

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian yang Relevan

1. Penelitian yang dilakukan oleh tim PUSHARLIS UP2W V dan menjadikannya penugasan internal PUSHARLIS (2021) dengan judul penugasan “Reverse Engineering *Popper Valve Shootblower* PLTU Barru”. Dari Penelitian dan penugasan ini memiliki tujuan untuk mengetahui penyebab Kebocoran dan pembuatan *Poppet Valve* PLTU Barru, metode perbaikan yang lebih untuk pengoptimalan PLTU Barru.
2. Adanya Kesempatan dari pihak PLTU Barru dan menjadikannya penugasan internal PUSHARLIS (2021) dengan judul penugasan “Penugasan Fabrikasi 10 buah *Poppet valve shootblower* PLTU Barru”. Dari penelitian dan penugasan ini memiliki tujuan yang sama dengan point 1 di atas.
3. Menurut Gomez, I., Valdés, J. R., & Miana, M. J. (2019). *Analysis of the design of a poppet valve by transitory simulation*. *Energies*, 12(5), 889. Penelitian ini membahas perilaku dinamis *poppet valve* melalui simulasi CFD (*Computational Fluid Dynamics*), memodelkan aliran di dalam poppet valve saat bergerak, termasuk analisis parameter *non-dimensional* dan pengaruh sudut *poppet* terhadap tekanan dan gaya aliran. Ini sangat cocok sebagai dasar untuk *reverse engineering* kinerja *poppet valve*[4]

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU)

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) merupakan pembangkit yang memanfaatkan energi panas hasil pembakaran bahan bakar, umumnya batubara, untuk menghasilkan uap bertekanan tinggi. Uap tersebut digunakan untuk memutar turbin yang terhubung dengan generator sehingga menghasilkan energi listrik. Proses pembangkitan di PLTU didasarkan pada *Rankine Cycle*, yaitu siklus termodinamika yang terdiri dari pemanasan air, pembentukan uap, ekspansi uap pada

turbin, dan kondensasi kembali menjadi air[5].

A. Komponen Utama PLTU

PLTU terdiri dari beberapa sistem utama yang bekerja secara terpadu, yaitu:

1. *Boiler* berfungsi untuk mengubah air menjadi uap bertekanan dan bertemperatur tinggi melalui proses pembakaran bahan bakar (umumnya batubara).

Bagian penting dalam *boiler*:

- a. *Furnace* (ruang bakar)
- b. *Economizer*
- c. *Superheater*
- d. *Reheater*
- e. *Air Preheater*

Boiler merupakan sumber utama energi panas dalam sistem PLTU.

2. Turbin uap berfungsi mengubah energi kinetik dan tekanan uap menjadi energi mekanik (putaran poros).
 - a. Turbin biasanya terdiri dari:
 - b. Turbin Tekanan Tinggi (HP)
 - c. Turbin Tekanan Menengah (IP)
 - d. Turbin Tekanan Rendah (LP)

Energi mekanik dari turbin digunakan untuk memutar generator.

3. Generator berfungsi mengubah energi mekanik dari turbin menjadi energi listrik melalui prinsip induksi elektromagnetik.
4. Komponen utama generator:
 - a. Rotor
 - b. Stator
 - c. Sistem pendingin

Listrik yang dihasilkan kemudian disalurkan ke sistem transmisi.

5. Kondensor berfungsi mengubah uap bekas dari turbin menjadi air kembali (kondensat) dengan proses pendinginan menggunakan air laut atau *cooling tower*.

Fungsi utama kondensor:

- a. Menurunkan tekanan uap keluar turbin
 - b. Meningkatkan efisiensi siklus
 - c. Mengembalikan air ke sistem
6. *Auxiliary Systems* seperti sistem bahan bakar, sistem pendingin, sistem pelumasan, dan *Sootblower* yang memastikan operasi tetap stabil.

B. Siklus Termal (*Rankine Cycle*)[3]

PLTU bekerja dengan prinsip siklus *Rankine*, yang meliputi:

- 1. *Pumping* air dipompa masuk ke *boiler*.
- 2. *Heating & Evaporation* air dipanaskan hingga menjadi uap.
- 3. *Expansion* uap memutar turbin untuk menghasilkan energi mekanik.
- 4. *Condensation* uap dikondensasi di kondensor menjadi air untuk siklus berikutnya.

