

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Penelitian yang relevan

1. Berdasarkan dari penelitian oleh **Archard, J. F. (1953)** Keausan pada komponen mekanik yang mengalami kontak geser berulang merupakan salah satu penyebab utama penurunan performa dan keandalan sistem *rotating equipment*. Fenomena ini dipengaruhi oleh distribusi beban, tekanan kontak, karakteristik material, serta kondisi operasi. Teori ini menjelaskan bahwa *volume* keausan berbanding lurus dengan gaya normal dan jarak geser, serta berbanding terbalik dengan kekerasan material. Model keausan ini menjadi dasar dalam banyak penelitian modern mengenai degradasi permukaan akibat kontak mekanik.
2. Berdasarkan dari penelitian oleh **Maloney, K. L. dan Benson, R. C. (1979)** mengenai analisis kegagalan *pulverizer*. Dari penelitian ini dijelaskan bahwa kegagalan operasional *pulverizer* umumnya dipicu oleh kombinasi keausan mekanik, ketidakseimbangan beban, dan konsentrasi tekanan kontak pada komponen internal yang mengalami kontak geser berulang. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa sistem penguncian yang tidak mampu mendistribusikan beban secara merata akan menyebabkan deformasi lokal, peningkatan vibrasi, serta keausan tidak seragam pada komponen seperti *Journal assembly* dan *tyre*. Kondisi ini berpotensi mempercepat terjadinya *overclearance* dan menurunkan kestabilan operasi *pulverizer*. Prinsip mekanika kontak yang menyatakan bahwa peningkatan tekanan lokal akan menghasilkan regangan elastis yang berulang pada area kontak, yang dalam jangka panjang memicu deformasi permanen dan degradasi material. Dalam konteks penelitian ini, konfigurasi *Single Lock* dapat diinterpretasikan sebagai sebagai sumber konsentrasi beban yang identik dengan mekanisme. Oleh karena itu, modifikasi menjadi konfigurasi multi-*Lock* diposisikan sebagai solusi rekayasa untuk memecah konsentrasi beban, menurunkan

tekanan kontak maksimum, serta meningkatkan kestabilan mekanik sistem selama operasi kontinu.

3. Dalam kajian desain elemen mesin, **Shigley et al. (2015)** menekankan bahwa distribusi beban yang tidak merata akan menghasilkan konsentrasi tegangan lokal yang dapat mempercepat deformasi elastis maupun plastis. Kondisi ini berpotensi menurunkan umur lelah komponen dan meningkatkan risiko kegagalan struktural. Pemerataan beban melalui optimasi desain penguncian dan sistem penopang menjadi strategi utama dalam meningkatkan keandalan operasional komponen yang bekerja di bawah beban dinamis.
4. Berdasarkan dari buku oleh **Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2014)**. *Shigley's Mechanical Engineering Design*. Dijelaskan bahwa dalam sistem elemen mesin yang mengalami kontak mekanik berulang, distribusi beban yang tidak merata merupakan penyebab utama terbentuknya konsentrasi tegangan lokal. Konsentrasi tegangan ini dapat memicu deformasi elastis berlebih, deformasi plastis permanen, serta mempercepat mekanisme keausan pada permukaan kontak. Selain itu, kondisi tegangan yang terfokus pada satu titik akan menurunkan umur lelah komponen secara signifikan karena terjadinya siklus pembebanan mikro yang berulang pada area yang sama. Oleh sebab itu, optimasi desain penguncian, sistem penopang, serta konfigurasi distribusi beban menjadi aspek penting dalam meningkatkan keandalan struktural dan umur pakai komponen. Konsep ini relevan untuk dianalisis pada sistem *Lock tyre Journal housing*, di mana pemerataan beban melalui modifikasi desain diharapkan mampu menurunkan tekanan kontak, mengurangi konsentrasi tegangan, serta memperlambat degradasi material selama operasi jangka panjang.
5. Berdasarkan dari penelitian oleh Zhang, Li, dan Zhou (2020), distribusi ukuran partikel batubara memiliki pengaruh signifikan terhadap karakteristik pembakaran pada *pulverized coal boiler*. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa partikel batubara yang tidak seragam menghasilkan proses pembakaran yang kurang stabil serta meningkatkan beban operasional *pulverizer*. Kondisi ini menyebabkan fluktuasi gaya mekanik pada komponen penggilingan, terutama pada

area kontak antara *tyre* dan *Journal housing*. Beban yang tidak stabil berkontribusi terhadap peningkatan tekanan kontak dan gesekan berulang, yang pada akhirnya mempercepat terjadinya degradasi permukaan komponen. penelitian tersebut mengindikasikan bahwa performa mekanik *pulverizer* sangat dipengaruhi oleh kestabilan sistem penggilingan. Ketika sistem mengalami ketidakseimbangan akibat distribusi partikel yang tidak optimal, komponen struktural akan menerima pembebanan siklik yang tidak merata. Fenomena ini berasosiasi langsung dengan peningkatan regangan lokal, keausan tidak seragam, serta potensi penurunan umur pakai komponen. Oleh karena itu, stabilitas desain mekanik, termasuk sistem penguncian *lock tyre*, menjadi faktor penting dalam menjaga konsistensi proses penggilingan dan meningkatkan keandalan operasional *medium speed mill*.

6. Berdasarkan dari penelitian oleh **K. S. Gopal and A. L. Rao, May-Jun. 2019.** analisis akar penyebab kegagalan peralatan mekanik di pembangkit listrik menunjukkan bahwa sebagian besar kerusakan komponen berawal dari distribusi beban yang tidak merata dan kondisi kontak mekanik yang ekstrem. Penelitian tersebut menekankan bahwa komponen *rotating equipment* yang bekerja secara kontinu sangat rentan terhadap keausan progresif akibat tekanan kontak tinggi dan pembebanan siklik. Ketidakseimbangan beban operasional menyebabkan terbentuknya konsentrasi tegangan lokal yang mempercepat retak mikro, deformasi permukaan, serta kegagalan dini komponen struktural. Hasil kajian mengindikasikan bahwa pendekatan preventif melalui optimasi desain mekanik dan evaluasi distribusi beban merupakan strategi utama dalam meningkatkan keandalan sistem. Komponen yang mengalami kontak berulang, seperti *journal housing* dan sistem penguncian pada *pulverizer*, memerlukan desain yang mampu mendistribusikan gaya secara merata untuk meminimalkan degradasi material. Temuan ini relevan dengan penelitian modifikasi *lock tyre*, di mana peningkatan pemerataan beban diharapkan dapat menurunkan tekanan kontak, mengurangi laju keausan, serta memperpanjang umur operasional komponen.

## **2.2 Landasan teori**

### **2.2.1 Definisi *Pulverizing***

Pada industri kimia konsep *pulverizing* secara luas diartikan sebagai proses dari *raw material* atau produk antara menjadi bahan yang siap untuk diproses lebih lanjut. Proses operasi pemecahan dari suatu padatan menjadi butiran yang lebih halus disebut *pulverizing*. Material yang diumpankan ke mesin disebut bahan baku sedangkan keluaran mesin *pulverizer* disebut produk. Ukuran material bahan baku dan produk bervariasi dari beberapa puluh centimeter sampai beberapa mikron. *Crusher* primer menghasilkan produk yang berukuran beberapa centimeter, *Crusher* sekunder menghasilkan produk beberapa *millimeter*, *fine grinding* menghasilkan produk berukuran ratusan sampai puluhan mikron, dan *ultra fine grinding* yang menghasilkan ukuran beberapa mikron dan yang lebih kecil.

### **2.2.2 Tujuan *Pulverizing***

Tujuan langsung dari *pulverizing* adalah untuk mendapat ukuran butiran dan *specific surface* atau distribusi ukuran butiran dari produk. Pada proses penanganan material padat, ukuran butiran yang lebih kecil berarti mempunyai *specific surface* yang lebih besar. Dalam usaha memperoleh ukuran butiran produk bubuk yang sangat halus dengan cara *pulverizing*, akan dibatasi oleh kenaikan konsumsi energi penggilingan yang diperlukan per unit *specific surface* area ataupun gejala penggumpalan pada produk. Faktor ekonomi menjadi pembatas terhadap spesifikasi *specific surface* area dari produk.

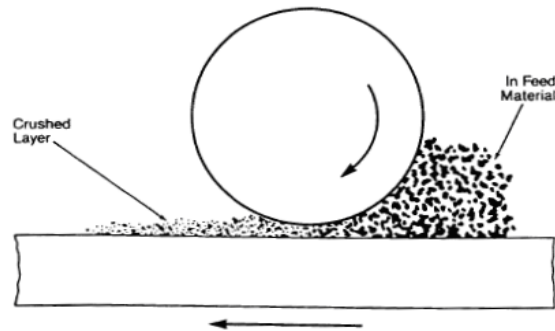
Tujuan dari *pulverizing* yang utama adalah:

- a. Untuk meningkatkan *surface area*
- b. Untuk mendapatkan ukuran partikel yang cocok untuk penanganan lebih lanjut
- c. Untuk mendapatkan ukuran dan bentuk partikel sesuai dengan kebutuhan pengguna

### **2.2.3 Mekanisme *Pulverizing***

Mekanisme dari *Pulverizing* adalah sesuatu hal yang rumit dan sesuatu yang bisa berbeda pada kasus yang berlainan. Pada kebanyakan kasus, mekanisme *Pulverizing* dibedakan atas gaya pemecah eksternal yang digunakan pada bahan baku untuk

menghasilkan pecahan-pecahan produk. Pecahan-pecahan tersebut dihasilkan karena perambatan *crack* (retak) pada daerah yang terkena stress. Berdasarkan hasil tes pada sebuah kristal, pecahan/patahan terjadi karena stress vertikal atau gaya geser yang mengenai kristal melebihi *tensile strength* atau *shearing strength* kristal tersebut.



