

BAB II

RUNNING-IN PADA KONTAK ROLLING SLIDING

2.1 Pengertian *running-in*

Ketika dua permukaan diberi pembebanan untuk pertama kalinya dan terjadi gerak relatif antar permukaan, 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 bertujuan untuk meminimalisir aliran energi yang terjadi, baik energi mekanis maupun energi kimiawi [4]. Perubahan yang terjadi mulai dari kondisi awal menuju kondisi tunak (*steady state*) disebut sebagai *running-in*. Meskipun sebagai bentuk konversi energi, terjadinya keausan (*wear*) dalam fase *running-in* tidak diinginkan.

GOST Standart mendefinisikan *running-in* sebagai: “Perubahan pada geometri dari permukaan *sliding* dan pada sifat *physycomechanical* lapisan permukaan dari material selama terjadi gerakan *sliding* awal, yang menyebabkan terjadinya perubahan tersebut dengan asumsi kondisi luar konstan adalah berkurangnya gesekan, penurunan temperatur, dan laju keausan” [5]. Summer-Smith [6], mendefinisikan *running-in* sebagai “Perpindahan titik tertinggi pada permukaan yang saling kontak karena keausan atau deformasi plastis pada kondisi yang terkendali yang meningkatkan keselarasan (*conformability*) dan mengurangi resiko terjadinya kegagalan lapisan permukaan selama kondisi operasi normal”. *Running-in* terjadi pada periode pertama pada kontak *rolling*, *sliding* atau *rolling-sliding* dalam kondisi sistem berpelumas, yang dijelaskan seperti pada Gambar 1.2.

Sebelum terjadinya *running-in*, beberapa permukaan yang saling berkontak belum sepenuhnya cocok, misalnya pada mesin-mesin baru. Biasanya terjadi perbedaan ketinggian titik pada permukaan kontak yang disebabkan oleh kekasaran permukaan akibat proses *finishing* manufaktur, menyebabkan jarak awal antar permukaan menjadi kecil, yang menyebabkan aliran pendingin atau oli menjadi rendah. Kurang lancarnya

aliran oli, ditambah dengan gesekan awal yang besar menyebabkan temperatur operasi lebih tinggi daripada kondisi normal. Selama terjadi *running-in*, *peak asperity* yang tersisa dari proses *machining* berkurang karena adanya deformasi plastis, sehingga semua permukaan menjadi lebih *smooth*. Semakin tinggi temperatur biasanya menyebabkan semakin tingginya laju keausan, akan tetapi setelah permukaan menjadi lebih halus dan semakin banyak *asperity* yang menjadi rata, laju keausan menjadi turun hingga kondisi *steady state*. Ada dua mekanisme yang dominan selama terjadinya *running-in*, yaitu deformasi plastis dan *mild wear* [7]. Laju keausan berkurang hingga mencapai kondisi *steady state*. Laju keausan selama *running-in* jauh lebih besar daripada kondisi operasi normal.

Setelah melewati fase *running-in*, yang durasinya bervariasi tergantung pada sistem *tribology* kontak, kondisi operasi dapat dilakukan tanpa terjadi peningkatan laju keausan. Kapasitas beban operasi juga dapat mencapai kondisi ideal sesuai dengan desain, laju keausan yang kecil dijaga selama kondisi operasi berlangsung. Sedangkan *steady state* didefinisikan sebagai kondisi *tribo-system* dimana koefisien dinamis rata-rata dari gesekan, laju keausan, dan parameter spesifik lain telah dicapai dan berada pada kondisi konstan [8].

Laju keausan dapat naik kembali apabila kondisi operasi telah berlangsung selama rentang waktu tertentu yang dapat menyebabkan terjadinya proses kegagalan lelah pada lapisan material yang menerima pembebanan. Hal ini sebagai pertanda berakhirnya kondisi *steady state* menuju kondisi *wear out*, dimana material mulai mengalami kegagalan operasi [1].