Efisiensi siklus dipengaruhi oleh temperatur dan tekanan uap, kehilangan panas, kondisi peralatan, serta kualitas pembakaran.

C. Efisiensi dan Kehilangan Energi di PLTU

Efisiensi termal PLTU adalah ukuran kemampuan pembangkit mengubah energi kimia batubara menjadi energi listrik. Faktor yang mempengaruhi efisiensi antara lain:

- 1. Desain dan kondisi *boiler*
 - 2. Efektivitas perpindahan panas di permukaan pemanas
 - 3. Sistem kontrol pembakaran dan kualitas Batubara
 - 4. Pemeliharaan sistem bantu (misal: *Sootblower*, *air heater*, *feedwater heater*)
- Kehilangan panas yang tidak terkendali berakibat pada kenaikan konsumsi bahan bakar dan penurunan daya keluaran listrik.

D. Peran PLTU dalam Sistem PLN

PLTU merupakan tulang punggung pasokan energi listrik nasional karena mampu menghasilkan daya berkapasitas besar dan beroperasi stabil secara *base load*. Dalam sistem PLN, PLTU berperan dalam:

- 1. Menyediakan pasokan listrik berkelanjutan untuk masyarakat dan industri

2. Menjaga keseimbangan suplai–beban pada jaringan transmisi
 3. Menyokong pertumbuhan ekonomi melalui ketersediaan energi
- Optimalisasi operasi PLTU sangat penting untuk menjaga keandalan sistem tenaga listrik nasional dan efisiensi biaya pembangkitan.



Gambar 2.1 PLTU Barru

2.2.2 Sootblower

Sootblower adalah peralatan bantu pada *boiler* PLTU yang berfungsi untuk membersihkan deposit abu (*soot*), *slag*, dan *fouling* yang menempel pada permukaan pipa pemanas (*heating surface*) akibat proses pembakaran bahan bakar, terutama batubara[6].

Pada sistem PLTU (Pembangkit Listrik Tenaga Uap), *Sootblower* berperan penting dalam menjaga efisiensi perpindahan panas dan mencegah penurunan kinerja *boiler*. Pada proses pembakaran batubara di furnace, terjadi reaksi kimia yang menghasilkan:

1. Gas hasil pembakaran (CO_2 , H_2O , dll.)
2. Abu terbang (*fly ash*)
3. Partikulat

4. *Slag*

Sebagian partikel abu akan menempel pada:

1. Dinding furnace
2. Pipa superheater
3. Pipa reheater
4. Economizer

Penumpukan ini menyebabkan:

1. Hambatan perpindahan panas
2. Kenaikan temperatur gas buang
3. Penurunan efisiensi *boiler*
4. Potensi overheating pada pipa

Secara teori perpindahan panas, fouling meningkatkan tahanan termal (*thermal resistance*):

$$R_{total} = R_{konveksi} + R_{konduksi} + R_{fouling}$$

Semakin besar nilai $R_{fouling}$, semakin kecil laju perpindahan panas.

2.2.2.1 Prinsip Kerja *Sootblower*

Sootblower bekerja dengan menyemprotkan:

1. Uap bertekanan tinggi (steam *Sootblower*)
2. Udara bertekanan tinggi (air *Sootblower*)

Semburan fluida berkecepatan tinggi menghasilkan gaya impak dan geser yang mampu melepaskan deposit abu dari permukaan pipa.

Prinsip dasar yang bekerja:

1. Mekanika fluida (tekanan & kecepatan jet)
2. Momentum fluida
3. Gaya impingement (tumbukan)

Secara sederhana:

$$F = \dot{m} \times V$$

Dimana:

- F = gaya semburan
 $\dot{m}$ = laju aliran massa
 V = kecepatan fluida

Semakin tinggi tekanan dan kecepatan uap, semakin besar gaya pembersihan.

2.2.2.2 Jenis-jenis Sootblower

1. ***Wall Blower***

Dipakai pada dinding furnace untuk membersihkan slag.

2. ***Long Retractable Sootblower (LRSB)***

Digunakan untuk membersihkan superheater dan reheater. Memiliki lance tube yang masuk ke dalam *boiler* saat operasi dan keluar kembali setelah selesai.

3. ***Rotary Sootblower***

Berputar secara tetap untuk area tertentu.