**Gambar 2.1** Proses penggilingan di *Mill tipe roll and race*, sumber (Metso, *Crushing and Screening Handbook*; FTM Machinery, *Roll Crusher Manual*)

#### 2.2.4 *Pulverizing Batu Bara*

Klasifikasi batubara diberbagai negara didasarkan pada masing-masing standar yang dikembangkan atau yang dianut oleh suatu negara. Namun demikian standar yang banyak digunakan adalah standar ASTM D388-92a. Pada klasifikasi ini batubara dibedakan berdasar kadar karbon (*fixed carbon*), kadar *volatile matter*, dan *gross caloric value* (kandungan energi). Berdasarkan criteria tersebut batubara dikelompokkan menjadi 4 (empat) kelas : Anthrasit, Bituminious, Subbituminious, dan Lignit.

*Grindability* merupakan suatu ukuran kemudahan relatif suatu material umpan untuk digiling. Pada saat ini telah disepakati suatu standar mesin penggiling yang digunakan untuk mengukur tingkat kemudahan suatu material untuk digiling. Mesin tersebut telah distandisasi dengan ASTM dan untuk aplikasi pada proses penggilingan batubara, yaitu Metode *Hardgrove grindability* (ASTM D409).

Kapasitas suatu *Mill* batubara tergantung dari tiga parameter utama yaitu : indeks kekerasan batubara (*HGI: hard grove index*), kadar air di batubara (*moisture*), dan tingkat kehalusan produk *Mill* berupa batubara bubuk (*Fineness*). Kapasitas suatu *Mill* biasanya didisain dengan mengacu pada suatu kondisi HGI dan *Fineness* serta kadar air yang tertentu.

### 2.2.5 Medium Speed Mill (MSM)

*Medium Speed Mill* (MSM) atau *pulverizer* digunakan di PLTU untuk mengurangi ukuran batubara yang masuk sampai dengan ukuran *Fineness* yang dapat terbakar secara efisien di dalam ruang bakar (*furnace*). Kapasitas maksimum dari MSM tergantung pada kriteria sebagai berikut:

1. Besar ukuran *pulverizer*
2. Kualitas batubara – *Hardgrove index* dan *moisture level*
3. *Pulverized coal Fineness* – berapa % yang dapat melewati 200 *mesh*

*Raw coal* (batubara kasar) dengan diameter  $\frac{1}{2}$  - 1 inchi diumpan ke dalam *rotating bowl* melalui *center feed pipe* laju pengumpanan batubara (*coalflow*) ditentukan oleh sistem kendali pembakaran yang mengacu kepada permintaan MW setiap unit, kualitas batubara, dan jumlah *pulverizer* yang beroperasi. Gaya sentrifugal menyebabkan batubara yang berada di *bowl* bergerak keluar searah jari-jari *bowl*, menimbulkan tumpukan batubara di sisi *grinding ring*. (KL Maloney, 1979)

Tumpukan batubara akan melewati *grinding assembly* berporos yang disebut *journal*. Di sini, beban yang ditimbulkan oleh pegas ditekan pada batubara oleh *roll* yang berputar. Pengurangan ukuran batubara terjadi pada area antara *grinding* (disebut *bullring*) dan *Journal roll* melalui proses yang dikenal dengan *attrition* atau *friction grinding*. Gerakan radial dan sirkumferensial (mengelilingi) dari batubara membawa batubara tergiling ke pinggir *bowl* dan menuju jalur media transportasi yaitu udara primer (X. Jiang. (2019).

Dalam operasinya, batubara dipengaruhi oleh gaya sentrifugal akibat putaran *bowl*, sehingga terdorong ke arah luar dan terjepit di antara *tyre* dan *grinding ring*. Interaksi mekanik inilah yang menyebabkan terjadinya keausan pada komponen-komponen utama MSM, khususnya *tyre* dan *Journal housing*. Oleh karena itu, desain, material, serta sistem penguncian pada *tyre* menjadi faktor krusial yang menentukan keandalan dan umur pakai MSM.

Dalam sistem pemeliharaan PT Indonesia Power, MSM menjalani dua jenis inspeksi berbasis waktu operasi (*time-based maintenance*), yaitu:

**A. *Minor inspection* MSM 3000 jam**

Sesuai dengan dokumen Instruksi Kerja IK.BLB – *Minor Inspection* MSM 3000 Jam, kegiatan ini bertujuan untuk memastikan kondisi komponen dalam keadaan layak operasi.

Proses *Minor Inspection* mencakup:

- Pemeriksaan *grinding roll*, *grinding ring*, dan *Journal assembly*.
- Pemeriksaan *classifier*, spring tension, seal air system, dan pyrite gate.
- Pengukuran *clearance* antar *grinding roll* dan *grinding ring*.
- Pengecekan tension spring dengan standar 54 mm dan *classifier* 65% open.
- Pembersihan internal *mill*.

**B. *Major inspection* MSM 8000 jam**

Berdasarkan Instruksi Kerja *Major Inspection Medium Speed Mill* PLTU Banten 2 Labuan (HP963), kegiatan ini merupakan *overhaul* besar untuk memastikan seluruh sistem dalam kondisi optimal. Ruang lingkupnya meliputi:

- Pembongkaran dan penggantian *tire* serta *grinding roller* baru.
- Realignment motor dan *gearbox*, serta pemeriksaan *coupling*.
- Pemeriksaan dan pembersihan sistem pelumasan (*lube oil station*).
- Pengujian sistem proteksi seperti sealing air dan *fire fighting* system.
- Pengecekan *yoke seal*, *labyrinth clearance*, dan *gearbox oil condition*.
- Uji performa pasca-inspeksi (*vibrasi*, *ampere motor*, dan *temperatur bearing*).

Dari hasil inspeksi rutin ini sebagai acuan untuk melakukan perbaikan pada komponen *Medium Speed Mill*.

| Work Order  | Description                                                                                                   | WO Report Date   | Worklog Description                                                                 |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| BLB18/27569 | Inspeksi dan perbaikan suara abnormal MSM 2E #2 (tyre temuan rollwheel sudah overclearance)                   | 10/10/18 9:38 AM | Penggantian journal house dan major inspeksi                                        |
| BLB18/28623 | Inspeksi dan perbaikan abnormal sound MSM 1D area scrapper (re build rollwheel dan modifikasi lock tyre)      | 10/26/18 9:14 AM | Penggantian journal house, modifikasi lock tyre, dan major inspeksi                 |
| BLB19/29258 | Penggantian 3 journal assembly, GRS, troath ring, dan lube oil cooler MSM 2C (Lock tyre sisi labuan melintir) | 9/10/19 9:43 AM  | Penggantian journal house dan major inspeksi                                        |
| BLB19/15324 | Perbaikan abnormal sound di area MSM 1B (grinding tyre melintir 2 sisi) #1                                    | 3/11/19 9:57 AM  | Penggantian journal house dan major inspeksi                                        |
| BLB20/14955 | Penggantian grinder roller MSM 1E kondisi melintir dan turun                                                  | 3/2/20 11:16 AM  | Penggantian journal house                                                           |
| BLB20/30973 | Penggantian Grinding tyre MSM 2D sisi labuan rompal Unit #2                                                   | 9/29/20 7:58 AM  | Penggantian journal house                                                           |
| BLB22/16523 | Inspeksi Abnormal sound MSM 2A (Temuan roller assembly melintir)                                              | 4/4/22 8:00 AM   | Penggantian journal house                                                           |
| BLB22/23989 | Pemasangan Lock tyre MSM 1B ada yang lepas (tyre sisi panimbang oversize)                                     | 6/28/22 9:47 AM  | Reposisi dan penambahan lock tyre                                                   |
| BLB22/25903 | Inspeksi dan perbaikan Abnormal sound MSM 2D (Lock tyre dan ring keeper sisi turbin lepas)                    | 7/22/22 1:47 PM  | Reposisi dan penambahan lock tyre dan penggantian journal house pada bulan November |
| BLB22/35925 | Inspeksi tyre sisi darat MSM 1B abnormal vibrasi dan ada kebocoran udara (tyre sisi panimbang oversize)       | 11/18/22 8:17 PM | Penggantian journal house dan major inspeksi                                        |

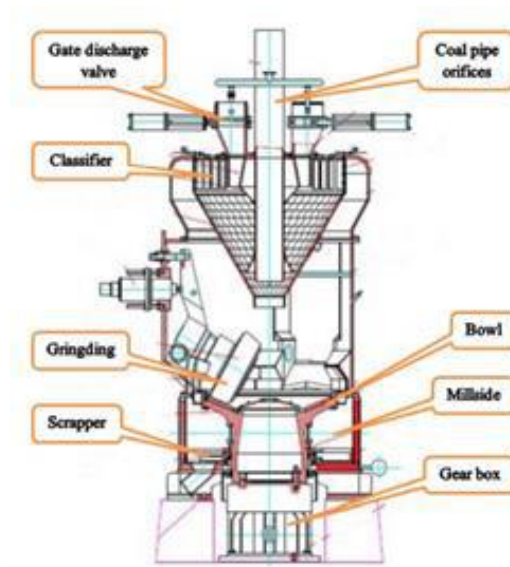
**Gambar 2.2** Data gangguan *grinding tyre* tahun 2018 – 2022, sumber (maximo)

Dalam konteks PLTU, *Medium Speed Mill* (MSM) atau *pulverizer* berperan penting dalam proses pengurangan ukuran batubara hingga mencapai tingkat kehalusan (*Fineness*) yang optimal untuk efisiensi pembakaran di ruang bakar. Kapasitas optimal MSM dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti ukuran *pulverizer*, kualitas batubara yang diukur dari *Hardgrove Index* dan *moisture level*, serta tingkat kehalusan batubara yang diukur dari persentase yang melewati 200 *mesh*.

Pada operasi aktual, *raw coal* dengan diameter ½ - 1 inchi diumpankan ke dalam *rotating bowl* melalui *center feed pipe*, di mana laju pengumpanan dikendalikan oleh sistem pembakaran yang mengacu pada permintaan daya, kualitas batubara, dan jumlah *pulverizer* yang beroperasi. Namun, tantangan utama yang sering dihadapi dalam operasional MSM adalah kerusakan berulang pada sistem *Lock tyre*. Kerusakan ini berdampak pada *downtime* yang panjang, karena akses untuk perbaikan sulit dijangkau berada pada posisi tidak siap (*not standby*), hal tersebut mengganggu kontinuitas operasi. Kegiatan ini bersifat inspeksi visual dan pengujian ringan untuk mendeteksi dini adanya indikasi keausan dan getaran abnormal.

