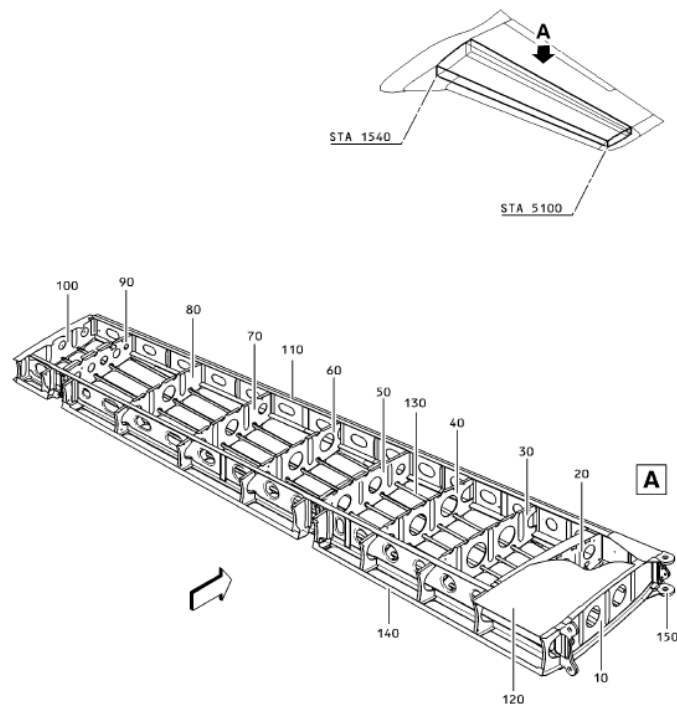


## BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Landasan Teori

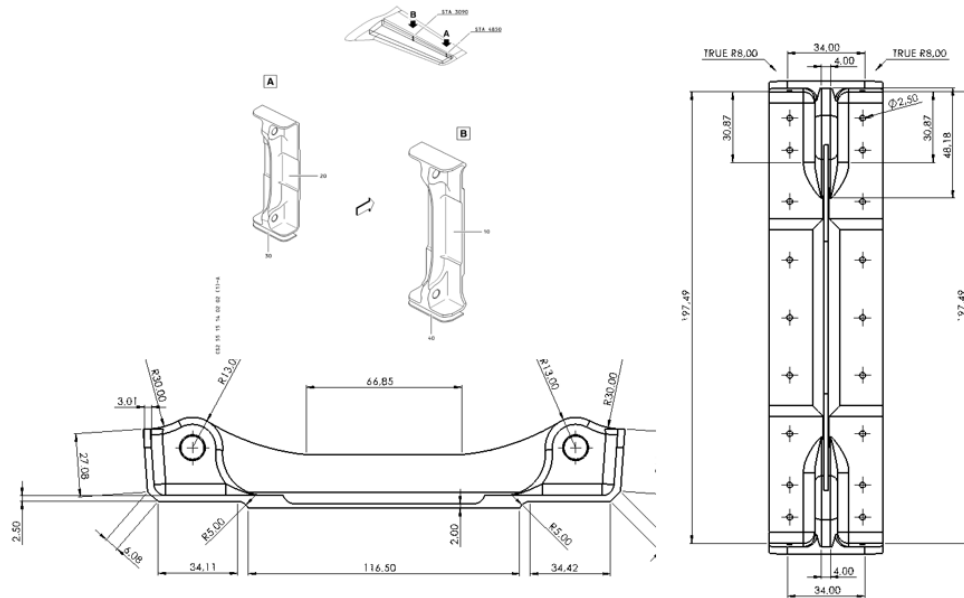
#### 2.1.1. Pengertian *Elevator*

*Elevator* adalah komponen kontrol yang terletak di bagian ekor pesawat. *Elevator* merupakan sirip horizontal yang mengarahkan badan pesawat dan mengatur sikap kemiringan pesawat (Iryani & Ramadhan, 2021). Pilot mengendalikan sistem kontrol penerbangan *elevator* untuk mencapai kondisi *pitch* yang diinginkan. Untuk mengubah ketinggian pesawat, sesuaikan sudut kontak sayap. Hal ini dapat menaikkan atau menurunkan pesawat.



**Gambar 2.1** *Elevator* pada Pesawat CN 235  
(*Structural Repair Manual* CN-235)

## 2.1.2 Pengertian *Fitting*



**Gambar 2.2** Elevator Fitting pada Pesawat CN-235  
(Structural Repair Manual CN-235)

Pada lingkup komponen pesawat terbang, istilah *fitting* mengacu pada berbagai komponen yang digunakan untuk menyambung, menyatukan atau memasang berbagai komponen pesawat terbang, salah satunya pada *elevator* yang disebut sebagai *elevator fitting*.

## 2.1.3 Aluminium alloy

*Aluminium alloy* adalah paduan logam yang dibuat dengan menggabungkan aluminium dengan elemen paduan. Meskipun aluminium memiliki keunggulan dalam hal konduktivitas dan ketahanan terhadap erosi, aluminium juga memiliki beberapa kekurangan. Oleh karena itu, paduan aluminium diperlukan untuk mencapai karakteristik material tertentu untuk tujuan yang dimaksudkan.

Beragamnya jenis material yang dapat dipadukan dengan aluminium menghasilkan berbagai karakteristik dalam paduan aluminium. Dengan memilih paduan yang sesuai, aluminium dapat digunakan untuk berbagai

aplikasi. Salah satu pengaplikasiannya yaitu pada komponen pesawat yang mengalami retak kali ini yaitu pada komponen *elevator fitting* pesawat CN-235, *aluminium alloy* yang digunakan pada komponen ini yaitu *aluminium alloy* 2024.

#### **2.1.4 Analisis Kegagalan**

Analisis kegagalan adalah penginspeksian dan pengujian pada material yang mengalami kegagalan, dengan tujuan untuk menentukan penyebab kegagalan. Analisis kegagalan dilakukan bertujuan untuk mengidentifikasi mekanisme kegagalan dan memberikan solusi untuk mengatasi masalah tersebut.

Dengan begitu, analisis kegagalan melibatkan pengamatan komponen yang rusak untuk menentukan penyebab kegagalan. Pengamatan pola kerusakan yang rusak sangat penting untuk seluruh proses analisis kegagalan. Dengan demikian, pengamatan makroskopis dan mikroskopis harus dilakukan secara bertahap. Penyebab dari kegagalan biasanya terjadi karena adanya gaya yang bekerja pada lingkungan kerja komponen, oleh karena itu penting dilakukannya pengujian mekanis.

Menurut Brooks (2002), beberapa faktor yang sering menjadi penyebab kegagalan material yaitu:

##### **1. Faktor kesalahan pemilihan material**

Hasil penelitian berdasarkan faktor kesalahan pemilihan material yang menjadi faktor paling utama sebagai penyebab kegagalan material. Berikut Tabel 2.1 memberikan data statistik tentang masalah-masalah yang terkait dengan kegagalan material.

**Tabel 2.1** Permasalahan Dalam Kegagalan Komponen Mesin

<b>Permasalahan</b>	<b>%</b>
Kesalahan pemilihan material	<b>38</b>
Kecacatan dalam pemroduksian	<b>15</b>
Kesalahan perlakuan panas	<b>15</b>
Kesalahan pada mekanik desain	<b>11</b>
Kondisi berlebihan saat operasi	<b>8</b>
Kondisi lingkungan tidak terkontrol	<b>6</b>
Kurang baik saat inspeksi	<b>5</b>
Ketidajelasan material	<b>2</b>

## 2. Perawatan Komponen yang kurang baik

Penelitian menunjukkan bahwa prosedur perawatan komponen mesin yang tidak memadai adalah penyebab utama kegagalan material akibat perawatan komponen mesin. Data kegagalan material yang terjadi disajikan pada Tabel 2.2.

**Tabel 2.2** Data Kegagalan Material Akibat Pemeliharaan Komponen Mesin

<b>Permasalahan</b>	<b>%</b>
Pemeliharaan kurang baik	<b>44</b>
Fabrikasi yang cacat	<b>17</b>
Defenisi perancangan	<b>16</b>
Pemakain tidak normal	<b>10</b>
Kecacatan pada material	<b>7</b>
Penyebab yang tidak jelas	<b>6</b>

### 3. Kesalahan pada desain komponen

Berbagai faktor kesalahan yang terjadi ketika merancang komponen mekanis:

1. Kegagalan ulet akibat pembebanan yang terlalu besar terhadap kekuatan material.
2. Kegagalan getas akibat beban kejut.
3. Kegagalan pada suhu tinggi.
4. Keterlambatan pada fraktur statis.
5. Prosedur desain yang berlebihan dapat menyebabkan konsentrasi tegangan seperti tegangan.
6. Analisis tegangan pada komponen yang kurang tepat sehingga rentan terhadap kegagalan beban berlebih.
7. Kesalahan yang dilakukan pada saat mengidentifikasi material bagian-bagian mesin, yang berdampak pada perhitungan yang dilakukan.

