah beban selama kontak terjadi, karena adanya gesekan, beban, dan gerakan relatif antar permukaan, *asperity* mengalami deformasi sehingga terjadi keausan dan perubahan bentuk dari *asperity* tersebut.

2.5.3 *Boundary lubrication (BL)*

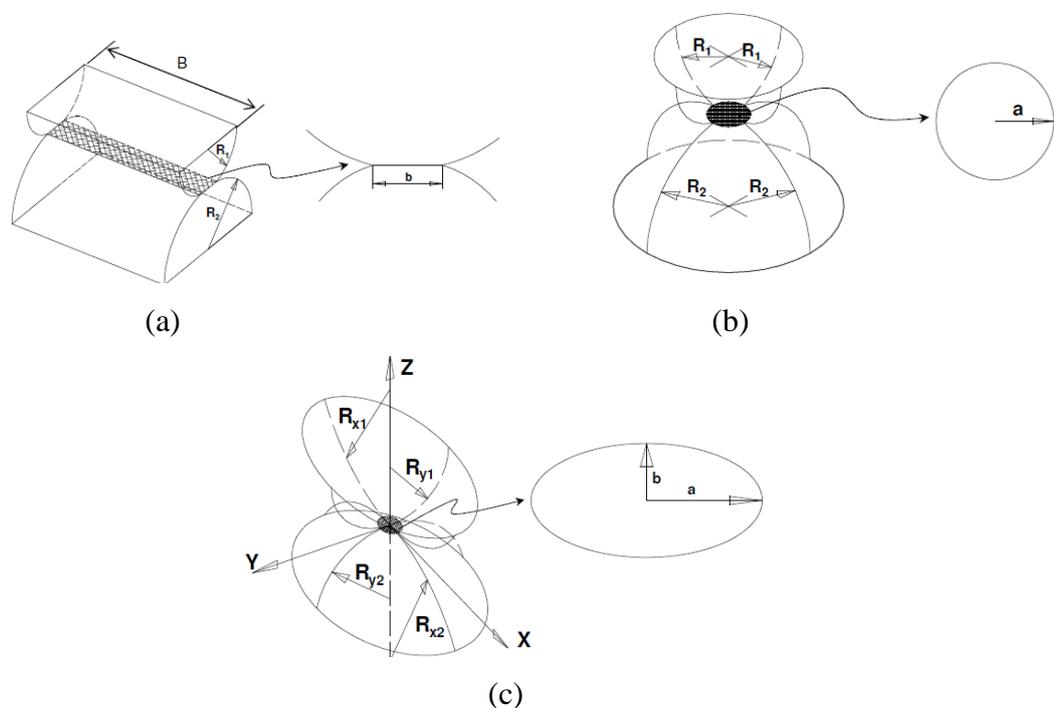


Gambar 2.13. *Boundary lubrication* [17].

Dalam *boundary lubrication*, pelumas tidak dapat memisahkan kedua permukaan sehingga banyak *asperity* yang saling kontak, dapat dilihat pada Gambar 2.13. Hal ini menyebabkan beban yang diberikan ditahan sepenuhnya oleh *asperity*. Banyaknya *asperity* yang berkontak menimbulkan koefisien gesek yang besar. Kasus *boundary lubrication* terjadi pada kontak dengan pembebanan besar dan kecepatan yang rendah [19].

2.6 Geometri kontak

Ketika dua benda berkontak, bergantung pada geometri permukaan, ada tiga tipe kontak yang mungkin terjadi, yaitu *line contact*, *point contact*, dan *elliptical contact*. *Line contact* terjadi ketika dua buah silinder dengan radius R_1 dan R_2 berkontak di bawah kondisi pembebanan, dapat dilihat pada Gambar 2.14 (a). Kontak antara dua silinder itu akan menghasilkan lebar kontak yang dinotasikan dengan b . Contoh *line contact* adalah pada *cylindrical roller bearings* dan kontak antara ring piston dan *liner* silinder. *Circular contact* terjadi ketika dua buah bola dengan radius R_1 dan R_2 berkontak di bawah kondisi pembebanan, dapat dilihat pada Gambar 2.14 (b). Kontak antara dua bola akan menghasilkan area kontak berbentuk lingkaran dengan radius a . contoh *circular contact* yaitu pada *ball bearing*. *Elliptical contact* terjadi ketika dua buah elipsoid berkontak di bawah kondisi pembebanan, dapat dilihat pada Gambar 2.14 (c). Kontak antara dua elipsoid itu akan menghasilkan area kontak berbentuk elips dengan radius mayor a dan radius minor b . Contoh *elliptical contact* adalah pada kontak antara rel dan roda dan kontak antara roda dan jalan.



Gambar 2.14: Berbagai tipe geometri kontak (a) *line contact*, (b) *circular contact*, (c) *elliptical contact* [19].