



MATERIAL PESAWAT 1

MATERIAL ALUMINIUM DAN
METODE PENGUJIANNYA

SAHID BAYU SETIAJIT, ST., MT.

MATERIAL PESAWAT 1 MATERIAL ALUMUNIUM DAN METODE PENGUJIANNYA

Sahid Bayu Setiajit, S.T., M.T



MATERIAL PESAWAT 1
MATERIAL ALUMUNIUM DAN METODE
PENGUJIANNYA

Penulis:

Sahid Bayu Setiajit, S.T., M.T

Editor :

Imam Setyo Nugroho, M.Pd.

Ukuran :

Hal. vi, 123, Uk: 15.5x23 cm

ISBN :

.....

Cetakan Pertama :

Juni, 2025

Hak Cipta 2025, Pada Penulis

Isi diluar tanggung jawab percetakan

Copyright © 2025 by Prime Identity House

All Right Reserved

Hak cipta dilindungi undang-undang

Dilarang keras menerjemahkan, memfotokopi, atau memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini tanpa izin tertulis dari Penerbit.

PT Prime Identity House

Anggota IKAPI 396/JTI/2024

Dukuh Dresi, Wagir Kidul, Pulung, Ponorogo, Jawa Timur

Telp: 085157033918

Website: www.primeidentityhouse.com

www.publisher.primeidentityhouse.com

E-mail: primeidentitypublisher@gmail.com

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan ke hadirat Allah SWT atas rahmat dan karunia-Nya sehingga buku ajar ini yang berjudul *Material Pesawat 1 Material Aluminium Dan Metode Pengujiannya* dapat disusun dan diselesaikan dengan baik. Buku ini disusun sebagai bahan ajar bagi dalam memahami dasar-dasar material logam yang digunakan dalam struktur dan komponen pesawat terbang.

Buku ajar ini mencakup materi mengenai karakteristik logam, khususnya aluminium, serta berbagai metode pengujian material seperti uji tarik, uji kekerasan, uji impak, dan pengujian non-destruktif (NDT) seperti inspeksi visual, termografi, dan uji akustik. Penyajian materi didesain selaras dengan Rencana Pembelajaran Semester (RPS) mata kuliah *Material Pesawat*, serta dilengkapi dengan ilustrasi, contoh soal, dan latihan untuk menunjang pemahaman mahasiswa.

Harapan saya, buku ini dapat menjadi referensi yang bermanfaat tidak hanya bagi mahasiswa, tetapi juga bagi dosen dan praktisi yang berkecimpung dalam bidang teknologi pemeliharaan pesawat.

Ucapan terima kasih saya sampaikan kepada rekan-rekan dosen, mahasiswa, dan seluruh pihak yang telah memberikan dukungan serta masukan selama proses penulisan buku ini.

Saya menyadari bahwa buku ini masih memiliki kekurangan. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat saya harapkan demi penyempurnaan di masa mendatang.

Surakarta
Sahid Bayu Setiajit, S.T., M.T

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	iv
DAFTAR ISI	v
BAB 1 PROPERTI MATERIAL DAN PENGUJIAN ...	1
MATERIAL	1
A. PENYAJIAN MATERI	1
B. RANGKUMAN	34
C. LATIHAN SOAL	35
BAB 2 KEGAGALAN MATERIAL: <i>CREEP</i> DAN	
<i>FATIGUE</i>	36
A. PENYAJIAN MATERI	36
B. RANGKUMAN	39
C. LATIHAN SOAL	40
BAB 3 MATERIAL FERROUS: BESI DAN BAJA	41
A. PENYAJIAN MATERI	41
B. RANGKUMAN	45
C. LATIHAN SOAL	46
BAB 4 LOGAM MURNI DAN ALUMINIUM	47
A. PENYAJIAN MATERI	47
B. RANGKUMAN	51
C. LATIHAN SOAL	51
BAB 5 TREATMENT LOGAM CAMPURAN	52
A. PENYAJIAN MATERI	52
B. RANGKUMAN	70
C. LATIHAN SOAL	71
BAB 6 PEMBENTUKAN LOGAM (METAL	
FORMING)	72
A. PENYAJIAN MATERI	73
B. RANGKUMAN	78
C. LATIHAN SOAL	79
BAB 7 KOROSI PADA MATERIAL PESAWAT	80
A. PENYAJIAN MATERI	80
B. RANGKUMAN	109
C. LATIHAN SOAL	115

BAB 8 STUDI KASUS KERUSAKAN KOROSI PADA PESAWAT	116
A. KASUS KOROSI PADA SAYAP ALUMINIUM	116
B. RANGKUMAN.....	120
C. LATIHAN SOAL.....	120
DAFTAR PUSTAKA	122

PRIME IDENTITY HOUSE

BAB 1

PROPERTI MATERIAL DAN PENGUJIAN MATERIAL

Sub-CPMK	- Mampu menjelaskan berbagai jenis properti material dan pengujian material secara baik dan benar.
Indikator	- Ketepatan menjelaskan berbagai jenis properti material
	- Ketepatan menjelaskan berbagai jenis pengujian material serta karakteristik adhesive dan sealant.

A. PENYAJIAN MATERI

Material logam merupakan komponen utama dalam struktur pesawat terbang karena memiliki kekuatan, keawetan, dan keandalan tinggi. Untuk memastikan material tersebut bekerja sesuai harapan, diperlukan pemahaman tentang propertinya serta metode pengujiannya. Materi dalam bab ini membahas karakteristik fisik dan mekanik logam, serta metode pengujian yang digunakan untuk menentukan kualitas dan integritasnya, baik secara destruktif maupun non-destruktif.

