

## **BAB II**

### **DASAR TEORI**

#### **2.1 Tinjauan Pustaka**

Dalam penelitian yang sebelumnya, dilakukan simulasi numerik menggunakan SolidWorks 2012 untuk pemodelan desain dan ANSYS Workbench 14.0 untuk analisis struktur pada *bearing* tipe ASb UC204-12 dengan diameter 19,50 mm yang terbuat dari baja struktural dan aluminium alloy. Dengan pembebahan sebesar 200 N dan torsi 75,429 N·m, hasil simulasi menunjukkan bahwa baja struktural mengalami deformasi total sebesar 0,00030158 mm, tegangan ekuivalen 10,085 MPa, dan regangan ekuivalen  $5,695 \times 10^{-5}$  mm/mm. Sementara itu, aluminium alloy mengalami deformasi total 0,00094256 mm, tegangan ekuivalen 9,9263 MPa, serta regangan ekuivalen 0,00015763 mm/mm (Zulpani et al., 2021).

Kasus lain ditunjukkan pada analisis *bearing* di PT. Kimia Tirta Utama, di mana kerusakan berupa retakan atau patahnya *bearing* dianalisis menggunakan ANSYS untuk memetakan distribusi tegangan dan area kritis. Pada sistem conveyor dengan kapasitas 50 ton/jam dan beban ekuivalen sebesar 28,43 kg, umur *bearing* diproyeksikan mencapai 4.969,19 hari. Hasil simulasi struktural menunjukkan tegangan von Mises sebesar 94,777 MPa dengan faktor keamanan 4,85 (kategori aman), deformasi total mencapai 490.332,5  $\mu\text{m}$  saat dibebani 50.000 kg, perkiraan umur kelelahan sebesar  $5,83 \times 10^5$  siklus, serta safety factor akhir tercatat sebesar 0,91056 (Anjaswara, 2019).

Pada penelitian sebelumnya meneliti reliabilitas *bearing* pada industri cetak offset dengan pendekatan metode Least Square dan Maximum Likelihood Estimation (MLE) untuk menghitung sisa umur *bearing*. Berdasarkan analisis Least Square, estimasi sisa umur untuk *bearing* tipe 6001 ZZ, 6205 ZZ, 0606 ZZ, dan thrust *bearing* masing-masing adalah 11 hari 18 jam; 16 hari 21 jam; 9 hari 15 jam; serta 7 hari 13 jam. Sedangkan estimasi dengan metode MLE menunjukkan umur yang lebih panjang,

yakni 23 hari 10 jam; 25 hari 1 jam; 29 hari 1 jam; dan 19 hari 14 jam secara berturut-turut (Famela et al., 2017).

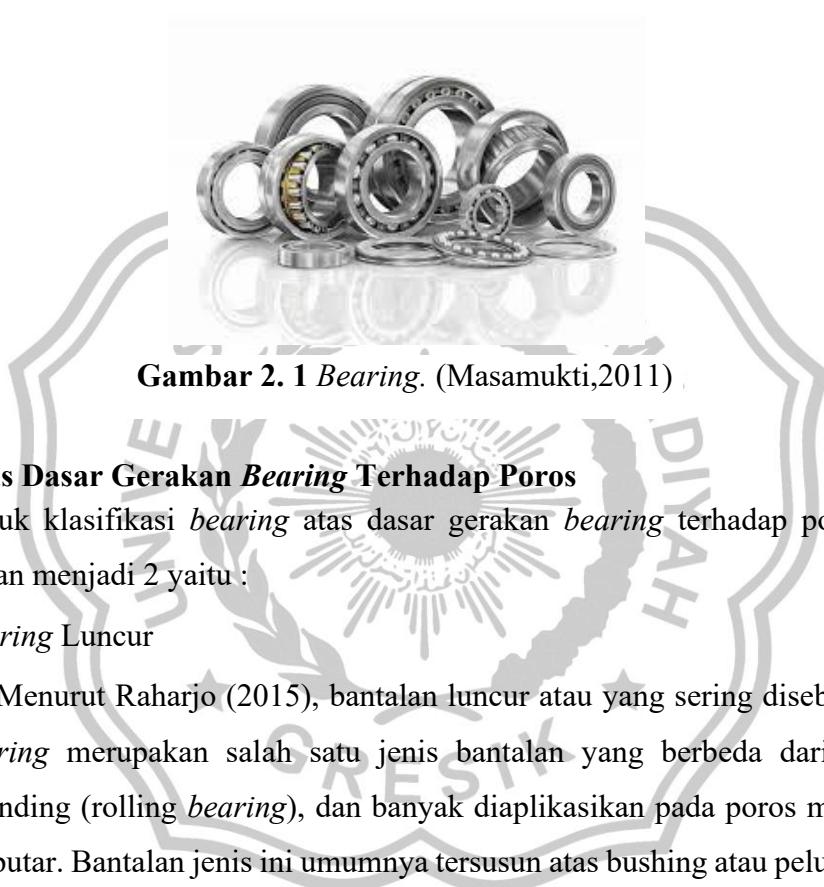
Secara umum, kegagalan pada sistem mekanik seringkali dipicu oleh interaksi gesekan antar dua permukaan yang saling ber gesekan. Fenomena ini menghasilkan panas sekaligus memicu keausan, yang lebih dominan terjadi pada material dengan tingkat kekerasan lebih rendah. Faktor-faktor yang memengaruhi intensitas keausan meliputi tekanan kontak, kecepatan relatif, kekasaran permukaan, serta kekerasan material itu sendiri (Ningsih, E. K. 2016).

Penelitian sebelumnya menguji performa *bearing* UCFL206 pada mesin pencacah limbah botol plastik. Pada kecepatan putar 702,5 rpm dengan beban masing-masing 577,71 N dan 183,783 N, *bearing* mampu bertahan selama 7.231,37 jam. Sementara pada kecepatan 501,78 rpm dengan beban 734,867 N dan 184,05 N, umur *bearing* meningkat hingga 10.095,16 jam. Berdasarkan kondisi operasi yang tidak melibatkan suhu maupun kecepatan ekstrem, pelumasan menggunakan grease dipandang paling sesuai. Pelumasan ini juga perlu dilakukan secara berkala guna memperpanjang masa pakai *bearing* dan menjaga kinerjanya tetap optimal (Irwanda, 2010).

## 2.2 Pengertian Bantalan/*Bearing*

*Bearing* atau bantalan merupakan salah satu elemen mesin yang berfungsi menopang poros berbeban, sehingga memungkinkan gerakan putar maupun gerakan bolak-balik berlangsung secara halus, aman, dan memiliki umur layanan yang panjang. Dalam sebuah mesin, keberadaan *bearing* sangat krusial untuk memastikan putaran berjalan lancar sekaligus meminimalkan gesekan antara poros dengan elemen penumpunya. Terdapat berbagai jenis *bearing* yang diklasifikasikan berdasarkan aplikasi dan karakteristik kerjanya. Salah satunya adalah journal *bearing* yang cenderung menghasilkan gesekan lebih besar dan rentan mengalami keausan lebih cepat. Fungsi utama bantalan adalah menahan poros yang memikul beban tertentu agar dapat bergerak dengan mulus dan komponen di sekitarnya tetap awet. Agar dapat berfungsi optimal, *bearing* harus memiliki kekuatan yang memadai untuk menopang

beban dari poros dan komponen mesin lainnya yang terhubung, sehingga sistem dapat bekerja sesuai rancangan. Apabila bantalan mengalami kerusakan atau tidak dapat bekerja dengan baik, maka performa keseluruhan sistem mekanik akan menurun drastis, bahkan dapat mengakibatkan terhentinya proses operasi. (Fish, 2020)(Chen et al., 2018)



### 2.3. Atas Dasar Gerakan *Bearing* Terhadap Poros

Untuk klasifikasi *bearing* atas dasar gerakan *bearing* terhadap poros dapat dibedakan menjadi 2 yaitu :

#### 1. *Bearing* Luncur

Menurut Raharjo (2015), bantalan luncur atau yang sering disebut journal *bearing* merupakan salah satu jenis bantalan yang berbeda dari bantalan gelinding (rolling *bearing*), dan banyak diaplikasikan pada poros mesin yang berputar. Bantalan jenis ini umumnya tersusun atas bushing atau peluncur yang didukung oleh rumah bantalan, dimana poros atau journal berputar di dalam lubang bushing tersebut.

Komarudin dan Harfi (2012) menambahkan bahwa bantalan ini dinamakan bantalan luncur karena terdapat gerakan meluncur (sliding) antara permukaan diam dan permukaan bergerak di dalamnya. Selain itu, sebutan journal *bearing* digunakan karena bagian poros yang ditopang oleh bantalan berada pada area

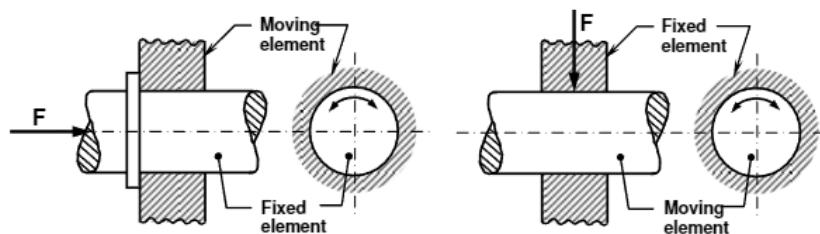
tertentu yang disebut tap-poros atau journal, sebagaimana dapat dilihat pada ilustrasi Gambar 2.2.



**Gambar 2. 2 Bearing Luncur.** (Masamukti,2011)

Jenis - jenis *bearing* yang termasuk kelompok ini adalah:

- Bearing radial*, berbentuk silinder, belahan silinder, elips, dll.
- Bearing aksial*, berbentuk engsel, kerah, Michel, dll. *Bearing* ini menahan beban beban *horizontal parallel* dengan sumbu poros *horizontal*.
- Bearing* khusus, yang berbentuk bola, dll.



**Gambar 2. 3 Bearing Radial & Aksial.** (Masamukti,2011)

## 2. *Bearing* Gelinding

Pada *bearing* gelinding, terjadi kontak antara komponen yang berputar dengan komponen diam melalui elemen gelinding berupa bola, rol silinder, rol jarum, maupun rol bulat. Mekanisme ini memungkinkan terjadinya gesekan gelinding yang jauh lebih kecil dibandingkan dengan gesekan luncur pada bantalan biasa, sehingga memberikan sejumlah keuntungan dalam aplikasi

mesin. Elemen gelinding seperti bola dan rol ditempatkan di antara cincin luar (*outer ring*) dan cincin dalam (*inner ring*). Saat salah satu cincin berputar, bola atau rol akan menggelinding sehingga gesekan yang terjadi menjadi sangat minimal.

Akurasi dimensi dan bentuk bola maupun rol merupakan faktor kritis yang wajib terpenuhi, mengingat luas bidang kontak antara elemen gelinding dengan cincinnya relatif sangat kecil. Kondisi ini menyebabkan tekanan kontak menjadi tinggi meskipun total gaya yang bekerja tidak terlalu besar. Berdasarkan arah pembebanan, *bearing* gelinding dapat dikategorikan menjadi *bearing* radial yang dirancang terutama untuk menahan beban radial serta sebagian kecil beban aksial, dan *bearing* aksial yang berfungsi untuk menahan beban sejajar sumbu poros. Ditinjau dari bentuk elemen gelindungnya, *bearing* gelinding juga dibedakan menjadi *bearing* bola dan *bearing* rol. Selain itu, klasifikasi dapat dilakukan berdasarkan jumlah baris elemen gelinding maupun konstruksi internalnya.