Media transportasi, yaitu udara primer panas (*hot primary air*), mempunyai 3 fungsi yaitu:

1. Menyediakan gaya dinamis yang diperlukan di dalam *pulverizer* untuk mengklasifikasi batubara (mengendalikan *coal Fineness*).
2. Udara yang panas membantu proses penggilingan dengan cara mengeringkan batubara.
3. Mengalirkan batubara tergiling (*pulverized coal*) dari *pulverizer* ke furnace.



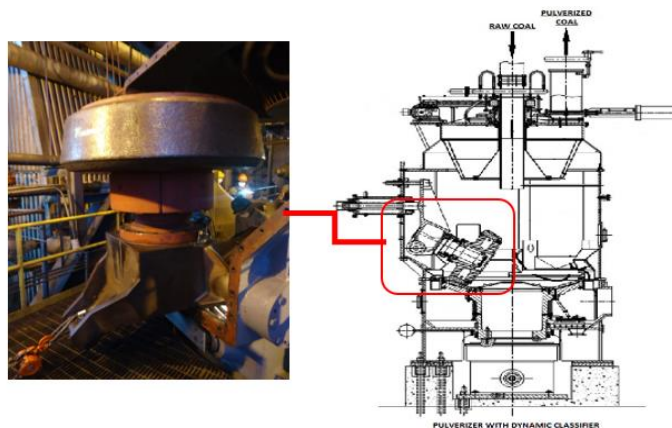
**Gambar 2.3** Komponen utama pada MSM, sumber (*manual book MSM HP963*)

### 2.2.6 Komponen Utama MSM

Terdapat beberapa komponen yang ada pada alat MSM yang diklasifikasikan sebagai berikut:

1. *Bowl*

Berbentuk seperti piring berbentuk seperti piring besar dengan gerakan berputar sebagai dasar untuk menggiling batubara bersama *grinding roll* yang berada di atasnya yang ikut berputar. *Pulverizer* type HP 963 berarti 96 inchi ukuran *bowl* dan 3 buah jumlah *grinding*.



**Gambar 2.4** *Journal Assembly*, sumber (dokumen pribadi)

## 2. *Grinding*

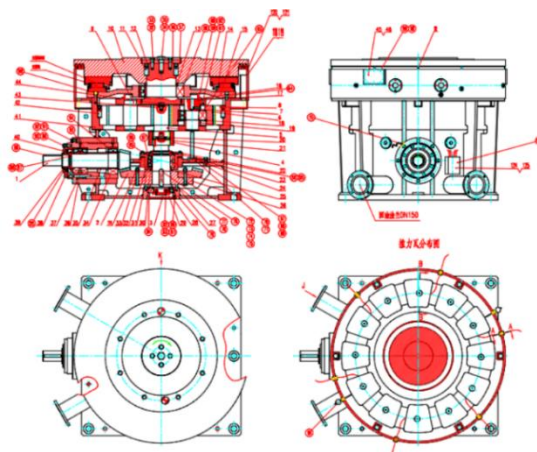
Berbentuk roda besar terbuat dari logam yang berfungsi untuk menggilas/menggiling batubara diatas *bowl* dan berputar mengikuti putaran *bowl*. *Clearance* antara *grinding roll* dan *bowl ring* sekitar 5 mm.

## 3. *Motor Pulverizer*

Berfungsi untuk memutar *bowl* melalui gigi reduksi dari *planetary gear box*.

## 4. *Planetary Gear Box*

Untuk mentransfer tenaga putar dari motor ke *bowl*. Di dalam *gear box* terdapat 2 *gear* yakni  $n_1$  dengan putaran 977 rpm dan  $n_2$  dengan putaran 29,748 rpm, ini adalah yang di *couple* dengan *bowl* dan juga *scraper*.



**Gambar 2.5** *Drawing gear box mill*, sumber (manual book MSM HP 963 )

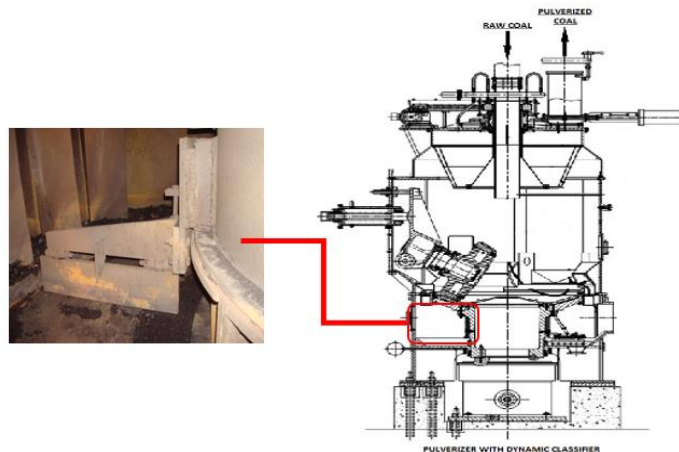
##### 5. *Mill Pulverizer side*

Adalah peralatan dan area dibawah *bowl* dimana udara dari *Primary Air Fan* masuk, untuk menampung batubara atau material yang *reject* dari *Mill pulverizer* dan jatuh ke *bottom liner* yang dilengkapi *scraper* untuk membersihkan serbuk batubara.

##### 6. *Scraper*

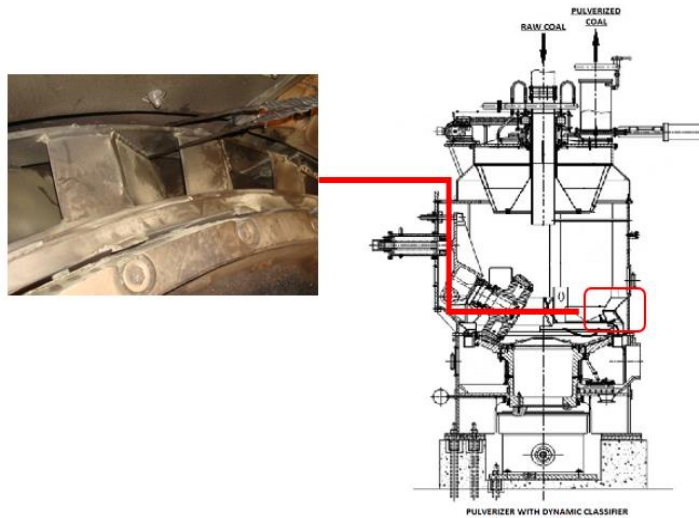
Pada proses penggilingan batu bara menggunakan *pulverizer* tipe HP 963, sebagian material yang tidak berhasil tergerus oleh sistem *grinding roll* akan terlempar ke bagian bawah *pulverizer* dan masuk ke ruang *scraper*. Ruang *scraper* berfungsi sebagai media pengumpulan serta jalur pembuangan material kasar (*reject*) yang tidak memenuhi spesifikasi ukuran hasil penggilingan.

Untuk memastikan material *reject* dapat dialirkan secara efektif menuju *pyrite tank*, digunakan daun *scraper* yang berfungsi mengarahkan material yang jatuh pada lantai ruang *scraper* ke saluran *pyrite*. Keberadaan daun *scraper* berperan penting dalam menjaga kelancaran aliran material *reject*, meminimalkan penumpukan material di dalam *pulverizer*, serta mendukung kontinuitas dan keandalan operasi sistem penggilingan.



**Gambar 2.6** Daun *scraper*, sumber (dokumen pribadi)

## 7. Vane Wheel



**Gambar 2.7** *Vanewheel Assembly*, sumber (dokumen pribadi)

Untuk pemerataan distribusi udara dari *mill pulverizerside* melalui *mill pulverizer* dan terus keatas menuju *classifier*, sehingga dapat meningkatkan efisiensi pembagian batubara.

## 8. Classifier

Terletak pada bagian atas *Mill pulverizer* yang berfungsi untuk memisahkan antara batubara halus dan kasar. Batubara yang halus langsung naik ke outlet dan menuju ruang bakar, Sedangkan yang kasar akan jatuh kembali ke *Mill pulverizer* untuk ikut tergiling lagi. *Classifier* ini terdiri dari deflector vane yang dapat disetel untuk mendapatkan tingkat kehalusan (*Fineness*) sesuai yang diharapkan.

## 9. Gate Discharge Valve

Berfungsi untuk mengisolasi atau membatasi pada waktu *Mill pulverizer* tidak beroperasi jangan sampai ada gas panas dari ruang bakar masuk ke *Mill pulverizer*.

## 10. Coal Pipe Orifices

Dipasang diatas discharge *Mill pulverizer* pada pipa batubara dari *Mill pulverizer* yang menuju ruang bakar. Fungsinya untuk menyamakan aliran campuran batubara dan udara dari *Mill pulverizer* ke ruang bakar. Karena panjang pipa

yang menuju empat sudut ruang bakar panjangnya tidak sama dan pula banyaknya belokan juga berbeda satu sama lain. Lubang orifice tiap pipa tidak sama tergantung panjang pipa dan ukurannya ada pada gambar (*master drawing*). *Orifice* harus diperbaiki apabila lubangnya telah aus dan melebihi 10% dari lubang standardnya. (I. Maulana, 2019)

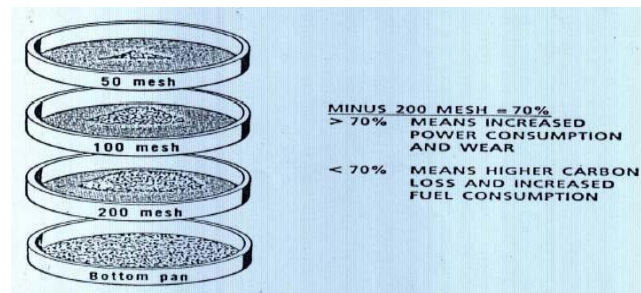
*Grinding roll pulverizer*, juga dikenal sebagai *coal MSM* atau *pulverizer*, adalah komponen kritis dalam sistem pembakaran batubara di Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Peralatan ini berperan penting dalam menghaluskan batubara menjadi bubuk halus. Fungsi utama *grinding roll pulverizer* dalam PLTU adalah:

- a. Menghaluskan batubara: Mengubah batubara kasar menjadi bubuk halus (umumnya 70-75% lolos saringan 200 *mesh*).
- b. Mengeringkan batubara: Mengurangi kadar air dalam batubara selama proses penggilingan.
- c. Klasifikasi partikel: Memisahkan partikel batubara berdasarkan ukuran.
- d. Distribusi batubara: Mengirim bubuk batubara ke *burner boiler*

### 2.2.7 Pengertian *Mesh* dan *Fineness*

*Mesh* adalah lubang-lubang pada ayakan batubara. Gunanya ayakan adalah untuk mengukur tingkat kehalusan (*fineness*) dari batubara setelah digiling pada *mill pulverizer* artinya apabila batubara setelah digiling kemudian diayak, maka batubara yang halus akan lolos sedangkan yang kasar akan tertinggal dan tidak lolos ayak. (D. Noviadri, 2019) *Fineness* adalah kehalusan batubara, sedangkan satuannya adalah %. Misalnya batubara yang diayak 100 gram, kemudian yang lolos ayakan 70 gram, sedangkan yang tertinggal adalah 30 gram, maka *Fineness* batubara =  $70 \text{ gram} / 100 \text{ gram} \times 100 \% = 70\%$ .