#### 4. Ekstrimnya lingkungan kerja.

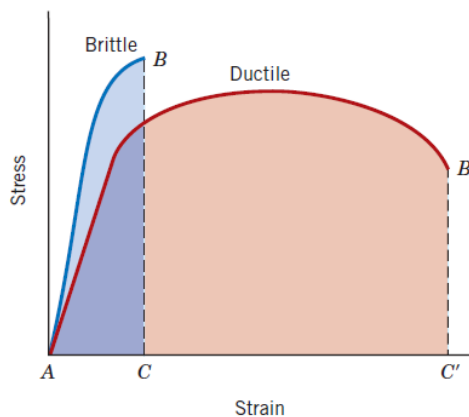
Kondisi kerja yang ekstrim pada Tabel 2.3 merinci masalah yang sering muncul ketika kondisi lingkungan kerja yang tidak baik menyebabkan kegagalan komponen mesin.

**Tabel 2.3** Faktor Penyebab Kegagalan pada Komponen Mesin

<b>Penyebab Kegagalan</b>	<b>%</b>
<i>Corrosion</i>	<b>29</b>
<i>Fatigue</i>	<b>25</b>
<i>Brittle fracture</i>	<b>16</b>
<i>Overload</i>	<b>11</b>
<i>High temperature corrosion</i>	<b>7</b>
<i>Stress corrosion cracking</i>	<b>6</b>
<i>Hydrogen embrittlement</i>	
<i>Creep</i>	<b>3</b>
Erosi	<b>3</b>

### 2.1.5 Patah Getas dan Patah Ulet

Patahan terjadi ketika suatu material terpisah menjadi dua bagian atau lebih pada suhu di bawah titik lelehnya akibat tegangan statis. Suatu material dapat mengalami berbagai macam tegangan, termasuk tegangan torsi, geser, tekan, dan tarik. Ada dua macam modus patahan dalam rekayasa material: patah getas dan patah ulet. Material dikategorikan berdasarkan seberapa mudahnya bahan tersebut lentur secara plastis dan menyerap energi dalam jumlah besar sebelum patah. Deformasi plastis yang tinggi membentuk rongga yang sedikit pada ujung patahan, dan pemanjangan atau penjarangan retakan yang progresif merupakan ciri-ciri bahan ulet. Material rapuh, sebaliknya, menunjukkan sedikit deformasi plastis dan perambatan retak yang cepat karena konsentrasi tegangan lokal di dekat ujung retak.

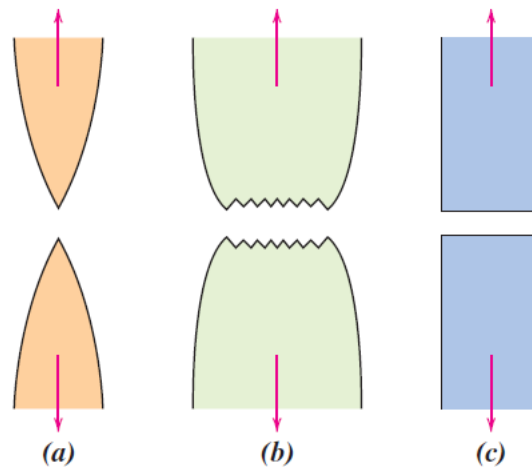


**Gambar 2.3** Diagram Skema Patah Ulet dan Getas  
(Callister Jr & Rethwisch, 2018)

Patahan suatu material dapat bersifat getas atau ulet, bergantung pada kondisi pembebanan. Dua langkah proses patahan adalah pembentukan dan perambatan retakan sebagai respons terhadap tekanan material. Cara suatu retakan merambat sangat mempengaruhi mode patahannya.

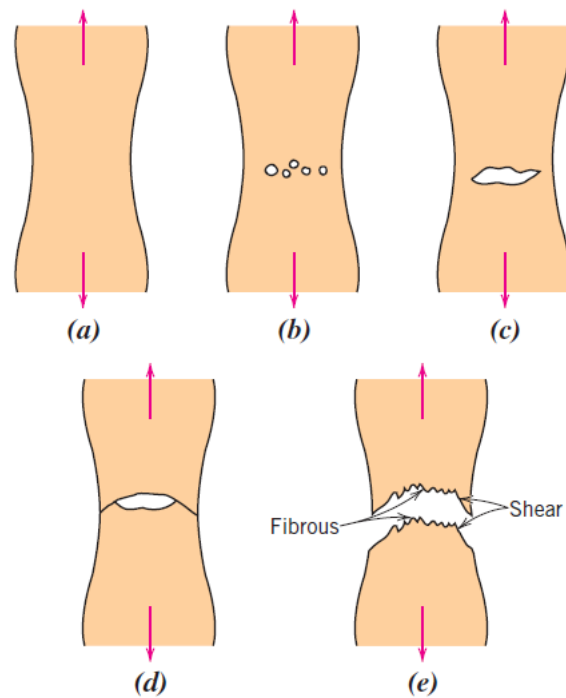
### 2.1.5.1 Patah Ulet

Jika dilihat secara makroskopis, patahan ulet memperlihatkan bentuk patahan yang berbeda. Dua profil kesalahan makro skematis yang representatif ditunjukkan pada Gambar 2.4. Bahan lunak seperti emas pada suhu normal dan logam, polimer, dan gelas anorganik pada suhu relatif tinggi semuanya memiliki susunan seperti yang terlihat pada Gambar 2.4 (a). Secara umum Gambar 2.4 (b) menggambarkan profil patahan bahan ulet akibat tegangan tarik, dimana patahan diawali dengan *necking*. Bahan melewati proses multi-tahap patah ulet. Setelah pengurangan area lokal (*necking*), rongga kecil atau *microvoids* pertama kali dibuat di dalam struktur material, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.5.



**Gambar 2.4** Tiga Jenis Patahan yang Dapat Terjadi: (a) Patahan Ulet, (b) Patahan Ulet Setelah *Necking*, dan (c) Patahan Getas Tanpa Deformasi Plastis

(Callister Jr & Rethwisch, 2018)



**Gambar 2.5** Tahapan Patahan *Cup* dan *Cone* (a) Awal *Necking*, (b) Terbentuknya *Cavity* Kecil, (c) Pengumpulan *Cavity* Hingga Menjadi Retakan, (d) Perambatan Retak, (e) Patahan Geser dengan Sudut  $45^\circ$  Terhadap Arah Tegangan  
(Callister Jr & Rethwisch, 2018)

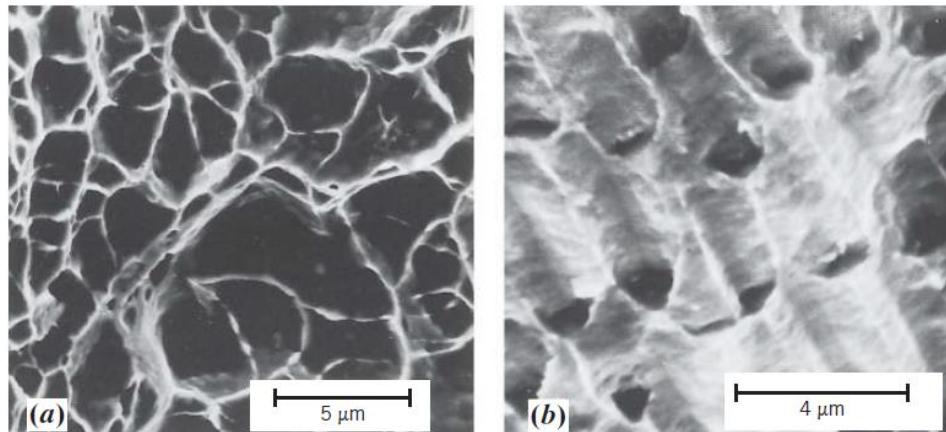
Microvoids tumbuh dan menyatu seiring dengan berkembangnya deformasi yang disebabkan oleh tegangan, yang pada akhirnya menciptakan rekahan melingkar yang tegak lurus terhadap arah pembebanan. Seperti terlihat pada Gambar 2.5 (e), retakan kemudian merambat sejajar dengan arah pembebanan hingga terjadi retakan akibat perambatan retakan yang cepat pada area leher. Deformasi geser di sekitar arah tegangan tarik, dimana sudut mencerminkan tegangan geser maksimum, inilah yang menyebabkan hal tersebut. Kadang-kadang suatu cacat memiliki ciri-ciri kontur seperti tampilan cangkir dan kerucut, dimana salah satu sisi patahan berbentuk seperti kerucut. Struktur berserat asimetris ini menunjukkan deformasi plastis. Pengujian dengan SEM dapat dilakukan untuk mendapatkan rincian tambahan mengenai

hal ini. *Fraktografi* adalah studi tentang cacat semacam ini. Karena SEM memiliki resolusi lebih besar dan bidang pandang lebih dalam dibandingkan mikroskop optik, maka biasanya digunakan untuk mempelajari bentuk retakan dan patahan. Gambar 2.6 menggambarkan variasi patah getas pada baja ringan serta patah ulet berbentuk *cup* dan *cone* (Kurniawan et al., 2017).



