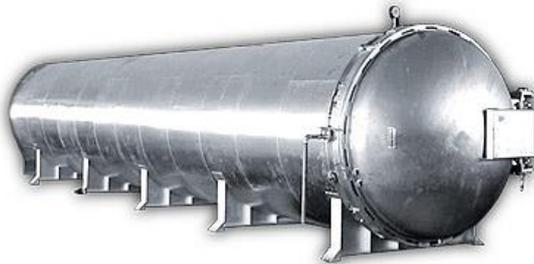


BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Area Sterilizer Station*

Sterilizer Station atau stasiun perebusan adalah area dimana langkah awal buah diproses untuk mendapatkan minyak. *Sterilizer* yang digunakan di PT. Hindoli Mill Sungai Lilin adalah jenis *horizontal*. Cara kerja dari sterilizer ini adalah dengan memasukkan lori yang berisi TBS dengan kapasitas 6 maksimal gerbong. Terdapat 5 *sterillizer horizontal* di dengan 7 garis lintasan *track* dan 17 sistem penggerak *undertow*. Durasi yang dibutuhkan pada proses ini berlangsung selama kurang lebih 91 menit. TBS direbus dengan tekanan uap sebesar 3 bar. Dalam perebusan tersebut, suhu diatur dengan temperatur 120 sampai 130 °C.



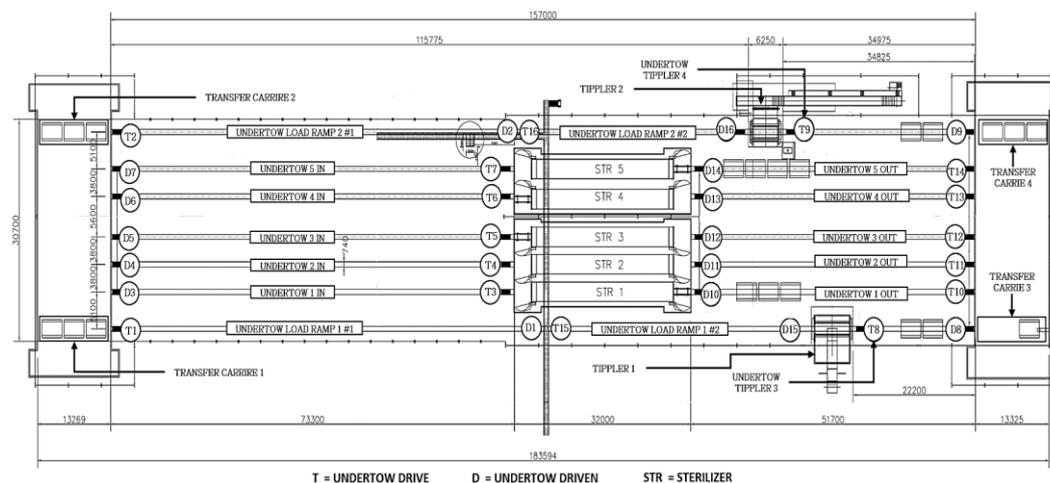
Gambar 2.1 *Sterilizer Horizontal*
(*Excelmech Engineering, 2022*)

Pada langkah perebusan ini, terdapat 11 step yang harus dijalani. *Build up* adalah proses memasukkan *steam* dari BPV kedalam rebusan pada saat proses rebusan berlangsung. Sedangkan *blow off* adalah proses mengeluarkan *steam*. Terdapat proses *condensate* yaitu membuang kadar air dan minyak yang tercampur pada proses perebusan.. Tabel 2.1 menunjukkan step atau langkah-langkah dan durasi proses dari *sterilizer*.

Tabel 2.1 *Step Process Sterilizer*
(PT. Hindoli MSL, 2022)

STERILIZER PROCESS					
NO	STEP	INLET	EXHAUST	CONDENSATE	PRESET TIME (m)
1	DERATION	OPEN	CLOSE	OPEN	3
2	BUILD UP	OPEN	CLOSE	CLOSE	10
3	CONDENSATE	OPEN	CLOSE	OPEN	2
4	BLOW OFF	CLOSE	OPEN	OPEN	3
5	BUILD UP	OPEN	CLOSE	CLOSE	14
6	CONDENSATE	OPEN	CLOSE	OPEN	2
7	BLOW OFF	CLOSE	OPEN	OPEN	3
8	BUILD UP	OPEN	CLOSE	CLOSE	14
9	HOLDING	PRESSURE	CLOSE	DRAIN	33
10	CONDENSATE	CLOSE	CLOSE	OPEN	2
11	EXHAUST	CLOSE	OPEN	OPEN	5

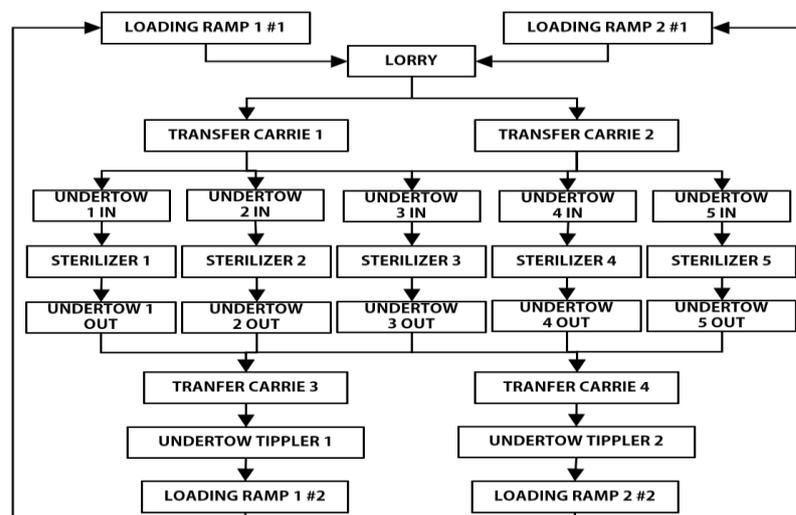
Sistem transportasi pada stasiun *sterilizer* di PT. Hindoli MSL menggunakan kereta lori sebagai alat pemindah TBS dari *loading ramp* ke *sterilizer* dan diteruskan lagi ke *tippler*. Saat ini terdapat 96 unit lori aktif, dan 2 unit lori yang sudah tidak beroperasi. *Unit* lori ini mempunyai kapasitas tampungan sebesar 7 ton, sedangkan berat lori adalah 2 ton. Gambar 2.1 menunjukkan *layout* stasiun *sterilizer* PT. Hindoli MSL. Didalam *layout* juga ditunjukkan ukuran secara spesifik, baik dari ukuran panjang maupun lebar alat beserta ukuran jarak antar alat. Gambar *layout* stasiun *sterilizer* secara jelas ditunjukkan pada pada lampiran.



Gambar 2.2 *Layout Sterillizer Station*
(PT. Hindoli MSL, 2022)

Dalam proses produksi, berawal dari lori sebanyak 6 gerbong mengisi TBS di *loading ramp*, kemudian dilanjutkan ke *rail track undertow in*. Proses

pemindahan *rail* dilakukan menggunakan *transfer carrie*. Lori yang telah dipindahkan ke *rail track undertow in*, kemudian dilanjutkan ke ruang tabung *sterillizer* untuk direbus. Setelah perebusan selesai, kemudian lori dikeluarkan menuju *tipler* untuk memproses buah rebusan ke stasiun *resher*. Dalam proses pemindahannya setelah direbus, lori melewati *rail track undertow out* dan dipindahkan *rail* menuju *rail undertow tipler* menggunakan *transfer carrie*. Gambar 2.3 menunjukkan diagram alir proses produksi secara kontinyu di stasiun *sterillizer*.