4. ***Air Heater Sootblower***

Digunakan pada Air *Preheater*.

2.2.2.3 Komponen Utama Sistem Sootblower

1. ***Poppet Valve***

Mengatur aliran uap tekanan tinggi menuju lance tube.

2. ***Lance Tube***

Pipa panjang yang menyalurkan uap ke dalam *boiler*.

3. ***Nozzle***

Mengatur arah dan pola semburan uap.

4. ***Drive Mechanism***

Motor dan gearbox untuk gerakan maju-mundur dan rotasi.

5. ***Control System***

Sistem otomatis berbasis waktu atau temperatur gas buang.

2.2.2.4 Parameter Operasi *Sootblower*

Beberapa parameter penting:

1. Tekanan uap (biasanya 10–25 bar atau sesuai desain)
2. Temperatur uap
3. Waktu peniupan (*blowing time*)
4. Frekuensi operasi
5. Sudut dan pola *nozzle*

Pengaturan yang tidak tepat dapat menyebabkan:

1. Erosi pipa *boiler*
2. Kerusakan tube
3. Pemborosan energi.

2.2.2.5 Pengaruh *Sootblower* terhadap Efisiensi *Boiler*

Tanpa *Sootblower*:

1. Temperatur gas buang meningkat
2. *Heat rate* naik
3. Konsumsi batubara meningkat

Dengan operasi optimal:

1. Perpindahan panas maksimal
2. Tekanan uap stabil
3. Efisiensi pembangkit meningkat

2.2.2.6 Permasalahan Umum pada *Sootblower*

1. Kebocoran pada *poppet valve*
2. Keausan *seat valve*
3. Erosi *nozzle*
4. Kerusakan packing

5. Macetnya mekanisme *retract*

Masalah ini dapat menyebabkan:

1. Tekanan uap turun
2. Pembersihan tidak maksimal
3. Kehilangan energi



Gambar 2.2 *ShootBlower*

2.2.3 *Poppet Valve*

Poppet valve adalah jenis katup (*valve*) yang menggunakan mekanisme gerak translasi (naik–turun) untuk membuka dan menutup aliran fluida. Katup ini terdiri dari kepala katup (*disc*) yang menekan *seat* (dudukan) untuk menghentikan aliran, dan akan terangkat ketika menerima gaya dari fluida atau aktuator[7].

Dalam sistem *Sootblower* pada PLTU (Pembangkit Listrik Tenaga Uap), poppet valve berfungsi mengontrol aliran uap bertekanan tinggi menuju *lance tube*. Prinsip kerja *poppet valve* berdasarkan keseimbangan gaya (*force balance*). Saat kondisi tertutup:

$$F_{\text{spring}} + F_{\text{back pressure}} > F_{\text{fluida}}$$

Saat kondisi terbuka:

$$F_{\text{fluida}} > F_{\text{spring}}$$

Dimana:

$$F_{\text{fluida}} = P \times A$$

P= tekanan fluida

A= luas penampang

F_{spring} = gaya pegas

Ketika tekanan fluida cukup besar untuk mengalahkan gaya pegas, katup akan terangkat dan aliran terjadi.

2.2.3.1 Komponen Utama *Poppet Valve*

1. *Body Valve*

Struktur utama yang menahan tekanan fluida dan menjadi rumah bagi seluruh komponen internal.

Fungsi:

- a. Menahan tekanan tinggi
- b. Mengarahkan aliran fluida
- c. Menjadiudukan *seat*

2. *Poppet (Disc/Kepala Katup)*

Bagian yang bergerak naik-turun untuk membuka atau menutup aliran.

Fungsi:

- a. Mengontrol aliran fluida
- b. Menutup rapat seat saat posisi *closed*

3. *Seat Valve*

Permukaanudukan tempat poppet menutup.

Karakteristik:

- a. Harus presisi
- b. Permukaan halus
- c. Tahan erosi dan temperatur tinggi

4. *Stem* (Batang Katup)

Menghubungkan poppet dengan aktuator atau mekanisme penggerak.

5. *Spring* (Pegas)

Memberikan gaya penutup agar valve kembali ke posisi closed.

6. *Seal / Packing*

Mencegah kebocoran pada bagian stem.