Menurut Masmukti (2011), *bearing* gelinding yang menggunakan rol lurus, tirus, atau desain khusus yang ditempatkan di antara dua cincin pada umumnya mampu menahan beban statis maupun dinamis yang lebih besar daripada *bearing* bola. Hal ini disebabkan oleh luas kontak yang lebih besar pada *bearing* rol dibandingkan *bearing* bola. Dari segi biaya, *bearing* gelinding dengan ukuran dan kapasitas beban besar umumnya juga lebih ekonomis dibandingkan *bearing* bola. Secara umum, *bearing* gelinding hanya dirancang untuk menahan beban dalam satu arah, baik itu radial maupun aksial, kecuali pada jenis *bearing* rol tirus atau *bearing* dengan konstruksi khusus. Berdasarkan bentuk dan susunannya, *bearing* gelinding dapat diklasifikasikan menjadi empat jenis utama.Bantalan Gelinding Silindirs

Komponen bantalan gelinding silindris (*cylindrical roller bearing*) meliputi bagian-bagian berikut:

a. Cincin Luar (*Outer ring*)

Merupakan bagian terluar dari *bearing* yang bersentuhan langsung dengan rumah bantalan (*bearing housing*), sehingga berfungsi sebagai tumpuan statis dari keseluruhan sistem bantalan.

b. Cincin Dalam (*Inner ring*)

Bagian ini terpasang pada poros dan akan berputar mengikuti putaran poros, sehingga menjadi elemen utama yang mentransmisikan gerakan putar ke elemen gelinding.

c. Elemen Gelinding (*Rollers*)

Berupa silinder kecil yang ditempatkan di antara cincin luar dan cincin dalam. Elemen inilah yang berperan mengubah gesekan geser menjadi gesekan gelinding, sehingga mengurangi resistansi putar secara signifikan.

d. Sangkar atau Separator (*Cage*)

Komponen ini bertugas menjaga jarak antar elemen gelinding agar tetap terpisah secara seragam, sehingga distribusi elemen gelinding menjadi merata dan tidak terjadi saling bersentuhan antar elemen.

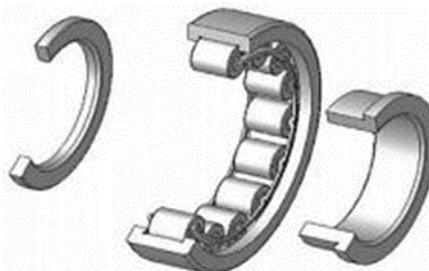
e. Seal atau Penutup (*Seal/Shield*)

Komponen opsional yang berfungsi melindungi bagian dalam bantalan dari masuknya debu, kotoran, maupun cairan asing. Seal ini biasanya diaplikasikan pada tipe bantalan tertutup (*sealed bearings*) untuk meningkatkan umur pakai.

f. Sistem Pelumasan (*Lubrication*)

Berkaitan dengan pemberian pelumas pada elemen gelinding, bertujuan untuk meminimalkan gesekan serta mengurangi keausan yang terjadi akibat kontak berulang selama operasi.

Bantalan Gelinding Silindirs dapat dilihat pada Gambar 2.4 di bawah ini.



**Gambar 2. 4 Bearing Gelinding Silindirs.** (Masamukti,2011)

1. Bantalan gelinding sperik

Bantalan gelinding sperik (*spherical roller bearing*) merupakan tipe *bearing* yang dirancang untuk mampu menahan beban radial sekaligus beban aksial, dengan keunggulan dapat mengakomodasi ketidaksejajaran poros. Bantalan ini memiliki sejumlah komponen utama sebagai berikut:

a. Cincin Luar (*Outer ring*)

Bagian ini dilengkapi lintasan (*raceway*) berbentuk cekung yang berfungsi menopang elemen gelinding berbentuk bola atau rol sferis.

b. Cincin Dalam (*Inner ring*)

Memiliki lintasan dengan profil sferis yang dirancang untuk mendukung elemen gelinding dan biasanya terpasang langsung pada poros, sehingga berputar bersamaan dengan poros.

c. Elemen Gelinding (*Rollers*)

Berupa bola atau rol sferis yang dirancang untuk menyebarkan beban secara merata serta memungkinkan terjadinya gerakan rotasi dengan tingkat gesekan yang rendah.

d. Sangkar atau Separator (*Cage*)

Berfungsi menjaga posisi elemen gelinding agar tetap terpisah dan tidak bersentuhan langsung, sekaligus memastikan distribusi elemen gelinding tetap seragam selama operasi.

e. Pelumasan (*Lubrication*)

Digunakan untuk meminimalkan gesekan serta mengurangi potensi keausan pada elemen gelinding, sehingga memperpanjang umur operasi *bearing*.

f. Seal atau Penutup (*Seal/Shield*)

Umumnya diaplikasikan pada jenis bantalan tertutup guna melindungi bagian dalam *bearing* dari masuknya debu, kotoran, atau cairan yang dapat merusak komponen.

Contoh gambar *bearing gelinding sperik* dapat dilihat pada gambar dibawah



**Gambar 2. 5 Bearing Gelinding Sperik.** (Masamukti,2011)

2. Bantalan gelinding tirus

Bantalan gelinding tirus (*tapered roller bearing*) merupakan salah satu jenis bantalan yang dirancang khusus untuk mampu memikul beban radial sekaligus beban aksial secara bersamaan. Desain ini membuatnya ideal digunakan pada aplikasi yang memerlukan dukungan beban kombinasi, seperti pada roda kendaraan, sistem transmisi (*gearbox*), serta berbagai mesin industri berkapasitas berat. Struktur bantalan ini tersusun atas beberapa komponen utama, yaitu:

a. Cincin Luar (*Outer ring*)

Memiliki lintasan (*raceway*) berbentuk kerucut yang berperan sebagai jalur bagi elemen gelinding.

b. Cincin Dalam (*Inner ring*)

Juga mempunyai lintasan kerucut yang terpasang pada poros dan berputar bersamanya, menopang elemen gelinding.

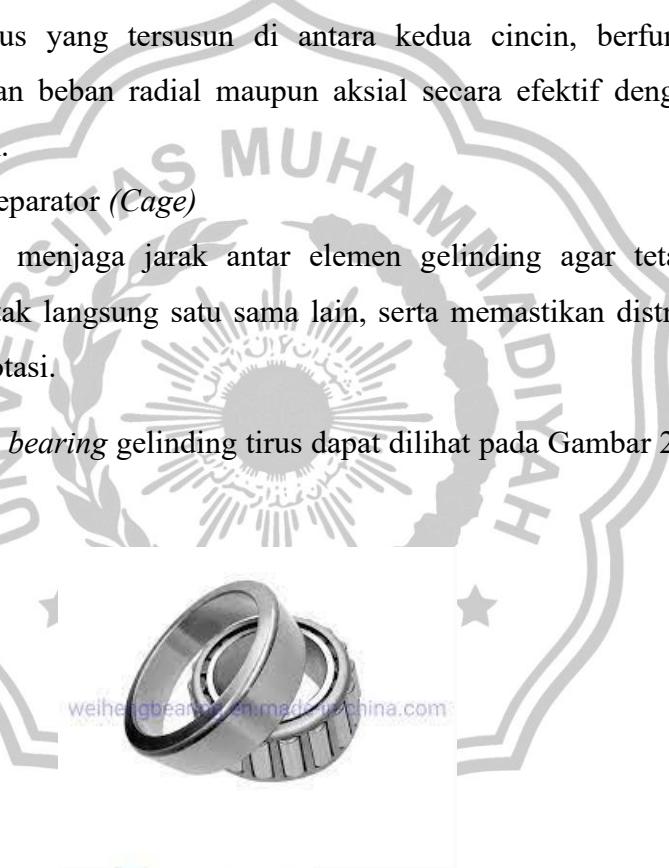
c. Elemen Gelinding (*Tapered Rollers*)

Berupa rol tirus yang tersusun di antara kedua cincin, berfungsi untuk mendistribusikan beban radial maupun aksial secara efektif dengan tingkat gesekan rendah.

d. Sangkar atau Separator (*Cage*)

Komponen ini menjaga jarak antar elemen gelinding agar tetap merata, mencegah kontak langsung satu sama lain, serta memastikan distribusi yang stabil selama rotasi.

Contoh gambar *bearing* gelinding tirus dapat dilihat pada Gambar 2.6 dbawah ini.



**Gambar 2. 6 Bearing Tirus.** (Masamukti,2011)

3. Bantalan gelinding jarum

Bantalan gelinding jarum (*needle roller bearing*) merupakan salah satu jenis bantalan yang memanfaatkan elemen gelinding berbentuk silinder panjang dengan diameter relatif kecil, menyerupai jarum, untuk menopang beban radial.

Desain rol yang ramping ini memungkinkan bantalan memiliki profil yang lebih tipis dibandingkan *bearing* pada umumnya, sehingga sangat cocok diaplikasikan pada ruang pemasangan yang terbatas namun tetap memerlukan kemampuan menahan beban radial yang signifikan.

Bantalan jenis ini umumnya digunakan pada sistem transmisi otomotif, peralatan industri ringan hingga berat, serta berbagai mekanisme yang membutuhkan kapasitas beban tinggi dengan dimensi kompak. Komponen utama bantalan ini meliputi:

a. Cincin Luar (*Outer ring*)

Berfungsi sebagai lintasan utama bagi elemen gelinding jarum. Pada desain tertentu, cincin luar ini dapat menyatu langsung dengan rumah bantalan (integral housing), sehingga memperkuat struktur dan menghemat ruang.

b. Cincin Dalam (*Inner ring*)

Pada beberapa konfigurasi bantalan jarum, digunakan cincin dalam terpisah yang berperan sebagai lintasan dalam untuk mendukung elemen gelinding dan biasanya terpasang pada poros.

c. Elemen Gelinding Jarum (*Needle Rollers*)

Merupakan rol berbentuk silinder panjang dengan diameter kecil, yang memberikan luas bidang kontak lebih besar dibandingkan bola, sehingga efektif dalam mendistribusikan beban radial.

d. Sangkar atau Separator (*Cage*)

Berfungsi menjaga posisi rol jarum agar tetap terpisah satu sama lain, memastikan distribusi yang seragam, serta membantu meminimalkan gesekan antar elemen gelinding.

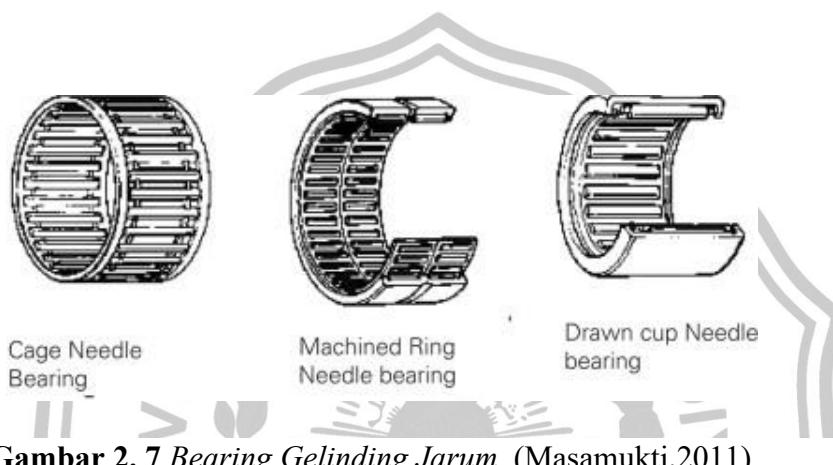
e. Pelumasan (*Lubrication*)

Digunakan untuk mengurangi gaya gesekan pada titik kontak antara elemen gelinding dengan lintasannya, sekaligus menghambat proses keausan sehingga memperpanjang masa kerja bantalan.

f. *End Caps (Seal)*

Pada beberapa tipe bantalan jarum dilengkapi dengan penutup ujung atau seal yang berfungsi untuk melindungi bagian dalam bantalan dari debu, kotoran, maupun cairan yang dapat mempercepat kerusakan.