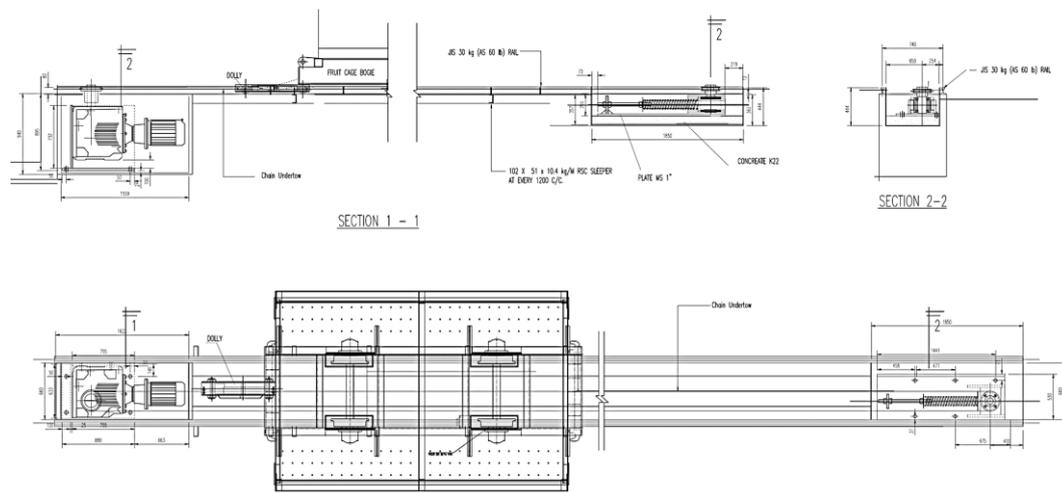
Gambar 2.3 Diagram Alir Proses Stasiun *Sterillizer*
(PT. Hindoli 2022)

Dalam setiap harinya, lamanya alat *undertow* digunakan bergantung pada jumlah pasokan buah yang masuk. Pasokan buah setiap harinya memiliki jumlah panen yang berbeda-beda. Jumlah buah akan menentukan jumlah siklus alat *undertow system* digunakan. Secara rata-rata, jumlah siklus alat bekerja dalam sehari dapat diasumsikan sebanyak 16 kali.

2.2 *Undertow System*

Undertow system merupakan sebuah mesin *unit transfer* gerbong lori yang beroperasi dibawah lintasan *rail track*. Saat ini terdapat 3 jenis *unit transfer* lori di pabrik kelapa sawit. Yaitu sistem *hydraulic* dengan nama *indexer*, kemudian sistem *capstan*, dan sistem *undertow*. Secara umum, kebanyakan pabrik kepala sawit

menggunakan sistem *capstan*. Namun dengan seiring waktu, banyak ditemukan kekurangan dari sistem *capstan* ini, terutama dalam masalah *safety*. *Unit transfer* lori di PT. Hindoli MSL pada awalnya menggunakan sistem *capstan*. Pada tahun 2015, sistem *capstan* mulai digantikan dengan sistem *undertow*. Gambar 2.4 menunjukkan gambar teknik dari *undertow system*. Gambar layout *undertow system* ditunjukkan secara jelas pada lampiran

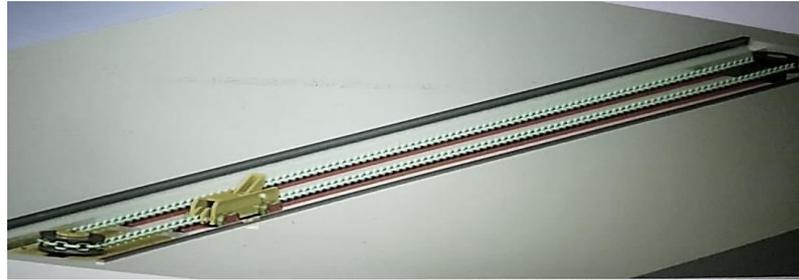


Gambar 2.4 *Layout Undertow System*
(PT. Hindoli, 2023)

Terdapat berbagai komponen dari setiap sistem fungsi *undertow system*. Sistem fungsi dibagi menjadi 3 bagian, yaitu:

1. *Drive system*
2. *Driven system*
3. *Rail track system*

Adapun cara kerja dari *undertow system* yaitu mendorong lori oleh dolly dibagian plat bawah, dimana dolly ditarik oleh *chain*. *Chain* terikat tanpa ujung diantara dua *sproket*, dimana sproket terdiri dari *drive* dan *driven*. Pergerakan dolly hanya sebatas maju dan mundur disepanjang lintasan *rail track*. Pada gambar 2.5 menunjukkan skema 3 dimensi tentang sistem kerja dari *undertow system*.



Gambar 2.5 Skema 3 Dimensi *Undertow System*
(PT. Hindoli MSL, 2023)

2.2.1 Drive System

Drive system berfungsi sebagai penggerak dari jalannya *undertow*. *Drive system* terdiri dari 3 komponen utama, yaitu

1. Motor listrik
2. *Gearbox*
3. *Sproket*

Dengan mengandalkan putaran *input* 1.475 *rpm* dari motor listrik 50 Hz sebagai sumber penggerak, dan meneruskan putaran ke *gearbox* hingga menghasilkan *output* 11 *rpm*. Rasio yang terjadi adalah 136,14/1 dan menghasilkan *output torque* sebesar 9700 Nm. Pada tabel 2.2 menunjukkan data spesifikasi dari *drive assembly*.

Tabel 2.2 *Drive Assembly Specification*
(PT. Hindoli, 2023)

Item	Specification
Chain Wheel	8 tooth Replaceable tooth segments Sprocket Part No. A2 301 C 1201 Tooth Segment Part No. A2 301 C1 1201-4
Bearings	Intergrated with gearbox
Gear motor	SEW - Eurodrive Pty. Ltd
Type	Helical Bevel, geared motor, foot mounted
Motor position	M16
Power	11 kW
Voltage	415 V
Frequency	50 Hz
Phases	3
Output Speed	11 rpm
Enclosure	IP55
Coupling	Torque Limiting type
Torque Setting	100% ex-works

2.2.2 Driven System

Driven system atau *take-up bearing* berfungsi sebagai penerima gaya putaran dari *driven*. *Drive system* juga memiliki fungsi sebagai peredam kejut karena

terdapat *coil spring* pada komponen *take-up*. Selain itu, terdapat pin padaudukan yang berfungsi mengatur level kekencangan rantai. Sproket yang terpasang juga adalah komponen yang sama seperti sproket *drive*. Tabel 2.3 menunjukkan spesifikasi dari *drive system* atau *take-up assembly*.

Tabel 2.3 *Take-up Assembly Specification*
(PT. Hindoli, 2023)

Item	Specification
Part No.	A1 301 C 1203
Type	Spring Loaded Sliding mechanism
Bearing	Grease packed & sealed
Chain Wheel	Plain grooved

2.2.3 Rail Track System

Rail track adalah tempat atau lintasan dari gerbong-gerbong lori beroperasi. Pada *track* ini, dolly mendorong lori tepat dibagian plat bawah tengah, dimana dolly beroperasi dibawah lori. Dolly ditarik oleh *chain*, baik bagian depan maupun belakang (saling terikat) dengan mekanisme kerja bergerak maju dan mundur. Pada tabel 2.4 dan 2.5 memberikan informasi spesifikasi dari *chain* dan dolly.