Ada beberapa macam jumlah lubang atau *Mesh* ayakan yang biasa digunakan yaitu *Mesh* 30, 50, 100, dan 200 : *Mesh* 50 berarti untuk lebar 1 inchi terdapat 50 lubang, jadi lebar perlubang =  $1 \text{ inch} / 50 = 1 / 50 \text{ inch} = 0,508 \text{ mm}$ . *Fineness* batubara untuk pembangkit umumnya berkisar 65 – 75 % untuk *Mesh* 200. Berarti lebar lubangnya =  $1 \text{ inchi} / 200 = 0,127 \text{ mm}$ .



**Gambar 2.8** Variasi Mesh Sizing, sumber ((Metso. (n.d.). *Crushing and Screening Handbook* (Edition 7)

### 2.2.8 Keausan pada Sistem Mekanik

Keausan merupakan fenomena hilangnya material dari permukaan padat akibat kontak dan gerakan relatif dengan permukaan lain. Jenis keausan yang terjadi pada *Journal housing tyre* umumnya adalah adhesive wear dan abrasive wear, yang disebabkan oleh gesekan antara komponen logam pada tekanan tinggi serta partikel batubara yang ikut menjadi abrasif.

### 2.2.9 Hukum Keausan Archard (*Archard's Wear Law*)

Salah satu pendekatan klasik untuk menghitung *Volume* material yang aus adalah Hukum Keausan Archard (Archard's Law). Hukum ini menjelaskan bahwa keausan berbanding lurus dengan gaya normal dan jarak geser, serta berbanding terbalik dengan kekerasan material.

$$V = K \frac{W \cdot L}{H}$$

#### Keterangan:

V= *Volume* material yang aus (mm<sup>3</sup>)

K= Koefisien keausan (tanpa satuan, tergantung material dan kondisi pelumasan)

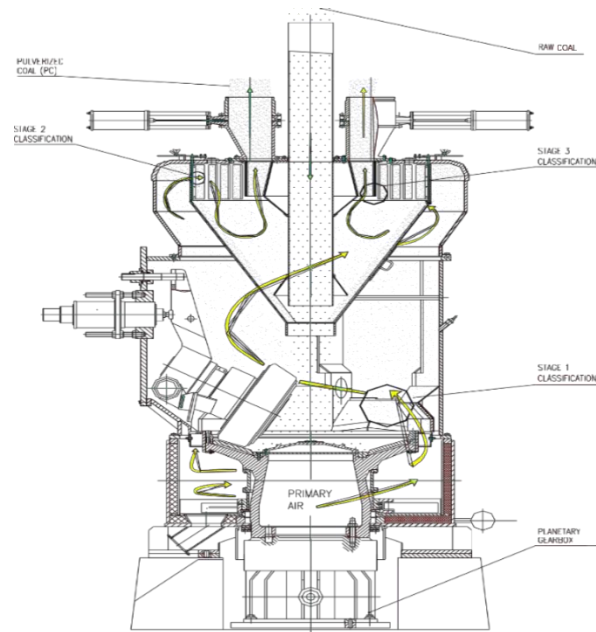
W= Gaya normal yang bekerja pada permukaan kontak (N)

L= Jarak geser total selama operasi (m)

H= Kekerasan material permukaan (N/mm<sup>2</sup>)

### 2.2.10 Pengertian Mill

*Mill* adalah suatu alat bantu pada *boiler* dengan bahan bakar batubara yang digunakan untuk menghancurkan batubara menjadi butiran halus kemudian butiran halus ini dihembuskan dari bawah *Mill* menuju outlet *mill*, Kemudian menuju ruang bakar bersama udara untuk pembakaran *boiler*, dapat dilihat pada gambar 2.3



**Gambar 2.9** Komponen *Mill* bagian luar, sumber (*manual book MSM HP 963* )

### 2.2.11 Tekanan Kontak (Contact Pressure)

Tekanan kontak antara *Lock tyre* dan *Journal housing* merupakan parameter utama yang menentukan tingkat keausan. Semakin tinggi tekanan, semakin besar energi kontak yang dihasilkan, dan semakin cepat material terdegradasi.

$$p = \frac{F}{A}$$

**Keterangan:**

$p$  = Tekanan kontak (Pa)

$F$  = Gaya tekan atau beban total (N)

$A$  = Luas permukaan kontak (m<sup>2</sup>)

Tekanan kontak dapat dikurangi dengan memperbesar area kontak efektif atau menggunakan material dengan kekerasan lebih tinggi. Analisis tekanan ini penting untuk menentukan desain modifikasi sistem *lock tyre* yang mampu menurunkan beban lokal berlebih.

#### 2.2.12 Data Teknis

Pada *boiler* unit 1&2 PLTU cilacap 2x300 MW, terdapat 5 (lima) *Mill* yaitu: 4 (empat) *Mill* operasi dan 1 (satu) *standby*. Spesifikasi *Mill* unit 1&2 PLTU Cilacap 2x300 MW adalah sebagai berikut:

|                           |                                           |
|---------------------------|-------------------------------------------|
| Model                     | : HP 963 ( <i>With Static separator</i> ) |
| Guaranted Output          | : 60 ton/h                                |
| <i>Max. Air Flow Rate</i> | : 45,37 ton/h                             |
| <i>Max. Resistance</i>    | : 4,5 Kpa                                 |
| <i>Rotary Speed</i>       | : 30 rpm                                  |
| Model Moto                | : YHP 560-6TH                             |
| Daya Motor                | : 850 KW                                  |
| Tegangan Motor            | : 6000 V                                  |
| Putaran Motor             | : 1000 rpm                                |

#### 2.2.13 Sistem Kerja *Medium Speed Mill*

Udara *transport* disuplai oleh PA fan dan masuk ke bawah *pulverizer bowl* ke dalam area yang disebut *millside*. *Millside* berada dalam tekanan positif apabila udara transport disuplai oleh PA fan. Dari *millside*, udara mengalir ke atas melalui diameter luar dari *rotating bowl*. *Vane* (sudu) yang terpasang pada *bowl* mengubah aliran udara menjadi vertikal. Partikel batubara yang lebih kecil terbawa ke atas oleh udara sementara material yang padat dan sulit digiling jatuh kembali ke *millside*. Di atas *bowl*, partikel batubara terbang mengalami proses klasifikasi tiga tingkat:

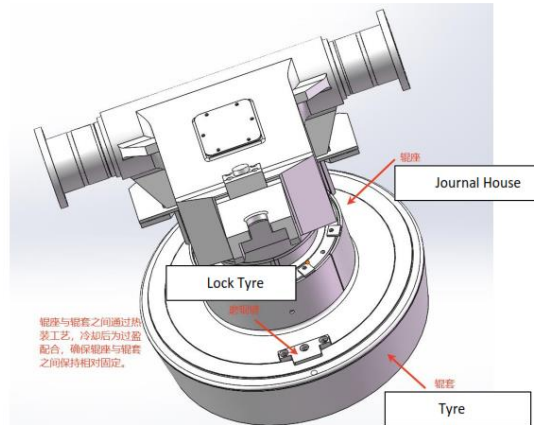
- a. Tahap pertama klasifikasi berlangsung pada daerah sedikit di atas level *bowl*. Deflektor udara stasioner terpasang pada separator body mengakibatkan partikel batubara terberat berubah arah, kehilangan momentum, dan kembali ke *bowl* untuk penggilingan kembali.
- b. Tahap kedua, partikel yang lebih ringan dibawa oleh udara transport menuju ke top separator. Di sini, curved adjustable vanes (baling-baling lengkung yang dapat diatur) memberikan gerakan siklonik ke campuran udara/batubara yang menyebabkan partikel yang lebih berat kehilangan momentum dan jatuh kembali ke *bowl*.
- c. Tahap ketiga campuran udara/batubara dilewatkan melalui venturi collar untuk klasifikasi lanjutan dan ukuran *Fineness* yang diinginkan dapat tercapai. Partikel batubara yang sudah dipisahkan oleh deflector blade dan venturi collar kembali ke area penggilingan dengan cara meluncur di dalam inner cone. Cone memisahkan area turbulensi *pulverizer* dari partikel yang sudah terklasifikasi. Tidak adanya turbulensi di area ini membuat gaya gravitasi dapat menarik kembali partikel yang lebih berat ke *bowl*. Sebuah cone dengan arah terbalik diposisikan di dalam inner cone untuk mengurangi kecepatan udara transport melalui moncong cone dan memastikan partikel batubara yang berat dapat kembali ke *bowl*.