2.2 Faktor-faktor yang mempengaruhi *running-in*

Pada kontak *rolling sliding* sistem yang berpelumas, keausan yang terjadi merupakan pengaruh dari kondisi operasi dan sifat mekanis dari material benda yang saling kontak. Hal yang paling berpengaruh terhadap efektifitas *running-in* adalah beban, kecepatan operasi, kondisi kekasaran permukaan, sifat material, dan topografi permukaan [3]. Berikut adalah penjelasannya:

2.2.1 Beban

Pada kondisi operasional, *running-in* terjadi saat penambahan pembebanan dan kecepatan. Pembebanan memiliki efek yang signifikan pada kualitas dan durasi dari *running-in*. Dengan peningkatan beban selama kondisi awal *running-in* besarnya deformasi plastis yang terjadi juga semakin meningkat. Hal ini menyebabkan meningkatnya kerja yang dilakukan dan temperatur.

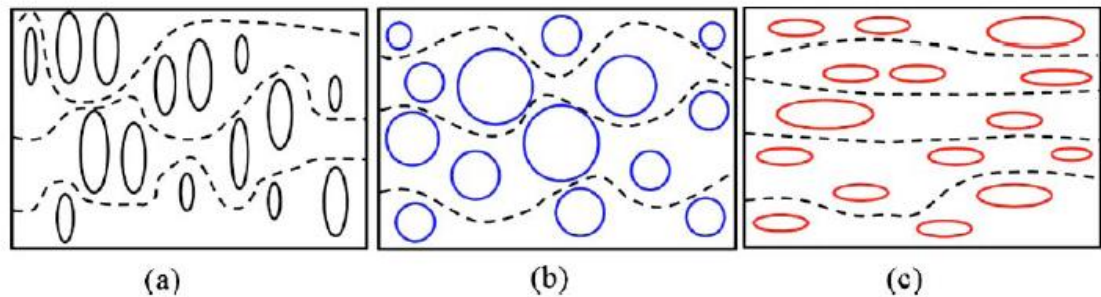
2.2.2 Kecepatan

Wang dkk. mengkaji pengaruh rasio *sliding/rolling* pada kekasaran permukaan selama *running-in*. Hasilnya adalah perubahan kekasaran permukaan tidak seluruhnya dipengaruhi oleh perubahan rasio kecepatan *sliding/rolling*. Perubahan kekasaran permukaan meningkat dengan meningkatnya rasio kecepatan *sliding/rolling* saat nilai kecepataanya rendah, dan nilai kekasaran permukaan berkurang saat terjadi peningkatan rasio kecepatan *sliding/rolling* untuk kecepatan yang besar. Kecepatan *rolling* juga berperan besar dalam fase *running-in*. Semakin tinggi kecepatan *rolling*, akan semakin tebal lapisan pelumasan yang terbentuk, mengakibatkan makin sedikit kontak antar *asperity* yang terjadi. Dengan demikian, gesekan dan laju keausan semakin berkurang, sehingga sistem lebih cepat mencapai fase *steady state*.

2.2.3 Sifat mekanis material

Salah satu sifat mekanis yang berpengaruh adalah kekerasan dan modulus elastisitas. Semakin keras dan tinggi modulus elastisitasnya, gaya yang diperlukan untuk menyebabkan deformasi semakin besar sehingga semakin sulit untuk terjadi perubahan bentuk permukaan. Dengan demikian, proses *running-in* yang terjadi akan semakin lama. Sebaliknya, apabila sifat kekerasan dan modulus elastisitasnya semakin rendah, benda akan lebih mudah menalami deformasi sehingga akan semakin mudah terjadi keausan. Dengan demikian waktu yang diperlukan dalam proses *running-in* akan semakin singkat.

2.2.4 Topografi permukaan (*surface topography*) [3]



Gambar 2.1 Perbedaan *surface pattern* (a) *transverse* ($\Gamma < 1$) (b) *isotropic* ($\Gamma = 1$) dan (c) *longitudinal* ($\Gamma > 1$) [3].

Pengaruh *surface pattern* terhadap *running-in* dipelajari dengan memodelkan 3 jenis *surface pattern* yang berbeda-beda pada model kontak *running-in*. Ketiga model *surface pattern* adalah *transverse*, *isotropic* dan *longitudinal*, seperti yang ditampilkan pada Gambar 2.1. Penggolongan suatu permukaan menjadi *transverse*, *isotropic*, dan *longitudinal* berdasarkan rasio 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, misalnya *grinding*, *lapping* dan *honing*.