1. Properti Material

Material memiliki berbagai sifat yang memengaruhi perilakunya saat digunakan dalam aplikasi struktural. Properti material umumnya diklasifikasikan menjadi dua kategori utama:

a. Sifat Fisik

Sifat fisik adalah karakteristik yang tidak berkaitan dengan kemampuan material menahan beban. Beberapa contoh sifat fisik meliputi:

1) Massa jenis (densitas)

Massa jenis atau density adalah besaran fisika yang menyatakan jumlah massa suatu zat per satuan volume. Sifat ini sangat penting dalam identifikasi dan karakterisasi material, termasuk logam pada pesawat terbang seperti aluminium. Secara umum, massa jenis menunjukkan kepadatan suatu material—semakin tinggi massa jenis, semakin berat material tersebut untuk volume yang sama.

Rumus Massa jenis

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Dengan:

ρ = massa jenis (kg/m³ atau g/cm³)

m = massa benda (kg atau gram)

V = volume benda (m³ atau cm³)

2) Relevansi Massa Jenis dalam Material

Pesawat

- a) Massa jenis rendah sangat diinginkan dalam industri penerbangan untuk mengurangi berat total pesawat.
- b) Aluminium dan paduannya digunakan karena memiliki massa jenis rendah ($\sim 2.7 \text{ g/cm}^3$) namun tetap memiliki kekuatan yang cukup.
- c) Material lain seperti titanium atau komposit serat karbon juga dipilih berdasarkan keseimbangan massa jenis vs kekuatan.

3) Massa Jenis Beberapa Material Umum:

Material	Massa Jenis (g/cm^3)	Keterangan
Aluminium	2,7	Ringan, tahan korosi, umum di badan pesawat
Baja (Steel)	7,8 – 8,0	Kuat, tapi berat
Titanium	4,5	Kuat dan tahan panas
Serat karbon	$\sim 1,6 - 2,0$	Ringan dan sangat kuat (komposit)

4) Konduktivitas termal

- a) Konduktivitas termal adalah kemampuan suatu material untuk menghantarkan panas. Satuan

internasionalnya adalah Watt per meter per Kelvin ($\text{W/m}\cdot\text{K}$).

- b) Semakin tinggi nilai konduktivitas termal, semakin cepat panas dapat merambat melalui material tersebut. Ini merupakan sifat fisik penting dalam desain pesawat, khususnya pada bagian yang mengalami temperatur ekstrem seperti mesin dan sistem pendingin.

Rumus Dasar Konduktivitas Termal (Hukum Fourier)

$$q = -k \cdot \frac{dT}{dx}$$

Dengan:

q = laju aliran panas per satuan luas (W/m^2)

k = konduktivitas termal ($\text{W/m}\cdot\text{K}$)

dT/dx = gradien temperatur (perubahan suhu terhadap jarak)

Interpretasi:

- Panas mengalir dari suhu tinggi ke suhu rendah.
- Nilai k besar \rightarrow material mudah menghantarkan panas.

Contoh Konduktivitas Termal Beberapa Material Umum:

Material	Konduktivitas Termal (W/m·K)	Keterangan
Aluminium	205 – 237	Sangat baik menghantar panas
Baja	45 – 60	Sedang, tapi kuat strukturalnya
Titanium	21 – 25	Rendah, tetapi ringan dan tahan panas
Tembaga (Cu)	~385	Salah satu konduktor panas terbaik
Komposit karbon	~5 – 10 (tergantung arah serat)	Rendah, insulatif

5) Peran Thermal Conductivity di Dunia Penerbangan:

1. Pendinginan Mesin dan Sistem Pembuangan Panas

Material seperti aluminium digunakan karena mampu menghantar panas dari mesin ke udara sekitarnya.

2. Desain Struktur Penahan Panas

Di area suhu tinggi, digunakan material dengan konduktivitas termal rendah untuk isolasi

panas, seperti pada pelindung termal pesawat luar angkasa atau nozzle jet.

3. Manajemen Termal Elektronik Pesawat

Avionik (sistem elektronik di pesawat) memerlukan pembuangan panas yang efisien agar tetap berfungsi optimal.

6) Faktor-faktor yang Mempengaruhi Konduktivitas Termal

(a) Jenis dan struktur atom material

Material logam cenderung memiliki konduktivitas tinggi karena adanya elektron bebas yang membawa energi panas.

(b) Suhu

Pada suhu sangat tinggi, beberapa logam bisa mengalami penurunan konduktivitas karena peningkatan hambatan antar atom.

(c) Kondisi mikrostruktur

Adanya cacat, pori, atau batas butir dapat memperlambat perambatan panas.

(d) Konduktivitas Listrik

Konduktivitas listrik adalah kemampuan suatu material untuk menghantarkan arus listrik. Besarnya konduktivitas bergantung pada

jumlah dan mobilitas elektron bebas di dalam material. Semakin tinggi konduktivitas listrik, semakin mudah arus listrik mengalir melalui material tersebut.