Tabel 2.4 *Dolly Specification*
(PT. Hindoli, 2023)

Item	Specification
Part No.	A1 301 C 1209
Type	Steel chasis with 4 wheels & guide bearings
Dog	Graity, counterweighted
Dog, max load	68,000 kg

Tabel 2.5 *Chain Specification*
(PT. Hindoli, 2023)

Item	Specification
Type	14 x 50; DIN 22252-2
Nominal dia., d	14 mm
Nominal pict, t	50 mm
Proof Stress	650 N/mm ²
Breaking Stress	800 N/mm ²
Inner width (min)	17 mm
Outer width (max)	48 mm
Mass (net)	3,85 kg/m
Connecting Link	VHVK G80-14X50
Tooth Mounting Bolts	EHV 14X50

Undertow system yang terdapat di PT. Hindoli MSL memiliki pola operasi secara kontinu. Adapun *downtime* terjadwal untuk *maintenance* adalah setidaknya

satu kali dalam sebulan. Terjadinya *downtime* tidak terjadwal disebabkan oleh berbagai macam variabel. Berbagai variabel penyebab tersebut yaitu:

1. *Chain* putus adalah kondisi dimana terjadinya putus atau patah pada struktur *chain*.
2. *Chain* lepas adalah kondisi terlepasnya *chain* dari sproket.
3. *Chain* mengendur adalah kondisi terjadinya ketidakkencangan *chain* sesuai standar operasi.
4. *Sproket* aus adalah terjadinya pengurangan daging dari gigi sproket sehingga *chain* tidak tercekam sproket atau selip.
5. *Bearing* tidak berfungsi, biasanya ditandai dengan putaran sproket yang tersedat-sedat dan timbul suara *abnormal*.
6. Sproket miring adalah terjadinya ketidakkencangan pada kunciian dudukan *take-up pit* ataupun motor *housing pit*
7. Motor korsleting adalah terjadinya korsleting listrik karena terendamnya air dan minyak pada *motor pit*.

Berdasarkan *downtime maintenance* yang tidak terjadwal, maka dibuatlah tabel guna mengetahui jumlah frekuensi dan *downtime* yang terjadi pada *chain*. *Downtime history report* yang di *input* adalah *downtime* tahun 2022.

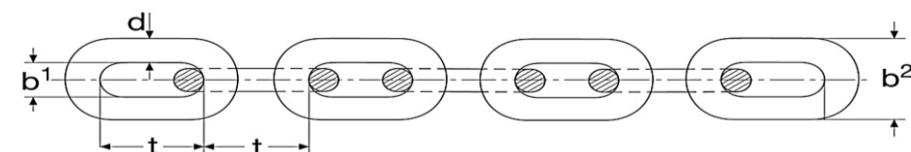
Tabel 2.6 *Downtime History Report Chains*
(PT. Hindoli, 2023)

BULAN	FREKUENSI (kali)	DOWNTIME (menit)
Januari	16	185
Februari	6	240
Maret	1	30
April	7	230
Mei	3	160
Juni	4	130
Juli	6	200

Agustus	4	120
September	2	60
Oktober	2	70
November	5	190
Desember	4	160
JUMLAH	60 kali	1775 menit (29 jam 35 menit)

2.3 Mekanisme *Chain Undertow System*

Chain pada *undertow system* berbeda dari *tranmisi roller* rantai seperti pada rantai sepeda. *Chain undertow* memiliki bentuk bulat panjang yang saling menyambung diantara *pich* hingga membentuk *link* panjang. Pada proses pembuatannya, kawat panjang setebal 14 mm dipanaskan pada suhu tertentu hingga dengan mudah dibengkokkan dan dibentuk. Proses pembentukan berupa lingkaran panjang dan saling terhubung diantara *pich* rantai hingga membentuk *link* panjang. Hampir seluruh proses dari pembentukan, penyambungan hingga perlakuan panas menggunakan teknologi canggih. Gambar 2.6 menunjukkan gambar teknik dari *chain*, dan tabel 2.7 menunjukkan ukuran geometri *chain*.

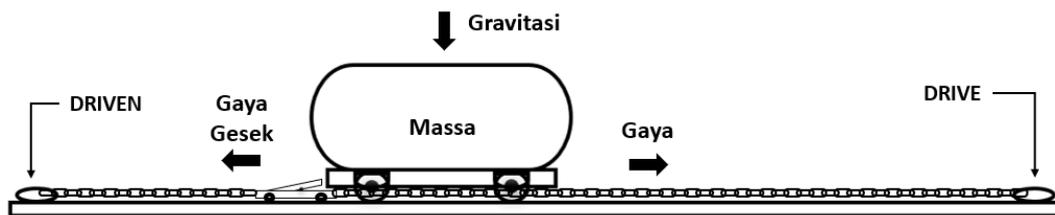


Gambar 2.6 Gambar Teknik *Round Chain*
(PT. Hindoli, 2023)

Tabel 2.7 Ukuran Geometri *Round Chain*
(PT. Hindoli, 2023)

d mm	Tolerance mm	t mm	Tolerance mm	b1 min. mm	b2 max. mm	Weight kg/m	Gage Length 5xt, mm	Tolerance mm
14	± 0,4	50,0	± 0,5	17	48	4,0	250,0	± 1,0

Dalam pengoperasiannya, sprocket *drive* memberikan gaya saat mekanisme untuk menarik beban yang berdampak pada kekuatan tarik rantai. Sedangkan sproket *driven* sebagai penerima dan penerus putaran melalui *chain*. Tegangan yang ditanggung pada *chain* adalah segala yang beban yang ditarik termasuk berat dari *chain* itu sendiri. Gambar 2.7 menunjukkan gambaran skema tegangan yang terjadi pada *chain*.



Gambar 2.7 Skema Gaya Teraplikasikan
(PT. Hindoli, 2023)

Besar kekuatan yang teraplikasikan dapat diselesaikan dengan persamaan sebagai berikut:

$$\sum F = m_l \cdot g \cdot \mu \cdot n + m_c \cdot l \cdot g \cdot \mu + m_d \cdot g \cdot \mu$$

Dimana:

- $\sum F$: Total gaya
- m : Massa
- g : Gravitasi
- l : Panjang *chain*
- μ : Koefisien gesek
- σ : Tegangan tarik
- A : Luas penampang

Dalam pengoperasiannya, terjadi tegangan pada *chain* yang saling tarik menarik. Tegangan pada *chain* dirumuskan dengan persamaan berikut:

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

Dimana luas penampang dihitung dari besarnya diameter kawat *chain* dengan persamaan:

$$A = \frac{\pi}{4} \cdot d^2$$

2.4 Baja

Baja adalah paduan logam antara *carbon* dengan bahan dasar besi. Sifat dari besi murni itu sendiri adalah mempunyai tingkat keuletan yang tinggi, namun kekuatan yang rendah dan mudah berkarat. Terdapat beberapa elemen unsur lainnya termasuk *carbon* yang telah dipadukan dengan logam besi dengan tujuan memodifikasi karakteristiknya. Secara umum terdapat beberapa unsur yang dijadikan paduan adalah *aluminum*, *nickel*, *bismuth*, dan *manganase*. Sedangkan elemen unsur yang lebih jarang digunakan antara lain *vanadium*, *cromium*, *boron*, *titanium*, *molybdenum*, *tunsten*, dan *niobium*. Persentasi unsur elemen dalam paduan baja akan mempengaruhi pada karakteristik dan sifat material itu sendiri.

Baja biasa ditambahkan unsur *carbon*, hal ini dengan tujuan meningkatkan kekuatannya. Dari paduan tersebut, baja menjadi lebih getas dan kekuatan baja meningkat, namun keuletannya berkurang. Paduan unsur *carbon* pada baja berkisar 0,2% hingga 2,1% yang digolongkan menjadi beberapa jenis. Semakin tinggi presentasi *carbon*, maka akan membuat baja semakin getas dan mudah patah. Namun *carbon* yang tinggi bila dipadukan unsur logam lain, maka karakteristik dan sifat mekanik dapat kembali berubah.