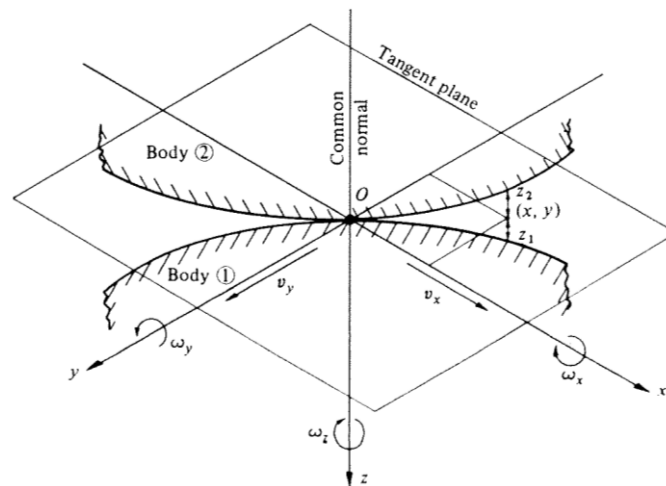
Pada Gambar 2.1, terdapat ilustrasi aliran pelumas yang ditunjukkan dengan garis putus-putus. Pada *transverse surface*, orientasi *asperity* menghambat laju aliran fluida, hal ini menyebabkan semakin banyak kontak antar *asperity* yang terjadi menghasilkan semakin besarnya beban yang diterima oleh *asperity*. Peningkatan beban itu sendiri mengakibatkan keausan yang terjadi semakin besar.

2.3 Kontak *rolling sliding* [9]

Pada kontak antara dua buah roller dengan *radius* masing-masing R_1 dan R_2 untuk roller 1 dan 2, gerakan dari masing-masing roller pada waktu tertentu dapat didefinisikan sebagai kecepatan linear atau kecepatan sudut relatif terhadap suatu titik acuan yang telah ditentukan. Jika mengambil titik acuan pada titik kontak antar roller, diperoleh kecepatan linear V_1 dan kecepatan sudut Ω_1 untuk roller pertama, dan kecepatan linear V_2 dan kecepatan sudut Ω_2 untuk roller kedua. Ilustrasi kontak antar 2

permukaan tersebut seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.2 dibawah. Gambar 2.2 menunjukkan 2 buah permukaan yang bersinggungan dengan sumbu kontak yang terjadi.

Kontak *rolling sliding* terjadi ketika 2 permukaan yang bersinggungan masing-masing mempunyai kecepatan yang berbeda sehingga menyebabkan terjadinya gerak relative antar permukaan yang dapat berupa *spin*, *sliding* atau *rolling*. *Spin* didefinisikan sebagai kecepatan sudut relatif pada sumbu normal. *Sliding* didefinisikan sebagai kecepatan linear relatif antara dua permukaan yang berkontak. *Rolling* didefinisikan sebagai kecepatan sudut relatif antara dua benda terhadap suatu sumbu putar pada bidang singgung kedua permukaan. Kontak *rolling sliding* dapat diartikan sebagai kontak antar permukaan yang memiliki perbedaan kecepatan sehingga menimbulkan gerak relatif antar permukaan tersebut.



Gambar 2.2 Kontak permukaan *non-conforming* pada titik O [9].

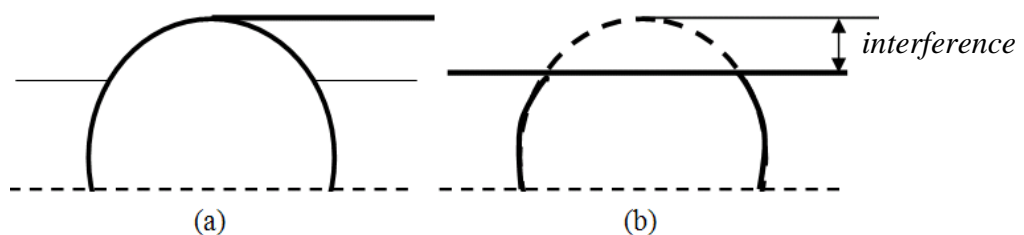
2.4 Keausan (*wear*) pada kontak *rolling-sliding*

Dalam *German Industrial Standard*, DIN 50320, keausan digambarkan sebagai proses hilangnya bahan dari permukaan benda pejal karena aksi mekanis, yaitu kontak dan gerak relatif terhadap padatan, zat cair atau *body counter* berupa gas [10]. Keausan dari bahan terjadi karena banyak faktor dan mekanismenya dipengaruhi oleh berbagai parameter, meliputi parameter bahan, lingkungan, kondisi operasi, dan geometrinya. Menurut tipe gesekan, parameter keausan antara lain karena proses *rolling*, *rolling-sliding*, *sliding*, *fretting*, dan *impact* [11].