2.2.3.2 Klasifikasi *Poppet Valve*

1. Berdasarkan Sistem Penggerak:

- a. Manual
- b. Pneumatik
- c. Hidrolik
- d. Solenoid

2. Berdasarkan Tekanan Kerja:

- a. *Low pressure valve*
- b. *High pressure valve*

Pada *Sootblower*, umumnya digunakan *high-pressure steam poppet valve*.

2.2.3.3 Material *Poppet Valve*

Karena bekerja pada tekanan dan temperatur tinggi, material harus memiliki:

1. Ketahanan aus (wear resistance)
2. Ketahanan korosi
3. Ketahanan temperatur tinggi
4. Kekuatan mekanik tinggi

Material umum:

1. *Stainless steel*
2. *Alloy steel*
3. *Hardened steel*

Pada sistem uap, ketahanan terhadap erosi partikel dan steam erosion sangat penting.

2.2.3.4 Mekanisme Keausan pada *Poppet Valve*

Keausan dapat terjadi akibat:

1. Erosi partikel
2. Abrasi
3. Korosi suhu tinggi
4. Fatigue akibat siklus buka–tutup

Menurut teori tribologi, laju keausan dipengaruhi oleh:

1. Tekanan kontak
2. Kekerasan material
3. Kecepatan relatif
4. Lingkungan kerja

Kerusakan umum:

1. Seat bocor
2. Poppet aus
3. Spring melemah
4. Stem baret

2.2.3.5 Pengujian *Poppet Valve*

Untuk memastikan kinerja, dilakukan:

1. *Hydrostatic Test (Hydro Pump Test)*
Menguji kebocoran dan kekuatan body terhadap tekanan.
2. *Leakage Test*
Menguji tingkat kebocoran pada tekanan kerja.
3. *Dimensional Inspection*
Mengukur toleransi dan keausan.

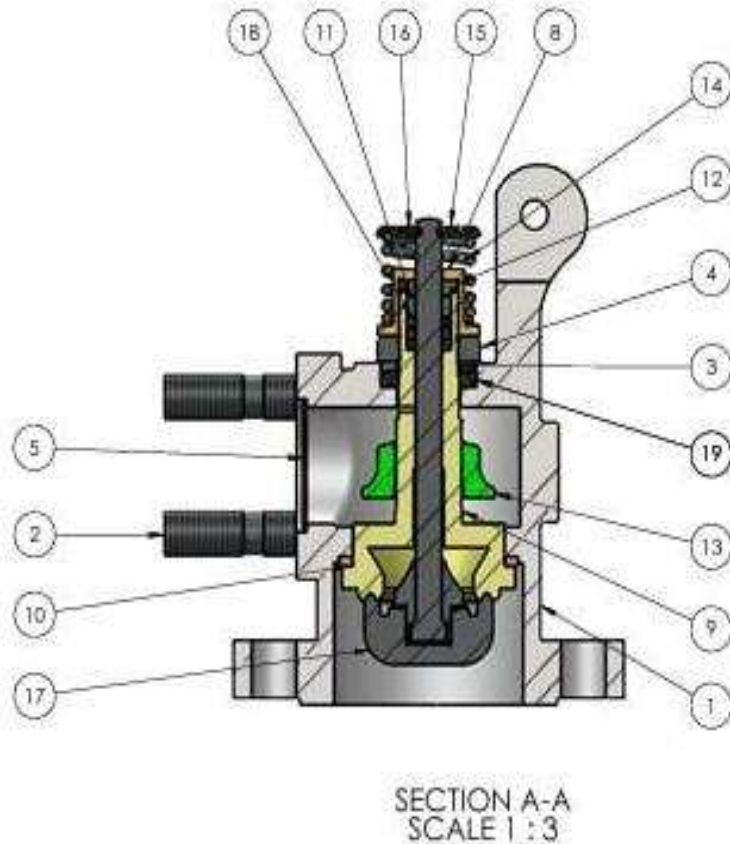
2.2.3.6 Peran *Poppet Valve* pada Sistem Sootblower

Dalam Sootblower PLTU, poppet valve berfungsi:

1. Mengontrol suplai uap tekanan tinggi
2. Menjaga tekanan tetap stabil
3. Mencegah kebocoran saat tidak beroperasi

Jika terjadi kebocoran:

1. Tekanan uap turun
2. Efisiensi pembersihan menurun
3. Konsumsi energi meningkat



Gambar 2.3 Poppet Valve

Detail *Poppet Valve Sootblower* sebagai berikut :