Terdapat dua kristal yang terbentuk dari besi yaitu *Body Center Cubic* (BCC) dan *Face Center Cubic* (FCC), dimana kristal tersebut dapat berubah ketika terdapat perbedaan temperatur. Terdapat atom besi ditengah-tengah kubus atom dalam susunan bentuk BCC. Sedangkan susunan bentuk FCC terdapat atom besi disetiap sisi kubus atom. Terjadi interaksi alotropi antara logam besi dengan elemen terpadu seperti *carbon*, yang membuat baja dan besi cor memiliki ciri khas tersendiri.

2.5 Baja Paduan

Baja menjadi paduan dengan berbagai elemen dalam jumlah persentasi 1,0% hingga 50%. Persentase elemen tersebut merupakan berat total dengan tujuan untuk meningkatkan sifat mekanik. Smith dan Hashemi menentukan perbedaan pada 4,0%, sedangkan Degarmo, et al., mendefinisikan pada 8.0% yang paling umum, frase "baja paduan" mengacu pada baja paduan rendah. Tegasnya, setiap baja sudah

merupakan paduan, tetapi tidak semua baja bisa disebut "baja paduan". Sederhana, baja adalah besi yang dicampur dengan carbon dengan jumlah persentase 0.1% hingga 1 % (tergantung pada jenisnya). Elemen-elemen unsur logam yang sengaja dipadukan selain carbon inilah yang menyebabkan baja disebut "baja paduan". Paduan secara umum yang terdapat pada baja paduan meliputi *manganase, cromium, nickel, vanadium, silicon, boron* dan *molybdenum*. Sedangkan paduan yang tidak umum meliputi *aluminum, titanium, kobalt, tungsten, cuprum (tembaga), cerium, zink (timah), niobium, stantum (timah), dan zirconium*. Sifat dan karakteristik material ditentukan pada berbagai paduan dan jumlah persentase hingga material tersebut mencapai sifat karakteristik yang diinginkan. Sifat dan karakteristik yang lebih baik dari pada baja *carbon* meliputi kekerasan, kekuatan, ketahanan aus, ketangguhan, ketahanan korosi, dan panas. Perlakuan panas diperlukan dalam mencapai peningkatan sifat logam tersebut.

Pengaplikasian baja paduan biasa ditemukan pada peralatan berspesifikasi tinggi misalnya pada sudut-sudut turbin pesawat terbang, pesawat ruang angkasa dan dalam reaktor nuklir. Selain itu sifat feromagnetik dari besi menjadi salah satu peranan penting dalam pengaplikasian transformator dan motor listrik. Baja paduan dapat tersusun dari ribuan besi dan karbon dengan komposisi dan perlakuan panas yang berbeda. Kandungan karbon menentukan sifat mekanik yang dihasilkan pada baja paduan dengan komposisi yang kurang dari 1% berat karbon. Berdasarkan komposisi karbonnya, baja paduan dibedakan menjadi tiga jenis yaitu:

1. Baja Karbon Rendah

Kandungan unsur pada baja karbon rendah yaitu kurang dari 0,25%. Pada baja karbon rendah, perlakuan panas sangat sulit untuk dilakukan karena tidak terjadi pembentukan martensit. Baja karbon rendah memiliki keuletan dan ketangguhan yang tinggi. Secara *mikrotik*, baja karbon rendah terdiri dari ferit dan sedikit perlit. Baja ini biasa dipakai dalam pembuatan peralatan permesinan dan pengelasan. Syarat penggunaan baja karbon rendah ialah kekuatan dan syarat pekerjaan teknis yang tidak terlalu besar. Batas kekuatan tekanan yang mampu diterima oleh baja karbon rendah adalah kurang dari 100.000 psi atau 690 MPa. Selain itu, pengerasan

tidak dapat terjadi pada mesin berukuran besar serta sangat mudah mengalami oksidasi dan korosi

2. Baja Karbon Sedang

Kandungan *carbon* dalam baja karbon sedang yaitu antara 0,2% hingga 0,5%. Perlakuan panas dapat dilakukan pada baja karbon sedang dengan celup cepat yang diikuti dengan penemperan. Hal tersebut dilakukan dengan tujuan mendapatkan sifat-sifat mekanik pada material. Namun baja karbon sedang hanya dapat dilakukan pada benda yang tipis dan laju pendinginan yang cepat, karena tingkat pengerasan pada baja ini tergolong rendah. Penambahan unsur *nickel*, *chrome* dan *molybdenum* akan menghasilkan kondisi pengerasan yang kuat pada perlakuan panas yang menghasilkan baja karbon sedang. Tingkat kekuatan dan ketahanan aus dapat bekerja dalam waktu yang lama pada baja ini. Sehingga baja ini biasa diaplikasikan pada roda gigi dan roda rel kereta api.

3. Baja Karbon Tinggi

Kandungan *carbon* pada baja karbon tinggi yaitu antara 0,6% hingga 14%. Baja karbon tinggi memiliki sifat mekanik sangat kuat dan keras, namun tingkat keuletannya sangat rendah. Penambahan unsur *vanadium*, *molybdenum*, *chrome* dan *tunsten* menghasilkan sifat mekanik yang sangat kuat dan keras serta tingkat ketahanan aus yang tinggi. Penambahan unsur ini biasa diaplikasi pada pembuatan cetakan baja dan alat-alat potong atau perkakas. Baja ini dapat digunakan setelah mengalami proses pengerasan dan penemperan.

2.6 Analisa Kegagalan

Dalam banyak kasus, analisis kegagalan memiliki hubungan dengan forensik *engineering* atau rekayasa forensik. Forensik *engineering* merupakan suatu penyelidikan dari kegagalan yang dimulai dari penyelidikan kemampuan lainnya suatu sistem komponen atau struktur hingga terjadinya bencana yang mana dapat mengarah pada aktivitas hukum termasuk perdata dan pidana. Rekayasa forensik intinya adalah tentang upaya mencari tahu apa yang salah. Analisis kegagalan metalurgi adalah proses ahli metalurgi menentukan mekanisme yang menyebabkan komponen logam gagal.

Peran insinyur dalam menghadapi terjadinya kegagalan dituntut mampu mengantisipasi kemungkinan terjadinya kegagalan. Namun demikian, pada praktiknya kegagalan tetap terjadi karena diakibatkan kurangnya pengetahuan dan pemahaman dari pihak-pihak yang terlibat tentang potensi kegagalan serta risiko dibalik kegagalan yang menyebabkan kegagalan terjadi dan dapat berlangsung berulang kali. Kegagalan yang terjadi harus dianalisis modus kegagalannya dan dicari penyebabnya untuk mencegah terjadinya kegagalan serupa dimasa mendatang. Selain peran insinyur, tentunya diperlukan dukungan yang nyata di level manajemen.

2.6.1 Jenis Kegagalan

Terdapat 4 jenis kegagalan, yaitu *Fatigue*, *Wear*, *Corrosion*, *Impact Load/Overload*. Tabel 2.8 menunjukkan jenis fenomena kegagalan beserta pertumbuhan makroskopik dan pertimbangan keamanannya.

Tabel 2.8 Jenis Kegagalan
(Korda, 2021)

JENIS	FENOMENA MAKROSKOPIK	PERTUMBUHAN MAKROSKOPIK	KEAMANAN
<i>Fatigue</i>	Tak Terlihat	Cepat	Berbahaya
<i>Wear</i>	Terlihat	Bertahap	Aman
<i>Corrosion</i>	Terlihat	Bertahap	Aman
<i>Impact Load, Overload</i>	Tak Terlihat	Cepat	Berbahaya

Pada tabel dibawah ini menunjukkan jenis-jenis dari kegagalan beserta pertimbangan keamannya.