Campuran udara/batubara keluar melalui venturi di mana campuran tersebut dikonsentrasikan dan kemudian diekspansi untuk mendapatkan distribusi udara/batubara dengan jumlah seimbang pada setiap *coal pipe*. *Coal pipe* membawa campuran udara/batubara ke furnace di mana pembakaran terjadi. Material yang sulit digiling jatuh ke *millside* dan dipindahkan oleh *scraper* menuju ke bukaan di lantai *millside*. Material tersebut kemudian masuk ke pyrite system.

#### **2.2.14 Sistem Penguncian *Lock Tyre***

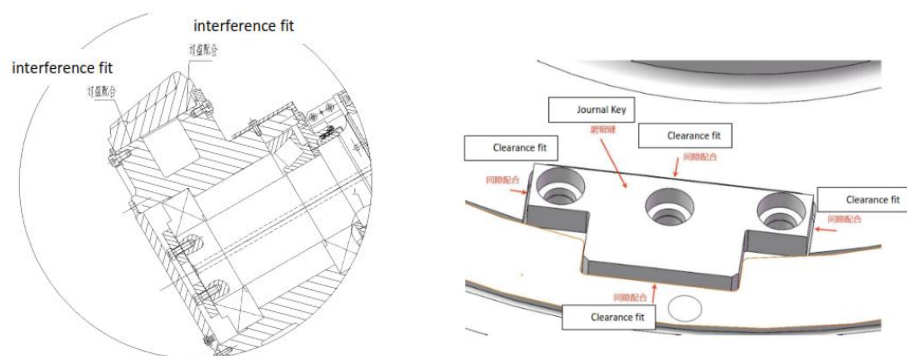
*Pulverizer* merupakan komponen penting dalam sistem pembakaran pada pembangkit listrik tenaga uap berbahan bakar batubara, yang berfungsi untuk menggiling batubara menjadi partikel halus sebelum dibakar. Namun, dalam pengoperasiannya, *pulverizer* sering

mengalami kegagalan yang signifikan, terutama pada komponen *tyre* yang mengalami keausan berlebih. Keausan ini disebabkan oleh berbagai faktor, termasuk gesekan tinggi, distribusi beban yang tidak merata, dan getaran yang berlebihan, yang semuanya berdampak pada penurunan kinerja dan stabilitas *pulverizer* (Luo, et al., 2019).



**Gambar 2.10** *Journal Grinder* MSM, sumber ( manual book MSM HP 963 )

Sistem *Lock tyre* berfungsi sebagai mekanisme penahan yang menjaga posisi *tyre* tetap terkunci pada *Journal housing* selama operasi. Desain sistem *Lock* sangat mempengaruhi distribusi beban dan respons struktural komponen. Pada konfigurasi *Single Lock*, beban operasional cenderung terpusat pada satu area penguncian sehingga meningkatkan konsentrasi tegangan lokal. Kondisi ini berpotensi mempercepat terjadinya keausan, deformasi plastis lokal, serta retak lelah pada *Journal housing*.



**Gambar 2.11** Sistem pengunci atau *lock tyre journal grinder*, sumber ( manual book MSM HP 963 )

Sistem pengunci atau *Lock tyre* berfungsi memastikan *tyre* tetap terikat secara kokoh dengan *Journal housing* pada MSM, mencegah terjadinya pergeseran atau slip selama operasi. Desain ini memanfaatkan dua jenis *fit* utama, yaitu *Interference fit* dan *clearance fit*, dengan fungsi berbeda tetapi saling melengkapi.

#### *Interference Fit* antara *Journal Housing* dan *Tyre*

- Sambungan utama antara *Journal housing* dan *tyre* mengandalkan *Interference fit* (*press fit*), yaitu sambungan dengan toleransi negatif di mana diameter luar *Journal housing* sedikit lebih besar dari diameter dalam *tyre*.
- Pemasangan dilakukan dengan metode *heat shrink fit* ting, di mana *tyre* dipanaskan hingga mengembang lalu dipasang pada *Journal house*. Setelah mendingin, *tyre* mengerut dan memberikan gaya jepit yang tinggi.
- *Interference fit* ini menjadi penahan utama torsi dan beban radial selama operasi.
- Keunggulannya adalah kemampuan menahan beban tanpa komponen pengunci tambahan untuk arah putar, namun kelemahannya adalah berkurangnya kekuatan sambungan jika terjadi pelumasan tak sengaja, keausan, atau beban kejut (*Engineering*).

#### 2. *Clearance Fit* pada *Journal Key* (*Lock Tyre*)

- *Journal key* atau *Lock tyre* dipasang sebagai secondary *Locking system*. Sambungan antara *Journal key* dengan slot pada *tyre* dan *Journal housing* menggunakan *clearance fit*, sehingga terdapat celah kecil di sekelilingnya saat kondisi normal.
- *Clearance fit* memudahkan proses pemasangan dan pembongkaran, namun tidak dirancang untuk menahan beban torsi secara terus-menerus.
- Peran *Journal key* baru aktif saat *Interference fit* gagal, di mana komponen ini berfungsi sebagai penghalang arah keliling (*circumferential barrier*) untuk mencegah *tyre* berputar bebas (*idling*) dalam jangka pendek, hingga perbaikan dilakukan.
- Satu *Journal key* dinilai cukup untuk mengamankan kondisi darurat sementara (*Engineering*).

### 2.2.15 Fungsi *Lock Tyre*

Fungsi utama *Lock tyre* adalah sebagai mekanisme pengaman cadangan (*failsafe mechanism*) yang akan bekerja ketika kekuatan *Interference fit* menurun atau hilang, sehingga sambungan tetap aman. Selain itu, *Lock tyre* berperan menahan beban aksial dan beban kejutan untuk mencegah *tyre* bergeser dari posisi idealnya selama operasi. Desain dengan *clearance fit* juga memudahkan proses pemeliharaan, karena komponen dapat dibongkar dan dipasang kembali dengan lebih cepat saat diperlukan penggantian. Secara keseluruhan, keberadaan *Lock tyre* membantu memperpanjang umur operasional sistem dengan mengurangi risiko kerusakan yang lebih parah ketika terjadi slip mendadak.

Sebaliknya, konfigurasi *three Lock tyre* membagi beban ke dalam tiga titik penguncian yang terdistribusi merata sepanjang keliling *tyre*. Distribusi ini menurunkan tegangan maksimum pada setiap titik kontak dan meningkatkan kestabilan struktur selama operasi. Secara teoritis, sistem multi-*Lock* mampu meningkatkan faktor keamanan struktur serta memperpanjang umur pakai komponen akibat berkurangnya fluktuasi tegangan.

Perbandingan antara *Single Lock* dan *three Lock* menjadi fokus utama penelitian ini, khususnya dalam kaitannya dengan respons deformasi dan tegangan von Mises pada *Journal housing*.

### 2.2.16 Mekanisme Keausan pada *Tyre* dan *Journal Housing*

Keausan pada *tyre* dan *Journal housing* umumnya terjadi akibat mekanisme keausan adhesif dan abrasif. Keausan adhesif muncul ketika dua permukaan logam bersentuhan di bawah tekanan tinggi sehingga terjadi transfer material mikro. Sementara itu, keausan abrasif disebabkan oleh partikel keras, seperti batubara dan mineral, yang terjebak di antara permukaan kontak.

Distribusi beban yang tidak merata, seperti pada sistem *Single Lock*, akan meningkatkan tekanan kontak lokal sehingga mempercepat laju keausan. Fenomena ini sejalan dengan hukum keausan *Archard* yang menyatakan bahwa *Volume* keausan berbanding lurus dengan gaya normal dan jarak geser, serta berbanding terbalik dengan kekerasan material.

Dalam desain dan operasi komponen mekanis, hubungan antara tegangan (*stress*) yang diterima komponen dan tingkat keausan (*wear*) yang terjadi sangatlah krusial. Tegangan yang berlebihan pada suatu komponen dapat mempercepat laju keausan, yang pada akhirnya dapat mengurangi umur pakai komponen tersebut. Oleh karena itu, memahami hubungan antara tegangan dan keausan sangat penting dalam upaya melakukan perbaikan desain untuk meningkatkan keandalan dan daya tahan sistem (Pope, 1997).

Tegangan adalah gaya yang bekerja pada suatu area tertentu dari komponen. Ketika tegangan yang diterima oleh suatu komponen melebihi batas material yang digunakan, maka potensi untuk terjadi deformasi atau kerusakan meningkat. Keausan merupakan hasil dari interaksi antar permukaan yang mengalami gesekan dan tegangan yang terus-menerus. Semakin tinggi tegangan yang diterima oleh suatu permukaan, semakin besar pula laju keausan yang terjadi. Penelitian telah menunjukkan bahwa distribusi tegangan yang tidak merata dapat menyebabkan konsentrasi tegangan pada titik-titik kritis, yang mengakibatkan keausan lokal yang lebih cepat. Hal ini berlaku khususnya pada komponen-komponen seperti *tyre* dan *Journal housing* yang beroperasi dalam kondisi beban tinggi. Oleh karena itu, penting untuk merancang komponen dengan mempertimbangkan distribusi beban yang optimal, guna mengurangi potensi keausan yang berlebihan (Oberg, Jones, & Horton, 2012).

Dalam konteks modifikasi *Lock tyre* MSM di PLTU Labuan, penambahan jumlah *Lock tyre* dari satu menjadi tiga bertujuan untuk mendistribusikan tegangan secara lebih merata. Hal ini diharapkan dapat mengurangi keausan pada *inner diameter* (ID) *tyre* dan *outer diameter* (OD) *Journal house*. Dengan beban yang tersebar lebih merata, konsentrasi tegangan pada titik kritis berkurang, yang pada akhirnya dapat memperpanjang umur pakai komponen (Budynas & Nisbett, 2014).

#### **2.2.17 Pengaruh Clearance Terhadap Stabilitas dan Keandalan Sistem**

*Clearance* merupakan salah satu aspek penting dalam desain mekanis yang mempengaruhi keandalan dan kinerja komponen mesin. Dalam buku "*Mechanical Design for Reliability*" oleh J. Edward Pope, konsep *clearance* dijelaskan sebagai elemen kunci untuk menciptakan desain yang andal dan tahan lama. *Clearance* diartikan sebagai ruang bebas atau celah yang disengaja antara dua komponen mekanis yang berinteraksi.