(e) Satuan dan Rumus

Satuan SI: Siemens per meter (S/m)

Simbol: σ (konduktivitas)

(f) Hubungan dengan resistivitas:

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

Dengan:

σ = konduktivitas listrik (S/m)

ρ = resistivitas listrik ($\Omega \cdot m$)

7) Relevansi Konduktivitas Listrik pada Material Pesawat:

(a) Sistem Kelistrikan Pesawat

- Kabel penghubung, konektor, dan rangkaian listrik memerlukan material konduktif.
- Aluminium sering digunakan untuk kabel pesawat karena ringan dan cukup konduktif (walaupun tidak sebaik tembaga).

(b) Pencegahan Akumulasi Muatan Listrik

- Permukaan logam yang konduktif dapat mengalirkan muatan listrik (misalnya akibat petir) agar tidak terakumulasi dan menyebabkan kerusakan sistem elektronik.

(c) Komponen Struktur Pesawat

- Rangka pesawat berbahan aluminium atau titanium biasanya cukup konduktif untuk membuang muatan listrik secara aman ke struktur pesawat.

8) Faktor yang Mempengaruhi Konduktivitas Listrik:

(a) Jenis Material

Logam memiliki banyak elektron bebas, sehingga sangat konduktif.

(b) Suhu

Umumnya, kenaikan suhu akan menurunkan konduktivitas logam karena peningkatan getaran atom (hambatan elektron meningkat).

(c) Kemurnian Logam

Impuritas atau paduan dapat menghambat aliran elektron, sehingga menurunkan konduktivitas.

(d) Struktur Kristal dan Cacat

Batas butir, dislokasi, dan porositas juga mengurangi konduktivitas.

Konduktivitas Listrik Beberapa Material:

Material	Konduktivitas (S/m)	Catatan
Tembaga (Cu)	$\sim 5,96 \times 10^7$	Konduktor terbaik, standar industri
Perak (Ag)	$\sim 6,30 \times 10^7$	Konduktor terbaik secara teoritis, mahal
Aluminium (Al)	$\sim 3,5 \times 10^7$	Ringan, cukup baik, banyak digunakan di pesawat
Baja	$\sim 6 - 10 \times 10^6$	Konduktivitas rendah, lebih difokuskan ke kekuatan
Karet, keramik	$\sim 10^{-8} - 10^{-16}$	Isolator listrik

9) Titik leleh

Titik leleh adalah suhu tertentu di mana suatu material berubah dari fase padat menjadi fase cair dalam kondisi tekanan atmosfer normal (1 atm atau 101,3 kPa). Pada titik ini, partikel-partikel dalam padatan memiliki energi kinetik yang cukup untuk mengatasi gaya tarik-menarik antar atom atau molekul, sehingga berubah menjadi cairan.

10) Karakteristik Titik Leleh:

- (a) Suhu tetap selama proses peleburan berlangsung (untuk zat murni).
- (b) Merupakan sifat fisik khas suatu material, khususnya logam.
- (c) Titik leleh logam menunjukkan kekuatan ikatan antar atom: makin kuat ikatan, makin tinggi titik lelehnya.

Contoh Titik Leleh Material Logam Umum:

Material	Titik Leleh (°C)	Keterangan
Aluminium (Al)	660,3	Relatif rendah, mudah dibentuk

Titanium (Ti)	1.668	Tinggi, tahan suhu ekstrem
Baja (Steel)	1.370 – 1.510	Tergantung komposisi
Tembaga (Cu)	1.085	Baik untuk penghantar panas/listrik
Magnesium (Mg)	650	Rendah, ringan tapi mudah terbakar

11) Relevansi Titik Leleh dalam Material Pesawat

(a) Ketahanan Suhu Tinggi

Material struktur dan mesin pesawat harus tidak meleleh atau melemah pada suhu kerja tinggi, seperti pada turbin atau nozzle jet.

(b) Proses Fabrikasi

Pengetahuan titik leleh penting dalam proses penuangan (casting), pengelasan (welding), dan pemanasan logam.

(c) Pemilihan Material

Titik leleh menjadi salah satu pertimbangan penting dalam pemilihan material untuk bagian yang terpapar panas tinggi.

12) Faktor yang Mempengaruhi Titik Leleh:

(a) Jenis Ikatan Atom

Ikatan logam atau kovalen yang kuat → titik leleh tinggi.

Ikatan Van der Waals lemah → titik leleh rendah.

(b) Struktur Kristal

Material dengan struktur kristal tertentu (misalnya FCC, BCC) memiliki kestabilan termal berbeda.

(c) Kotoran/Impuritas

Campuran atau kontaminan dapat menurunkan titik leleh material (fenomena *depresi titik leleh*).

b. Sifat Mekanik

Sifat mekanik menunjukkan bagaimana suatu material bereaksi terhadap gaya luar. Sifat ini sangat penting dalam perancangan dan pemeliharaan struktur pesawat. Beberapa sifat mekanik yang umum adalah:

1. Kekuatan tarik (tensile strength)

Kekuatan tarik adalah kemampuan suatu material untuk menahan gaya tarik (gaya yang mencoba meregangkan material) sebelum mengalami kerusakan atau patah. Ini merupakan salah satu sifat mekanik utama dalam desain dan pemeliharaan komponen pesawat.

Dalam pengujian tarik, spesimen logam ditarik secara perlahan oleh mesin uji sampai putus. Dari uji ini dihasilkan data berupa kurva tegangan-regangan (stress-strain curve).

a) Jenis-Jenis Kekuatan Tarik

Dari uji tarik, dapat diperoleh beberapa parameter penting:

- **Kekuatan Tarik Maksimum (Ultimate Tensile Strength / UTS)**

Tegangan maksimum yang dicapai material sebelum patah. Ini menunjukkan batas kekuatan maksimum material.