Mekanisme keausan diklasifikasikan menjadi dua kelompok, yaitu: keausan yang penyebabnya didominasi oleh perilaku mekanis dari padatan-padatan dan keausan yang penyebabnya didominasi oleh perilaku kimia dari bahan [12]. Tetapi menurut K. Kato, tipe keausan terdiri dari tiga macam, yaitu *mechanical wear*, *chemical wear* dan *thermal wear* [13].

Dari macam-macam keausan, untuk keausan yang utama dan paling sering terjadi dikelompokkan menjadi empat macam, yaitu: keausan *adhesive*, keausan *abrasive*, keausan *fatigue*, dan keausan *corrosive*. Sebenarnya dalam situasi pengausan, ada banyak mekanisme beroperasi secara serempak, meskipun begitu tetap ada satu mekanisme penentu tingkat keausan yang akan diteliti yang berhubungan dengan masalah keausan.

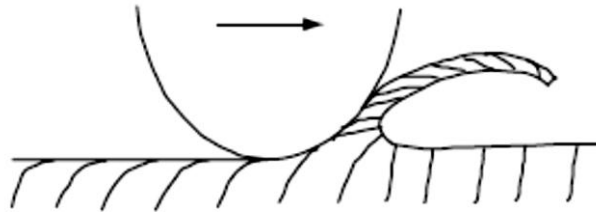
Pada jenis kontak *rolling sliding*, penentu utama dari keausan yang terjadi merupakan pengaruh dari gerakan relatif yang terjadi antar permukaan, yaitu gerak *rolling* dan gerak *sliding*. Pada gerak *rolling*, keausan yang merupakan fenomena berkurangnya kekasaran permukaan, lebih dominan disebabkan karena adanya deformasi plastis yang terjadi pada tingkat *asperity* karena gerak *rolling* yang terjadi. Ilustrasi dari fenomena perubahan kekasaran permukaan akibat deformasi plastis dapat dilihat pada Gambar 2.3 berikut .



Gambar 2.3 Perubahan bentuk *asperity* akibat deformasi plastis

(a).Kondisi awal (b) deformasi akibat gerak *rolling*

Sedangkan fenomena keausan yang terjadi pada gerak *sliding*, dominan disebabkan karena adanya *abrasive wear*: Keausan ini terjadi jika partikel keras atau permukaan keras yang kasar menggerus dan memotong permukaan yang aus, atau *earth moving equipment* [10, 13]. Contohnya pada proses pemesinan seperti *micro-cutting*, *wedge forming*, dan *ploughing*. Ilustrasi dari fenomena perubahan kekasaran permukaan akibat *abrasive wear* dapat dilihat pada Gambar 2.4 berikut:



Gambar 2.4 *Abrasive wear* akibat gerak *sliding*.

2.5 *Slide to roll, creep* dan *slip* pada kontak *rolling sliding*

Pada perkembangannya, saat dua roller dengan *radius*, kecepatan linear dan kecepatan sudut yang berbeda-beda saling berkontak, perbedaan tersebut menyebabkan terjadinya kontak *rolling sliding*, dimana roller mengalami gerakan *sliding* dan *rolling* disaat yang bersamaan. Pada kontak *rolling sliding*, ada beberapa parameter yang dapat digunakan untuk menggambarkan kontak yang terjadi, antara lain *slip*, kecepatan *rolling*, *creep*, dan *slide to roll ratio*. Masing-masing memiliki pengertian dan penggambaran yang berbeda, berikut penjelasan singkatnya :

a. Kecepatan *rolling* [15]