Pengaturan *clearance* yang tepat sangat penting untuk memastikan bahwa komponen dapat beroperasi secara optimal di bawah berbagai kondisi operasional. Jika *clearance* terlalu kecil, gesekan berlebihan dapat terjadi, menyebabkan panas berlebih dan mempercepat keausan. Sebaliknya, *clearance* yang terlalu besar, atau *over-clearance*, dapat menurunkan stabilitas komponen dan meningkatkan risiko kegagalan mekanis (Pope, 1997). *Clearance* yang diatur dengan baik dapat meningkatkan distribusi beban pada komponen yang bergerak, sehingga mengurangi konsentrasi tegangan pada titik-titik kritis. Hal ini sangat penting dalam upaya meminimalkan keausan berlebih dan mengurangi potensi kegagalan komponen. Distribusi beban yang merata melalui pengaturan *clearance* yang optimal mendukung keandalan sistem dalam jangka panjang. Risiko yang dihadapi ketika terjadi *over-clearance* dapat menyebabkan ketidakstabilan sistem, terutama pada komponen yang beroperasi pada kecepatan tinggi atau menerima beban siklik. Dampak negatif *overclearance* meliputi peningkatan getaran, kebisingan operasional, dan keausan yang tidak merata, yang berpotensi mengurangi efisiensi dan umur pakai sistem (Zhuo, et al., 2025)

#### **2.2.18 CFD (Computational Fluid Dynamics)**

CFD adalah analisa system yang mencakup aliran fluida, aliran kalor dan berhubungan dengan phenomena seperti reaksi kimia dengan menggunakan seperangkat simulasi komputer.

Pemakaian CFD ini sangat baik diterapkan untuk mencakup semua penggunaannya di dalam dunia industri diantaranya : *Aerodinamik* pada pesawat terbang dan kendaraan, menganalisa gaya angkat, pergerakan air yang dihasilkan oleh perahu, pembakaran dalam *engine* dan turbin gas pada power plan, aliran didalam putaran lubang pada mesin turbo, percampuran dan pemisahan *polimer moulding* dalam proses kimia dll.

Penggunaan CFD pada penelitian dimaksudkan untuk memvisualisasikan aliran di dalam sebuah *vortex* dan memberi informasi property aliran yang sulit diperoleh secara menyeluruh dalam sebuah eksperimen. Proses komputasi atau perhitungan-perhitungan yang digunakan dalam CFD berdasarkan hukum *Navier-Stokes*.

*Computational Fluid Dynamics (CFD)* adalah sebuah analisis system yang melibatkan aliran fluida, perpindahan panas dan fenomena terkait seperti reaksi kimia dengan cara simulasi berbasis komputer. Teknik ini sangat handal dan meliputi cakupan luas dalam area industry dan non industry. Beberapa contohnya yaitu :

- Aerodinamika pesawat dan kendaraan : *lift* dan *drag*
- Hidrodinamika kapal
- Pembangkit Tenaga : pembakaran dalam mesin IC dan turbin gas
- Mesin turbo : aliran dalam laluan *rotating*, *diffuser* dsb.
- Rekayasa *electrical* dan *electronic* : pendingin peralatan termasuk microchip
- Rekayasa proses kimia : mixing dan separation, polymer moulding
- Lingkungan internal dan eksternal gedung : beban angin dan pendinginan/ventilasi
- Rekayasa lingkungan : distribusi polutan dan anak sungai
- Oceanografi dan hidrologi : aliran sungai, muara, laut
- Meteorologi : prediksi cuaca
- Rekayasa biomedis : aliran darah melalui arteri dan vena

Sistem analisis *CFD* tersusun dari beberapa algoritma numeric (disebut Code), yang terbagi oleh 3 elemen sebagai berikut :

1. *Pre-processor*

Merupakan bagian input suatu problem fluida ke sebuah program *CFD* melalui *interface* dan transformasi lanjut ke dalam sebuah bentuk yang sesuai untuk *solver*.

2. *Solver*

Terdapat 3 macam teknik solusi *numeric* : beda hingga (*Finite difference*), elemen hingga (*Finite element*) dan metode *spectral*. Kerangka utama metode *numeric* untuk dasar sebuah *solver* terdiri dari langkah :

- Aproksimasi variable-variabel aliran yang tidak diketahui dengan fungsi-fungsi sederhana.
- Diskretisasi dengan substitusi aproksimasi ke dalam persamaan atur aliran dan manipulasi matematis lanjut.

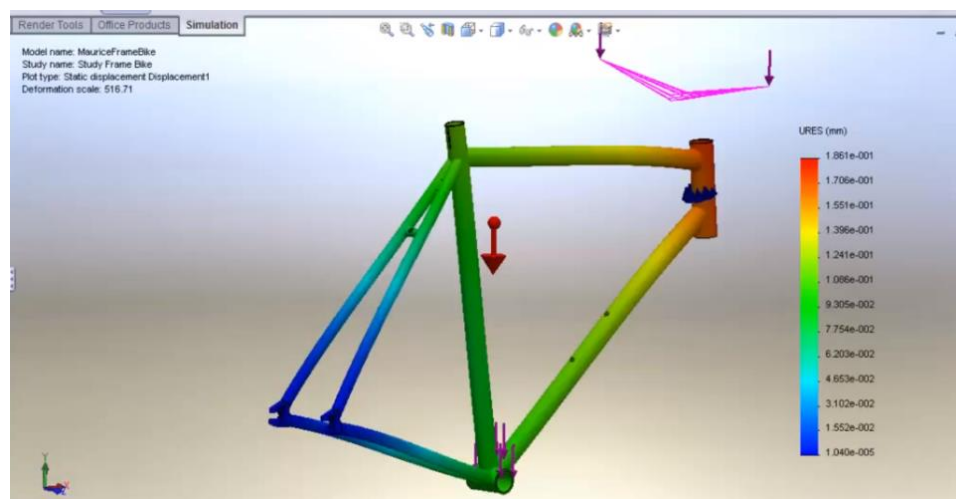
- Solusi persamaan-persamaan aljabar. Perbedaan utama di antara ketiga macam teknik adalah pada cara aproksimasi variable-variabel aliran dan proses diskretisasi.

### 3. *Post-processor*

Hasil perhitungan modul *solver* berupa nilai-nilai numerik (angka-angka) variabel-variabel dasar aliran seperti komponen-komponen kecepatan, tekanan, temperatur dan fraksi-fraksi masa. Dalam modul *post-processor* nilai-nilai numerik ini diolah agar pengguna dapat dengan mudah membaca dan menganalisis hasil-hasil perhitungan *CFD*. Hasil-hasil ini dapat disajikan dalam bentuk grafis-grafis ataupun kontur-kontur distribusi parameter-parameter aliran fluida. Selain itu juga, modul *post-processor* menghitung parameter-parameter desain seperti koefisien gesek,  $C_d$ ,  $C_l$ , Fluks panas, Gaya-gaya yang dikembangkan aliran fluida, Torsi, Daya dan lain sebagainya.

#### 2.2.19 *Static Structural* menggunakan ANSYS 2022 R1

Analisis struktur statik digunakan untuk mengevaluasi respons struktur terhadap beban statik atau beban yang berubah secara lambat terhadap waktu. Dalam penelitian ini, analisis statik difokuskan pada dua parameter utama, yaitu **total Deformation** dan **tegangan ekuivalen von Mises**. Tegangan von Mises digunakan sebagai kriteria kegagalan material ulet untuk menentukan apakah tegangan kerja masih berada di bawah batas luluh material.

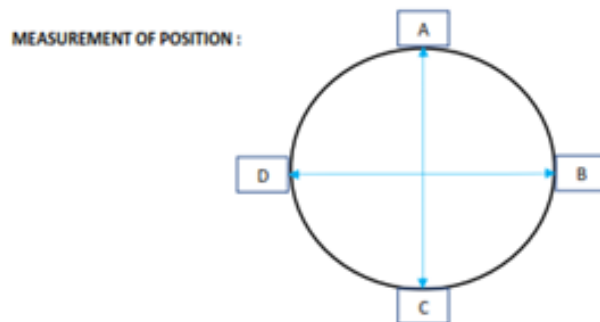


**Gambar 2.12** Contoh simulasi *static structural* menggunakan Ansys, sumber (dokumen pribadi)

Penerapan analisis ini memungkinkan perbandingan kuantitatif antara desain *Single Lock* dan *three Lock* dalam menahan beban operasional, serta mengidentifikasi area kritis yang berpotensi mengalami kegagalan struktural.

#### 2.2.20 Konsep Ovalitas dan Penyimpangan Dimensi

Ovalitas merupakan kondisi di mana penampang komponen berbentuk lingkaran mengalami penyimpangan sehingga tidak lagi memiliki diameter yang seragam pada seluruh arah. Pada *tyre* MSM, ovalitas dapat terjadi akibat keausan tidak merata, deformasi plastis lokal, maupun proses perbaikan yang tidak optimal. Ovalitas berpengaruh signifikan terhadap distribusi beban dan kestabilan kontak antara *tyre* dan *Journal housing*.



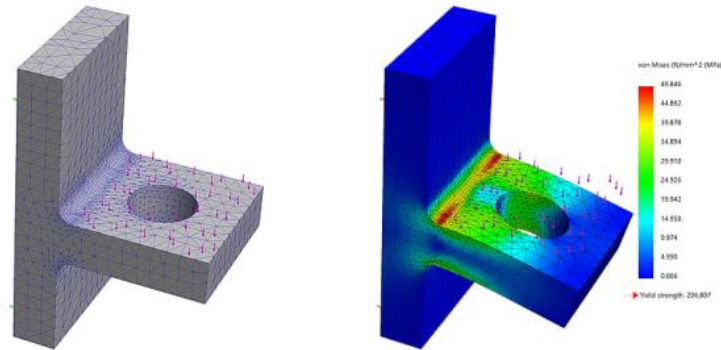
**Gambar 2.13** Titik pengukuran, sumber ( laporan pengukuran tyre )

Pengukuran ovalitas dilakukan dengan membandingkan diameter pada dua arah tegak lurus, yaitu A–C dan B–D. Selisih yang signifikan antara kedua arah tersebut menunjukkan adanya ketidaksempurnaan geometrik yang dapat memicu konsentrasi tegangan dan peningkatan getaran.