1. *Body*
2. *Valve*
3. *Seat valve*
4. *Adjuster gear*
5. *Ring seat valve*
6. *Regulator*
7. *Spring, Dll*

2.2.3.7 Jenis–Jenis Poppet Valve pada PLTU Berdasarkan Tekanan Boiler

Pada Perusahaan Listrik Negara (PLN) dan pembangkit sejenis, *poppet valve* (khususnya untuk *Sootblower* atau jalur uap bantu) dipilih mengikuti kelas tekanan & temperatur uap *boiler*. Semakin tinggi tekanan boiler, semakin tinggi pula kelas material, rating, dan desain sealing yang digunakan[8].

A. Klasifikasi PLTU Berdasarkan Tekanan Boiler

Tabel 2.1 Klasifikasi Poppet bersadar kan tekanan Boiler

Kategori PLTU	Tekanan Uap Utama	Temperatur	Karakter Umum
<i>Subcritical</i>	< 221 bar	540°C	Umum di Indonesia
<i>Supercritical</i>	221–250 bar	560–600°C	Efisiensi lebih tinggi
<i>Ultra-Supercritical</i>	> 250 bar	> 600°C	Teknologi terbaru

B. Jenis Poppet Valve Berdasarkan Tekanan Kerja

1. *Low–Medium Pressure Poppet Valve*

Aplikasi : PLTU Subcritical kecil / jalur uap bantu
Tekanan kerja : 5 – 16 bar
Material umum : Carbon steel / Stainless steel standar
Seat : *Soft seat* atau *hard seat* tipis

Karakteristik:

- Desain sederhana
- Spring tunggal
- Umur pakai ± 3 tahun (operasi normal)

Biasanya digunakan pada:

- Wall blower* tekanan rendah
- Sistem drain steam*

2. *High Pressure Poppet Valve (Standar Sootblower PLTU Subcritical)*

Tekanan kerja : 10 – 25 bar

Tekanan desain : 30 – 40 bar

Material:

- a. *Body: Alloy steel (A216 WCB / setara)*
- b. *Seat & disc: Hardened stainless / Stellite coating*

Karakteristik:

- a. *Hard facing pada seat*
- b. *Spring high fatigue resistance*
- c. *Sealing metal-to-metal*

Umur pakai:

- a. 50.000 – 100.000 siklus
- b. 3 – 5 tahun (tergantung frekuensi blowing)

Ini adalah tipe paling umum pada Sootblower boiler.

3. *Extra High Pressure Poppet Valve (Supercritical Boiler)*

Tekanan kerja : 25 – 60 bar (jalur Sootblower khusus)

Material :

- a. *Cr-Mo alloy steel*
- b. *Stellite overlay pada seat*
- c. *Heat treated stem*

Karakteristik:

- a. Ketahanan erosi tinggi
- b. Thermal fatigue resistance
- c. Toleransi presisi tinggi

Umur pakai:

- a. 3 – 6 tahun (jika steam kering & bersih)

4. *Ultra High Temperature / Severe Service Poppet Valve*

Aplikasi: PLTU Ultra-supercritical

Tekanan desain: mengikuti class ANSI 600 – 1500

Material:

- a. ASTM A182 F91
- b. *Inconel / Alloy khusus*
- c. *Hardfacing tebal (Stellite 6)*

Karakteristik:

- a. *Metal-to-metal sealing* presisi tinggi
- b. Dirancang untuk steam $> 600^{\circ}\text{C}$
- c. *Anti wire-drawing design*

Umur pakai sangat tergantung kualitas steam dan kontrol operasi.

C. Klasifikasi Berdasarkan ANSI *Pressure Class*

Valve biasanya mengikuti standar tekanan:

Tabel 2.2 ANSI Pressure class

ANSI Class	Tekanan Maksimum (Steam)
Class 150	± 19 bar
Class 300	± 50 bar
Class 600	± 100 bar
Class 900+	> 150 bar

PLTU *subcritical* umumnya menggunakan *Class 150–300* untuk *Sootblower*.