- **Tegangan Luluh (Yield Strength)**

Tegangan di mana material mulai mengalami deformasi plastis (tidak kembali ke bentuk semula).

- **Modulus Elastisitas (Young's Modulus / E)**

Kemampuan material untuk kembali ke bentuk awal setelah diberi beban dalam rentang elastis.

b) Rumus Kekuatan Tarik

a. Tegangan (σ)

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

Keterangan:

σ = tegangan tarik (N/mm² atau MPa)

F = gaya tarik maksimum (N)

A = luas penampang awal (mm²)

b. Regangan (ϵ)

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

Keterangan:

ϵ = regangan (tanpa satuan)

ΔL = perubahan panjang (mm)

L_0 = panjang awal (mm)

2. Kekerasan (hardness):

Kekerasan adalah kemampuan suatu material untuk menahan penetrasi, goresan, atau deformasi plastik pada permukaan ketika diberikan beban dari luar. Kekerasan berhubungan langsung dengan ketahanan aus (wear resistance), daya tahan terhadap deformasi lokal, dan kekuatan permukaan material. Sifat ini sangat penting dalam menentukan ketahanan suatu komponen terhadap tekanan, gesekan, dan benturan selama pengoperasian pesawat.

a) Kekerasan Penting dalam Dunia Penerbangan

- Menentukan daya tahan aus pada komponen mesin, landing gear, roda, dan sambungan
- Menilai efek perlakuan panas pada logam (apakah struktur mengeras atau tidak)
- Menguji material yang telah digunakan untuk memastikan tidak terjadi degradasi mekanik

b) Jenis-Jenis Pengujian Kekerasan

Tiga metode utama pengujian kekerasan pada logam:

a. Brinell Hardness Test (HB)

- Menggunakan bola baja atau tungsten karbida berdiameter tertentu
- Ditekan ke permukaan material dengan beban besar (500–3000 kgf)
- Cocok untuk material **lunak hingga menengah** dan permukaan **kasar**

Rumus Brinell:

$$HB = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Keterangan:

F = gaya tekan (kgf)

D = diameter bola (mm)

d = diameter lekukan (mm)

b. Rockwell Hardness Test (HR)

- Menggunakan skala dan indenter berbeda (bola atau kerucut intan)
- Cepat dan tidak merusak banyak material
- Ada berbagai skala:
 - HRC (untuk baja keras)
 - HRB (untuk kuningan, aluminium)

Catatan: Tidak memerlukan rumus langsung karena nilai terbaca dari skala mesin.

c. Vickers Hardness Test (HV)

- Menggunakan piramida intan sebagai indenter
- Cocok untuk **pengujian presisi tinggi**, termasuk logam tipis atau area kecil
- Dapat digunakan untuk semua logam

Rumus Vickers:

$$HV = \frac{1.854F}{d^2}$$

Keterangan:

F = beban (kgf)

d = panjang diagonal rata-rata lekukan (mm)

Perbandingan Metode

Metode	Cocok untuk	Keuntungan	Kekurangan
Brinell	Logam lunak-sedang	Sederhana, kuat	Kurang presisi, lekukan besar
Rockwell	Logam sedang-keras	Cepat, mudah digunakan	Tidak cocok untuk logam tipis
Vickers	Semua logam	Sangat presisi, universal	Butuh mikroskop & operator ahli

Contoh Hasil Kekerasan

Material	HB	HRC	HV
Aluminium murni	15-25	—	20-40
Aluminium 7075-T6	130-150	40-45	150-170
Baja karbon menengah	180-250	20-35	200-300
Baja alat (tool steel)	>500	>60	>600

3. Kelenturan (ductility):

Kelenturan atau dalam istilah teknik disebut ductility, adalah kemampuan suatu material untuk mengalami deformasi plastis (perubahan bentuk permanen) sebelum patah, khususnya saat dikenai gaya tarik.

Material yang ductile tidak langsung patah saat diberi beban, tetapi memanjang atau menipis terlebih dahulu, sehingga kerusakannya dapat dideteksi lebih awal ini sangat penting dalam industri penerbangan.

Indikator Kelenturan

Kelenturan biasanya diukur dari hasil uji tarik dan ditunjukkan dalam dua parameter:

- % Elongation (perpanjangan)

$$\% \text{Elongasi} = \frac{L_f - L_0}{L_0} \times 100\%$$

Keterangan:

L_f = Panjang akhir setelah patah

L_0 = Panjang awal

- % Reduction of area (penyusutan luas penampang)

$$\% \text{Reduksi Area} = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \times 100\%$$

Keterangan :

A_0 = luas penampang awal

A_f = luas penampang akhir

Semakin tinggi nilai elongasi dan penyusutan area, semakin ductile material tersebut.

Karakteristik Material Ductile

- Tidak patah secara tiba-tiba → **memberi peringatan sebelum gagal**
- Mampu menyerap energi tinggi sebelum patah
- Dapat ditarik, digulung, atau dibentuk tanpa retak
- **Contoh:** aluminium, tembaga, baja lunak

Perbandingan dengan Brittle (Rapuh)

Sifat	Ductile	Brittle
Perubahan bentuk	Banyak (plastis)	Sedikit atau tidak ada
Contoh	Aluminium, baja lunak	Kaca, keramik, cor besi
Energi sebelum patah	Tinggi	Rendah
Tanda kerusakan	Terlihat (necking, retak kecil)	Tiba-tiba patah

Relevansi dalam Industri Pesawat

- Komponen pesawat harus memiliki kelenturan cukup, agar dapat menahan getaran, tekanan, atau benturan tanpa langsung patah.
- Skin pesawat, panel, dan saluran bahan bakar biasanya menggunakan material yang ductile agar lebih aman terhadap deformasi kecil.