Kecepatan *rolling* merupakan kecepatan rata-rata dari 2 roller yang saling berkontak. Berikut adalah persamaan dari kecepatan *rolling*:

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

kecepatan *rolling*, menunjukkan kecepatan translasi rata-rata dari kedua roller yang saling berkontak.

b. *Slip* [15]

Slip merupakan perbandingan antara selisih kecepatan dari dua roller yang berkontak dibandingkan dengan kecepatan benda yang menjadi acuannya. Berikut adalah persamaan *slip*:

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

Dari persamaan di atas, nilai *slip* menunjukkan kecepatan linear relatif antara roller 1 dengan roller lainnya.

c. *Creep* [16]

Seperti yang telah dibahas sebelumnya, saat dua buah roller saling berkontak, masing-masing memiliki kecepatan linear dan kecepatan sudut yang berbeda, akan terjadi kontak *rolling sliding*. Pada saat masing-masing roller memiliki kecepatan linear yang berbeda ($V_1 \neq V_2$) gerakan *rolling* yang terjadi akan disertai gerak *sliding*, sedangkan jika kecepatan sudut berbeda ($\Omega_1 \neq \Omega_2$) maka akan disertai dengan *spin*.

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* [9].

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 [16].

$$creep = \frac{R_1\Omega_1 - R_2\Omega_2}{0.5(R_1\Omega_1 + R_2\Omega_2)} \quad (2.3)$$

Untuk roller dengan kecepatan sudut yang sama, maka persamaannya menjadi

$$creep = \frac{2(R_1 - R_2)}{R_1 + R_2} \quad (2.4)$$

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

d. *Slide to roll ratio* [14]

Slide to roll ratio adalah perbandingan antara besarnya perbedaan kecepatan benda yang saling berkontak dengan kecepatan *rolling*, dan dirumuskan sebagai berikut:

$$sr = \frac{(u_1 - u_2)}{\left(\frac{u_1 + u_2}{2}\right)} = \frac{2(u_1 - u_2)}{(u_1 + u_2)} \quad (2.5)$$

Fenomena fisik dari kontak yang terjadi pada *slide to roll ratio* mirip dengan *creep*, perbedaannya adalah istilah *slide to roll ratio* lebih berkembang pada roller dengan kecepatan sudut yang berbeda, sedangkan *creep* digunakan pada roller yang memiliki kecepatan sudut yang sama.

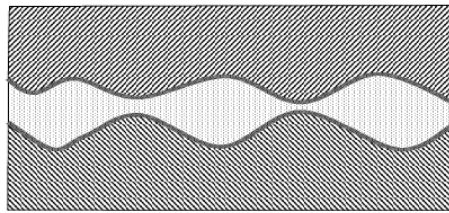
2.6 Jenis kontak berpelumas [17]

Gesekan antar 2 permukaan sering kita jumpai dalam kehidupan sehari-hari. Dengan adanya gesekan ini memungkinkan kita untuk bisa berjalan, roda dapat menggelinding dan sebagainya. Dalam aplikasinya, ada beberapa sistem yang membutuhkan gesekan yang besar dalam prinsip kerjanya seperti kopling, rem dan sistem traksi. Ada pula yang memerlukan gesekan sekecil mungkin dalam proses kerjanya seperti roda gigi, *bearing*, *cam and tappet system*.

Salah satu perkembangan dalam desain adalah untuk mengurangi ukuran komponen sementara transmisi beban operasi yang dapat diteruskan sama atau bahkan lebih tinggi. Oleh karena itu, diperlukan kualitas material yang lebih baik dan peningkatan pengetahuan mengenai aspek *tribology*. Selanjutnya mekanisme sistem dioptimalkan dengan cara mengurangi gesekan dan keausan. Hal ini sering dilakukan untuk mengurangi gesekan dan keausan adalah pelumasan. Bila pelumas ini mampu

memisahkan permukaan yang berkontak, maka gesekan jauh berkurang bila dibandingkan dengan situasi ketika permukaan berada dalam keadaan berkontak langsung. Ada 3 jenis pelumasan yang terjadi pada kontak yang terjadi antar 2 permukaan, yaitu:

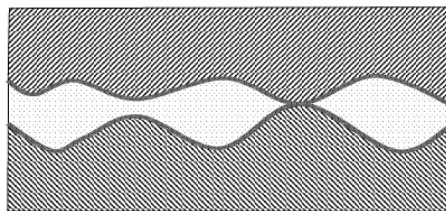
a) *Hydrodynamic Lubrication*



Gambar 2.5 *Hydrodynamic lubrication* [17].