**Gambar 2.6** (a) Patah Ulet (*Cup and Cone*) pada *Aluminium*, dan (b) Patah Getas pada *Mild Steel*  
(Callister Jr & Rethwisch, 2018)

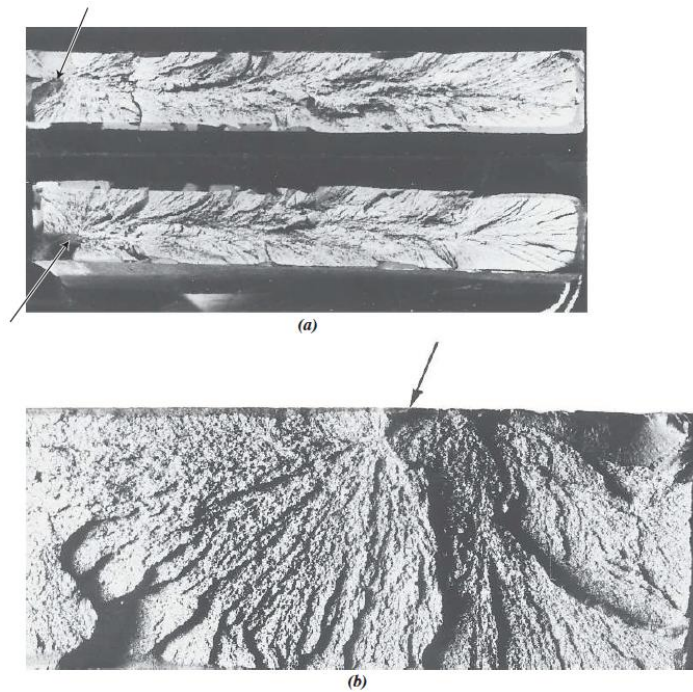
*Shear lips* atau variasi yang terlihat pada tinggi penampang objek, adalah cara yang umum untuk mengidentifikasi patahan ulet pada skala makro. Seperti yang terlihat pada Gambar 2.7, patahan ulet pada skala mikro dicirikan oleh profil *dimple* pada permukaan patahan, yang disebabkan oleh perambatan retakan mikro (penggabungan *microvoid*).



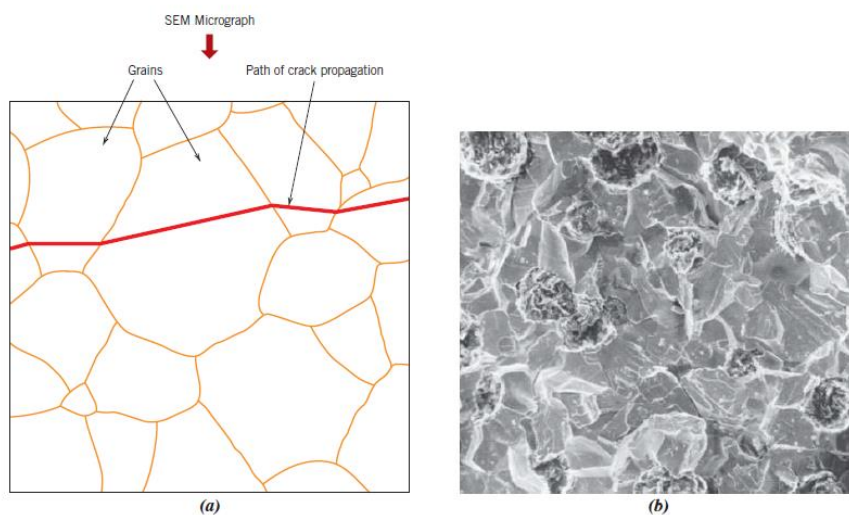
**Gambar 2. 7** (a) SEM yang Menunjukkan *Spherical Dimple* Karakteristik, Patahan Hasil Beban Tarik *Uniaxial*, 3300x, dan (b) SEM yang Menunjukkan *Spherical Dimple* Karakteristik Hasil Beban Geser, 5000x  
(Callister Jr & Rethwisch, 2018)

#### 2.1.5.2 Patah Getas

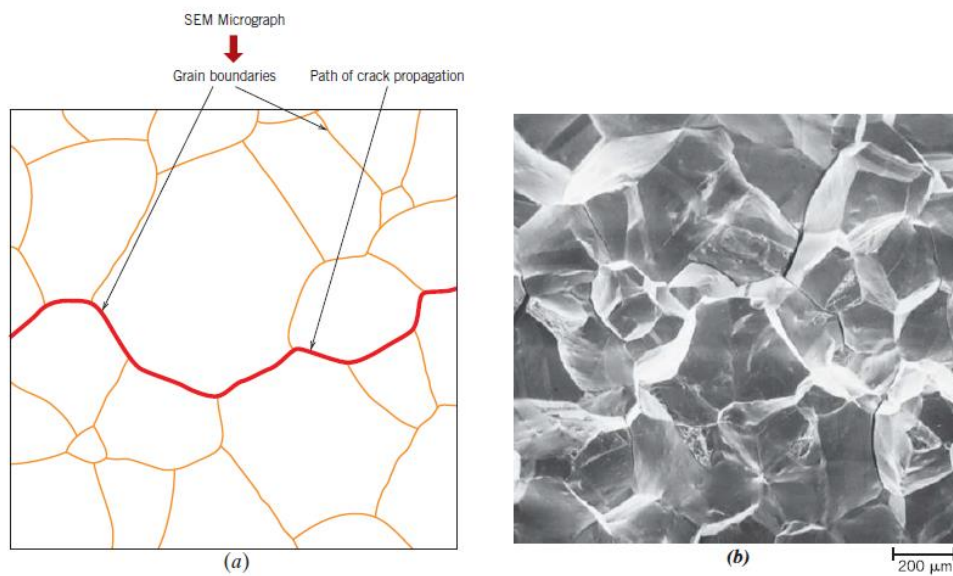
Pada sebagian besar kasus, material menunjukkan deformasi plastis yang minimal atau bahkan tidak ada sama sekali saat terjadi patah getas. Patahan atau retakan menyebar di sepanjang bidang kristal, membagi atom-atom material (*transgranular*). Gambar 2.8 (a) menggambarkan pola seperti *chevron* pada material yang lebih lunak dengan butiran kasar, sedangkan Gambar 2.8 (b) menunjukkan permukaan patah getas dengan garis yang terlihat atau lokasi asal retakan, yang dikenal sebagai pola kipas. Pada kedua data propagasi dan hasil SEM, terlihat jelas bahwa patahan yang berkembang di sepanjang batas butir (*intergranular*) dan yang melewatinya (*transgranular*) terlihat jelas pada Gambar 2.9 dan 2.10.



**Gambar 2.8** (a) Foto yang Menunjukkan Bentuk V “Chevron” Sebagai Karakteristik Patah Getas dan (b) Foto yang Menunjukkan Permukaan Patah Getas Daerah Asal Retakan (Callister Jr & Rethwisch, 2018)



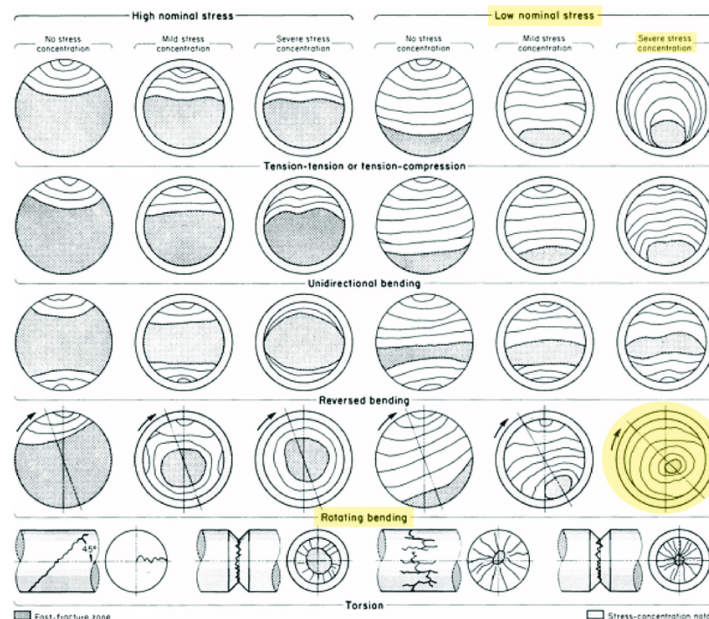
**Gambar 2.9** (a) Skema Perambatan Retak yang Melewati Butir (*Transgranular*). (b) Hasil SEM dari Patah Secara *Transgranular* (Callister Jr & Rethwisch, 2018)