Contoh gambar *bearing gelinding jarum* dapat dilihat pada Gambar 2.7 dibawah ini.



**Gambar 2.7 Bearing Gelinding Jarum.** (Masamukti,2011)

## 2.4 Analisa Kerusakan

Sebuah komponen dikategorikan mengalami kegagalan atau kerusakan apabila tidak mampu mencapai umur pakai yang telah ditetapkan dalam perencanaan. Selain itu, terdapat beberapa kondisi lain yang termasuk dalam definisi kerusakan, antara lain:

1. Komponen sama sekali tidak dapat berfungsi lagi.
2. Komponen masih dapat beroperasi, tetapi menimbulkan potensi bahaya.
3. Komponen tetap berjalan, namun performanya tidak optimal atau tidak sesuai dengan spesifikasi desain.
4. Komponen masih bekerja, namun masa layanannya sudah sangat terbatas akibat adanya retakan atau cacat permukaan lain.

Sementara itu, analisis kerusakan logam dapat didefinisikan sebagai serangkaian prosedur untuk memeriksa komponen yang mengalami kegagalan, termasuk mengidentifikasi kondisi kegagalannya, agar dapat diketahui penyebab utama serta langkah penanggulangannya. Proses analisis ini menuntut pemahaman yang menyeluruh terhadap beberapa aspek penting, di antaranya:

1. Fungsi komponen tersebut dalam keseluruhan sistem peralatan.
2. Kondisi operasi serta gejala-gejala yang teramat sebelum terjadi kegagalan.

Pengumpulan data terkait material penyusun komponen serta proses pembuatannya sangat berperan dalam mengungkap penyebab utama kegagalan. Sampel yang diambil hendaknya dapat mewakili kondisi sebenarnya dari kerusakan, sehingga lokasi serta kualitas sampel menjadi aspek krusial dalam proses investigasi (Abrianto, 2008; Anjaswara, 2019).

## **2.5 Jenis Kerusakan dan Penyebab Kerusakan Pada Bantalan**

Bantalan merupakan salah satu elemen penting dalam sistem mesin yang berfungsi menopang poros agar dapat berputar dengan tingkat gesekan seminimal mungkin. Namun demikian, dalam praktiknya bantalan sering mengalami kegagalan yang disebabkan oleh berbagai faktor, seperti pembebanan yang melebihi kapasitas desain, sistem pelumasan yang kurang efektif, serta pengaruh eksternal lainnya. Oleh karena itu, penting untuk memahami jenis-jenis kerusakan yang umum terjadi pada bantalan agar dapat dilakukan tindakan pencegahan maupun penanganan yang tepat.

### **a. *Flaking***

Flaking atau pengelupasan adalah salah satu bentuk kegagalan pada bantalan yang umumnya terjadi akibat adanya beban aksial berlebih. Fenomena ini juga dapat dipicu oleh ketidaktepatan dalam proses pemasangan bantalan pada poros atau karena adanya kontaminasi dari partikel asing yang masuk ke dalam sistem. Gejala flaking pada bantalan dapat berupa terkelupasnya

sebagian permukaan pada thrust *bearing*, pengelupasan yang terjadi pada titik-titik tertentu, pola pengelupasan simetris di kedua sisi, ataupun flaking yang muncul di satu sisi saja dengan pola berupa garis-garis miring pada permukaan lintasan cincin bantalan (Koyo, 2013). Gambar 2.8 memperlihatkan contoh visual dari kegagalan jenis flaking pada bantalan.



**Gambar 2. 8 Flaking ( Koyo,2013 )**

b. *Scratches dan Scuffing* ( goresan dan lecet )

Scratches dan scuffing merupakan jenis kerusakan pada bantalan yang umumnya disebabkan oleh pembebanan aksial yang melebihi batas rancangan, kualitas pelumasan yang buruk, atau penggunaan pelumas dengan viskositas terlalu tinggi. Faktor lain yang turut memicu kegagalan ini meliputi akselerasi yang terlalu cepat saat mesin mulai beroperasi, serta gesekan yang timbul pada elemen gelinding akibat pengaruh gaya sentrifugal selama proses rotasi.

Kerusakan scratches dan scuffing ditandai dengan munculnya lecet pada permukaan akhir bantalan maupun pada permukaan sangkar (*cage*), serta adanya goresan pada lintasan bantalan (*raceway*). Kondisi ini dapat menurunkan kemampuan bantalan dalam menopang beban secara optimal dan mempercepat terjadinya kegagalan menyeluruh (Koyo, 2013). Contoh visual kerusakan berupa scratches dan scuffing pada *bearing* dapat dilihat pada Gambar 2.9.



a. *Scuffing*

b. *Scratches*

**Gambar 2. 9 a. *Scuffing* dan b. *Scratches* ( Koyo, 2013 )**

c. *Cracks dan Chips* ( retak dan pecah )

Cracks dan chips merupakan bentuk kegagalan pada bantalan yang umumnya terjadi akibat pembebahan berlebih melebihi kapasitas desain, penggunaan metode pelumasan yang tidak sesuai, kecepatan operasi yang terlalu tinggi, maupun adanya getaran yang intens selama proses kerja. Faktor-faktor tersebut berkontribusi pada munculnya tegangan lokal yang berlebihan pada material bantalan sehingga memicu kerusakan.

Jenis kegagalan ini dapat dikenali melalui munculnya retak atau patah pada elemen gelinding (seperti bola atau roller), retakan maupun pecah pada permukaan cincin dalam (*inner ring*) maupun cincin luar (*outer ring*), serta kerusakan serupa pada struktur sangkar atau separator bantalan. Kondisi tersebut tentunya akan mengganggu fungsi utama bantalan dalam menopang poros dan menahan beban, serta berpotensi menyebabkan kegagalan total sistem jika tidak segera ditangani (Koyo, 2013). Visualisasi dari kerusakan cracks dan chips pada bantalan dapat dilihat pada Gambar 10.



**Gambar 2. 10 a. Crack dan b. Chip ( Koyo, 2013 )**

d. *Wear* ( Keausan )

Wear atau keausan merupakan salah satu jenis kerusakan pada bantalan yang umumnya diakibatkan oleh kurangnya pelumasan, kualitas pelumasan yang tidak memadai, atau adanya kontaminasi dari partikel asing yang masuk ke dalam sistem bantalan. Kondisi ini mengakibatkan terjadinya gesekan langsung yang berulang antara permukaan-permukaan kontak di dalam bantalan, sehingga mempercepat proses pengikisan material.

Gejala kegagalan akibat wear biasanya tampak dalam bentuk aus pada permukaan lintasan cincin dalam (*inner ring*) maupun cincin luar (*outer ring*), serta pada bagian sangkar (*cage*) bantalan yang berfungsi menjaga posisi elemen gelinding. Apabila tidak segera ditangani, keausan ini dapat memperburuk distribusi beban, meningkatkan getaran, dan akhirnya menurunkan kinerja maupun umur pakai bantalan secara signifikan (Koyo, 2013). Contoh visual kerusakan bantalan akibat wear dapat dilihat pada Gambar 2.11.



**Gambar 2. 11 Wear, ( Koyo, 2013 )**

e. *Rust dan Corrosion* ( karat dan korosi )

*Rust* (karat) dan *corrosion* (korosi) merupakan bentuk kegagalan pada bantalan yang umumnya disebabkan oleh kondisi lingkungan yang lembap, masuknya air atau uap air ke dalam sistem bantalan, serta kualitas pelumasan yang tidak memadai. Selain itu, korosi juga dapat terjadi akibat reaksi kimia dari aditif pelumas yang mengandung senyawa sulfur atau klorin, terutama saat pelumas terpapar suhu tinggi yang menyebabkan dekomposisi senyawa tersebut.

Kerusakan akibat *rust* dan *corrosion* umumnya ditandai dengan munculnya karat pada permukaan cincin bagian dalam (*inner ring*), cincin luar (*outer ring*), dan bahkan pada seluruh permukaan komponen bantalan. Korosi ini tidak hanya merusak permukaan, tetapi juga dapat mengganggu integritas struktural bantalan, mempercepat keausan, serta menurunkan kemampuan bantalan dalam mendistribusikan beban secara merata (Koyo, 2013). Contoh kerusakan akibat *rust* pada bantalan dapat dilihat pada Gambar 2.12.



a. *Rust* b. *Corrosion*

**Gambar 2. 12 a. *Rust* dan b. *Corrosion*, ( Koyo, 2013 )**

f. *Pear skin* dan *Discoloration* ( warna kuliat pir dan perubahan warna )

*Pear skin* dan *discoloration* merupakan jenis kegagalan berikutnya yang sering dijumpai pada bantalan. Kerusakan *pear skin* umumnya disebabkan oleh masuknya kontaminan asing ke dalam bantalan serta tidak tercukupinya pelumasan pada area kontak. Sementara itu, *discoloration* terjadi akibat degradasi pelumas yang menyebabkan residu atau zat warna pada pelumas melekat pada permukaan bantalan.

Gejala kegagalan *pear skin* dan *discoloration* dapat dikenali dari perubahan warna pada permukaan bantalan. Kondisi ini biasanya muncul akibat peningkatan suhu selama operasi, yang memicu reaksi kimia pada permukaan bantalan. Sebagai contoh, munculnya warna coklat pada bantalan gelinding disebabkan oleh melekatnya bubuk asam yang terbentuk dari proses gesekan selama kerja bantalan (Koyo, 2013).

Visualisasi kerusakan akibat *pear skin* dan *discoloration* pada bantalan dapat dilihat pada Gambar 2.13.



**Gambar 2. 13 a. *Pear skin* dan b. *Discoloration***

g. *Brinelling* dan *nicks*

*Brinelling* adalah kegagalan yang disebabkan oleh beban yang terlalu berat yang diterima oleh bantalan, benda – benda padat yang masuk dan terjebak dalam bantalan, sedangkan *nicks* disebabkan karena bantalan mengalami kerusakan

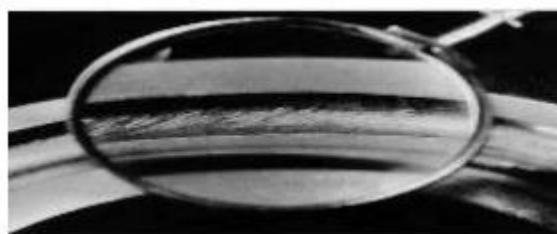
pada saat pemasangan dan kesalahan pada saat menangani bantalan. fenomena kegagalan yang dialami oleh bantalan ketika terkena *brinelling* adalah terjadinya depresi pada bagian permukaan lintasan yang disebakan bersentuhan langsung dengan elemen gelinding dan juga dikarenakan deformasi plastis, *brinelling* 19 merupakan lekukan yang kecil yang terdapat pada permukaan bantalan yang disebabkan oleh kontaminasi benda benda asing yang padat. Sedangkan fenomena bantalan yang terkena nicks adalah cacat yang disebabkan oleh dampak langsung yang diterima saat bantalan terkena palu atau benda padat lainnya. ( Koyo, 2013 ). Contoh kerusakan Brinelling dan nicks *bearing* dapat dilihat pada Gambar 2.14.