1. *Fatigue*

Tabel 2.9 Fenomena Kegagalan *Fatigue*
(Korda, 2021)

Fenomena Makroskopik	Tak Terlihat	Retak <i>fatigue</i> tidak tampak secara jelas dipermukaan luar suatu penampang komponen
-------------------------	--------------	------------------------------------------------------------------------------------------

		atau struktur. Terlebih apabila komponen tersebut diberikan <i>coating</i> (Proses penambahan lapisan khusus pada permukaan).
Pertumbuhan Makroskopik	Cepat	Retak merambat sejalan dengan pembebanan berulang. Semakin tinggi tegangan dan frekuensi pembebanan akan meningkatkan laju pertumbuhannya. Laju perambatan meningkat dengan meningkatnya faktor intensitas tegangan, K_I
Keamanan	Berbahaya	Retak yang tidak tampak dan laju pertumbuhan yang cepat menjadikan kegagalan <i>fatigue</i> merupakan kegagalan mekanik yang paling dominan dan dapat menyebabkan <i>catastrophic failure</i> .

Contoh kejadian dalam kegagalan ini adalah tenggelamnya platform Alexander L Kielland pada tahun 1980 yang disebabkan oleh *fatigue crack growth* yang merenggut 123 nyawa dari 212 orang pekerja.



Gambar 2.8 Tenggelamnya Platform Alexander L Killand
(Korda, 2021)

2. Wear

Tabel 2.10 Fenomena Kegagalan *Wear*
(Korda, 2021)

Fenomena Mikroskopis	Terlihat	Kehilangan tebal penampang tampak jelas dalam pengamatan kerusakan akibat aus. Pengamatan aus relatif mudah.
Pertumbuhan Makroskopis	Bertahap	Pengurangan ketebalan penampang bertahap sejalan dengan aksi mekanis antara dua permukaan padat atau akibat aksi dari fluida yang mengandung padatan
Keamanan	Aman	Kerusakan akibat aus menunjukkan fenomena makroskopis yang relatif teramati dan pertumbuhan yang bertahap. Penanganan relatif terukur. Struktur yang beresiko umumnya jarang yang mengalami kegagalan akibat aus.

Contoh *wear* yang sering terjadi biasanya terdapat pada peralatan alat berat.



Gambar 2.9 *Wear Bucket Excavator*
(Korda, 2021)

3. *Corrosion*

Tabel 2.11 Fenomena Kegagalan *Corrosion*
(Korda, 2021)

Fenomena Mikroskopis	Terlihat	Korosi merata yang umumnya tampak jelas dipermukaan paduan logam sebagai hasil interaksi dengan lingkungan. Korosi disini adalah korosi yang tidak melibatkan faktor mekanik (<i>stress corrosion cracking, sulphide stress cracking</i> ataupun <i>corrosion fatigue</i>).
----------------------	----------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Pertumbuhan Makroskopis	Bertahap	Korosi terjadi secara bertahap dan laju korosi umum dapat diperkirakan serta ditentukan relatif mudah.
Keamanan	Aman	Kehilangan tebal dan kerusakan di permukaan akibat korosi umum terjadi secara nyata. Pengendalian korosi yang nampak nyata ini telah secara luas dilakukan. Struktur yang beresiko umumnya jarang yang mengalami kegagalan akibat korosi jenis ini.

Contoh kejadian dari *corrosion* ini adalah jembatan kereta api yang berkarat akibat faktor lingkungan yang ditunjukkan pada gambar 2.10.



Gambar 2.10 Jembatan Kereta Api Berkarat (Korda, 2021)

4. *Impact Load, Overload*

Fenomena Mikroskopis	Tak Terlihat	Kegagalan akibat <i>impact load</i> ataupun <i>overload</i> terjadi secara tiba-tiba.
Pertumbuhan Makroskopis	Cepat	Kegagalan akibat <i>impact load</i> ataupun <i>overload</i> terjadi secara tiba-tiba tanpa peringatan.
Keamanan	Berbahaya	Kegagalan yang terjadi secara tiba-tiba sangat berbahaya. kegagalan ini umumnya terjadi akibat kesalahan desain atau <i>human error</i> .

Gambar 2.11 adalah contoh struktur yang mengalami kegagalan akibat *overload*.



Gambar 2.11 Kegagalan Struktur akibat *Overload*
(Korda, 2021)

2.6.2 Penyebab-penyebab Kegagalan

Kegagalan secara umum dapat disebabkan oleh faktor-faktor berikut:

- 1) Faktor Manusia: Termasuk didalamnya kegagalan etika atau integritas, *human error* dan kecelakaan.
- 2) Cacat dalam desain: Seringkali disebabkan oleh praktik yang tidak sesuai etika atau prinsip moral atau integritas.
- 3) Kegagalan dari bahan yang digunakan.
- 4) Kondisi yang ekstrem atau lingkungan
- 5) Kombinasi dari alasan-alasan sebelumnya.

Perlu ditekankan bahwa kegagalan etika dan integritas cukup banyak terjadi dari kasus-kasus kegagalan yang besar. Kegagalan etika ini terutama dipicu oleh:

- 1) Ketidakpedulian mengambil keputusan karena potensi terjadinya kegagalan.
- 2) Pemotongan tahapan untuk mempersingkat waktu proses.
- 3) Karena pemikiran sempit yang mengedepankan pertimbangan biaya atau keuntungan diatas keselamatan.

2.6.3 Prosedur Dalam Anallisa Kegagalan

Ketika terjadi sebuah kegagalan atau retak, perlu dilakukan suatu tindakan untuk mencegah terjadinya kegagalan yang sama dengan menginvestigasi dan menganalisis kegagalan komponen yang terjadi. Adapun tindakan yang perlu dilakukan dalam menginvestigasi komponen yaitu (Nishida, 1992):

1. Material yang digunakan

- a. Data produksi : *melting, rolling, forming, casting, heat*
 - b. *Treatment*, dan proses *machining*.
 - c. Analisa kimia : pengujian X-Ray, komposisi kimia.
 - d. Sifat mekanik : *tensile, bending, hardness, impact*, dan *fatigue test*.
 - e. Struktur metalurgi : struktur makro dan mikro struktur.
 - f. Pengerasan permukaan dan tegangan sisa ; *finishing*.
 - g. Patah permukaan.
2. Desain tegangan dan kondisi perawatan
 - a. Kekuatan dari luar : golongan, besar, pengulangan.
 - b. *Atmospher* : udara, air, air laut, dan sebagainya.
 - c. Yang lain : kondisi perbaikan.
 3. Uji percobaan
 - a. Uji laboratorium : perhitungan tegangan (kekuatan).
 - b. Material, *finite element method* (FEM), kekuatan leleh kekerasan patahan.
 - c. Konfirmasi uji lapangan : ukuran tegangan, uji produksi.
 4. Hasil uji seluruhnya

2.7 Kegagalan Pada Struktur

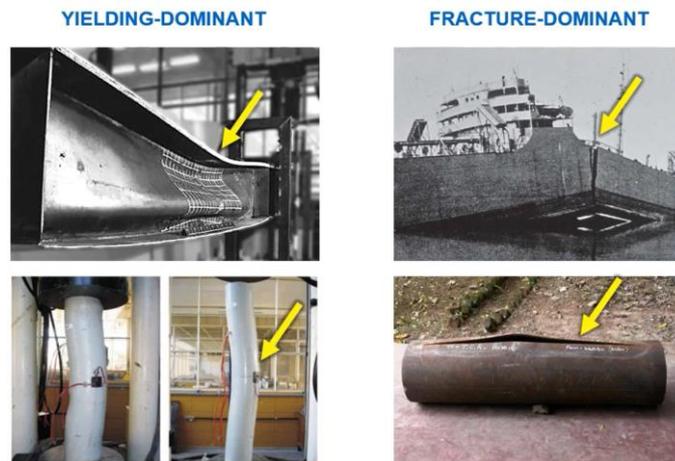
Kegagalan suatu struktur dibagi menjadi 2 kategori yaitu:

Tabel 2.12 Perbedaan *Yielding-Dominant* dan *Fracture-Dominant*
(Akuan, 2007)

<i>Failure of Structures</i>	
<i>Yielding-Dominant</i> (Dominan Ulet)	<i>Fracture-Dominant</i> (Dominan Getas)
1) Kegagalan yang didominasi oleh Deformasi Plastis. Pada kegagalan ini deformasi plastis terjadi pada area luas komponen/struktur	Deformasi plastis terjadi secara lokal pada lokasi lokal atau defek. Cacat-cacat yang berperan penting pada kegagalan ini adalah cacat-cacat makroskopis:
2) Cacat-cacat yang penting yang mengendalikan ketahanan terhadap deformasi plastis pada logam:	1. Cacat Lasan

1. Atom-atom intersiti	2. Porositas (ukuran dari ruang kosong di antara material)
2. Batas-batas butiran	3. Cacat Penempaan
3. Presipitas dan lain sebagainya	4. Retak akibat Fatik
	5. Retak akibat korosi tegang

Gambar 2.12 menunjukkan perbedaan kegagalan struktur secara *yielding-dominan* dan *fracture-dominan*. Pada *yielding-dominan* terlihat adanya perubahan bentuk pada struktur dilokasi yang mengalami kegagalan. Sementara itu pada *fracture-dominan* tidak terdapat adanya deformasi plastis atau perubahan bentuk yang nyata pada area patah.

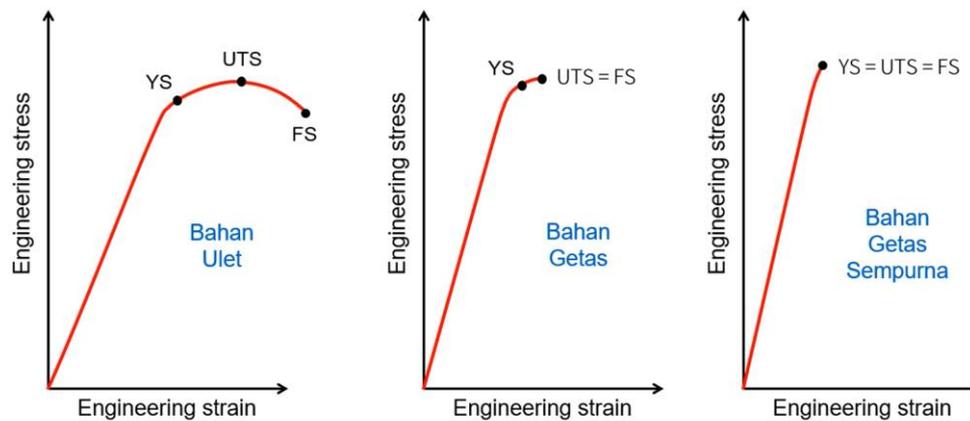


Gambar 2.12 Perbedaan Kegagalan antara *Yielding-Dominant* dan *Fracture-Dominan*
(Akuan, 2007)

2.7.1 Kurva Tegangan-Regangan

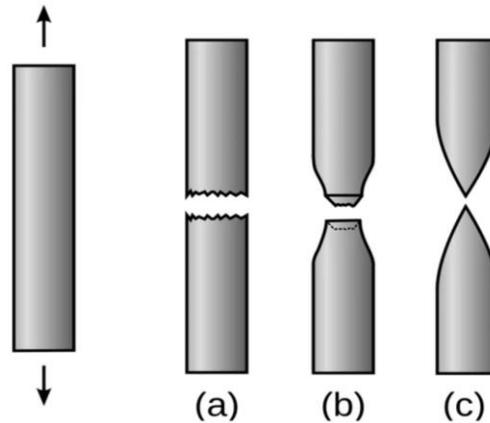
Kurva tegangan-regangan tampil dalam bentuk yang berbeda pada bahan yang ulet dan getas. Pada bahan yang ulet akan terlihat adanya elongasi atau perpanjangan yang nyata pada saat bahan ditarik. Ketika bahan ditarik, maka akan terlihat adanya nilai *yield stress*, dimana bahan logam mulai mengalami deformasi plastis atau deformasi secara permanen. Kemudian pada beban maksimum dicapai *ultimate tensile stress*. Nilai tegangan kemudian menurun disebabkan terbentuknya *necking* hingga mencapai *fracture stress*. Pada bahan yang getas, elongasi bahan berkurang secara nyata. Pada kondisi ini, nilai *ultimate tensile*

stress dapat dianggap sama dengan *fracture stress*. Sementara itu, untuk bahan yang getas sempurna dimana bahannya mengalami deformasi secara elastis, maka *yield stress* sama dengan *ultimate stress*.



Gambar 2.13 Perbedaan Kurva Tegangan-Regangan pada Bahan Ulet, Getas dan Getas Sempurna
(Akuan, 2007)

Gambar 2.14 menunjukkan perbedaan patah pada benda getas dan ulet saat suatu bahan diberikan beban tarik. Gambar A merupakan patahan getas, dimana pada area patah tidak terjadi reduksi penampang dari spesimen tarik. Misalnya pada keramik dan logam-logam yang didinginkan. Gambar C merupakan patah yang sangat ulet, dapat dilihat reduksi penampang yang sangat nyata pada lokasi patah/putusnya spesimen tarik. Patah jenis ini umum terjadi pada logam-logam yang *root* atau pada bahan getas seperti gelas pada temperatur tinggi. Sementara gambar B adalah kondisi patah diantara keduanya. Ini biasanya ditemui pada logam pada umumnya.



Gambar 2.14 Skema Spesimen Uji Tarik (a)Benda Getas (b)Benda Ulet & Getas
(c)Benda Ulet
(Akuan, 2007)

2.7.2 Cara Struktur Mengalami Kegagalan

Terdapat 3 cara utama struktur mengalami kegagalan, yaitu:

1) *Fracture*

Fraktur adalah pemisahan suatu objek atau material menjadi dua bagian atau lebih di bawah pengaruh tekanan. Perpatahan suatu zat padat biasanya terjadi karena perkembangan permukaan diskontinuitas perpindahan tertentu di dalam zat padat tersebut. Jika perpindahan berkembang tegak lurus terhadap permukaan, itu disebut retak tarik normal atau hanya retak. Jika perpindahan berkembang secara *tangensial*, itu disebut retakan geser, pita slip, atau dislokasi.



Gambar 2.15 Patah Akibat Tegangan Maksimum
(Calister, 2007)

2) *Fatigue*

Dimana struktur mengalami beban berulang dibawah tekanan dan retak merambat hingga retak mencapai ukuran kritis dan struktur mengalami patah atau

patah lelah. Fatik material disebabkan oleh deformasi plastis, yang dalam bentuk terkecil disebut deformasi mikroplastik. Kerusakan ini dapat tumbuh dengan tekanan yang terus menerus (pertumbuhan retak), yang pada akhirnya menyebabkan kegagalan material atau komponen. Investigasi terhadap banyak kasus kerusakan mengarah pada temuan berikut:

- Komponen yang telah digunakan selama beberapa waktu tanpa masalah, bisa tiba-tiba gagal.
- Kegagalan tidak disebabkan oleh satu kelebihan beban.
- Kegagalan terjadi jauh di bawah batas kekuatan statis.
- Beban bervariasi dari waktu ke waktu dan seringkali berulang.

Umur fatik komponen yang tertekan secara *cyclic* terbatas. Oleh karena itu, sebelum komponen kritis diimplementasikan dilakukan evaluasi umur fatik, perhitungan umur fatik atau uji fatik untuk memberikan perkiraan daya tahan komponen (penentuan *durabilitas*).