D. Hubungan Tekanan Boiler dan Spesifikasi Poppet Valve

Semakin tinggi tekanan boiler:

1. Tebal *body valve* meningkat
2. Material harus tahan *creep*
3. *Seat* wajib *hardfacing*
4. Pegas harus tahan *fatigue* temperatur tinggi
5. Permukaan sealing lebih presisi

E. Perbandingan Umur Pakai Berdasarkan Tekanan

Tekanan Operasi	Umur Pakai Normal
10–16 bar	4–5 tahun
20–25 bar	3–4 tahun
40+ bar	2–3 tahun (jika tanpa <i>hardfacing</i> optimal)

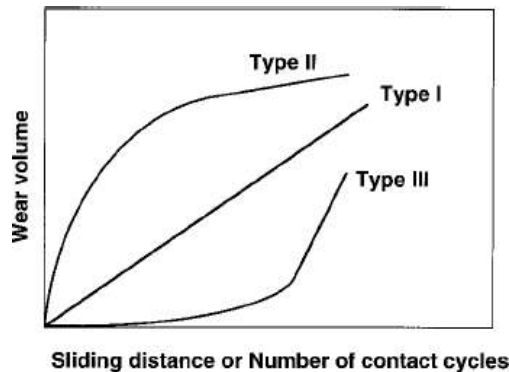
Semakin tinggi tekanan:

1. Risiko *wire drawing* meningkat
2. Erosi *seat* lebih cepat
3. *Spring fatigue* lebih tinggi

2.2.4 Pengertian Keausan dan beberapa jenis Keausan

Sifat yang melekat pada suatu material kadang-kadang dapat membatasi performanya. Akan tetapi, kinerja sebuah material jarang ditentukan oleh satu sifat saja; lebih sering, hal tersebut dipengaruhi oleh kombinasi beberapa sifat sekaligus. Sebagai contoh, ketahanan aus material sangat bergantung pada berbagai sifat, seperti kekerasan, kekuatan, ketangguhan, dan keuletan, serta faktor-faktor lainnya.

Keausan dapat didefinisikan sebagai rusaknya permukaan padatan atau suatu keadaan yang memburuk dari suatu permukaan kerja akibat dari pemakaiannya (gesekan). Hal ini umumnya diakibatkan oleh adanya gesekan antar permukaan padatan dan terjadi pada berbagai macam kondisi kerja. Keausan merupakan hal yang biasa terjadi pada setiap material yang mengalami gesekan dengan material lain. Keausan bukan merupakan sifat dasar material, melainkan respon material terhadap sistem luar (kontak permukaan). Material apapun dapat mengalami keausan yang disebabkan oleh mekanisme yang beragam. Akibat negatif yang ditimbulkan adalah ketahanan (*durability*) dan kehandalan (*reliability*) dari mesin berkurang saat mengalami keausan. Dengan mengetahui volume keausan, kekasaran permukaan, dan bentuk partikel memberikan informasi penting tentang keausan. Tiga macam tipe keausan bisa dilihat pada gambar berikut ini.



Gambar 2.4 Tiga Tipe Kurva Keausan

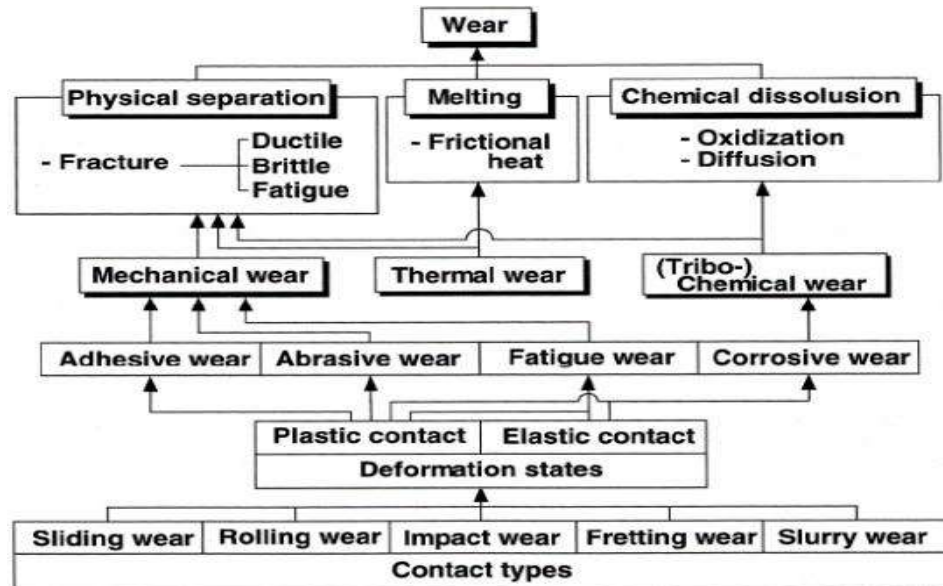
Kurva volume keausan dapat dianalisis sebagai fungsi dari jarak *sliding* atau jumlah kontak permukaan dalam sebuah siklus, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. 4. Terdapat beberapa tipe keausan: Tipe I menunjukkan nilai keausan yang konstan sepanjang proses, sementara Tipe II menggambarkan peralihan di mana laju keausan awalnya tinggi namun kemudian stabil pada tingkat yang lebih rendah. Tipe keausan ini sering kali ditemukan pada material logam. Di sisi lain, Tipe III menandakan peralihan yang signifikan dari laju keausan rendah menjadi sangat tinggi, seperti yang terjadi pada patahan akibat kelelahan (*fatigue fracture*), yang umumnya terjadi pada material keramik[9].