**Gambar 2. 14 Brinelling, ( Koyo, 2013 )**

h. *Smearing*

*Smearing* adalah kerusakan pada bantalan yang terjadi ketika lapisan pelumas gagal terbentuk, biasanya akibat pelumasan yang tidak memadai, beban aksial rendah, atau kecepatan tinggi. Kondisi ini menyebabkan gesekan langsung yang memicu panas berlebih, sehingga sebagian permukaan bantalan meleleh dan menjadi kasar (Koyo, 2013).



**Gambar 2. 15 Smearing ( Koyo, 2013 )**

i. *Creep*

Creep pada bantalan muncul akibat pengaruh panas atau beban kecil yang terjadi selama operasi. Kondisi ini menyebabkan cincin bantalan bergeser relatif terhadap poros atau rumah bantalan saat berputar (Koyo, 2013).



**Gambar 2. 16 Creep ( Koyo, 2013 )**

j. *Electric Pitting* ( lubang listrik )

Electric pitting adalah kerusakan bantalan akibat arus listrik yang mengalir melalui bantalan, sehingga sebagian permukaannya meleleh. Gejala kerusakan ini tampak berupa lubang-lubang kecil menyerupai kawah, hasil dari permukaan yang meleleh akibat loncatan listrik (Koyo, 2013). Contoh kerusakan electric pitting dapat dilihat pada Gambar 2.17.



**Gambar 2. 17 Electric Pitting ( Koyo, 2013 )**

k. *Seizure*

Seizure adalah kegagalan bantalan akibat panas berlebih yang muncul dari pelumasan buruk, beban berlebihan, atau ketidaksesuaian kontak antara elemen gelinding dengan lintasannya. Kondisi ini tidak dapat diatasi hanya dengan

pendinginan atau pelumasan, sehingga bantalan kehilangan kekerasannya dan tidak dapat dipakai lagi (Koyo, 2013).



**Gambar 2. 18 Seizure ( Koyo, 2013 )**

#### 1. *Failure of Cage*

Failure of *cage* adalah kerusakan pada sangkar bantalan yang berfungsi menahan bola atau silinder elemen gelinding. Kegagalan ini dapat dipicu oleh retak dan pecah (*cracks & chips*), cacat bentuk (*flaw & distortion*), keausan (*wear*), karat atau korosi (*rust & corrosion*), serta kendornya paku keling (*looseness & cut-off of rivet*). Gejala kerusakan tergantung penyebabnya, misalnya retak yang berkembang akibat beban berlebih atau karat pada *cage* yang biasanya juga mengindikasikan korosi pada cincin dan elemen gelinding (Koyo, 2013).

## 2.6 Pengertian Pelumasan

Pelumasan (*lubrication*) adalah proses pemberian minyak pelumas di antara dua permukaan bantalan yang saling bergesekan akibat tekanan dan gerakan relatif. Tujuan utamanya untuk menurunkan gesekan, mengurangi kehilangan daya (*power loss*), sekaligus meminimalkan keausan. Pelumasan juga membantu menyalurkan dan menyebarluaskan panas, sehingga mencegah perubahan dimensi akibat ekspansi termal.

Selain itu, pelumas melindungi permukaan dari korosi, menghalangi masuknya debu, serta meredam getaran atau gerakan dinamis. Mekanisme pelumasan dapat berupa hydrodynamic, elastohydrodynamic (EHL), maupun boundary lubrication.

### 2.6.1 Tipe Pelumasan

Pelumas dapat berwujud gas, cair, semi cair, atau padat, berfungsi mengurangi gesekan, menerima beban, dan mencegah keausan permukaan logam. Berdasarkan karakteristik dan aplikasinya, pelumas dibagi menjadi empat kelompok utama, yaitu pelumas cair, gemuk, polimer, dan padat.

#### a. Pelumas Cair

Pelumas cair (*liquid lubricants*) umumnya berupa minyak mineral atau sintetik. Minyak mineral populer karena biaya rendah dan stabilitas baik, dapat digunakan hingga suhu 200°C, sedangkan minyak sintetik dapat bekerja sampai 450°C. Minyak sintetik diformulasi dari molekul terpilih untuk meningkatkan sifat pelumasan, sering berbasis minyak bumi, atau polyglycols, phosphate esters, silicone fluids, hingga flourinated ethers. Kelebihan pelumas cair antara lain mudah diganti dan dikontrol, cocok untuk sistem kompleks, serta efektif membuang panas pada operasi suhu tinggi (Harris, 2010; Rebai, 2014).

#### b. Pelumas Gemuk

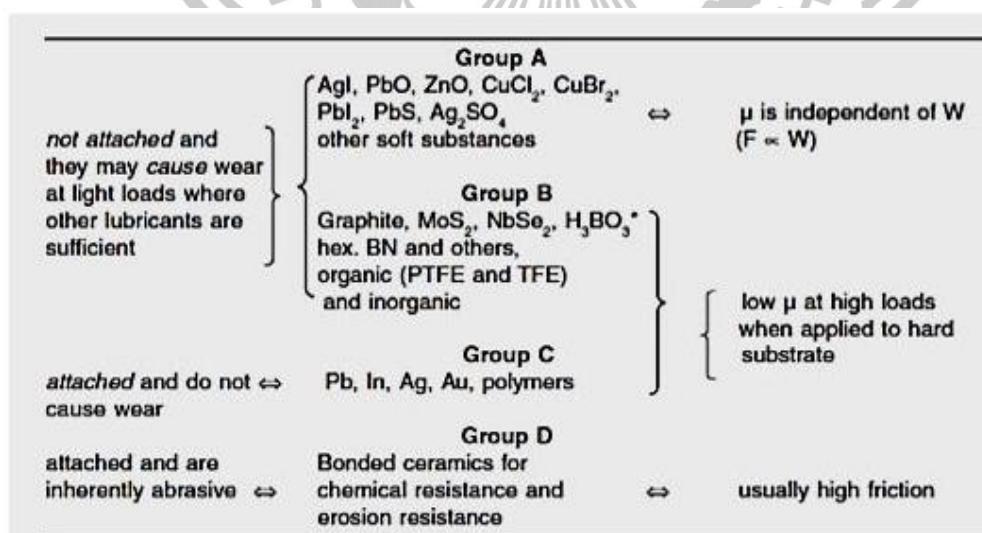
Pelumas gemuk (*greasse*) tersusun dari cairan pelumas (80–90%), lemak nabati/hewani (4–15%), dan zat alkali seperti *lithium*, *calcium*, atau *sodium*. Prosesnya melalui saponifikasi atau netralisasi asam lemak. Gemuk lebih kental dari minyak, cocok untuk beban besar pada kecepatan rendah, serta membentuk dua fase: minyak yang disimpan dalam struktur penebal. Keuntungannya meliputi perawatan sederhana, minim kebocoran, penyegelan lebih baik, dan gesekan awal rendah. Gemuk nabati/hewani tahan hingga 130°C, sementara jenis lain dapat mencapai 175°C (Ludema, 1996; Harris, 2010; Rebai, 2014).

### c. Pelumas Polimer

Pelumas polimer memanfaatkan fasa minyak dalam matriks padat seperti clay, silica, atau polyurea yang bekerja layaknya spons, melepaskan minyak saat diperlukan. Keunggulannya adalah memperpanjang umur pakai karena volume minyak lebih besar dibanding gemuk, serta tahan terhadap kegagalan akibat pembersihan, mengurangi kenaikan suhu, dan meminimalkan korosi akibat kelembapan (Harris, 2010; Ludema, 1996).

### d. Pelumas Padat

Pelumas padat digunakan pada kondisi ekstrem dimana film cair tidak stabil karena tekanan atau suhu tinggi. Contohnya grafit,  $\text{MoS}_2$ , dan  $\text{CaF}_2$  yang bekerja dengan membentuk lapisan tipis berdaya geser rendah. Pelumas padat cocok untuk boundary lubrication, tetapi tidak mengikuti mekanisme hidrodinamik atau EHL. Efektivitasnya sangat tergantung kondisi operasi. Berdasarkan aplikasinya, jenis ini dikelompokkan dari pelumasan pada permukaan kasar hingga beban berat dan gesekan sangat tinggi (Harris, 2010; Ludema, 1996; Jenis et al., 2019).



**Gambar 2. 19** Kelompok Pelumas Padat.  
(Sumber: Ludema, 1996), (Harris, 2010)

Menurut Ludema (1996) dan Harris (2010), pelumas padat memiliki sejumlah keunggulan penting, di antaranya:

1. Mampu beroperasi pada suhu sangat tinggi tanpa kehilangan efektivitas.
2. Fleksibel digunakan baik pada kondisi gesekan rendah maupun tinggi, tergantung situasi aplikasinya.
3. Cocok diterapkan pada lingkungan ekstrem seperti ruang hampa (vakum).
4. Berfungsi sebagai media penghantar panas yang efisien dalam sistem pelumasan.

## 2.7 Metode Pelumasan

Metode pelumasan umumnya dibagi menjadi tiga kategori, yakni:

1. Pengisian cairan ke celah melalui gaya tegangan permukaan,
2. Pelumasan hidrostatik yang dilakukan dengan memompa fluida ke area kontak,
3. Pelumasan hidrodinamik yang memanfaatkan gerakan relatif antar permukaan untuk membentuk film pelumas.

### 2.7.1 Tegangan Permukaan

Jika suatu cairan diteteskan pada permukaan datar, sebagian volumenya dapat keluar, sedangkan sisanya tertahan di celah tergantung pada sifat wettability cairan tersebut. Wettability diukur melalui sudut kontak ( $\beta$ ) antara cairan dan permukaan padat. Semakin kecil sudut kontak  $\beta$ , semakin baik daya sebar (wettability) cairan pada permukaan tersebut. Sebaliknya, sudut kontak yang besar menunjukkan wettability yang rendah. Setiap jenis cairan memiliki karakteristik wettability yang berbeda.

### 2.7.2 Pelumasan Hidrostatik

Pelumasan hidrostatik adalah metode pelumasan berbasis tekanan, di mana fluida pelumas dipompa masuk ke celah di antara dua permukaan sehingga tercipta lapisan pelumas tebal yang memisahkan kontak langsung. Cara ini sangat efektif meminimalkan gesekan, terutama pada kecepatan putar rendah. Namun, pelumasan ini

dapat menimbulkan risiko korosi akibat interaksi antara pelumas dengan material permukaan. (Rebai, 2014)

Dengan menyalurkan fluida bertekanan cukup ke celah antara dua permukaan yang bergeser, keduanya dapat terpisah sepenuhnya sehingga mencegah gesekan langsung. Lapisan pelumas yang tebal mengurangi hambatan gerak. Pelumasan hidrostatik bekerja optimal pada berbagai kecepatan geser, tetapi sangat bergantung pada sistem pompa eksternal yang mensuplai tekanan.

### 2.7.3 Pelumasan Hidrodinamik

Pelumasan hidrodinamik terjadi ketika dua permukaan bergerak relatif dengan kecepatan tertentu, sehingga fluida pelumas terbawa dan tertarik masuk ke dalam celah di antara kedua permukaan. Hal ini membentuk lapisan fluida yang cukup tebal untuk memisahkan permukaan, meminimalkan kontak langsung, dan memungkinkan pergerakan menjadi lebih lancar. Metode ini menjadi teknik pelumasan yang paling banyak diterapkan di industri modern karena dapat bekerja pada kecepatan normal hingga tinggi, serta memberikan ketebalan film pelumas yang melebihi ketidakteraturan permukaan kontak. (Rebai, 2014). Dalam pelumasan hidrodinamik, terjadi deformasi elastis pada permukaan saat menerima beban, yang mempengaruhi distribusi tekanan pelumas. Oleh karena itu, desain bantalan harus mempertimbangkan:

1. Penahanan fluida pelumas, agar tekanan tidak bocor keluar melalui sambungan, memerlukan seal atau desain ujung bantalan yang tepat.
2. Pembuangan kotoran (*debris*), karena kontaminasi dapat menurunkan performa.
3. Manajemen panas, sebab panas dari gesekan cairan dan sedikit kontak padat dapat menurunkan mutu pelumas. Jika panas yang dihasilkan melebihi kemampuan pelumas untuk menyerap dan melepasnya, akan terjadi degradasi pelumas dan peningkatan gesekan.