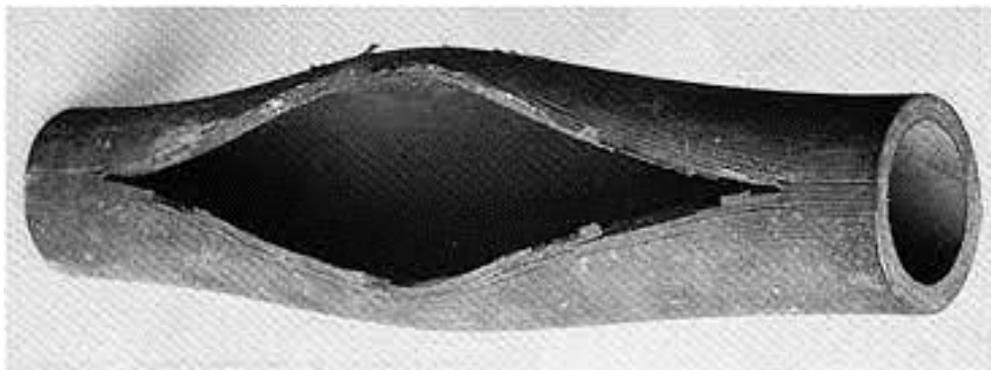
Gambar 2.16 Patah Fatik
(Falah, 2007)

3) *Creep*/Perayapan

Dimana kegagalan terjadi melalui deformasi plastis terjadi akibat pembebanan konstan pada temperatur tinggi. Kegagalan ini ditandai dengan deformasi permanen material di bawah beban dan suhu konstan. Dimana terjadi dalam situasi

stres yang konstan dan sangat umum terjadi pada suhu ekstrem, meskipun juga dapat terjadi pada lingkungan sekitar. Dan juga dapat terjadi di bawah kondisi pembebanan yang stabil sebagai fungsi waktu.

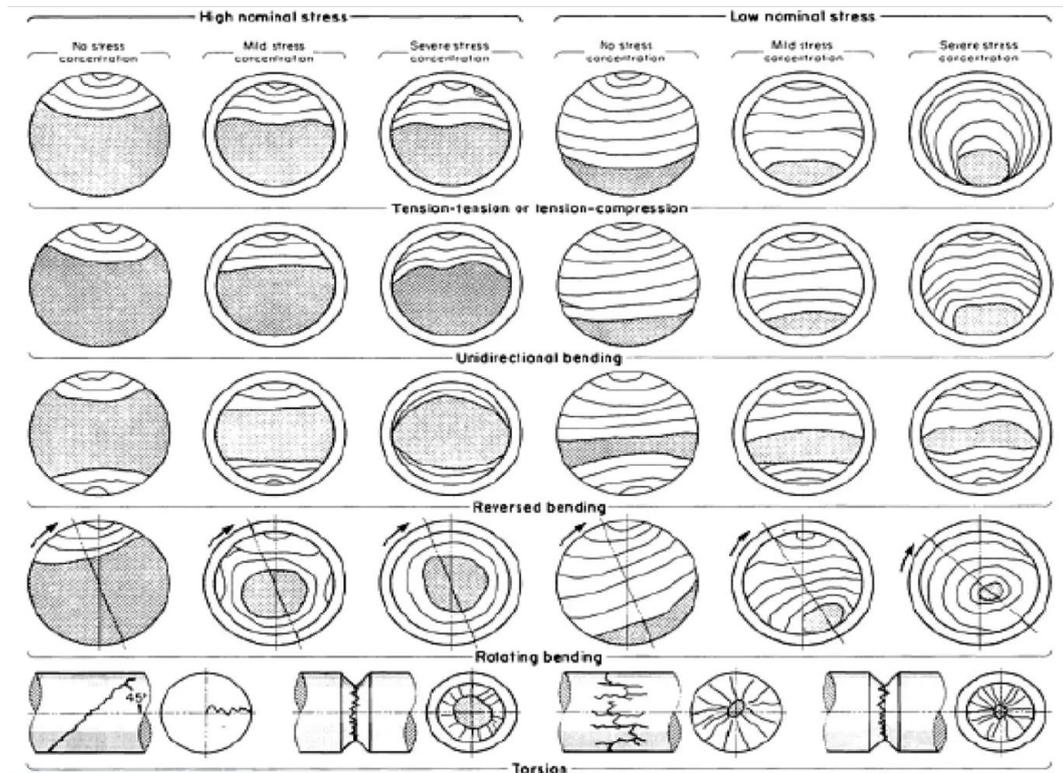
Kerusakan *creep* terjadi pada logam dan paduan setelah paparan stres yang berkepanjangan pada suhu tinggi. Hal ini biasanya terkait dengan tahap tersier *creep*, dan menimbulkan kegagalan *creep*. Namun, ia dapat dimulai pada tahap yang relatif awal merayap, dan berkembang secara bertahap sepanjang hidup merayap. Biasanya, aplikasi yang memiliki panas tinggi dan tekanan tinggi dapat rentan terhadap *creep*. Contohnya termasuk pembangkit tenaga nuklir, komponen mesin industri, filamen logam yang dipanaskan, komponen mesin jet, dan pipa suhu tinggi bertekanan.



Gambar 2.17 Patah Deformasi Plastis
(Huda, 2021)

2.7.3 Mekanisme Pembentukan Patah

Patah *fatigue* terjadi ketika sebuah benda atau struktur mengalami beban berulang dibawah batas *ultimate strength* dengan durasi cukup lama hingga mengalami kelelahan. Patah lelah terjadi melalui tiga tahap yaitu tahap retak awal (*crack initiation*), tahap penjalaran retak (*crack propagation*), dan tahap patah statis. Dan setelah retak lelah merambat cukup jauh, maka beban yang bekerja hanya akan didukung oleh penampang tersisa yang belum retak dan akhirnya komponen akan patah (tahap *final failure*). Pada Gambar 2.18 dibawah ini menunjukkan secara skematis penampilan permukaan patahan dari kegagalan lelah pada berbagai kondisi pembebanan.

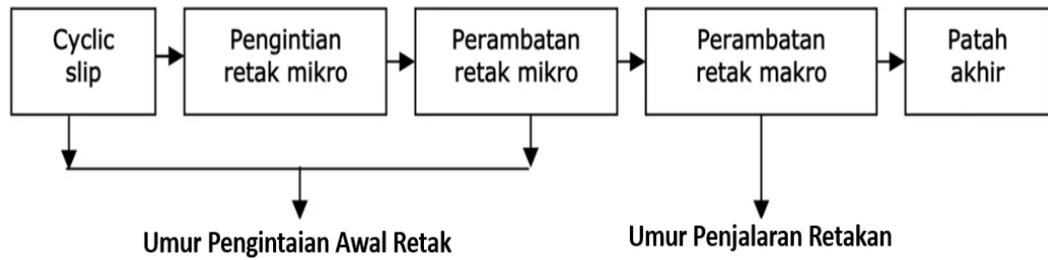


Gambar 2.18 Skematis Permukaan Lelah pada Penampang Bulat
(Akuan, 2007)

Karakteristik kelelahan logam dapat dibedakan menjadi 2 yaitu karakteristik makro dan karakteristik mikro. Karakteristik makro merupakan ciri-ciri kelelahan yang dapat diamati secara visual (dengan mata telanjang atau dengan kaca pembesar). Sedangkan karakteristik mikro hanya dapat diamati dengan menggunakan mikroskop. (Akuan, 2007)

Menurut Schijve, terdapat 5 fase yang selama proses *fatigue*, yaitu: (ASM Handbook Committee Volume 19, 2002):

1. *Cyclic slip*
2. *Crack nucleation*
3. *Growth of microcrack*
4. *Growth of macrocrack*
5. *Final failure*