#### 2.2.21 *Finite Element Method (FEM)*

Metode elemen hingga (FEM) adalah teknik analisis numerik untuk memperoleh solusi perkiraan untuk berbagai macam masalah teknik. Model elemen hingga dari suatu masalah memberikan perkiraan bertahap terhadap persamaan yang mengaturnya. Premis dasar FEM adalah bahwa wilayah solusi dapat dimodelkan secara analitis atau didekati dengan menggantinya dengan kumpulan elemen diskrit (diskretisasi). Karena elemen-elemen ini dapat digabungkan dengan berbagai cara, elemen-elemen tersebut

dapat digunakan untuk merepresentasikan bentuk yang sangat kompleks. (V Jagota, 2012)



**Gambar 2.14** *Finite Element Method (FEM)*, sumber (dokumen Pribadi )

### 2.2.22 Komposisi material dan pengujian

Material yang digunakan untuk melakukan uji tarik dan uji tekan pada project ini adalah baja (steel). Menurut (Prayogi, 2010) baja secara umum dapat dikelompokkan menjadi dua jenis berdasarkan kandungan kimianya, yaitu baja karbon dan baja paduan. Baja karbon bukan berarti hanya terdiri dari unsur besi dan karbon semata, melainkan juga mengandung unsur-unsur lain dalam jumlah kecil yang tidak mempengaruhi sifat dasar bajanya.

Baja dapat digolongkan sebagai baja karbon apabila mengandung mangan kurang dari 0,8%, silikon kurang dari 0,5%, dan hanya sedikit unsur tambahan lainnya. Dalam proses pembuatannya, mangan dan silikon biasanya ditambahkan secara sengaja untuk bertindak sebagai deoksidator, yaitu untuk mengurangi dampak negatif dari unsur pengotor. Baja karbon umumnya diproduksi dalam berbagai bentuk seperti balok, lembaran, profil, dan kawat. Berdasarkan kadar karbon yang terkandung di dalamnya, baja karbon dikelompokkan menjadi tiga kategori utama yaitu:

1. Baja karbon rendah (*low carbon steel*)

Baja karbon rendah merupakan jenis baja yang memiliki kandungan karbon antara 0,05% hingga 0,2%. Berdasarkan kadar karbonnya, baja ini pada umumnya digunakan untuk pelat strip, bodi kendaraan, struktur bangunan dan jembatan, serta komponen seperti baut dan paku keling.

## 2. Baja karbon menengah (*Medium carbon steel*)

Baja karbon menengah memiliki sifat mekanis yang lebih baik dibandingkan baja karbon rendah, dengan kandungan karbon berkisar antara 0,2% hingga 0,5%. Baja ini lebih sulit dibentuk dan dilas, serta cocok untuk proses pengerasan (*quenching*), sehingga umum digunakan untuk komponen teknik seperti roda gigi, poros, baut, mur, batang torak, penjepit (*clamp*), dan pegas, sesuai kadar karbonnya.

## 3. Baja karbon tinggi (*high carbon steel*)

Baja karbon tinggi memiliki kandungan karbon 0,6 hingga 1,8% dan dicirikan oleh kekuatan dan kekerasan tinggi, namun bersifat getas serta sulit dibentuk. Kehadiran unsur sulfur dan fosfor mengurangi keuletannya, meskipun baja ini dapat diproses dengan perlakuan panas. Sementara itu, baja paduan merupakan baja yang dicampur dengan unsur-unsur seperti nikel, kromium, dan molibdenum untuk memperoleh sifat mekanis tertentu, seperti kekuatan, kekerasan, keuletan, dan ketahanan panas. Proses produksinya lebih mahal karena melibatkan penambahan unsur khusus dalam industri.

Material *lock tyre* yang dipakai adalah baja SCM 440. Baja SCM 440 termasuk jenis baja karbon sedang (*Medium carbon steel*). Baja SCM 440 adalah baja paduan Cr-Mo (kromium-molibdenum) yang memberikan kombinasi kekuatan dan ketahanan yang baik serta ditentukan dalam standar Jepang (JIS). Baja SCM 440 dikenal memiliki kekuatan dan ketangguhan yang baik, serta dapat diperlakukan panas untuk meningkatkan sifat mekanisnya. Sering digunakan dalam aplikasi yang membutuhkan kekuatan tinggi seperti roda gigi, poros transmisi dan bagian-bagian mesin lainnya.



**Gambar 2.15** Baja SCM 440, sumber (<https://www.fushunspecialsteel.com/scm440-alloy-steel/> )

Berdasarkan *Japanese Standards Association* G4053 atau JIS G4053 (2020). *JIS G 4053:2020*), komposisi kimia pada baja SCM 440 adalah sebagai berikut:

**Tabel 2.1** Komposisi kimia (*chemical composition*) baja SCM 440 *original*

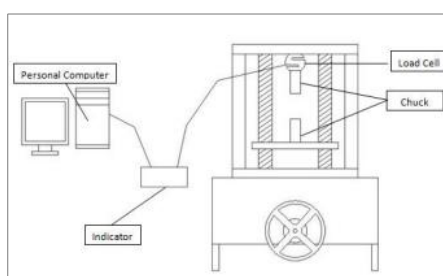
Sumber: *Japanese Standards Association. (2020). JIS G 4053:2020*

| C                | Si               | Mn               | Cr               | Mo               | Fe   |
|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------|
| (0,38–<br>0,43%) | (0,15–<br>0,35%) | (0,60–<br>0,90%) | (0,90–<br>1,20%) | (0,15–<br>0,25%) | Sisa |

Baja ini sering digunakan untuk aplikasi dengan beban tinggi, termasuk pada poros dan kornponen mesin yang memerlukan ketahanan terhadap beban dan keausan. Berikut ini beberapa organisasi yang telah diakui secara internasional dalam menerbitkan spesifikasinya antara lain: SAE (*Society of Automotive Engineer*), AISI (*American Iron and Steel Institute*), ASME (*American Society of Mechanical Engineers*), dan ASTM (*American Society for Testing and Materials*)

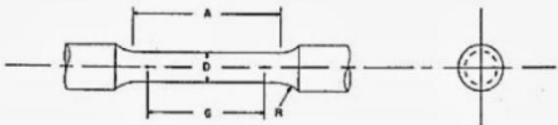
#### 2.2.22.1 Uji tarik (*tensile test*)

Pengujian tarik digunakan untuk mengetahui ketangguhan atau kekuatan tarik (*ultimate tensile strength*), menilai batas luluh (*yield strength*), menghitung perpanjangan atau *elongatio* (*Strain*) dan menentukan modulus elastisitas. Kekuatan tarik (*ultimate tensile strength*) adalah tegangan maksimum yang bisa ditahan oleh sebuah material ketika diregangkan atau ditarik, sebelum bahan tersebut patah.



**Gambar 2.16** Skematik sistem uji tarik (universal testing machine), sumber ((Budiman, H. (2016). *Analisis Pengujian Tarik (Tensile Test) pada Baja ST37 dengan Alat Bantu Ukur Load Cell*. Jurnal J-Ensitac, Vol. 03 No. 01.)

Uji tarik adalah metode untuk mengukur sifat mekanis logam dengan memberikan beban tarik secara bertahap hingga material patah. Selama proses berlangsung, spesimen diberi beban tarik secara perlahan mulai dari nol hingga putus, dan selama itu terjadi dua jenis perubahan sifat material, yaitu perubahan elastis dan perubahan plastis. Dalam penelitian ini menggunakan mesin uji tarik sesuai standar spesimen ASTM E8M



E8/E8M - 22

| Dimensions, mm [in.]                                             |                               |                               |                                               |                               |                               |
|------------------------------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| For Test Specimens with Gage Length Four times the Diameter [E8] |                               |                               |                                               |                               |                               |
|                                                                  | Standard Specimen             |                               | Small-Size Specimens Proportional to Standard |                               |                               |
|                                                                  | Specimen 1                    | Specimen 2                    | Specimen 3                                    | Specimen 4                    | Specimen 5                    |
| G—Gage length                                                    | 50.0 ± 0.1<br>[2.000 ± 0.005] | 36.0 ± 0.1<br>[1.400 ± 0.005] | 24.0 ± 0.1<br>[1.000 ± 0.005]                 | 16.0 ± 0.1<br>[0.640 ± 0.005] | 10.0 ± 0.1<br>[0.450 ± 0.005] |
| D—Diameter (Note 1)                                              | 12.5 ± 0.2<br>[0.500 ± 0.010] | 9.0 ± 0.1<br>[0.350 ± 0.007]  | 6.0 ± 0.1<br>[0.250 ± 0.005]                  | 4.0 ± 0.1<br>[0.160 ± 0.003]  | 2.5 ± 0.1<br>[0.113 ± 0.002]  |
| R—Radius of fillet, min                                          | 10 [0.375]                    | 8 [0.25]                      | 6 [0.188]                                     | 4 [0.156]                     | 2 [0.094]                     |
| A—Length of reduced section, min (Note 2)                        | 66 [2.25]                     | 45 [1.75]                     | 30 [1.25]                                     | 20 [0.75]                     | 16 [0.625]                    |

| Dimensions, mm [in.]                                              |                               |                               |                                               |                               |                               |
|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| For Test Specimens with Gage Length Five times the Diameter [E8M] |                               |                               |                                               |                               |                               |
|                                                                   | Standard Specimen             |                               | Small-Size Specimens Proportional to Standard |                               |                               |
|                                                                   | Specimen 1                    | Specimen 2                    | Specimen 3                                    | Specimen 4                    | Specimen 5                    |
| G—Gage length                                                     | 62.5 ± 0.1<br>[2.500 ± 0.005] | 45.0 ± 0.1<br>[1.750 ± 0.005] | 30.0 ± 0.1<br>[1.250 ± 0.005]                 | 20.0 ± 0.1<br>[0.800 ± 0.005] | 12.5 ± 0.1<br>[0.565 ± 0.005] |
| D—Diameter (Note 1)                                               | 12.5 ± 0.2<br>[0.500 ± 0.010] | 9.0 ± 0.1<br>[0.350 ± 0.007]  | 6.0 ± 0.1<br>[0.250 ± 0.005]                  | 4.0 ± 0.1<br>[0.160 ± 0.003]  | 2.5 ± 0.1<br>[0.113 ± 0.002]  |
| R—Radius of fillet, min                                           | 10 [0.375]                    | 8 [0.25]                      | 6 [0.188]                                     | 4 [0.156]                     | 2 [0.094]                     |
| A—Length of reduced section, min (Note 2)                         | 75 [3.0]                      | 54 [2.0]                      | 36 [1.4]                                      | 24 [1.0]                      | 20 [0.75]                     |