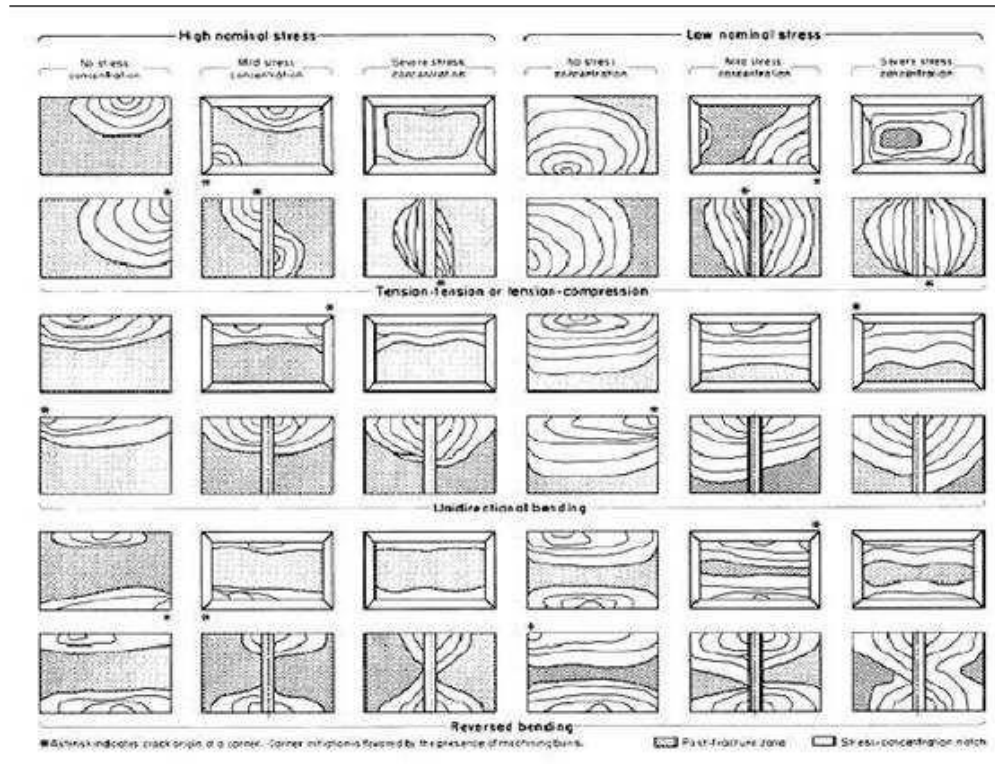
**Gambar 2.10** (a) Skema Perambatan Retak yang Terjadi Sepanjang Batas Butir (*Intergranular*) (b) Hasil SEM dari Patah Secara *Intergranular* (Callister Jr & Rethwisch, 2018)

### 2.1.6 Mekanisme Pembentukan Patah Lelah

Bidang penelitian kelelahan logam dipelopori oleh Wohler (Jerman) dan Fairbairn (Inggris) pada tahun 1860. Sejak tahun 1903, Ewing dan Humparey telah melakukan investigasi yang lebih menyeluruh terhadap kelelahan logam, yang berujung pada pengembangan hipotesis "Mekanisme Patah Lelah". Mekanisme fraktur *fatigue* sekarang dipahami terdiri dari tiga tahap yang berbeda: inisiasi retakan, perambatan, dan patah akhir (Antono & Gunawan, 2015).



**Gambar 2.11** Skematis Permukaan Lelah pada Penampang Bulat  
(Van Zyl & Al-Sahli, 2013)(Van Zyl & Al-Sahli, 2013)

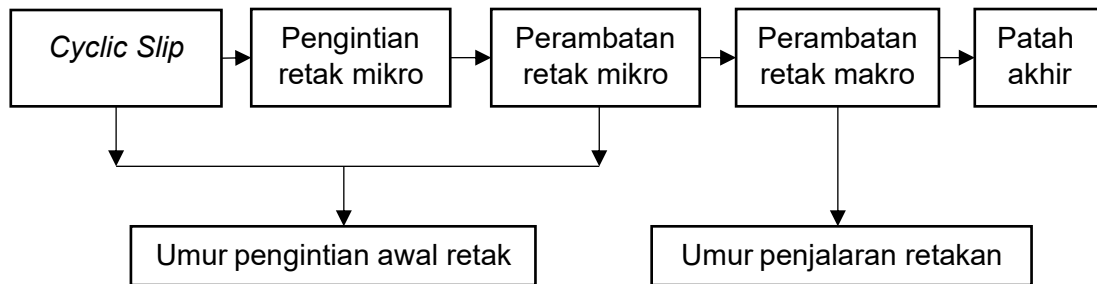


**Gambar 2.12** Skematis Permukaan Lelah pada Penampang Persegi Dalam Berbagai Kondisi Pembebanan  
(Antono & Gunawan, 2015)

Dua jenis karakteristik kelelahan logam yang berbeda dapat diidentifikasi yaitu karakteristik makro dan karakteristik mikro. Ciri-ciri mikro hanya dapat diamati di bawah mikroskop, sedangkan ciri-ciri makro adalah ciri-ciri yang berkaitan dengan kelelahan yang dapat dilihat dengan mata telanjang atau melalui penggunaan kaca pembesar (Antono & Gunawan, 2015).

Schijve menyatakan bahwa proses kelelahan terjadi dalam lima tahap (*ASM Handbook Committee Volume 19, 2002*):

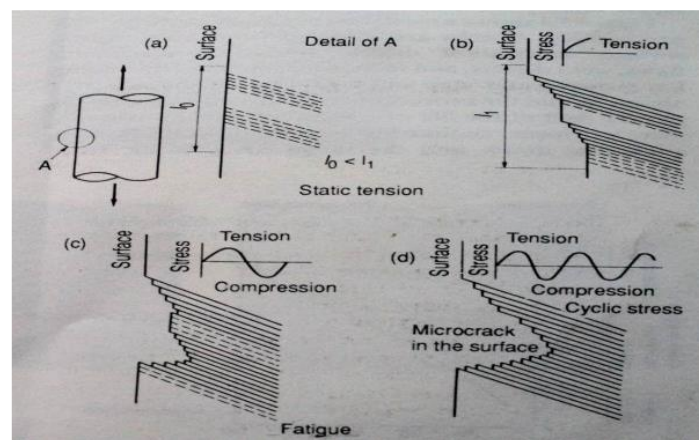
1. *Cyclic slip*
2. *Crack nucleation*
3. *Growth of microcrack*
4. *Growth of macrocrack*
5. *Final failure*



**Gambar 2. 13** Fase-Fase Kegagalan Lelah (*Fatigue*)  
(Antono & Gunawan, 2015)

### 2.1.6.1 Tahapan Inisiasi Retak

Mengingat beban yang cukup besar dan konsentrasi tegangan yang muncul dari perubahan dimensi atau operasi pemesinan, tidak jarang terjadi retakan di permukaan. Selain itu, konsentrasi tegangan juga dapat diakibatkan oleh cacat internal. Fenomena inisiasi retak dapat dijelaskan secara langsung dengan mengacu pada permodelan *Wood*. Gambar 2.14 mengilustrasikan beberapa model yang mencoba menjelaskan retak *fatigue*.



**Gambar 2.14** Model Wood Untuk Pengintian Retak  
Sumber: Kurniawan et al., 2017

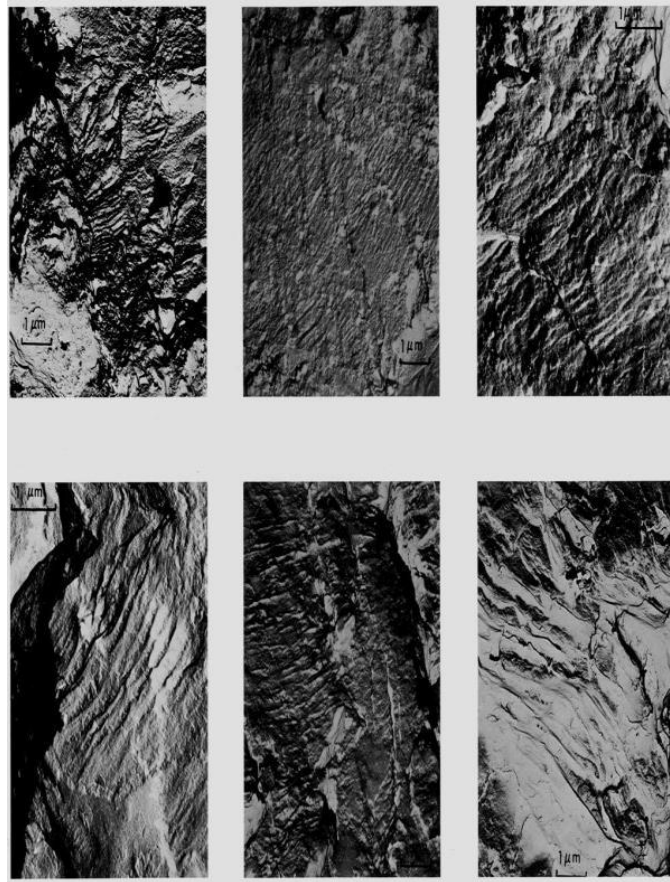
Tegangan geser tertinggi pada sudut tersebut menghasilkan pembentukan permukaan bertingkat pada sudut 45 derajat terhadap sumbu tegangan selama regangan tarik awal. Pada bidang yang berdekatan dengan bidang pertama, gerakan geser terjadi pada arah yang berlawanan ketika

beban kedua diterapkan. Selama siklus pembebanan, proses ini diulangi, dengan terjadinya pergeseran lagi dan pergeseran arah pada setiap siklus pembebanan. Fase slip siklik, fase nukleasi retak, dan pengembangan retak mikro merupakan komponen dari tahap awal retak. Penting untuk diperhatikan bahwa pada setiap siklus pembebanan, terjadi perpindahan arah pergeseran, yang merupakan komponen penting dalam proses yang berulang.