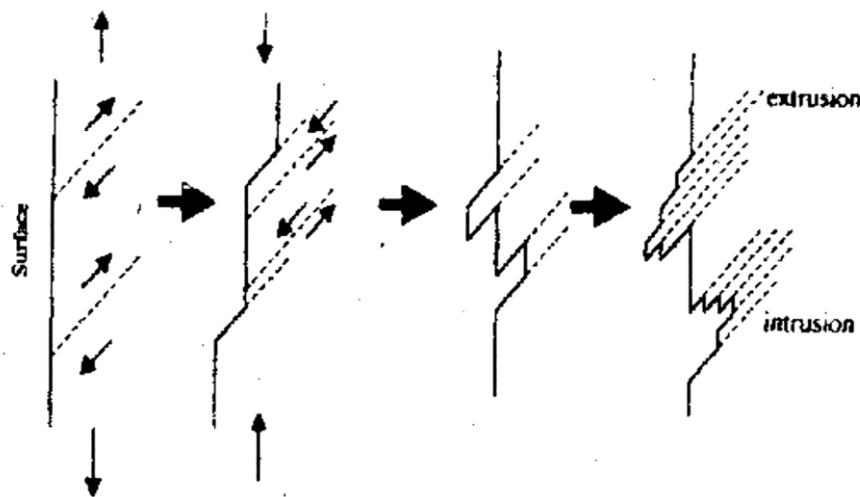
Gambar 2.19 Fase-fase Kegagalan Lelah (*fatigue*)

(Akuan, 2007)

Terdapat 3 tahap pembentukan retak, yaitu:

1. Tahap Retak Awal (*Crack Initiation*)

Crack Initiation atau inisiasi adalah proses yang membentuk retakan pada permukaan material. Alasan utama terbentuknya retakan pada permukaan apa pun adalah kelelahan. Kelelahan menyebabkan kerusakan struktural yang progresif dan terlokalisir ketika material mengalami pembebanan siklik. Karena pembebanan siklik, material mengalami beban atau gaya yang terus menerus dan berulang di berbagai titik pada material. Ketika beban tersebut cukup tinggi, mereka menyebabkan inisiasi retakan, pertumbuhan retakan dan akhirnya menjadi patahan. Inisiasi retakan juga dikenal sebagai pembentukan retakan. Awal retak biasanya dimulai dari permukaan. Hal ini terjadi karena permukaan menerima beban terbesar dan paling memungkinkan terjadinya konsentrasi tegangan. Fenomena awal retak, secara sederhana diberikan oleh Wood.

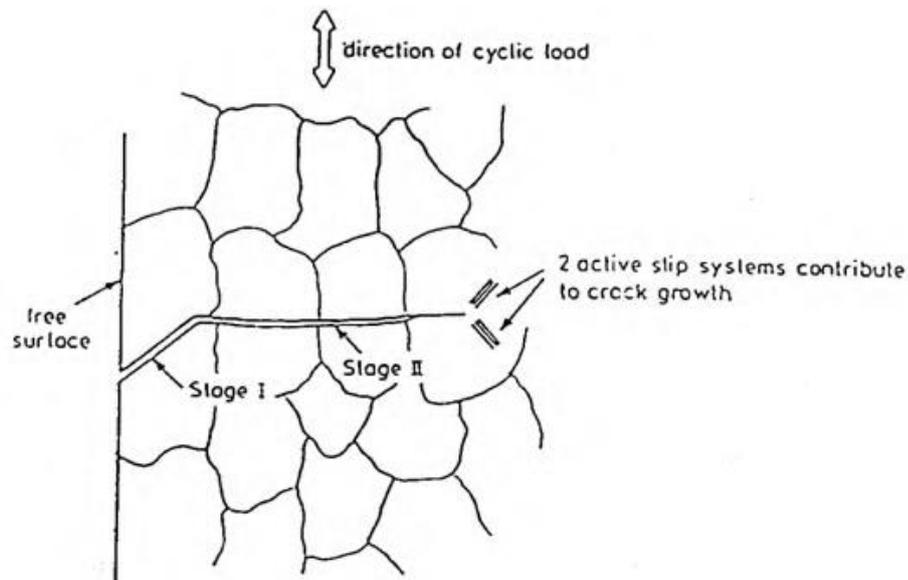


Gambar 2.20 Mekanisme Pengintian Retak

(Akuan, 2007)

2. Tahap Perambatan Retak (*Crack Propagation*)

Perambatan retakan dapat terjadi pada tegangan rendah dan biasanya ditandai dengan perambatan yang lambat, sehingga sering disebut sebagai perambatan retakan subkritis atau korosi tegangan . Tinjauan singkat tentang dasar-dasar perambatan retak pada material elastis linier diberikan, diikuti dengan diskusi tentang pengaruh kondisi lingkungan terhadap kecepatan perambatan . Perambatan retak pada suatu komponen terjadi jika tegangan maksimum pada ujung retakan berada di atas kekuatan material. Perambatan retak terjadi pada bidang slip dengan kecepatan lambat. Namun perambatan ini belum bisa dilihat secara makro. Peristiwa ini disebut perambatan retak tahap I. Selanjutnya pertumbuhan retak tahap II sering ditandai dengan adanya striasi. Pada tahap ini pertumbuhan retak tegak lurus dengan tegangan tarik maksimum. Retakan mulai dapat dilihat dengan mata telanjang, oleh karena itu disebut dengan retak makro.

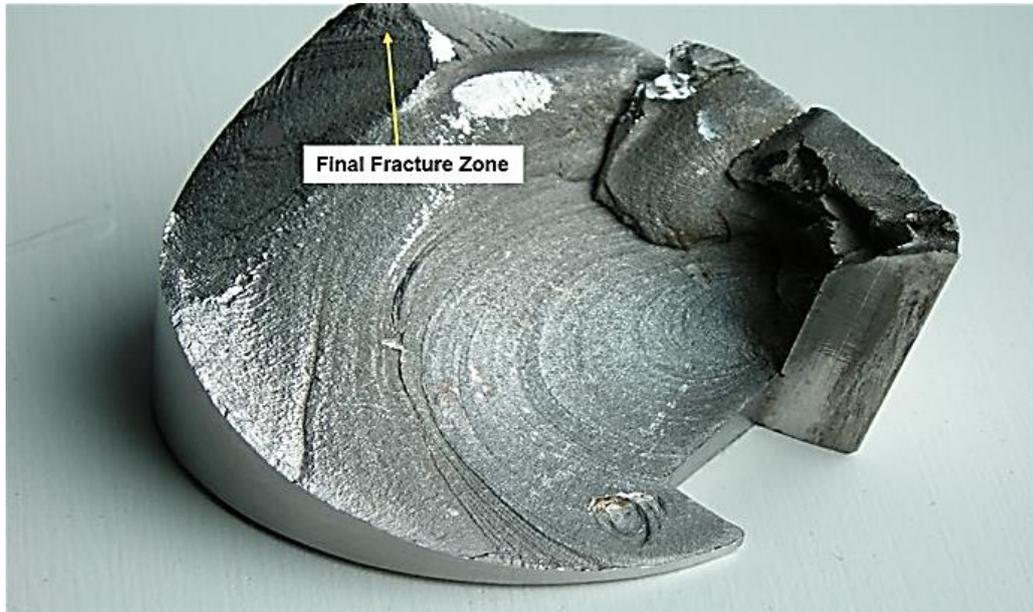


Gambar 2.21 Mekanisme Perambatan Retak
(Akuan, 2007)

3. Tahap Patah Akhir (*final fracture*)

Retak makro merambat sedikit demi sedikit dan bertambah panjang pada setiap siklus pembebanan yang selanjutnya menghasilkan keretakan yang semakin lama semakin panjang. Akhirnya penampang logam semakin kecil dan tidak lagi

mampu mendukung beban yang diterima hingga akhirnya logam akan patah.



Gambar 2.22 *Final Fracture* Logam
(Latino, 2022)