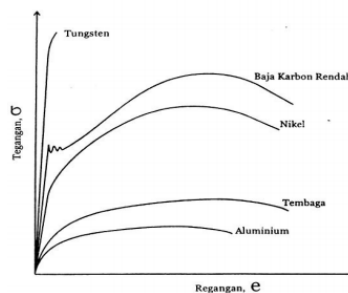
**Gambar 2.17** Standard pengujian ASTM E8/E8M 2022, sumber (ASTM *metal handbook*)

ASTM E8/E8M-22 adalah standar internasional terbaru untuk pengujian tarik pada bahan logam. Standar ini menjelaskan dimensi spesimen uji tarik, baik untuk spesimen standar besar maupun spesimen ukuran kecil (*sub-size*). Komponen utama tersebut terdiri dari alat pencatat gaya (*load cell*), alat pencatat material panjang specimen (*extensometer*), batang penarik (*moving crosshead*), dan spesimen. *Load cell* digunakan untuk mencatat besarnya pembebanan (F) yang dialami oleh spesimen, sedangkan *extensometer* digunakan untuk mencatat besarnya pertama material panjang ( $\Delta L$ ) yang terjadi pada spesimen. Hubungan antara gaya (F) terhadap material panjang ( $\Delta L$ ) inilah yang nantinya akan dikonversikan ke dalam kurva tegangan ( $\sigma$ ) terhadap regangan teknik ( $\epsilon$ ).

### 2.2.22.1.1 Spesimen uji tarik

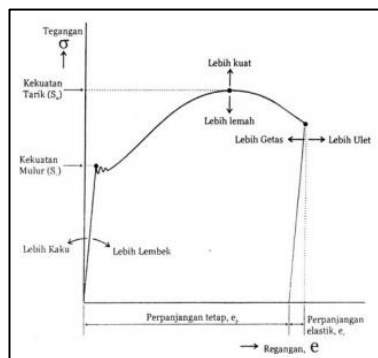
Spesimen uji tarik bentuk dan ukurannya sudah terstandar, dalam kasus-kasus tertentu diijinkan memakai bentuk dan ukuran specimen uji tidak standar. Bentuk dan ukuran spesimen uji terstandar disebut juga specimen uji proporsional, dan yang tidak terstandar disebut juga specimen uji non proporsional.

Setiap logam yang diuji tarik akan memperlihatkan perilaku yang berbeda dalam arti mempunyai empat besaran/parameter yang berbeda. Perbedaan perilaku itu ditunjukkan dalam gambar.



**Gambar 2.18** Kurva Empat besaran/parameter yang berbeda, sumber (diadaptasi dari Callister, W.D. & Rethwisch, D.G., *Materials Science and Engineering: An Introduction*)

Kurva uji tarik dapat diperoleh beberapa sifat mekanik material. Beberapa sifat mekanik material yang dimaksud yaitu Dari kekuatan tarik, keuletan, dan elastisitas. Contoh kurva hasil uji tarik dapat dilihat pada gambar.



**Gambar 2.19** Contoh kurva hasil uji tarik, sumber (Callister, W.D., *Materials Science and Engineering*)

Kekuatan yang biasanya ditentukan dari suatu hasil pengujian tarik adalah kuat luluh (*Yield Strength*) dan kuat tarik (*Ultimate Tensile Strength*). Kekuatan tarik atau kekuatan tarik maksimum (*Ultimate Tensile Strength* / UTS), adalah beban maksimum dibagi luas penampang lintang awal benda uji.

#### 2.2.22.1.2 Rumus Uji Tarik

1. Tegangan (*Engineering Stress*)

$$\sigma = F / A_0$$

Keterangan:

$\sigma$  = Tegangan (MPa atau N/mm<sup>2</sup>)

F = Gaya tarik (N)

A<sub>0</sub> = Luas penampang awal (mm<sup>2</sup>)

2. Regangan (*Engineering Strain*)

$$\varepsilon = \Delta L / L_0$$

Keterangan:

$\varepsilon$  = Regangan

$\Delta L$  = Pertambahan panjang (mm)

L<sub>0</sub> = Panjang awal spesimen (mm)

3. Modulus Elastisitas (*Young's Modulus*)

$$E = \sigma / \varepsilon$$

Keterangan:

E = Modulus elastisitas (MPa atau GPa)

4. Tegangan Maksimum (*Ultimate Tensile Strength* / UTS)

$$\sigma_u = F_{\max} / A_0$$

Keterangan:

F<sub>max</sub> = Gaya maksimum sebelum patah (N)

5. Persentase Perpanjangan

$$\% \text{Elongation} = (L_f - L_0) / L_0 \times 100\%$$

Keterangan:

L<sub>f</sub> = Panjang akhir setelah patah (mm)

Untuk logam-logam yang liat kekuatan tariknya harus dikaitkan dengan beban maksimum dimana logam dapat menahan sesumbu untuk keadaan yang sangat terbatas.

Tegangan tarik adalah nilai yang paling sering dituliskan sebagai hasil suatu uji tarik, tetapi pada kenyataannya nilai tersebut kurang bersifat mendasar dalam kaitannya dengan kekuatan bahan. Untuk logam-logam yang liat kekuatan tariknya harus dikaitkan dengan beban maksimum, di mana logam dapat menahan beban sesumbu untuk keadaan yang sangat terbatas. Akan ditunjukkan bahwa nilai tersebut kaitannya dengan kekuatan logam kecil sekali kegunaannya untuk tegangan yang lebih kompleks, yakni yang biasanya ditemui. Untuk berapa lama, telah menjadi kebiasaan mendasarkan kekuatan struktur pada kekuatan tarik, dikurangi dengan faktor keamanan yang sesuai.

#### **2.2.22.2 Uji Tekan**

Uji tekan adalah pengujian suatu benda yang besarnya sama dengan gaya persatuan luas yang menyebabkan benda yang diuji hancur bila dibebani dengan gaya tekan tersebut. Tujuannya untuk mengetahui kuat tekan maksimum yang dapat diterima oleh benda sampai benda tersebut mengalami kehancuran.

Kekuatan tekan adalah kapasitas dari suatu bahan atau struktur dalam menahan beban yang akan mengurangi ukurannya. Kekuatan tekan dapat diukur dengan memasukkannya ke dalam kurva tegangan regangan dari data yang didapatkan dari mesin uji. Beberapa bahan akan patah pada batas tekan, beberapa mengalami deformasi yang tidak dapat dikembalikan. Deformasi tertentu dapat dianggap sebagai batas kekuatan tekan, meski belum patah, terutama pada bahan yang tidak dapat kembali ke kondisi semula (*irreversible*).

##### **2.2.22.2.1 Fenomena yang Terjadi pada Pengujian Tekan**

Pada praktikum pengujian tekan, percobaan dilakukan untuk mengamati dan menganalisis fenomena yang muncul pada spesimen selama proses pembebanan. Beberapa fenomena yang umum terjadi adalah sebagai berikut:

a. *Barrelling*

*Barrelling* merupakan perubahan bentuk spesimen yang ditandai dengan menggelembungnya bagian tengah saat proses penekanan berlangsung. Fenomena ini terjadi akibat adanya gesekan antara permukaan spesimen dengan dies atau plat penekan. Gesekan tersebut menghambat deformasi pada bagian atas dan bawah spesimen, sehingga bagian tengah mengalami ekspansi lateral yang lebih besar dan membentuk profil menyerupai barel.

b. *Buckling*

*Buckling* adalah fenomena pembengkokan atau ketidakstabilan bentuk spesimen yang terjadi setelah material menerima beban tekan tertentu. Peristiwa ini umumnya muncul pada spesimen yang relatif ramping, di mana beban tekan menyebabkan kegagalan akibat ketidakstabilan struktur sebelum material mencapai batas kekuatan maksimumnya.

c. *Strain Hardening*

*Strain hardening* merupakan fenomena peningkatan kekerasan dan kekuatan material akibat deformasi plastis yang berkelanjutan. Proses ini terjadi karena akumulasi dan interaksi dislokasi di dalam struktur kristal, khususnya pada batas butir, sehingga pergerakan dislokasi menjadi semakin terhambat dan material menjadi lebih keras serta lebih kuat terhadap deformasi lanjutan.

**Rumus uji tekan (*compression test*)**

1. Tegangan Tekan (*Compressive Stress*)

$$\sigma = F / A$$

Keterangan:

$\sigma$  = Tegangan tekan (MPa atau N/mm<sup>2</sup>)

F = Gaya tekan (N)

A = Luas penampang awal spesimen (mm<sup>2</sup>)

2. Regangan Tekan (*Compressive Strain*)

$$\varepsilon = \Delta L / L_0$$

Keterangan:

$\varepsilon$  = Regangan

$\Delta L$  = Perubahan panjang (mm)

$L_0$  = Panjang awal spesimen (mm)

3. Modulus Elastisitas (Daerah Elastis)

$$E = \sigma / \varepsilon$$

Keterangan:

$E$  = Modulus elastisitas (MPa atau GPa)

4. Kuat Tekan Maksimum

$$\sigma_c = F_{\text{maks}} / A_0$$

Keterangan:

$\sigma_c$  = Kuat tekan maksimum

$F_{\text{maks}}$  = Gaya maksimum sebelum gagal (N)

$A_0$  = Luas penampang awal (mm<sup>2</sup>)