Contoh Nilai Ductility (Elongation %)

Material	% Elongation
Aluminium 6061-T6	10–17%
Baja karbon rendah	25–35%
Tembaga murni	30–40%
Besi cor	< 5% (brittle)

4. Ketangguhan (toughness)

Toughness atau ketangguhan adalah kemampuan suatu material untuk menyerap energi dan mengalami deformasi plastis yang signifikan sebelum mengalami patah. Toughness merupakan gabungan dari dua sifat mekanik utama, yaitu kekuatan (strength) dan keuletan (ductility).

Secara grafik, toughness dapat dilihat dari luas area di bawah kurva tegangan-regangan (stress-strain curve). Semakin luas area tersebut, semakin tinggi nilai toughness material tersebut.

Toughness dan Hubungannya dengan Sifat Mekanik Lain

Sifat Mekanik	Definisi Singkat	Hubungan dengan Toughness
Kekuatan (Strength)	Kemampuan material menahan beban tanpa patah	Komponen penting dalam menentukan toughness
Keuletan (Ductility)	Kemampuan mengalami deformasi plastis sebelum patah	Menentukan seberapa jauh material bisa berubah bentuk sebelum patah
Kekerasan (Hardness)	Ketahanan terhadap penetrasi atau goresan	Tidak berkaitan langsung, tapi bisa memengaruhi ketahanan terhadap keausan
Toughness (Ketangguhan)	Kombinasi dari kekuatan dan keuletan, menyerap energi sebelum patah	Menunjukkan kemampuan menyerap energi dalam kondisi ekstrem

Metode Pengujian Toughness

Beberapa metode umum untuk mengukur toughness material antara lain:

a. Uji Charpy atau Izod (Impact Test)

Uji ini dilakukan dengan memukul spesimen bertakik (notch) menggunakan pendulum dan mengukur energi yang dibutuhkan untuk mematahkan spesimen. Hasil pengujian biasanya dinyatakan dalam satuan **Joule (J)**.

b. Fracture Toughness (Ketangguhan terhadap Retakan)

Fracture toughness mengukur ketahanan suatu material terhadap pertumbuhan retakan yang telah ada. Nilainya dinyatakan dalam $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$, dan sangat penting dalam desain struktur pesawat karena adanya kemungkinan retakan mikro akibat kelelahan (fatigue) selama penggunaan.

Faktor yang Mempengaruhi Toughness pada Aluminium

Beberapa faktor yang mempengaruhi nilai toughness logam aluminium antara lain:

- **Komposisi Paduan:** Berbagai jenis paduan aluminium seperti 2024, 6061, atau 7075 memiliki toughness yang berbeda.
- **Kondisi Perlakuan Panas:** Misalnya kondisi T6, O, atau T3 dapat memengaruhi struktur mikro dan sifat mekanik.
- **Struktur Mikro:** Grain size dan adanya fasa kedua dalam mikrostruktur turut menentukan toughness.
- **Temperatur Operasi:** Aluminium dapat menjadi lebih getas pada suhu sangat rendah.
- **Siklus Beban (Fatigue):** Siklus beban yang berulang dapat menurunkan toughness seiring waktu karena pertumbuhan mikro-retak.

Relevansi Toughness dalam Struktur Pesawat

Dalam struktur pesawat, toughness sangat penting untuk mencegah kegagalan mendadak (catastrophic failure) akibat adanya retakan kecil atau kerusakan tak terlihat. Komponen seperti sayap, badan pesawat (fuselage), dan sambungan (riveted joints) didesain agar memiliki ketangguhan yang cukup melalui konsep **damage tolerance**, yaitu kemampuan struktur untuk tetap berfungsi walaupun terdapat cacat kecil.

1. **Modulus elastisitas (E):** adalah ukuran kekakuan suatu material, yaitu **kemampuan material untuk menahan deformasi elastis saat diberikan tegangan.**

Definisi Teknis

Modulus elastisitas adalah **rasio antara tegangan (stress) dan regangan (strain)** dalam daerah elastis (yaitu saat material masih bisa kembali ke bentuk semula setelah beban dilepaskan).

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

Keterangan:

E = modulus elastisitas (Pa atau GPa)

σ = tegangan (N/m²)

ϵ = regangan (tanpa satuan)

Karakteristik:

- Semakin **besar** nilai E, semakin **kaku** materialnya (sulit berubah bentuk).
- Semakin **kecil** nilai E, semakin **lentur** atau fleksibel material tersebut.

Contoh Nilai Modulus Elastisitas:

Material	Modulus Elastisitas (GPa)
Aluminium	~69 GPa
Baja (steel)	~200 GPa
Titanium	~110 GPa
Karet alami	~0,01–0,1 GPa

Adhesive dan Sealant pada Struktur Pesawat

Dalam industri kedirgantaraan, penyambungan material seperti aluminium tidak hanya dilakukan melalui pengelasan atau pengeling, tetapi juga menggunakan bahan kimia seperti adhesive dan sealant. Keduanya memiliki peran penting dalam memastikan integritas struktural dan perlindungan dari lingkungan ekstrem.