Dalam kasus ini pelumas mampu memisahkan permukaan yang berkontak. Selama terjadi gerakan, permukaan yang berkontak terlapisi oleh *fluid film* sehingga tidak terjadi kontak antara *asperity*. Hal ini menyebabkan koefisien gesekan yang terjadi semakin kecil. Tidak adanya kontak antar *asperities* juga menyebabkan tidak terjadinya deformasi plastis pada *asperity*, mengakibatkan tidak adanya keausan (*wear*) yang terjadi. Jenis kontak ini menunjukkan keberhasilan dalam pelumasan, yaitu mengurangi gesekan yang terjadi.

b) *Mixed Lubrication*

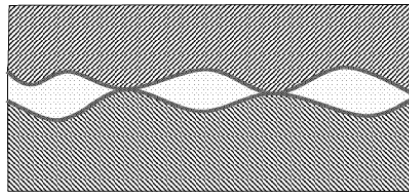


Gambar 2.6 *Mixed lubrication* [17].

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*. Pembagian distribusi beban menggunakan metode “*Load Sharing Concept*” yang dikembangkan oleh Moes. *Asperity*

menerima sejumlah beban selama kontak terjadi, karena adanya gesekan, beban, dan gerakan relatif antar permukaan. *Asperity* mengalami deformasi sehingga terjadi keausan perubahan bentuk dari *asperity* tersebut. Pada fase *running-in*, terjadi deformasi plastis yang menyebabkan keausan kemudian berangsur-angsur terjadi penurunan nilai koefisien gesek, laju keausan, dan kekasaran permukaan.

c) *Boundary Lubrication*

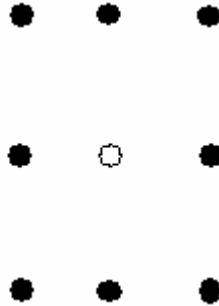


Gambar 2.7 *Boundary lubrication* [17].

Boundary Lubrication biasanya terjadi pada komponen yang mengalami pembebanan besar dengan kecepatan yang rendah seperti bearing, roda gigi, *traction drives* dan lain-lain. *Boundary lubrication* didefinisikan sebagai “pelumasan oleh *lubricant* dalam kondisi dimana permukaan solid begitu dekat antara satu dengan lainnya yang menyebabkan adanya kemungkinan terjadi ontak antar *asperity*. Gesekan dan keausan yang terjadi pada *Boundary Lubrication* ditentukan oleh interaksi yang terjadi antara *solid* dan *liquid*. *Bulk flow properties* dari *liquid* memiliki pengaruh dalam fenomena gesekan dan keausan yang terjadi.

2.7 *Density of asperity* [17]

Pertama harus didefinisikan bagaimana bentuk dari kumpulan *asperity* yang terbentuk. Ada bermacam-macam definisi dari kumpulan *asperity*. Ketika menghitung profil permukaan, *summit* secara umum didefinisikan sebagai titik dimana lebih tinggi dari dua tetangganya. Untuk pengukuran permukaan secara umum terdapat dua kemungkinan. Yang pertama adalah sebuah titik yang lebih tinggi dari empat tetangga langsungnya. Tipe ini disebut sebuah ‘*peak*’. Kedua adalah sebuah titik yang lebih tinggi dari delapan tetangga langsungnya. Tipe ini disebut sebuah ‘*summit*’.



Gambar 2.8 Skema *summit* pada *asperity*

Karena kemungkinan akan sebuah titik agar dapat menjadi *summit* lebih kecil daripada kemungkinan sebuah titik untuk menjadi *peak*, maka pada sebuah permukaan selalu terdapat lebih banyak *peak* dari pada *summit*. Setelah posisi dari *summit* telah diketahui, maka jumlah *asperity* dapat dihitung. Dengan membagi jumlah ini ke seluruh luas permukaan yang dihitung, maka *densitas* dari *summit* tiap unit *area* dapat ditentukan.