## 2.8 *Bearing lift/ Umur Bantalan*

Ketika bola atau roller pada bantalan gelinding (rolling-contact *bearing*) berputar, terjadi tekanan kontak di antara cincin dalam, elemen gelinding, dan cincin luar. Karena profil kontak di sepanjang arah beban berbeda dengan arah radial, perhitungan tekanannya menjadi lebih kompleks dibandingkan persamaan kontak sederhana. Jika bantalan terpasang dengan benar, dilumasi secara memadai, terlindung dari kontaminasi, dan beroperasi pada suhu normal, maka kegagalan utamanya umumnya hanya disebabkan oleh kelelahan material (fatigue). Kelelahan ini terjadi setelah jutaan siklus tegangan, sehingga diperlukan parameter kuantitatif untuk menilai umur bantalan, seperti:

- Jumlah putaran cincin dalam (dengan cincin luar diam) sampai muncul tanda awal kelelahan.
- Jumlah jam operasi pada kecepatan tertentu hingga terdeteksi kegagalan awal akibat kelelahan.

Dalam teknik permesinan, umur bantalan sering disebut sebagai *life* (masa pakai). Sama seperti fenomena kelelahan pada material, umur ini bersifat statistik, mengikuti distribusi tertentu dengan parameter yang menggambarkan variabilitasnya. Berdasarkan standar American *Bearing* Manufacturers Association (ABMA), kegagalan kelelahan pada bantalan didefinisikan ketika mulai terjadi spalling atau pitting pada permukaan kontak pembawa beban. Misalnya, laboratorium Timken menggunakan kriteria kegagalan dengan luas kerusakan permukaan minimal  $0,01 \text{ in}^2$ , meskipun bantalan masih bisa terus digunakan setelah titik ini.

Rating *life* (umur terklasifikasi) merupakan istilah yang digunakan ABMA dan produsen bantalan untuk menggambarkan umur yang dicapai oleh 90% populasi bantalan identik sebelum menunjukkan kegagalan (sering juga disebut L10 *life* atau B10 *life*). Artinya, hanya 10% bantalan yang akan gagal sebelum mencapai siklus ini.

Sebagai perbandingan, umur median (50 persentil) biasanya sekitar 4–5 kali lebih panjang dari umur L10. Istilah “average life” kadang dipakai sebagai sinonim untuk median life, meskipun ini bisa menimbulkan kebingungan.

Umur rating biasanya ditetapkan pada  $10^6$  revolusi (1 juta putaran). Namun Timken Company menggunakan standar berbeda, yaitu 3000 jam pada 500 rpm (setara sekitar  $90 \times 10^6$  revolusi). Walaupun nilai ini relatif rendah dibanding kemampuan bantalan modern, standar historis ini tetap dipertahankan sebagai acuan konsistensi.

### 2.8.1 *Bearing Load Life at Rated Reliability/ Umur Beban Bantalan pada Nilai Keandalan*

Ketika sekelompok bantalan yang identik secara nominal diuji pada beban berbeda hingga mencapai kegagalan, data hasil uji ini biasanya diplot pada grafik log-log seperti ditunjukkan pada Gambar 11-4. Setiap titik pada grafik merepresentasikan kombinasi antara beban (misalnya  $F_1$ ) dan umur rating kelompok bantalan (misalnya  $(L10)_1$ ) dalam skala logaritmik, dengan tingkat keandalan 90% (karena L10 mengindikasikan 90% bantalan akan mencapai atau melebihi umur tersebut). Dengan cara ini, dapat diperoleh kurva hubungan antara beban dan umur bantalan (load-life relationship) pada keandalan 0,90. Hubungan matematis antara beban dan umur dinyatakan melalui persamaan regresi umum berikut:

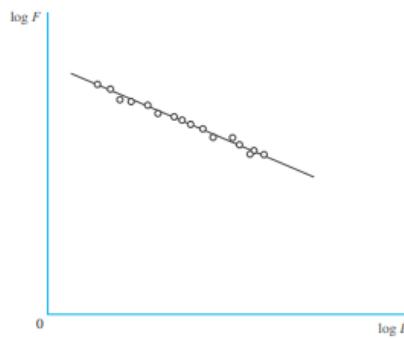
$$F L^{1/\alpha} = \text{constant}$$

hasil dari banyak tes untuk berbagai jenis lapisan menghasilkan :

- $\alpha = 3$  untuk *roller bearings*
- $\alpha = 10/3$  untuk *rollers (cylindrical and tapered roller)* A

Beban katalog atau C10 didefinisikan sebagai beban radial yang menyebabkan 10% dari sejumlah bantalan gagal tepat pada umur rating yang ditetapkan produsen. Istilah ini umumnya dikenal dengan Basic Dynamic Load Rating, atau sering disingkat

menjadi Basic Load Rating, terutama bila umur ratingnya ditentukan pada  $10^6$  putaran. Nilai beban yang tinggi untuk umur pendek seperti itu sebenarnya tidak realistik untuk aplikasi nyata. Karena itu, Basic Load Rating sebaiknya dianggap hanya sebagai patokan perhitungan, bukan beban kerja aktual yang diterapkan pada bantalan.



**Gambar 2. 20** Cara Menggunakan *Curve Load-Life Log*. (Richard G Budynas, 2019)

Dalam memilih *bearing* untuk aplikasi tertentu, perlu untuk menghubungkan beban yang diinginkan dan persyaratan masa pakai dengan peringkat beban katalog yang diterbitkan yang sesuai dengan masa pakai katalog. Dari Eq. (2.7.1-1) kita dapat menulis :

$$F_1 L_{11/\alpha} = F_2 L_{12/\alpha}$$

Di mana subkategori 1 dan 2 dapat mengacu pada setiap set beban dan kondisi hidup. Dengan membiarkan  $F_1$  dan  $L_1$  berkorelasi dengan peringkat beban katalog dan umur peringkat, dan  $F_2$  dan  $L_2$  berkoreksi dengan beban dan umur yang diinginkan untuk aplikasi, kita dapat mengekspresikan Eq. (2.7.1-2) sebagai:

$$F_{RL\ R1/\alpha} = F_{DL1D/\alpha}$$

Dimana unit LR dan LD adalah revolusi, dan tanda tangan R dan D berarti Rated dan Desired. Kadang-kadang nyaman untuk mengekspresikan hidup dalam jam dengan kecepatan tertentu. Ingly, setiap kehidupan L dalam revolusi dapat dinyatakan sebagai:

$$L = 60 \mathcal{L}n$$

Di mana adalah dalam jam, n adalah dalam rev/min, dan 60 min/h adalah faktor konversi yang sesuai. Menambahkan Eq (b) ke dalam Eq. (a),

$$(\mathcal{L}_{RN}60)^{1/\alpha} = (\mathcal{L}_{DN}60)^{1/\alpha}$$

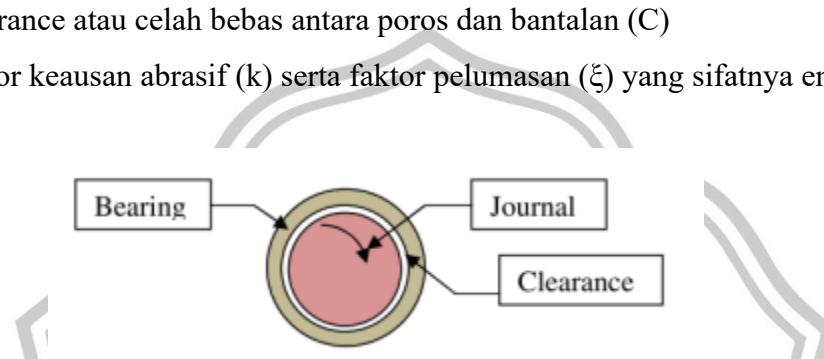
Menyelesaikan Eq. (c) untuk FR, dan mencatat bahwa itu hanyalah notasi alternatif untuk catalog load rating C10, kita mendapatkan ekspresi untuk catalog load rating sebagai fungsi dari beban yang diinginkan, masa pakai, dan masa pakai catalog rating.

### 2.8.2 *Lifetime Bearing/ Bantalan Seumur Hidup*

Gesekan akibat gerakan relatif antar komponen mesin dapat menurunkan efisiensi, meningkatkan suhu, serta mempercepat keausan. Untuk meminimalkan dampak negatif ini, digunakan bantalan (*bearing*) yang bekerja dengan dua prinsip dasar, yaitu mekanisme sliding (luncur) dan mekanisme rolling (gelinding). Pada mekanisme sliding, terjadi kontak langsung antara permukaan yang bergerak sehingga memerlukan sistem pelumasan yang optimal. Sebaliknya, pada mekanisme rolling, permukaan kontak dipisahkan oleh elemen gelinding (bola atau rol), sehingga pelumas berperan lebih kecil dalam mengurangi gesekan.

Sistem bantalan poros adalah sistem pendukung bagi poros yang berputar agar dapat beroperasi stabil dan mentransmisikan daya. Berdasarkan jenis kontaknya, bantalan dibagi menjadi bantalan gelinding (*rolling bearing*) dan bantalan luncur (*journal bearing*). Bantalan gelinding memiliki dua cincin (*inner* dan *outer ring*) dengan elemen gelinding di antaranya, sehingga poros tidak bersentuhan langsung dengan elemen gelinding. Sementara itu, bantalan luncur memungkinkan kontak langsung antara poros dengan permukaan bantalan (*bushing*), sehingga lebih rentan terhadap keausan. Umur bantalan luncur ditentukan oleh laju keausan, yang dipengaruhi berbagai faktor, antara lain:

- Gaya beban pada poros (F)
- Luas kontak (A) antara poros dan bantalan
- Kecepatan putar poros (V)
- Panjang lintasan gesek (L)
- Viskositas kinematik pelumas (v)
- Kekerasan material bantalan (H)
- Clearance atau celah bebas antara poros dan bantalan (C)
- Faktor keausan abrasif (k) serta faktor pelumasan ( $\xi$ ) yang sifatnya empiris.



**Gambar 2. 21** Bantalan Luncur. (Richard G Budynas, 2019)

Performa bantalan luncur dipengaruhi antara lain:

a. Kekuatan (*Strength*)

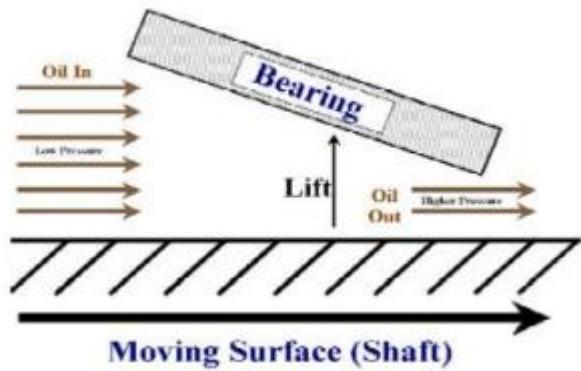
Saat bantalan beroperasi, muncul tegangan pada permukaan kontak yang memengaruhi daya tahan bantalan, khususnya pada bantalan luncur.

b. Keausan (*Wear*)

Gesekan antara poros dan bantalan menyebabkan keausan radial ( $h$ ), yang dipengaruhi oleh panjang lintasan, beban, dan luas kontak.

c. Faktor  $PV$

Merupakan kombinasi tekanan dan kecepatan poros. Nilai  $PV$  rendah membantu memperpanjang umur bantalan dengan mengurangi keausan.