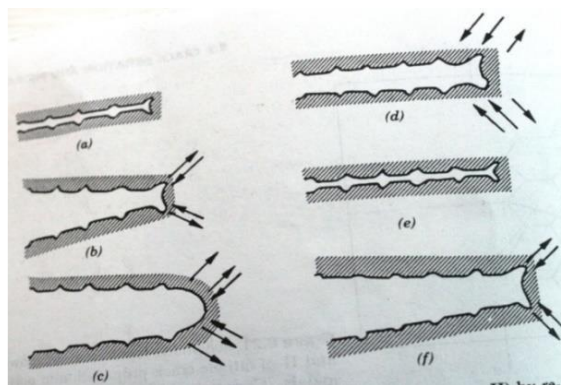
#### **2.1.6.2 Tahapan *Crack Propagation***

Saat tegangan maksimum pada ujung patahan melebihi kekuatan material, retakan akan merambat ke seluruh bagian. Hal ini mengakibatkan peningkatan konsentrasi tegangan pada ujung patahan, dengan perambatan awal retakan pada beberapa permukaan geser partikel terjadi pada tingkat yang relatif lambat. Perambatan ini, yang disebut sebagai perambatan retak Tahap I, tidak terlihat secara makroskopis.

Tahap II: Pengidentifikasian dengan *Striasi* memungkinkan untuk mendeteksi perkembangan patahan lebih lanjut. *Striasi* merupakan garis-garis halus di permukaan yang meluas selama siklus beban. Seperti diilustrasikan pada Gambar 2.15, retakan ini dihasilkan dari perluasan retakan yang ada, yang kemudian diisi dengan material plastis, yang menyebabkan penutupan retakan. Dapat ditunjukkan bahwa penurunan tegangan merupakan sumber dari retakan. Istilah 'retak makro' digunakan untuk menggambarkan titik di mana retak mengembang tegak lurus terhadap tegangan tarik maksimum dan terlihat oleh mata. Dalam penelitian, pengamatan retakan terutama difokuskan pada tahap ini. Ilustrasi mekanisme patah plastis disajikan pada Gambar 2.16 di bawah ini.



**Gambar 2.15** Contoh dari *Striasi* pada Baja Karbon  
(Antono & Gunawan, 2015)



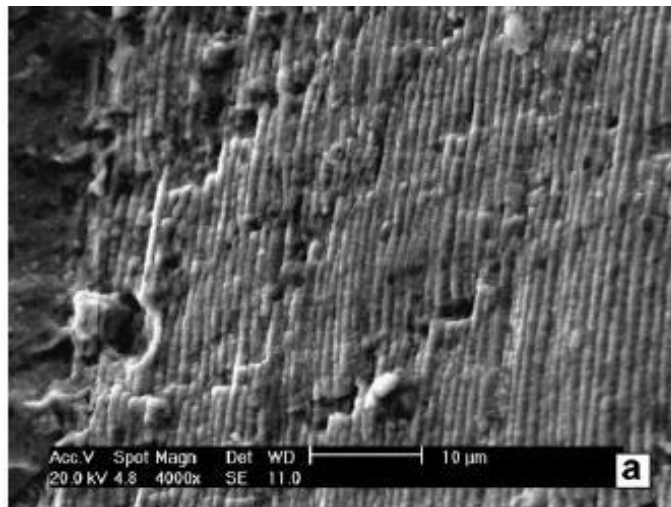
**Gambar 2.16** Mekanisme Penumpukan Ujung Retakan Secara Plastis (a) Beban Nol, (b) Beban Tarik kecil, (c) Beban Tarik Maksimum, (d) Beban Tekan Kecil, (e) Beban Tekan Maksimum, (f) Beban Tarik Kecil  
(Callister Jr & Rethwisch, 2018)

### 2.1.7 Karakteristik Patahan

Empat kategori proses patahan diidentifikasi menjadi patah lelah, patah getas, patah rangkai/monotonik, dan patah ulet. Setiap kategori dibedakan berdasarkan karakteristiknya yang unik. Untuk membedakan antara patah lelah dan patah rangkai, serta patah getas dan patah ulet, perlu dipertimbangkan sejumlah kriteria pada skala makro dan mikro (Koterazawa, 1974).

#### 1. Perbedaan antara karakteristik patah merangkai dan patah lelah

Patah lelah (*fatigue*) dapat diidentifikasi dengan adanya *beachmark* dan *Striasi*, sedangkan patah merangkai (*creep/monotonic*) tidak menunjukkan karakteristik ini. *Beachmark* dapat diamati dengan mengamati secara makro menggunakan mikroskop Stereo, sedangkan *Striasi* dapat dilihat selama fraktografi SEM.



**Gambar 2.17** Gambar SEM Menampilkan *Beachmarks* dan *Striasi*  
(Poursaedi, 2005)

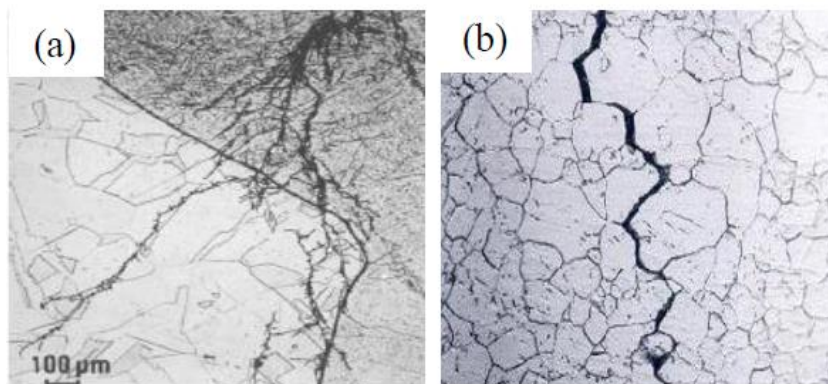
2. Perbedaan karakteristik antara patah getas dengan patah ulet pada skala makro

Dalam skala makro, patahan ulet ditandai dengan perubahan ketinggian di sepanjang penampang benda. Sebaliknya, pola patahan getas dicirikan oleh permukaan patahan yang rata, tegak lurus terhadap arah beban, dan tidak menunjukkan tanda-tanda deformasi plastis sebelum benda patah. Selain kedua ciri tersebut, pola patahan mode campuran juga dapat menyebabkan patahan getas menjadi ulet atau sebaliknya. Mayoritas kasus ini melibatkan patahan getas yang bertransisi menjadi patahan ulet, dengan Gambar 2.3 memberikan contoh ilustrasi patahan ulet.

3. Perbedaan karakteristik antara patah getas dengan patah ulet pada skala mikro

Cekungan pada permukaan patahan merupakan indikasi patahan ulet. Adanya *microvoids* adalah penyebab utama dari fenomena ini, sedangkan terjadinya salah satu peristiwa berikut ini merupakan indikasi fraktur getas:

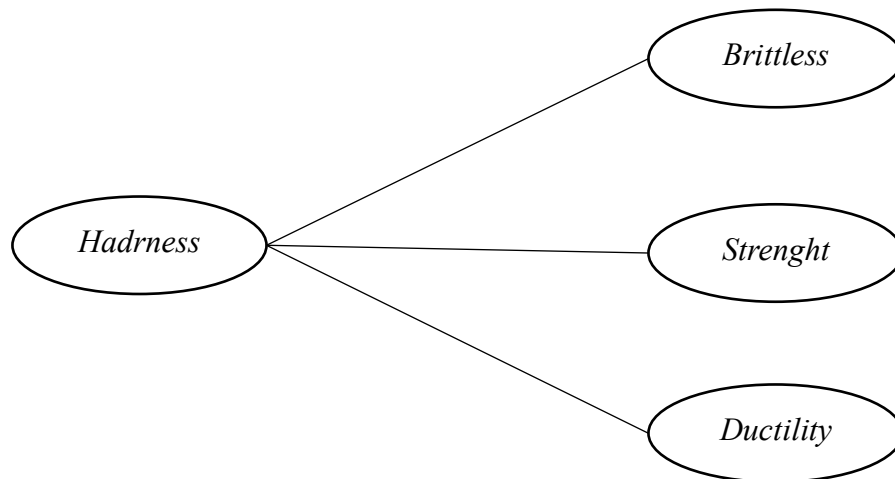
- Gambar 2.18 (a) mengilustrasikan fenomena *cleavage*, yang juga dikenal sebagai patah lintas butir atau *transgranular*.
- Gambar 2.18 (b) menggambarkan *embrittlement intergranular*, yang juga dikenal sebagai patah melintasi batas butir



**Gambar 2.18** Pola Retakan (a) *Transgranular*, (b) *Intergranular*  
(Colangelo, 1989)

### 2.1.8 Uji Kekerasan

Kekerasan material adalah aspek mekanis yang sangat penting, karena mempengaruhi karakteristik lain seperti kekuatan. Selain itu, nilai kekerasan material dapat digunakan dalam perhitungan kekuatan tariknya, Seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.19.