1. Adhesive (Perekat)

Definisi

Adhesive adalah bahan kimia yang digunakan untuk merekatkan dua permukaan, biasanya logam, plastik, atau komposit, menjadi satu kesatuan secara permanen.

Fungsi di Pesawat:

- Menyambung bagian struktural (misalnya panel aluminium pada sayap atau badan pesawat).

- Menggantikan paku keling pada area tertentu untuk mengurangi bobot.
- Mengurangi tegangan lokal akibat metode penyambungan mekanis.
- Menyediakan distribusi beban yang merata di seluruh area sambungan.

Jenis-Jenis Adhesive:

- *Epoxy adhesive*: paling umum, kuat, tahan suhu tinggi.
- *Acrylic adhesive*: cepat kering, daya rekat tinggi, cocok untuk logam.
- *Polyurethane adhesive*: lebih fleksibel, cocok untuk sambungan yang mengalami deformasi.
- *Silicone adhesive*: tahan terhadap suhu ekstrem dan getaran.

Keunggulan:

- Berat ringan.
- Distribusi tegangan merata.
- Tahan terhadap korosi (tidak seperti sambungan mekanis).
- Estetika lebih baik (tidak terlihat dari luar).

Keterbatasan:

- Waktu pengeringan (*curing*) bisa lama.

- Tidak cocok untuk semua jenis beban (misalnya beban tarik tinggi tanpa pendukung mekanik).
- Proses aplikasinya memerlukan kontrol yang ketat.

2. Sealant (Penyekat)

Definisi

Sealant adalah bahan yang digunakan untuk mengisi celah atau sambungan guna mencegah masuknya udara, air, bahan kimia, atau uap.

Fungsi di Pesawat:

- Mencegah kebocoran bahan bakar di tangki (*fuel tank sealant*).
- Melindungi sambungan dari kelembaban, korosi, dan kontaminan.
- Menyerap getaran dan pergerakan termal.
- Penyekat panel di area tekanan tinggi seperti kabin.

Jenis-Jenis Sealant:

- *Polysulfide sealant*: tahan bahan bakar dan pelarut, digunakan di tangki bahan bakar.
- *Silicone sealant*: tahan suhu ekstrem, fleksibel.
- *Urethane sealant*: cepat kering, fleksibel.
- *Butyl rubber sealant*: tahan air, digunakan di area tekanan rendah.

Keunggulan:

- Melindungi terhadap korosi antarmuka logam.
- Meningkatkan daya tahan struktural terhadap lingkungan.
- Fleksibel terhadap pergerakan struktural.

Keterbatasan:

- Harus diaplikasikan secara tepat untuk efektivitas maksimum.
- Beberapa jenis memerlukan waktu curing lama.
- Beberapa sealant bisa mengeras dan retak seiring waktu.

Contoh Penggunaan Adhesive dan Sealant pada Pesawat

- Pada pesawat Boeing dan Airbus, adhesive digunakan untuk merekatkan panel *skin* dengan struktur rangka.
- Sealant diaplikasikan pada sambungan tangki bahan bakar untuk mencegah kebocoran.
- Kombinasi adhesive dan sealant juga digunakan untuk menyambung dan melindungi struktur komposit dan aluminium.

2. Metode Pengujian Material

Pengujian material diperlukan untuk menilai sifat dan kualitas material yang akan digunakan atau telah

mengalami proses tertentu. Berikut adalah metode pengujian yang umum digunakan:

a. Uji Tarik (Tensile Test)

Uji tarik digunakan untuk menentukan kekuatan tarik, regangan maksimum, dan modulus elastisitas suatu material. Spesimen ditarik secara perlahan hingga putus dan menghasilkan kurva tegangan-regangan.

b. Uji Kekerasan (Hardness Test)

Uji ini mengukur ketahanan material terhadap penetrasi. Metode pengujian kekerasan antara lain:

- **Brinell Hardness Test (HB)**
- **Rockwell Hardness Test (HR)**
- **Vickers Hardness Test (HV)**

c. Uji Impak (Impact Test)

Uji impak mengukur ketangguhan material saat menerima beban mendadak. Dua metode umum:

- **Uji Charpy**

Uji Impak Charpy (Charpy Impact Test)

Pengertian

Uji impak Charpy adalah pengujian mekanik yang digunakan untuk mengukur **ketangguhan material** (toughness), yaitu kemampuan material untuk menyerap energi sebelum mengalami patah akibat beban kejut (beban mendadak).

Pengujian ini sangat penting untuk mengetahui apakah suatu material masih dapat menahan beban dalam kondisi **suhu rendah**, **beban mendadak**, atau **benturan keras**, seperti yang bisa terjadi pada pesawat saat terjatuh atau dalam kondisi turbulensi ekstrem.

Tujuan Pengujian

1. Mengetahui jumlah energi yang diserap oleh material sebelum patah.
2. Menganalisis sifat getas (*brittle*) atau ulet (*ductile*) suatu bahan.
3. Menentukan suhu transisi getas–ulet (*ductile-to-brittle transition temperature*).
4. Mengetahui ketahanan material terhadap beban kejut.

Prinsip Kerja

Spesimen uji berbentuk **balok kecil dengan takikan V** diletakkan secara horizontal di antara dua penyangga. Palu pendulum dilepaskan dari ketinggian tertentu dan menghantam spesimen tepat di sisi berlawanan dari takikan. Energi yang terserap oleh material hingga patah diukur melalui perubahan energi kinetik palu.