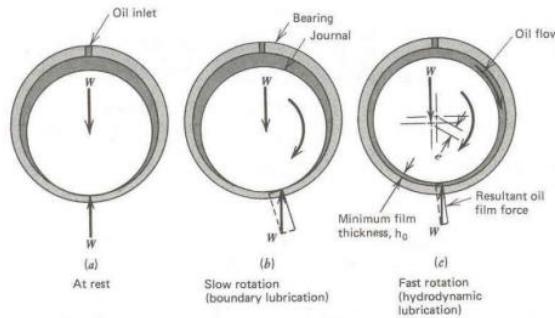


**Gambar 2.22 Moving Plain.** (Richard G Budynas, 2019)

Gambar 2.22 memperlihatkan bagaimana pelumas mengangkat poros akibat rotasi pada bantalan. Tekanan pada film minyak meningkat saat memasuki area kontak dibanding sebelum masuk, menyebabkan sedikit pengangkatan poros, baik saat mulai bergerak maupun saat diam. Ketika film pelumas masuk zona tekanan, tercapai ketebalan minimum yang harus dijaga agar tidak terputus.

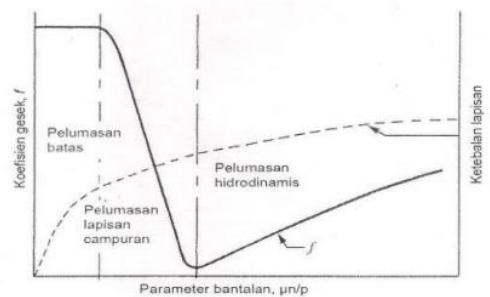
Faktor PV digunakan dalam desain bantalan luncur dengan pelumasan batas (boundary lubrication), yang mengabaikan ketebalan film pelumas. Pada kondisi ini, meski terdapat lapisan pelumas, terjadi kontak langsung antara bantalan dan journal, sehingga gesekan dan kerugian lebih besar pada kecepatan rendah.

Selain itu, terdapat parameter tak berdimensi  $\mu \cdot n / p$ , yang mengaitkan viskositas pelumas, kecepatan putar, dan tekanan kerja. Parameter ini penting untuk memastikan film pelumas tetap utuh. Semakin tinggi putaran poros, tekanan film pelumas juga meningkat, sehingga lapisan pelumas tetap stabil dan mengurangi keausan.



**Gambar 2. 23 Posisi Journal.** (Richard G Budynas, 2019)

Pengaruh dari parameter tersebut menunjukkan juga hubungan antara koefisien gesek dan jenis kontak pelumasannya seperti diperlihatkan pada Gambar 2.23 Kontak pelumasan *boundary* atau pelumasan batas mempunyai tingkat koefisien gesek yang paling tinggi hingga pelumasan hidrodinamik dengan koefisien gesek yang paling rendah.



**Gambar 2. 24 Kurva Stribeck.** (Richard G Budynas, 2019)

Bantalan luncur memerlukan pelumasan yang memadai, baik dari sisi ketebalan maupun viskositas, dengan ketebalan lapisan pelumas umumnya  $h_0 = 0,00025 D$  ( $D$  = diameter bantalan). Hubungan viskositas, kecepatan putar, jari-jari, kelonggaran, dan tekanan kerja dirumuskan melalui bilangan tak berdimensi Sommerfeld (Mott, 2009).

$$S = \frac{\mu(R/C)^2}{p}$$

Nilai Sommerfeld berkaitan dengan rasio  $ho/C$  (tebal film terhadap kelonggaran). Grafik Gambar 2.24 menunjukkan semakin besar Sommerfeld, semakin besar  $ho/C$ , tergantung  $L/d$ . Ketebalan film pelumas wajib dijaga, terutama pada kecepatan tinggi, untuk mengurangi keausan.

Pelumas berfungsi mengurangi gesekan dan keausan, mencegah korosi, meredam beban kejut, menjaga kebersihan, dan membantu pendinginan. Sistem pelumasan mengatur perilaku pelumas di antara dua permukaan bergerak, dipengaruhi jenis fluida (gas, cair, padat), tipe pelumasan (boundary, mixed, full film), serta metode aplikasinya.

( $\rho$  = densitas fluida). Viskositas kinematik biasanya diukur pakai viskometer kapiler atau rotasi. Viskositas yang tinggi mampu mengurangi gesekan dan keausan lebih baik, serta menahan tekanan tanpa memecah film pelumas dibanding pelumas encer.

## 2.9 Keausan (*Wear*)

Keausan adalah penipisan permukaan akibat gesekan pada beban dan gerak, ditandai hilangnya material karena interaksi mekanik dua permukaan yang bersinggungan. Ini wajar terjadi saat dua benda saling bergeser. Kinerja komponen mesin sangat bergantung pada sifat material, seperti logam, polimer, keramik, kaca, dan komposit, yang umumnya tidak hanya ditentukan oleh satu sifat saja, melainkan kombinasi (misalnya kekerasan, kekuatan, pelumasan, dan koefisien gesek) yang memengaruhi ketahanan aus.

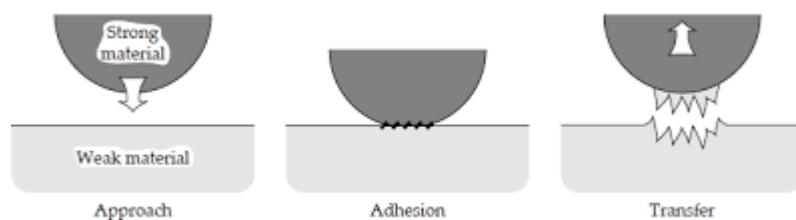
Semua material bisa mengalami keausan dengan mekanisme berbeda. Untuk menguji tingkat keausan, salah satunya digunakan metode Ogoshi, di mana spesimen ditekan oleh cakram berputar yang menyebabkan kontak berulang, mengikis permukaan. Kedalaman dan luas jejak gesek menjadi indikator tingkat keausan; makin besar jejaknya, makin tinggi volume material yang terkelupas.

Keausan dapat bersifat normal maupun abnormal (misalnya akibat pelumasan yang tidak teratur). Faktor-faktor yang memengaruhi meliputi beban, kecepatan, jumlah dan jenis pelumas, suhu, kekerasan dan kehalusan permukaan, serta adanya partikel asing atau zat kimia. Mekanisme keausan meliputi adhesive, abrasive, fatigue, oxidative, dan erosion wear.

### 2.9.1 Jenis - Jenis Keausan

#### 1. Keausan *Adhesive* (*Adhesive Wear*)

Keausan *adhesive* adalah salah satu jenis keausan yang disebabkan oleh terikat atau melekat (*adhesive*) atau berpindahnya partikel dari suatu permukaan material yang lemah ke material yang lebih keras serta deformasi plastis dan pada akhirnya terjadi pelepasan atau pengoyakan salah satu material. Proses 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*. Mekanisme keausan *adhesive* dapat dilihat pada gambar 2.25. dibawah ini.



**Gambar 2. 25** Proses perpindahan logam secara *adhesi*. (Stachowiak, GW. And A.W. Batchelor . 2000)

Faktor-faktor yang menyebabkan keausan *adhesive*:

- Kecenderungan dari material yang berbeda untuk membentuk larutan padat atau senyawa intermetalik.

b. Kebersihan permukaan.

Jumlah *wear debris* akibat terjadinya aus meliputi mekanisme *adhesive* ini adapat dikurangi dengan cara antara lain:

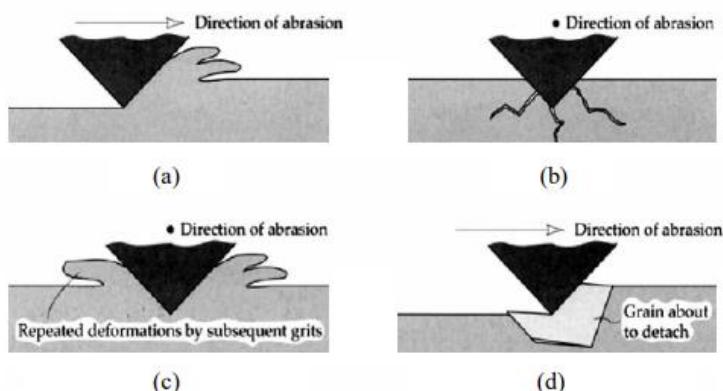
- Mengurangi material keras.
- Material dengan jenis yang berbeda, misal berbeda struktur dan kristalnya

2. Keausan *Abrasive (Abrasive Wear)*

Keausan *adhesive* terjadi ketika partikel dari permukaan material yang lebih lunak melekat pada material yang lebih keras, lalu mengalami deformasi plastis hingga akhirnya terlepas atau terkelupas. Proses ini dimulai saat permukaan keras bersentuhan dengan material yang lebih lemah, membentuk ikatan yang muncul secara spontan bahkan pada suhu rendah hingga sedang. Keausan ini dikenal juga sebagai *galling*, *scoring*, *scuffing*, *seizure*, atau *seizing*. Ada dua kategori keausan ini, yaitu:

a. *Two body abrasion*

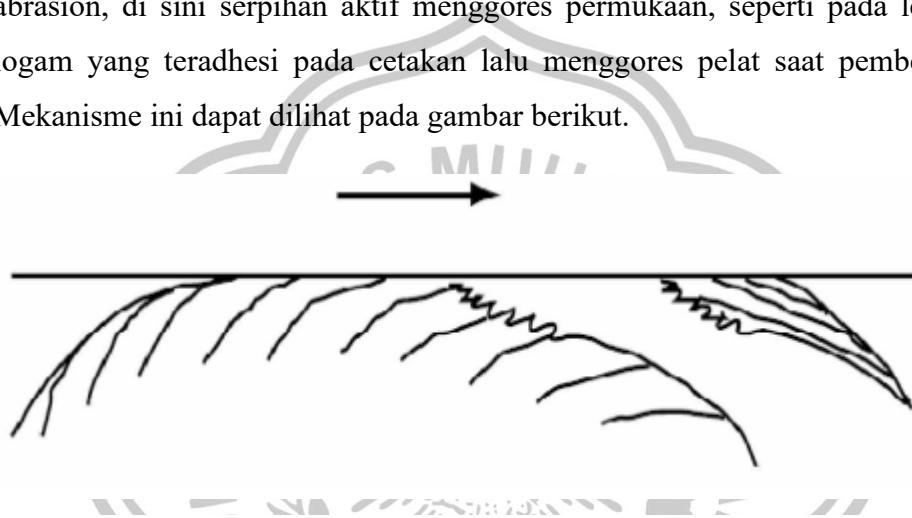
Keausan abrasif terjadi akibat hilangnya material karena pengikisan (*rubbing*) oleh benda lain yang lebih keras. Akibatnya, permukaan material yang lebih lunak tergerus. Contohnya dapat ditemui pada proses pemesinan seperti pemotongan (*cutting*) dan pembubutan (*turning*). Mekanisme keausan dua benda (*two-body abrasive*) ini dapat dilihat pada gambar 2.26 berikut.