**Gambar 2.19** Karakteristik Material Terkait Kekerasan  
(detech.co.id)

Konsep yang digunakan menentukan metodologi yang digunakan dalam pengujian kekerasan. Dalam bidang teknik logam, kekerasan didefinisikan sebagai ketahanan terhadap abrasi, penetrasi, dan lekukan. Sebaliknya, kapasitas logam untuk menahan deformasi plastis didefinisikan sebagai kekerasannya.

Kekerasan logam dapat ditentukan dengan menggunakan sejumlah uji standar, termasuk Uji Brinell, Rockwell, dan Vickers. Dalam pengujian ini, sebuah *indentor* yang lebih keras dari bahan uji ditekan ke permukaan objek untuk jangka waktu tertentu dan pada beban yang telah ditentukan (biasanya 10 hingga 15 detik). Nilai kekerasan kemudian ditentukan dengan mengukur

ukuran lekukan yang dihasilkan dan membagi gaya yang diberikan dengan luas lekukan.

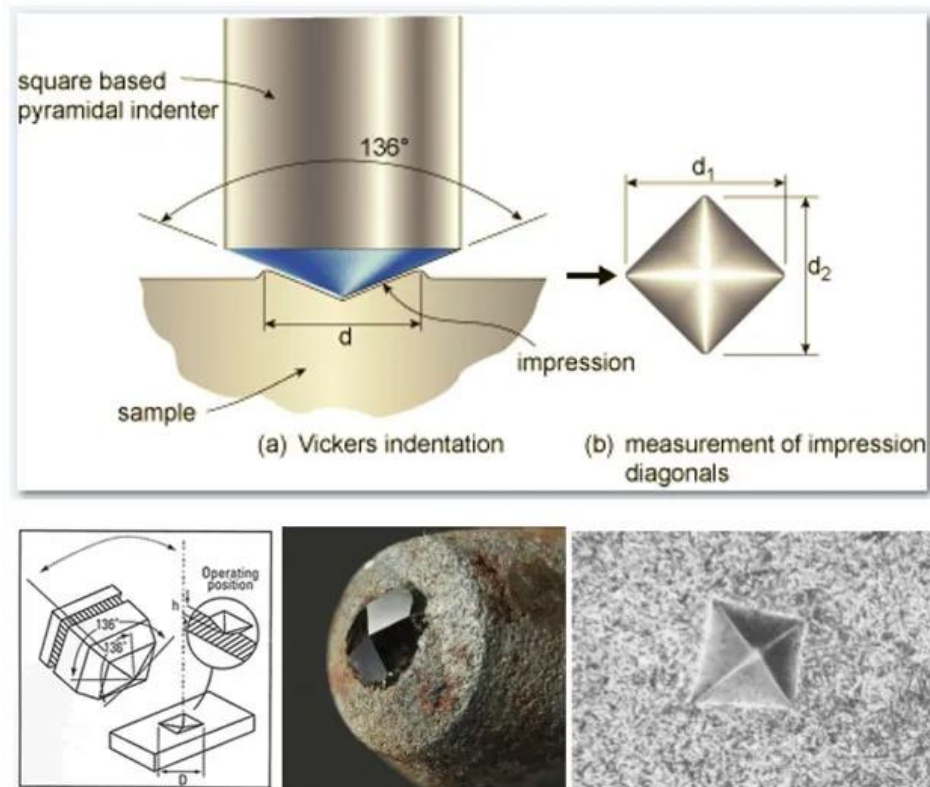
#### **2.1.8.1. Metode Pengujian Kekerasan Vickers**

Uji Vickers didasarkan pada prinsip yang sama seperti Uji Brinell, tetapi menggunakan *indentor* intan dalam bentuk piramida alas persegi dengan sudut puncak 136 derajat. Hal ini memungkinkan pengukuran diagonal bujur sangkar yang lebih akurat, dibandingkan dengan lingkaran yang digunakan dalam Uji Brinell. Pengujian bisa diterapkan pada spesimen setipis 0,006 inci, dan hasil yang dapat dipercaya bisa diperoleh hingga 1300 (setara dengan Brinell 850). Berbeda dengan Uji Brinell, lekukan yang dihasilkan belum tentu rata.

Gaya yang berkisar antara 1 hingga 120 kgf diterapkan selama Uji Vickers. Telah dibuktikan bahwa mengubah beban tidak berpengaruh pada hasil pengujian. Terlepas dari beban yang diterapkan, material yang sama akan menghasilkan nilai yang sama. Rumus berikut dapat digunakan untuk memastikan nilai kekerasan Vickers:

$$HV = 2P \sin(\alpha/2) / d^2 = 1.8544P / d^2 \quad (2.1)$$

Dimana: HV = *Hardness Vickers*, P = Beban (kgf),  $\alpha$  = sudut 2 sisi yang berhadapan pada *indentor*, d = diagonal indentasi rata-rata (mm)



**Gambar 2.20** Pengujian Kekerasan Vickers  
(detech.co.id)

Perlu ditambahkan akhiran yang menunjukkan gaya yang digunakan dan durasi pembebanan pada Nilai Kekerasan Vickers.

#### 2.1.8.2. Metode Pengujian Kekerasan Brinell

Bola baja yang sudah dikeraskan didorong dengan beban tertentu untuk menciptakan indentasi pada permukaan logam sebagai bagian dari uji kekerasan. Permukaan yang akan diindentasi harus bebas dari kontaminasi, rata, dan memiliki tingkat kehalusan yang memadai. Namun demikian, ukuran jejak penekanan dapat menghalangi penggunaan pengujian ini pada spesimen tipis atau kecil, atau pada bagian yang mengalami tekanan yang signifikan, di mana indentasi berpotensi menyebabkan kegagalan.

### **2.1.8.3. Metode Pengujian Kekerasan Rockwell**

Sama halnya dengan Uji Brinell, Uji Rockwell menentukan angka kekerasan berdasarkan kedalaman lekukan. Sesuai dengan keadaan spesifik pengujian, beban dan *indentor* yang berbeda digunakan. Berbeda dengan Uji Brinell, beban dan *indentor* yang lebih kecil digunakan dalam pengujian ini, sehingga menghasilkan indentasi yang lebih kecil dan lebih halus.

## 2.2 Hasil Penelitian Terdahulu

**Tabel 2.4** Review Jurnal Penelitian Terdahulu

1	Judul	<i>Failure analysis of an aluminum extrusion aircraft wing component</i>
	Peneliti	Oinofyta Viotias, Greece
	Metode	<p>Analisis kegagalan pada spar stiffener yang retak pada komponen sayap pesawat ekstrusi aluminium menggunakan metode investigasi sebagai berikut:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Analisis Kimia: Komposisi kimiawi komponen stiffener dianalisis menggunakan spektroskopi XRF agar sesuai dengan nilai spesifikasi menurut standar SAE AMS QQ-A-200/11.</li> <li>2. Pemeriksaan Visual dan Makro-fraktografi: Evaluasi fraktografi digunakan sebagai teknik analisis utama untuk memperoleh bukti mengenai mekanisme retak yang terjadi. Hal ini melibatkan pemeriksaan permukaan retak, yang terdiri dari zona-zona yang berbeda, dan pengamatan makrofraktografi yang mengungkapkan mekanisme kegagalan sinergis yang berkontribusi pada fraktur akhir.</li> <li>3. <i>Stereo</i> dan SEM: Evaluasi makroskopis dari permukaan luar komponen dan pemeriksaan topografi patahan dengan pembesaran rendah dilakukan dengan menggunakan kamera digital dan mikroskop <i>Stereo</i> Nikon SMZ 1500. Analisis fraktografi dengan perbesaran yang lebih tinggi dilakukan dengan menggunakan SEM FEI XL40 SFEG, menggunakan pencitraan elektron sekunder di bawah tegangan akselerasi 20 kV.</li> <li>4. Analisis Elemen Hingga: Metode ini digunakan sebagai salah satu alat analisis utama untuk karakterisasi material dan investigasi kegagalan.</li> </ol>