Secara umum, evaluasi keausan dilakukan dengan mengukur jumlah material yang hilang dan kondisi permukaan yang aus. Tingkat keausan dapat dinyatakan dalam berbagai bentuk, seperti *wear rate*, *specific wear rate*, atau *wear coefficient*. *Wear rate* didefinisikan sebagai volume keausan per satuan jarak, sedangkan *specific wear rate* adalah volume keausan per satuan jarak yang juga mempertimbangkan beban. Sedangkan *wear coefficient* merupakan hasil dari *specific wear rate* yang dibagi dengan kekerasan (*hardness*) material yang mengalami keausan.

2.2.5 Mekanisme Proses Keausan

Keausan dapat terjadi melalui empat mekanisme berbeda. Berikut ini adalah

penjelasan mengenai masing-masing mekanisme tersebut.



Gambar 2.5 Macam-macam mekanisme keausan karena efek kontak permukaan

Berikut merupakan penjelasan dari gambar 2.5 mengenai macam-macam tipe keausan.

2.2.5.1 Keausan Adesif (*Adhesive Wear*)

Keausan adhesif terjadi ketika permukaan dua atau lebih material saling bersentuhan, yang menyebabkan terbentuknya perlekatan antara mereka. Proses ini disertai dengan deformasi plastis, yang pada akhirnya mengarah pada pengikatan permukaan material satu dengan yang lainnya, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.6 dan mekanismenya dalam Gambar 2.7.

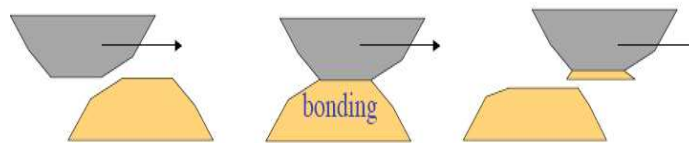
Beberapa faktor yang berkontribusi terhadap keausan adhesif meliputi kontaminasi pada permukaan dan terbentuknya ikatan antar molekul dalam material, seperti ikatan ion, ikatan kovalen, ikatan logam, atau ikatan *van der Waals* antara material yang saling bergesekan[10].



H. Czichos, Tribology, Springer 1978

Gambar 2.6 Pengamatan secara Micrographs kausan adhesif

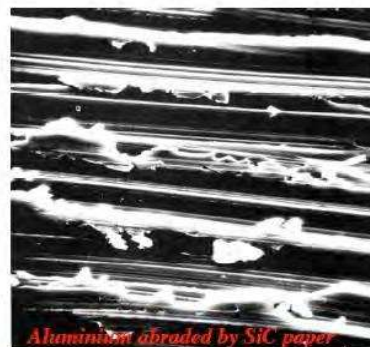
Adhesive wear by strong interfacial bonding



Gambar 2.7 Mekanisme keausan adesif

2.2.5.2 Keausan Abrasif (*Abrasive Wear*)

Terjadi ketika sebuah partikel keras dari material tertentu meluncur di atas permukaan material lain yang lebih lunak. Proses ini menyebabkan penetrasi atau pemotongan pada material yang lebih lunak, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.8, dengan mekanismenya diperjelas di Gambar 2.9