Karakteristik Spesimen Uji

- **Bentuk:** Balok persegi panjang standar dengan panjang ± 55 mm, tinggi ± 10 mm.

- **Takik (notch):** Berbentuk huruf V (V-notch) sedalam 2 mm dengan sudut 45° .
- **Letak takik:** Di bagian tengah sisi tegak lurus terhadap arah tumbukan.

Diagram Skematik Uji Charpy

Saya akan sertakan ilustrasi berikut ini untuk memudahkan pemahaman (gambar akan saya tampilkan di bawah bila diminta):

- Palu pendulum dijatuhkan dari ketinggian tetap
- Menumbuk spesimen pada titik lawan dari takik
- Energi yang diserap diukur dari beda ketinggian ayunan awal dan akhir

Energi Impak

Energi impak merupakan energi yang diserap oleh spesimen hingga patah, dinyatakan dalam satuan **joule (J)**.

Suhu Transisi Getas-Ulet

Beberapa logam menunjukkan sifat ulet pada suhu tinggi namun menjadi getas saat suhu turun. Suhu di mana material berubah sifat dari ulet ke getas disebut ductile-to-brittle transition temperature.

Contohnya:

- Aluminium: tidak memiliki suhu transisi getas yang nyata — tetap relatif ulet pada berbagai suhu.
- Baja karbon: menunjukkan transisi getas-ulet yang signifikan.

Interpretasi Hasil Uji

1. Energi rendah (<10 J) → Material getas, patah secara cepat.
2. Energi sedang (10–30 J) → Material mulai menunjukkan sifat ulet.
3. Energi tinggi (>30 J) → Material ulet, mampu menyerap banyak energi sebelum patah.

Patahan juga dapat diamati:

- Patahan getas: permukaan halus, bersinar.
- Patahan ulet: permukaan kasar, berserabut.

Contoh Penggunaan dalam Industri Pesawat

- Menilai kinerja aluminium atau paduannya pada suhu ekstrem.
- Menghindari kegagalan mendadak struktur akibat benturan (misalnya saat pendaratan keras).
- Mengevaluasi bahan pelat logam untuk skin, spar, atau fitting struktural.

- **Uji Izod**

- **Pengertian**

- Uji impak Izod adalah metode pengujian mekanik yang digunakan untuk mengukur ketangguhan material terhadap beban kejut, mirip dengan uji Charpy. Bedanya, pada uji Izod, spesimen ditegakkan secara vertikal dan palu pendulum menghantam bagian atas spesimen yang memiliki takikan di bagian depan, menghadap palu.

- **Tujuan Pengujian**

- Menentukan jumlah energi yang diserap oleh spesimen hingga patah akibat benturan cepat.
- Menganalisis apakah material bersifat ulet atau getas saat menerima beban mendadak.
- Membandingkan ketangguhan antar material dalam kondisi standar.
- Digunakan dalam kontrol kualitas terutama pada plastik teknik, komposit, dan logam ringan.

- **Perbedaan Utama dengan Uji Charpy**

Aspek	Uji Charpy	Uji Izod
Posisi spesimen	Horizontal	Vertikal
Arah takikan	Menjauhi arah tumbukan	Menghadap arah tumbukan
Penempatan palu	Menumbuk tengah spesimen	Menumbuk atas spesimen
Dukungan spesimen	Dua sisi (seperti jembatan)	Satu sisi (seperti kantilever)

Uji Non-Destruktif (*Non-Destructive Testing/NDT*)

Uji ini digunakan untuk mendeteksi cacat atau kerusakan pada material tanpa merusaknya. Contoh metode:

- *Visual Inspection*
- *Dye Penetrant Test*
- *Ultrasonic Testing*
- *Radiographic Testing*

B. RANGKUMAN

- Material memiliki sifat fisik (seperti massa jenis dan titik leleh) dan sifat mekanik (seperti kekuatan tarik dan kekerasan).

- Adhesive digunakan untuk menyatukan permukaan, sedangkan sealant mencegah masuknya cairan/gas.
- Pengujian material penting dilakukan untuk memastikan keamanan dan kelaikan material dalam aplikasi penerbangan.
- Uji tarik, kekerasan, dampak, dan NDT merupakan bagian dari proses evaluasi kualitas material.

C. LATIHAN SOAL

1. Jelaskan perbedaan antara sifat fisik dan sifat mekanik material logam!
2. Sebutkan tiga metode pengujian material dan fungsi utamanya!
3. Apa perbedaan antara adhesive dan sealant dalam aplikasi pemeliharaan pesawat?

BAB 2

KEGAGALAN MATERIAL: *CREEP* DAN *FATIGUE*

Sub-CPMK	- mampu menjelaskan berbagai jenis properti material dan pengujian material secara baik dan benar.
Indikator	- Ketepatan menjelaskan kegagalan Creep dan Fatigue pada material logam.

A. Penyajian Materi

Dalam dunia penerbangan, komponen pesawat bekerja dalam kondisi beban yang berat, suhu tinggi, serta tekanan berulang. Kondisi ini dapat menyebabkan kegagalan material yang tidak terjadi secara tiba-tiba, tetapi secara bertahap akibat beban jangka panjang maupun beban siklik. Dua jenis kegagalan utama yang sering terjadi pada material logam adalah creep dan fatigue.

Pemahaman terhadap mekanisme kegagalan ini penting agar teknisi dapat mengenali tanda-tanda awal kerusakan, menentukan waktu perawatan, serta memilih material dan metode fabrikasi yang sesuai dengan kondisi operasi.