		<p>Metode ini digunakan untuk menganalisis material, menyelidiki mekanisme kegagalan, dan mengidentifikasi akar penyebab dari spar stiffener yang retak. Kombinasi analisis kimia, pemeriksaan visual, dan teknik mikroskop canggih memberikan pendekatan menyeluruh untuk memahami kegagalan komponen pesawat.</p>
	<p>Hasil</p>	<p>Berdasarkan analisa kegagalan dari <i>fractured spar stiffener</i> pada komponen sayap pesawat ekstrusi aluminium, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Kegagalan <i>spar stiffener</i> disebabkan oleh sinergi dari dua mekanisme: inisiasi retakan pada arah longitudinal ekstrusi akibat korosi yang dibantu oleh lingkungan, diikuti oleh perambatan retakan melalui proses <i>high cycle fatigue</i>.</li> <li>2. Faktor lingkungan, seperti korosi <i>intergranular</i> (IGC) dan retak korosi tegangan (SCC), diidentifikasi sebagai kontributor signifikan terhadap kegagalan komponen.</li> <li>3. Kehadiran struktur butiran kasar pada permukaan komponen ditemukan sebagai faktor potensial dalam inisiasi retak, menyoroti pentingnya struktur mikro material dalam analisis kegagalan.</li> <li>4. Studi ini menyarankan perlakuan panas yang dimodifikasi dari temper T6 ke temper T73 untuk komponen yang didesain ulang, yang menunjukkan potensi perbaikan material dan desain berdasarkan analisis kegagalan.</li> <li>5. Temuan dari analisis kegagalan memberikan wawasan yang berharga tentang mekanisme inisiasi dan perambatan retak, dengan implikasi untuk desain, inspeksi, dan pemeliharaan komponen pesawat serupa yang terbuat dari paduan aluminium 7075-T6.</li> </ol>

		Singkatnya, analisis kegagalan tidak hanya mengidentifikasi akar penyebab dari spar stiffener yang retak, tetapi juga memberikan rekomendasi yang berharga untuk perbaikan material dan desain, serta wawasan untuk industri kedirgantaraan yang lebih luas.
2	Judul	<i>Fatigue failure of aircraft components</i>
	Peneliti	S.K. Bhaumik, M. Sujata, M.A. Venkataswamy
	Metode	Jurnal ini berkonsentrasi pada analisis kegagalan pada komponen pesawat akibat <i>fatigue</i> dan faktor lainnya. Peneliti menggunakan kombinasi metode eksperimental dan analitis untuk menyelidiki kegagalan. Peneliti memasukan data dokumentasi beberapa kegagalan yang terjadi pada komponen pesawat berupa metalografi dan topografi dengan menggunakan mikroskop optik dan SEM sebagai alat uji.
	Hasil	<p>Penelitian pada jurnal ini membahas mengenai penyebab dan analisis kegagalan pada komponen pesawat, terutama berfokus pada kegagalan <i>fatigue</i>. Jurnal ini memberikan contoh kegagalan spesifik, seperti kegagalan batang penghubung dan sambungan roda, serta membahas faktor-faktor yang memengaruhi umur kelelahan komponen-komponen ini. ini menekankan pentingnya proses desain, manufaktur, inspeksi, dan perawatan yang tepat dalam mencegah kegagalan <i>fatigue</i> pada komponen pesawat.</p> <p>Jurnal ini menyatakan bahwa sebagian besar kegagalan servis pada komponen pesawat terjadi karena <i>fatigue</i>, yaitu sekitar 60% dari total kegagalan. juga menekankan perlunya analisis kegagalan yang sistematis untuk menentukan faktor yang bertanggung jawab atas insiden/kecelakaan dan untuk memulai tindakan pencegahan.</p> <p>Secara keseluruhan, Jurnal ini berfungsi sebagai sumber informasi untuk memahami penyebab kegagalan pada</p>

		komponen pesawat terbang dan pentingnya analisis kegagalan dalam industri penerbangan.
	Judul	<i>Failure analysis of two sets of aircraft blades</i>
	Peneliti	E. Silveira, G. Atxaga, A.M. Irisarri
3	Metode	<p>Metodologi yang digunakan untuk analisis kegagalan bilah pesawat, seperti yang dijelaskan dalam jurnal ini, dilakukan dengan beberapa langkah utama:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Pemeriksaan Visual: Langkah awal meliputi pemeriksaan visual pada bilah yang gagal, dengan fokus pada permukaan patahan dan aspek lain yang dapat membantu dalam mengidentifikasi asal mula kegagalan atau mekanisme operasi. Pemeriksaan ini dilakukan dengan menggunakan mata telanjang atau dengan bantuan mikroskop <i>Stereoskopik</i> kecil.</li> <li>2. Analisis Fraktografi: Analisis fraktografi dari permukaan patahan dilakukan dengan menggunakan mikroskop elektron pemindaian (SEM) untuk mengamati aspek-aspek fraktografi. Analisis ini melibatkan identifikasi fase yang berkontribusi terhadap kegagalan menggunakan spektrometri dispersif energi sinar-X.</li> <li>3. Analisis Metalografi: Sampel metalografi diperoleh dari zona tertentu pada bilah, dan sampel ini diperiksa dengan mikroskop elektron optik dan pemindaian setelah dietsa. Kondisi yang belum dietsa pada awalnya diperiksa untuk mengungkapkan aspek-aspek seperti retakan sekunder yang dapat disembunyikan dengan etsa.</li> <li>4. Identifikasi Akar Masalah: Temuan dari analisis <i>visual</i>, <i>fraktografi</i>, dan <i>metalografi</i> digunakan untuk menentukan asal mula kegagalan yang paling masuk akal dan mekanisme kegagalan. Informasi ini sangat penting untuk mengidentifikasi akar penyebab kegagalan.</li> </ol>

		<p>5. Penerapan pada Komponen yang Berbeda: Metodologi ini diterapkan pada berbagai komponen, seperti bilah kompresor dan bilah turbin dari mesin pesawat terbang, untuk menganalisis akar penyebab kegagalan dini mereka.</p> <p>Metodologi ini bertujuan untuk memberikan pemahaman yang menyeluruh mengenai mekanisme kegagalan dan sumber penyebab kegagalan <i>blade</i> prematur pada mesin pesawat terbang, yang pada akhirnya berkontribusi pada pengembangan langkah-langkah pencegahan untuk menghindari kegagalan serupa di masa depan.</p>
	<p>Hasil</p>	<p>Hasil analisis kegagalan blade pesawat, seperti yang diuraikan dalam jurnal ini, menunjukkan adanya hal penting yang berkaitan dengan kegagalan awal pada blade pesawat. Berikut adalah beberapa hasil utama:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Pengamatan Material dan Kerusakan: Blade kompresor yang diperiksa dibuat dengan menggunakan superalloy berbasis dasar nikel 718 yang diperkuat oleh partikel fase c0. Pemeriksaan visual terhadap blade menunjukkan kerusakan yang nyata antara bagian atas blade dan ujung terdepan, yang mengindikasikan adanya deformasi yang signifikan dan hilangnya material di area ini. Selain itu, permukaan patahan ditutupi oleh zat kekuningan, dan endapan tebal diamati melalui analisis fraktografi.</li> <li>2. Analisis Permukaan Fraktur: Analisis fraktografi dari permukaan fraktur dari bilah yang gagal menunjukkan adanya lapisan oksida, dan karbida primer, termasuk karbida hafnium dan tantalum, diidentifikasi memainkan peran penting dalam proses fraktur.</li> <li>3. Penentuan Mekanisme Kegagalan: Studi ini menunjukkan bahwa kegagalan bilah kemungkinan besar disebabkan oleh benturan dari fragmen yang lepas, yang menyebabkan</li> </ol>

		<p>deformasi material yang kuat. Adanya endapan asing pada permukaan patahan mengarah ke kerusakan benda dalam negeri (DOD) yang terkait dengan benturan yang dihasilkan oleh pecahan bilah yang awalnya gagal.</p> <p>4. Penerapan Metodologi: Metodologi yang digunakan untuk analisis kegagalan memberikan wawasan yang berharga mengenai sumber penyebab kegagalan blade awal pada mesin pesawat yang diperiksa. Analisis visual, fraktografi, dan metalografi berkontribusi pada penentuan asal mula kegagalan yang paling masuk akal dan mekanisme kegagalan.</p> <p>Hasil ini menunjukkan pentingnya analisis kegagalan yang menyeluruh dalam memahami faktor-faktor yang mempengaruhi kegagalan blade prematur pada mesin pesawat. Temuan ini dapat digunakan untuk mengembangkan langkah-langkah pencegahan dan meningkatkan desain dan pemeliharaan komponen pesawat untuk mengurangi kegagalan yang sama di masa depan.</p>
4	Judul	<i>Failure Mode Analysis of Aluminium alloy 2024-T3 in Double-Lap Bolted Joints with Single and Double Fasteners; A Numerical and Experimental Study</i>
	Peneliti	Khosro Fallahnezhad, Andrew Steele and Reza H. Oskouei
	Metode	<p>Metodologi penelitian yang digunakan dalam studi "<i>Failure Mode Analysis of Aluminium alloy 2024-T3 in Double-Lap Bolted Joints with Single and Double Fasteners</i>" menggunakan metode eksperimental dan numerik untuk menganalisis perilaku mekanis dan jenis kegagalan sambungan baut. Metode utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Pengujian Eksperimental: Penelitian ini melibatkan pengujian eksperimental untuk mendapatkan kurva beban-</li> </ol>