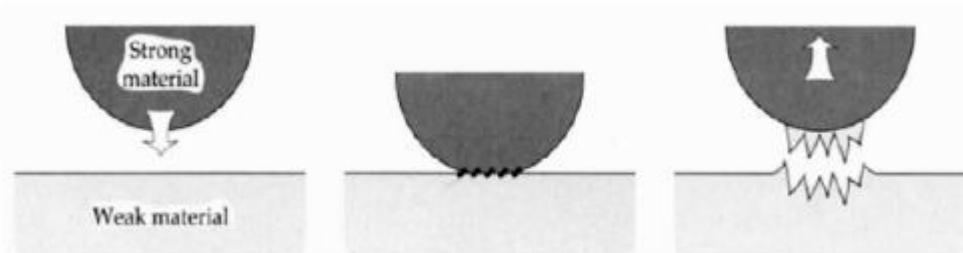
**Gambar 2. 26** Mekanisme pada *abrasive wear* a) *cutting*, b) *fracture*, c) *fatigue* dan d) *grain pull-out*. (Stachowiak, GW. And A.W. Batchelor . 2000)

b. *Three body abrasion*

Keausan *three body abrasion* terjadi saat proses galling menghasilkan serpihan (debris) yang mengeras, lalu turut mengikis material akibat gerakan berulang. Disebut "tiga benda" karena melibatkan dua permukaan yang bergesekan dan partikel serpihan yang terbentuk. Berbeda dengan two body abrasion, di sini serpihan aktif menggores permukaan, seperti pada lembaran logam yang teradhesi pada cetakan lalu menggores pelat saat pembentukan. Mekanisme ini dapat dilihat pada gambar berikut.



**Gambar 2. 27** Adhesive wear karena adhesive shear dan transfer. (Stachowiak, GW. And A.W. Batchelor . 2000)

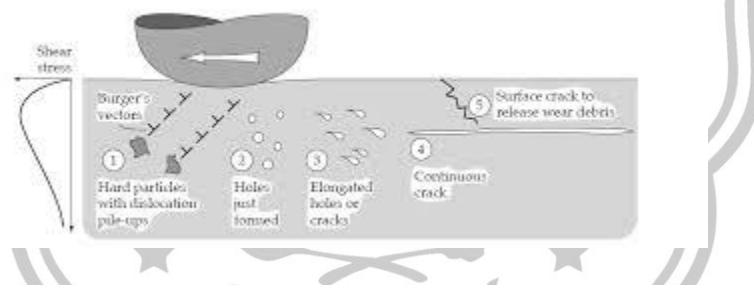


**Gambar 2. 28** Proses perpindahan logam karena adhesive wear. (Stachowiak, GW. And A.W. Batchelor . 2000)

Faktor yang memengaruhi ketahanan material terhadap keausan abrasif meliputi kekerasan material, struktur mikronya, ukuran serta bentuk partikel abrasif. Sementara itu, kerusakan permukaan akibat abrasive wear biasanya muncul dalam bentuk goresan (scratching), alur dalam (scoring), dan cekungan atau sobekan (gouging).

### 3. Keausan Lelah ( *Surface Fatigue Wear* )

Keausan lelah (fatik) terjadi akibat beban berulang yang bersifat periodik, dapat berupa mekanisme abrasive maupun adhesive, sehingga memicu kenaikan tegangan geser. Gambar 2.29 menggambarkan pertumbuhan retak pada permukaan akibat kelelahan material. Retak ini sering bermula dari ketidaksempurnaan internal, seperti rongga atau void pada struktur butir material.

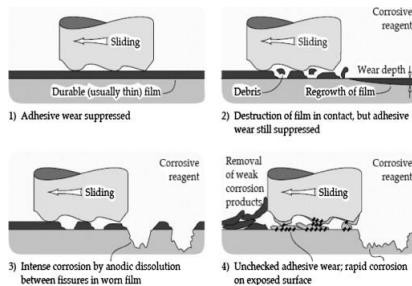


**Gambar 2. 29** Ilustrasi dari proses *subsurface* pertumbuhan retak. (Stachowiak, GW. And A.W. Batchelor . 2000)

Akibat tekanan saat gesekan, rongga pada material melebar lalu bergabung membentuk retakan. Retak ini terus merambat hingga akhirnya permukaan terkelupas menjadi partikel (*debris*).

#### 4. Keausan Oksidasi/Korosif (*Tribo Chemical Wear*)

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

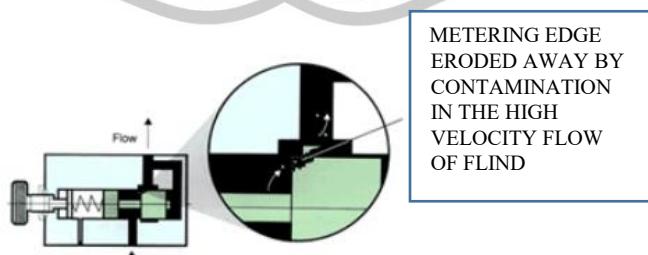


**Gambar 2. 30** Model interaksi antara agen korosif dan permukaan yang rusak. (Stachowiak, GW. And A.W. Batchelor . 2000)

Sebagai contoh, oksidasi pada kontak luncur antar logam dapat memicu retak dan abrasi. Keausan kimia ini meningkatkan suhu dan mengubah sifat asperiti, sehingga memicu korosi. Korosi biasanya diawali kerusakan film pelindung akibat keausan adhesive. Kontak geser terus-menerus akan mengikis lapisan ini, mempercepat reaksi korosi pada permukaan yang terekspos.

#### 5. Keausan Erosi (*Erosion Wear*)

Erosi terjadi akibat hantaman partikel padat yang terbawa gas atau cairan ke permukaan material. Bila sudut tumbuk kecil, keausan mirip dengan mekanisme abrasif. Namun pada sudut tumbuk tegak lurus ( $90^\circ$ ), keausan memicu kegagalan getas pada permukaan.



**Gambar 2. 31** Ilustrasi Keausan Erosi. (Stachowiak, GW. And A.W. Batchelor . 2000)

Gambar 2.35 menunjukkan keausan erosi yang terjadi akibat hantaman fluida berkecepatan tinggi pada permukaan material, yang menyebabkan sudut-sudutnya aus.

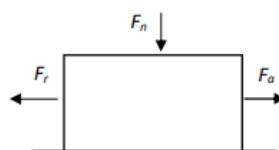
6. Kausan yang disebabkan perilaku panas (*Thermal Wear*)
  - a. *Melt wear*  
keausan yang terjadi ketika panas gesekan cukup tinggi sehingga permukaan mulai meleleh.
  - b. *Diffusive wear*  
terjadi akibat difusi elemen melintasi bidang kontak, misalnya pada perkakas HSS.

### 2.9.2 Teori *sliding, rolling* dan *rolling-sliding contact*.

Keausan terjadi saat dua permukaan bersentuhan, baik melalui mekanisme sliding, rolling, atau kombinasi keduanya (rolling-sliding).

#### 1. Teori *sliding contact*

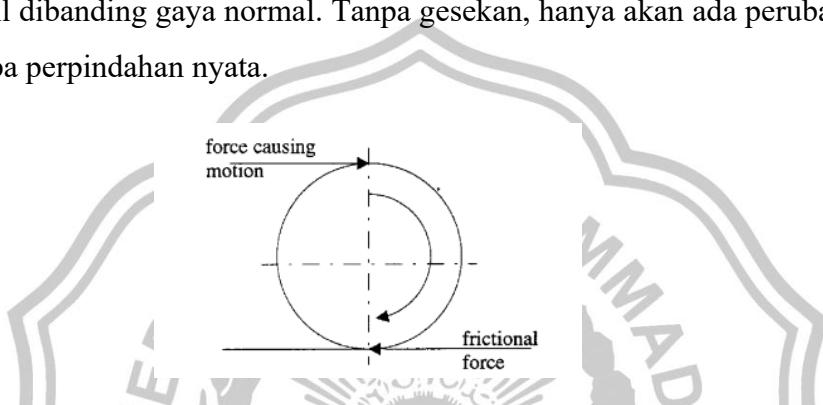
Gesekan muncul ketika dua permukaan saling bersentuhan, baik dengan udara, air, maupun benda padat lainnya. Misalnya, saat suatu benda bergerak di udara atau air, akan timbul gesekan antara permukaannya dengan medium tersebut. Pada permukaan padat sekilipun yang tampak licin, terdapat asperity dalam skala mikroskopis yang menyebabkan gesekan saat bergeser. Gesekan ini selalu berlawanan arah dengan gerak benda, sehingga selain memperlambat gerakan, juga berpotensi menimbulkan keausan dan kerusakan pada permukaan kontak.



**Gambar 2. 32** *Sliding contact.* (Stachowiak, GW. And A.W. Batchelor . 2000)

## 2. Teori *rolling contact*

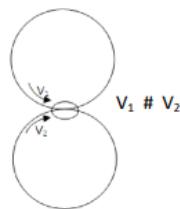
Rolling terjadi akibat perbedaan kecepatan sudut ( $\omega$ ) antara dua benda terhadap sumbu tertentu pada bidang tangensial. Fenomena ini memicu perpindahan rotasi pada titik kontak. Dalam kasus dua dimensi, seperti dua silinder, terjadi kontak garis (line contact). Rolling sebenarnya memerlukan gesekan agar gaya tangensial dapat berpindah, meskipun nilainya selalu lebih kecil dibanding gaya normal. Tanpa gesekan, hanya akan ada perubahan sudut tanpa perpindahan nyata.



**Gambar 2. 33** Rolling contact. (Stachowiak, GW. And A.W. Batchelor . 2000)

## 3. Teori *rolling-sliding contact*

*Rolling contact* adalah kondisi saat dua benda bersentuhan di bawah beban dan mengalami rotasi. Jika kedua benda berotasi dengan kecepatan yang sama, ini disebut *rolling sempurna*. Namun, dalam praktiknya, kondisi *rolling sempurna* jarang terjadi.



**Gambar 2.34** *Rolling sliding contact.* (Stachowiak, GW. And A.W. Batchelor . 2000)

Saat dua benda berputar dan titik kontaknya bergerak pada permukaan masing-masing, ada dua kemungkinan: kecepatan titik kontak pada benda pertama (V1) sama dengan kecepatan pada benda kedua (V2), atau berbeda. Jika kecepatannya sama, kondisi ini disebut rolling murni. Jika tidak, terjadi sliding, atau rolling disertai sliding (roll-slip).

### 2.9.3 Pengurangan Keausan

Untuk meminimalkan keausan, para ahli tribologi tak hanya mengandalkan pelumas cair, tetapi juga menggunakan pendekatan lain. Dalam pembentukan lembaran logam, misalnya, galling dapat dicegah melalui perlakuan pada pelat maupun alat cetaknya. Galling sendiri diatasi dengan pelapisan tipis pelat menggunakan dry lubricant berbasis logam paduan, atau melapisi tool dengan metode PVD (Physical Vapor Deposition) maupun CVD (Chemical Vapor Deposition). Jika keausan terjadi, dampaknya bisa bermacam-macam:

1. Pada bantalan menimbulkan getaran dengan frekuensi dan amplitud bervariasi.
2. Pada alat ukur mengurangi akurasi.
3. Pada alat reproduksi menurunkan kualitas serta kapasitas produksi.

Upaya mengurangi keausan meliputi:

- Menjaga kontak gaya tetap rendah.
- Menekan suhu pada area gesekan.
- Menggunakan material keras untuk permukaan kontak.
- Memperhalus permukaan yang bergesekan.
- Memastikan pelumasan berlangsung kontinu.
- Menjaga viskositas relatif tetap rendah.
- Memilih bahan dengan ketahanan aus yang baik.