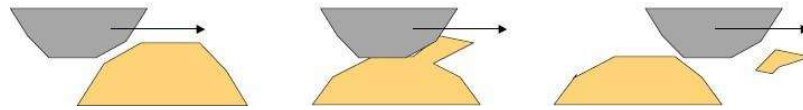


H. Czichos, Tribology, Springer 1978

Dia 10/44

Gambar 2.8 Pengamatan secara Micrographs keausan abrasif

Abrasive wear by plastic deformation and microcutting



Gambar 2.9 Mekanisme pada keausan abrasif

2.2.5.3 Keausan Lelah (*Fatigue Wear*)

Keausan lelah merupakan mekanisme yang berbeda dari dua mekanisme sebelumnya, terutama dalam hal interaksi permukaan. Sementara keausan adhesif dan abrasif hanya melibatkan satu jenis interaksi, keausan lelah memerlukan interaksi yang lebih kompleks dan beragam.

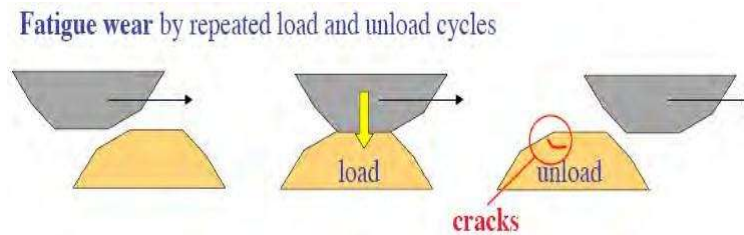
Proses keausan ini terjadi karena interaksi permukaan yang terus menerus, di mana permukaan yang terkena beban berulang akan mengakibatkan munculnya retakan mikro. Retakan-retakan ini kemudian dapat bergabung dan menyebabkan pengelupasan material. Dalam hal ini, volume material yang hilang akibat keausan lelah bukanlah parameter yang paling krusial; yang lebih penting adalah tahapan umur material setelah mengalami sejumlah putaran atau waktu yang diperlukan sebelum keausan lelah muncul.

Gambar 2.10 menunjukkan kegagalan lelah yang terjadi pada *ball bearing* dan gambar 2.11 menunjukkan mekanisme keausan lelah.



Fatigue failure of a steel ball bearing

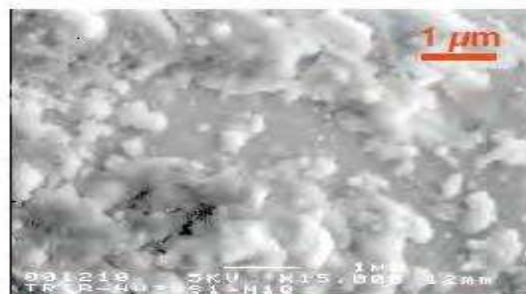
Gambar 2.10 Keausan lelah pada *ball bearing*



Gambar 2.11 Mekanisme keausan lelah

2.2.5.4 4 Keausan Korosif (*Corrosive Wear*)

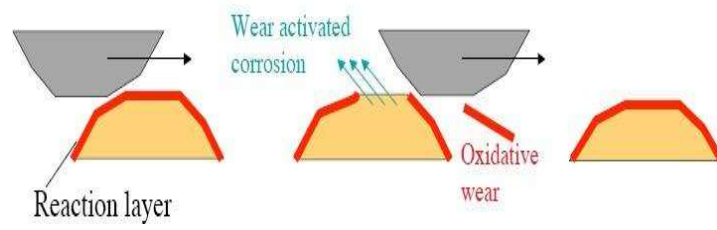
Proses kerusakan dimulai ketika terjadi perubahan kimia pada permukaan material akibat pengaruh lingkungan. Kontak ini menyebabkan terbentuknya lapisan pada permukaan yang memiliki sifat berbeda dibandingkan dengan material induknya. Sebagai akibatnya, material mengalami pemisahan di antara lapisan permukaan dan material induk, yang pada akhirnya mengakibatkan terlepasnya seluruh lapisan permukaan tersebut. Gambar 2.12 memperlihatkan keausan korosif yang terjadi pada baja, sementara Gambar 2.13 menggambarkan mekanisme dari keausan korosif tersebut.



Agglomerated oxide particles after wear of a passive steel.

Gambar 2.12 Keausan korosif pada baja

Tribochemical wear by removal of reaction layers



Gambar 2.13 Mekanisme keausan korosif