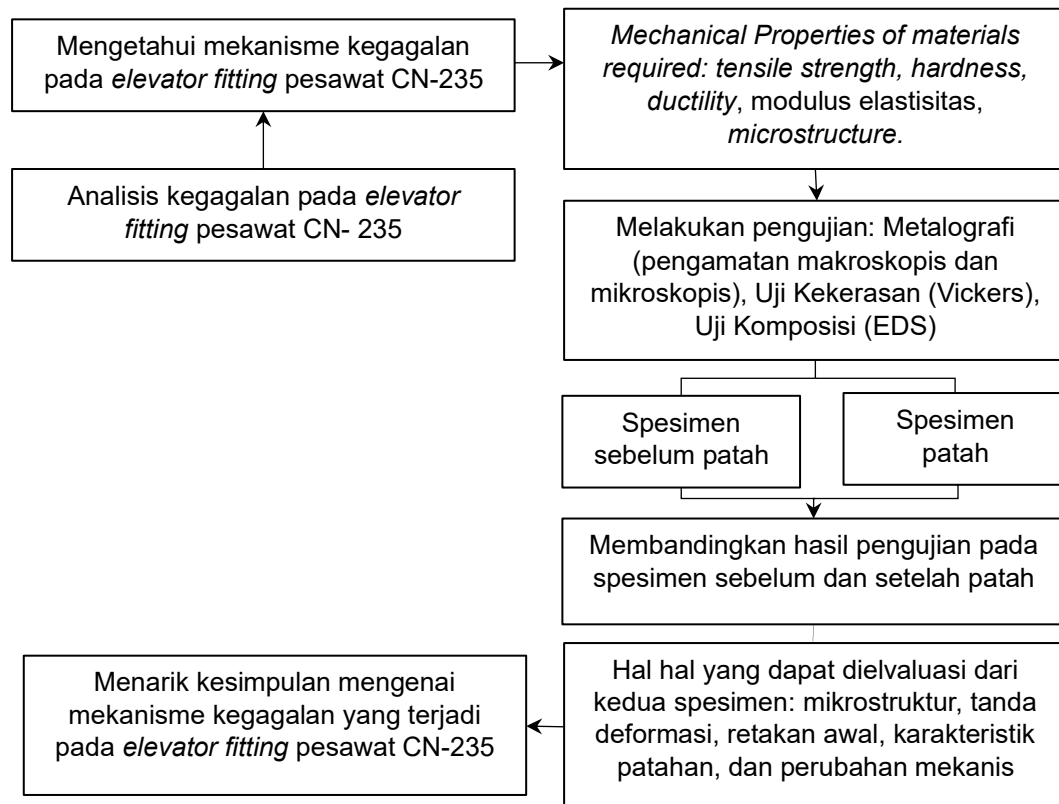
		<p>perpindahan dan deformasi lokal lubang. Perpindahan tarik longitudinal sebesar 4 mm diterapkan pada ujung pelat tengah melalui proses quasi-statis.</p> <p>2. Analisis Elemen Hingga: Model elemen hingga tiga dimensi dikembangkan dengan menggunakan ABAQUS/Standard untuk mensimulasikan perilaku sambungan baut di bawah tegangan. Model ini diverifikasi terhadap hasil eksperimen untuk memastikan keakuratan dan keandalannya.</p> <p>3. Investigasi Variabel Geometrik: Variabel geometris yang berbeda, termasuk lebar pelat dan jarak tepi untuk sambungan baut tunggal dan ganda, dipertimbangkan sebagai variabel dalam model elemen hingga untuk menyelidiki pengaruhnya terhadap distribusi tegangan di dalam sambungan baut dan untuk memprediksi mode kegagalan.</p> <p>4. Perbandingan Hasil Eksperimental dan Numerik: Studi ini melibatkan perbandingan hasil eksperimen dengan simulasi numerik untuk memvalidasi model elemen hingga dan metodologi numerik yang digunakan untuk mengevaluasi variabel geometris yang berbeda.</p> <p>Secara keseluruhan, kombinasi pengujian eksperimental dan analisis elemen hingga memungkinkan penyelidikan komprehensif terhadap perilaku mekanis dan mode kegagalan sambungan baut, memberikan wawasan yang berharga tentang pengaruh parameter geometris pada kinerja sambungan baut tunggal dan ganda.</p>
	<p>Hasil</p>	<p>Studi "<i>Failure Mode Analysis of Aluminium alloy 2024-T3 in Double-Lap Bolted Joints with Single and Double Fasteners</i>" memperoleh beberapa hasil yang signifikan:</p> <p>1. Daya Dukung Beban: Sambungan baut ganda ditemukan memiliki kapasitas angkut beban yang lebih besar daripada</p>

		<p>sambungan baut tunggal, dengan peningkatan berkisar antara 40% hingga 49%.</p> <p>2. Pengaruh Parameter Geometrik pada Sambungan Baut Tunggal: Pada sambungan baut tunggal, lebar pelat memiliki pengaruh yang tidak signifikan terhadap perilaku sambungan di bawah pembebanan tarik. Namun, meningkatkan jarak lubang dari tepi sangat meningkatkan kekuatan sambungan.</p> <p>3. Pengaruh Parameter Geometrik pada Sambungan Baut Ganda: Mengubah jarak tepi hampir tidak berpengaruh pada perilaku sambungan pada sambungan baut ganda. Namun, meningkatkan lebar pelat dari 25,4 menjadi 30 mm meningkatkan daya dukung beban sebesar 28%.</p>
5	Judul	Analisis Kegagalan Komponen <i>Spring Rod</i> dalam <i>Spring Suspension Assembly</i> pada <i>Coal Mill</i> Tuban I PT. Semen Indonesia Tbk
	Peneliti	Ryan Tri Kurniawan, Alvian Toto Wibisono, dan Lukman Noerochim
	Metode	<p>Metodologi penelitian berikut telah digunakan dalam jurnal ini:</p> <p>1 Pemeriksaan catatan perusahaan dilakukan untuk mendapatkan informasi mengenai batang pegas dari perusahaan, dengan tujuan untuk memperkuat temuan studi.</p> <p>2 Spesimen disiapkan dengan memotongnya menjadi dua bagian, satu di dekat patahan dan satu lagi jauh dari patahan, menggunakan potongan kawat dengan dimensi 20 x 20 x 20 mm.</p> <p>3 Penggunaan kamera, mikroskop optik, dan <i>Stereomicroscope</i> digunakan untuk mengamati temuan makro dan mikro untuk memastikan ukuran, bentuk, posisi, fasa, dan penampakan struktur mikro komponen yang mengalami kegagalan.</p>

		<p>4 Pengujian kekerasan dengan teknik Vickers dilakukan di Laboratorium Metalurgi, Jurusan Teknik Material dan Metalurgi, ITS, dengan menggunakan alat Universal Hardness Tester HBRV 187.5A.</p> <p>5 Wilayah dalam material dengan tegangan tertinggi yang dapat patah diidentifikasi melalui metode analisis titik kritis dengan menggunakan metode elemen hingga. Dalam investigasi ini, perangkat lunak untuk simulasi digunakan.</p>
	<p>Hasil</p>	<p>Hasil penelitian yang disajikan dalam jurnal ini mencakup beberapa temuan penting, antara lain:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Uji komposisi memberikan hasil sebagai berikut: Komposisi kimiawi dari sampel uji batang pegas tidak selaras dengan komposisi AISI 4140, bahan standar yang ditetapkan. Selain itu, beberapa komponen material, termasuk nikel, aluminium, dan tembaga, tidak ada dalam standar.</li> <li>2. Pengamatan mikroskopis mengungkapkan hal-hal berikut: Material batang pegas ditemukan menunjukkan fase ferit dan bainit, dengan distribusi fase bainit yang bervariasi antara bagian yang dekat dan jauh dari patahan.</li> <li>3. Pengujian kekerasan dilakukan. Untuk memastikan distribusi kekerasan sampel material, pengujian kekerasan dilakukan.</li> <li>4. Analisis titik kritis (FEM): Analisis titik kritis menggunakan metode elemen hingga dilakukan untuk mengidentifikasi area pada material dengan tegangan tertinggi dan berpotensi mengalami kegagalan.</li> </ol> <p>Dengan semua temuan ini, kondisi material dan mekanisme kegagalan komponen batang pegas pada <i>coal mill</i> sekarang sepenuhnya dipahami.</p>

### 2.3 Kerangka Berpikir

Pada Gambar 2.21 di bawah ini dijelaskan beberapa pengujian digunakan dalam penelitian ini.



**Gambar 2.21** Kerangka Berpikir Penelitian  
(Sumber: diolah oleh peneliti)

### 2.4 Hipotesis

Hipotesis inti dari penelitian ini adalah kegagalan material pada *elevator fitting* pesawat CN-235 terjadi karena kelelahan struktural yang diakibatkan oleh pembebanan siklik selama operasi dan faktor-faktor seperti siklus beban, lingkungan penerbangan, dan sifat material yang dapat memengaruhi ketahanan terhadap kelelahan.