#### 2.9.4 Alat Uji Keausan

Pengukuran adalah proses membandingkan suatu besaran dengan standar sejenis yang dijadikan satuan. Secara umum, pengukuran diartikan sebagai penentuan nilai besaran, dimensi, atau kapasitas terhadap acuan tertentu. Pengukuran juga dapat dimaknai sebagai pemberian angka pada atribut atau karakteristik objek, orang, atau hal tertentu berdasarkan aturan yang jelas (Budi, Fitri, & Suhendar, 2022).

Dalam praktiknya, pengukuran harus mencantumkan satuan dan besaran, bertujuan memperoleh data—baik data tunggal maupun data berulang—yang masing-masing memiliki tingkat presisi berbeda. Ilmu metrologi memuat aturan angka penting serta operasinya, yang sangat penting untuk menyajikan data hasil ukur secara benar (Ropi'i, 2019).

Sementara itu, jangka sorong—dikenal juga sebagai mistar sorong, mistar geser, vernier caliper, atau schuifmaat—adalah alat ukur dengan ketelitian lebih tinggi dibanding mistar biasa. Alat ini dilengkapi dua skala: skala utama dalam milimeter (1 mm = 0,1 cm) dan skala nonius. Ketelitian jangka sorong umumnya mencapai 0,1 mm, 0,05 mm, bahkan 0,02 mm.



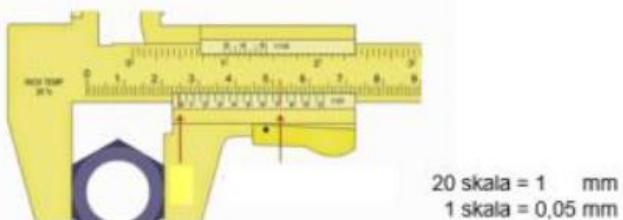
**Gambar 2. 35** Gambar Jangka Sorong. (Sumber, <https://www.Gramedia.com>)

#### Bagian – bagian jangka sorong

- Rahang Dalam, Terdiri dari rahang tetap dan rahang geser, digunakan untuk mengukur diameter dalam seperti lubang atau celah.
- Rahang Luar, Terdiri dari dua rahang (tetap dan geser) yang berfungsi mengukur dimensi luar, misalnya diameter luar, panjang, atau lebar benda.
- Batang Pengukur Kedalaman, Digunakan untuk mengukur kedalaman lubang atau cekungan.
- Skala Utama, Menampilkan hasil pengukuran pokok dalam satuan cm atau inci, umumnya memiliki panjang 15–17 cm.
- Skala Nonius, Berfungsi untuk meningkatkan ketelitian pengukuran, biasanya terbaca dalam mm atau inci.
- Baut Pengunci, Berperan menahan rahang tetap agar tidak bergeser, sehingga hasil pengukuran tetap stabil.

## Cara menggunakan jangka sorong

- (a) Siapkan benda yang akan diukur (misalnya koin atau kelereng).
- (b) Buka rahang geser ke kiri hingga rapat sempurna, pastikan skala menunjukkan nol agar terhindar dari zero error.
- (c) Longgarkan baut pengunci, geser rahang ke kanan lalu letakkan benda di antara rahang.
- (d) Geser rahang ke kiri hingga menjepit benda dengan pas, lalu kunci posisi rahang.
- (e) Periksa garis yang sejajar antara skala utama dan skala nonius.
- (f) Bacalah hasil pengukuran dengan menjumlahkan nilai pada skala utama dan pembacaan skala nonius untuk mendapatkan ukuran akhir diameter benda



$$\begin{aligned} \text{Skala tetap} &= 24 \times 1 \text{ mm} = 24 \text{ mm} \\ \text{Skala nonius} &= 14 \times 0,05 \text{ mm} = 0,7 \text{ mm} \\ \text{Hasil} &= \text{skala tetap} + \text{skala nonius} \\ &= 24 \text{ mm} + 0,7 \text{ mm} = 24,7 \text{ mm} \end{aligned}$$

Jadi, hasil dari pengukurannya adalah 24,7 mm

Tingkat ketelitian ini memungkinkan jangka sorong digunakan untuk mengukur diameter kelereng, cincin, maupun kedalaman tabung secara lebih presisi. Sebagaimana dijelaskan sebelumnya, alat ini dapat mengukur diameter luar, diameter dalam, serta kedalaman objek silindris. Ketepatan pembacaan sangat tergantung pada kecermatan pengguna dan kondisi alat. Pada tipe analog, jangka sorong biasanya memiliki ketelitian 0,05 mm atau 0,02 mm, sedangkan versi digital mempermudah

pembacaan. Cara menentukan keausan pada *bearing* yang sudah di uji putar dengan menggunakan jangka sorong:

1. Pengukuran Awal (Sebelum Pengujian)
  - a. Ukur diameter luar *bearing* (OD) dan catat.
  - b. Ukur diameter dalam *bearing* (ID) dan simpan datanya.
  - c. Ukur ketebalan (lebar) pada beberapa titik lalu hitung rata-rata.
2. Pengukuran Akhir (Setelah Pengujian)
  - a. Lakukan pengukuran ulang OD, ID, dan ketebalan pada titik-titik yang sama.
  - b. Hitung rata-rata perubahan dimensi untuk memastikan hasilnya representatif.
3. Analisis hasil dari pengujian keausan
  - a. Bandingkan data sebelum dan sesudah pengujian dengan spesifikasi atau batas toleransi keausan yang ditetapkan.
  - b. Evaluasi pengaruh jenis pelumas atau parameter pengujian lainnya terhadap tingkat keausan *bearing*.

## 2.10 Kerataan (*Flatness*)

Kerataan menjadi salah satu aspek penting dalam menjaga performa dan umur komponen mekanis, termasuk bantalan dan roda gigi. Kerataan sendiri menunjukkan sejauh mana suatu permukaan dapat dikatakan benar-benar rata. Pada bantalan, kerataan sangat berperan dalam meminimalkan gesekan dan mendukung efisiensi kerja. Permukaan yang rata akan membantu distribusi beban merata dan memaksimalkan pelumasan. Sebaliknya, ketidakrataan dapat memicu ketidakstabilan saat beroperasi, memperbesar gesekan, serta mempercepat keausan komponen..

### 2.10.1 Kerataan Permukaan

Kerataan permukaan adalah ukuran sejauh mana jarak tegak lurus titik-titik pada suatu permukaan terhadap bidang geometris acuan tetap berada di bawah batas

toleransi tertentu. Bidang acuan ini bisa direpresentasikan oleh plat rata (surface plate) atau garis lurus yang dibantu oleh penggaris datar (straight edge), leveler, maupun sinar cahaya yang digeser-gesarkan. Pengukuran kerataan dapat dilakukan menggunakan alat ukur pendatar, autokolimator, angle dekkor, atau instrumen optik lainnya. Selain itu, metode pengujian juga dapat memanfaatkan dial gauge untuk mendeteksi deviasi kerataan.

#### **2.10.2 Faktor – faktor yang mempengaruhi kerataan pada *ball bearing***

- a. Mutu Proses Produksi: Pemesinan dan penghalusan (grinding) raceway harus mematuhi toleransi ketat untuk menjaga kerataan.
- b. Beban Kerja: Beban berlebih atau distribusi beban yang tidak merata dapat menimbulkan deformasi plastis, yang berdampak pada kerataan permukaan.
- c. Pelumasan: Kekurangan pelumas akan meningkatkan gesekan, mempercepat keausan lokal, dan memengaruhi rata permukaan.
- d. Korosi & Kontaminasi: Partikel asing atau cairan korosif bisa merusak raceway dan bola, sehingga mengganggu kerataan.

#### **2.10.3 Metode Pengukuran Kerataan**

Kerataan pada *ball bearing* dapat diukur menggunakan alat dan metode berikut:

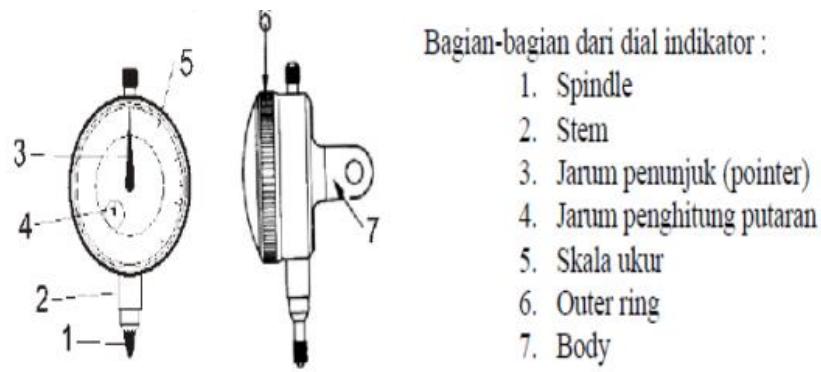
- a. CMM (*Coordinate Measuring Machine*): Digunakan untuk memeriksa toleransi dimensi dan tingkat kerataan.
- b. Profilometer : Mengukur langsung kekasaran serta kerataan permukaan.
- c. Metode Optik : Memakai interferometer atau alat berbasis cahaya untuk mendeteksi deviasi kerataan.

#### 2.10.4 Alat Uji Kerataan

Alat yang digunakan untuk mengukur kerataan permukaan adalah dial gauge (dial indikator). Cara penggunaannya, jarum dial indikator ditempatkan pada permukaan benda kerja, lalu benda digerakkan perlahan sambil membaca angka yang ditunjukkan jarum. Sebelum mencatat hasil, pastikan mengetahui skala ketelitian alat, karena angka pembacaan perlu dikalikan dengan nilai ketelitiannya untuk mendapatkan hasil akhir pengukuran.



**Gambar 2. 36 Dial Indicator.**  
(<https://www.websitependidikan.com>)



**Gambar 2. 37 Gambar Bagian – bagian Dial Indicator.**  
(<https://www.websitependidikan.com>)

1. Fungsi bagian-bagian dial indicator:
  - a. Spindel, Mendeteksi perubahan posisi pada benda yang diukur.
  - b. Stem, Menjadi rumah atau tempat spindel bergerak.
  - c. Jarum penunjuk, Menampilkan hasil pembacaan utama.
  - d. Jarum penghitung putaran, Menghitung jumlah putaran jarum penunjuk.
  - e. Skala ukur, Digunakan membaca nilai pergeseran jarum.
  - f. *Outer ring*, Untuk mengatur skala nol saat kalibrasi.
  - g. Body, Menopang dial indicator agar bisa dipasang pada stand pengukur.
2. Cara mengukur kerataan permukaan *bearing* dengan dial indicator:
  - a. Persiapan alat
    - (a) Pasang dial indicator pada stand.
    - (b) Letakkan probe menyentuh permukaan *bearing* secara tegak lurus.
    - (c) Setel skala ke nol sebagai titik referensi.
  - b. Pengukuran permukaan samping (side face flatness)
    - (a) Tempelkan probe pada sisi samping *bearing*.
    - (b) Putar *bearing* perlahan tanpa menggeser stand.
    - (c) Amati gerakan jarum dan catat pembacaan maksimum serta minimum.
  - c. Pengukuran diameter dalam atau luar
    - (a) Tempatkan probe pada inner race atau outer race.
    - (b) Putar *bearing* perlahan dan konsisten.
    - (c) Catat selisih nilai tertinggi dan terendah sebagai deviasi kerataan.

**d. Evaluasi hasil**

- (a) Bandingkan deviasi dengan batas toleransi standar *bearing*.
- (b) Jika deviasi melebihi batas, *bearing* dinilai tidak rata dan perlu perbaikan atau penggantian.