3.2 Creep

Creep adalah deformasi plastis permanen yang terjadi secara perlahan pada material saat dikenai beban konstan dalam waktu lama pada suhu tinggi (biasanya di atas 0,4 dari suhu leleh logam dalam Kelvin).

Contoh kasus: bilah turbin pesawat yang bekerja dalam suhu sangat tinggi dan beban tetap akan mengalami creep seiring waktu.

Karakteristik creep:

- Terjadi pada suhu tinggi
- Berlangsung secara perlahan
- Deformasi terjadi walau tegangan di bawah batas luluh

Tiga tahap *creep*:

1. *Primary creep* – laju deformasi menurun seiring waktu
2. *Secondary creep (steady-state)* – laju deformasi konstan
3. *Tertiary creep* – laju deformasi meningkat tajam hingga gagal

Faktor yang memengaruhi *creep*:

- Suhu operasi
- Waktu pemaparan
- Besar beban

- Struktur mikro material

Pengendalian creep:

- Pemilihan material tahan suhu tinggi (seperti superalloy)
- Desain geometri yang memperkecil tegangan
- Perlakuan panas untuk memperbaiki struktur mikro

3.3 Fatigue

Fatigue adalah kegagalan material yang terjadi akibat pembebanan berulang (siklik), meskipun tegangan yang diterima lebih kecil dari tegangan luluh material.

Contoh kasus: sayap pesawat yang mengalami beban angkat dan gravitasi berulang saat lepas landas dan mendarat.

Tahapan kegagalan fatigue:

1. Inisiasi retak mikro di titik konsentrasi tegangan (seperti sudut tajam, lubang)
2. Perkembangan retak seiring siklus beban berulang
3. *Fraktur* akhir setelah retakan cukup besar

Ciri khas kegagalan fatigue:

- Permukaan patahan menunjukkan pola garis-garis ("beach marks" atau "striations")
- Tidak menunjukkan deformasi plastis signifikan

Kurva S-N (Stress vs Number of Cycles):

- Menunjukkan hubungan antara besar tegangan dan jumlah siklus hingga patah
- Material memiliki batas fatigue (fatigue limit) atau tidak, tergantung jenis logam

Faktor yang memengaruhi fatigue:

- Besarnya tegangan siklik
- Jumlah siklus
- Permukaan material (kasar atau halus)
- Lubang atau takikan
- Perlakuan permukaan (*polishing, shot peening*)

Pencegahan fatigue:

- Desain tanpa takik tajam
- Penggunaan paduan logam fatigue-resistant
- Inspeksi berkala menggunakan metode NDT
- Pengendalian kualitas permukaan dan penyambungan

B. Rangkuman

- Creep adalah deformasi perlahan pada suhu tinggi di bawah beban tetap.
- Fatigue adalah kegagalan akibat tegangan siklik yang berulang dalam jangka panjang.
- Kedua mekanisme ini sering menjadi penyebab utama kegagalan struktur pesawat dan memerlukan pemahaman serta kontrol desain yang tepat.

- Pencegahan dapat dilakukan melalui pemilihan material, desain struktur, serta inspeksi berkala.

C. Latihan Soal

1. Apa yang dimaksud dengan creep dan pada kondisi apa creep terjadi?
2. Jelaskan perbedaan utama antara creep dan fatigue!
3. Sebutkan tiga faktor yang memengaruhi kegagalan fatigue!
4. Mengapa bilah turbin sangat rentan mengalami creep?

BAB 3

MATERIAL FERROUS: BESI DAN BAJA

Sub-CPMK	- Mahasiswa mampu menjelaskan proses pembuatan, karakteristik, komposisi, klasifikasi serta treatment material ferrous (logam yang mengandung besi).
Indikator	<ul style="list-style-type: none">- Ketepatan menjelaskan produksi besi dan baja, serta karakteristik dan komposisi baja.- Ketepatan menjelaskan struktur mikro dan perlakuan panas pada baja.- Ketepatan memahami memahami elemen campuran pada material baja serta uji identifikasi besi dan baja

A. Penyajian Materi

Material ferrous adalah kelompok material logam yang mengandung unsur besi (Fe) sebagai komponen utamanya. Dalam industri penerbangan dan manufaktur, material ferrous seperti besi dan baja memiliki peran penting karena kekuatan, ketahanan aus, serta ketersediaannya yang luas.

Pemahaman tentang proses produksi, struktur mikro, serta sifat mekaniknya sangat diperlukan dalam pemeliharaan dan perancangan struktur pesawat.

4.2 Produksi Besi dan Baja

a. Besi (Iron)

Besi diperoleh dari bijih besi melalui proses reduksi dalam tanur tinggi (blast furnace). Produk utamanya adalah besi kasar (pig iron), yang kemudian dapat diproses menjadi baja atau besi tuang.

b. Baja (Steel)

Baja adalah paduan besi dengan karbon (umumnya 0,02%–2,0%) serta elemen lain untuk meningkatkan sifat mekaniknya.

Proses pembuatan baja meliputi:

- Proses *Bessemer*
- Proses *Basic Oxygen Furnace (BOF)*
- Proses *Electric Arc Furnace (EAF)*

Setelah diproduksi, baja dapat diproses lebih lanjut menjadi berbagai bentuk produk seperti pelat, batang, kawat, dan komponen struktural.

4.3 Komposisi dan Klasifikasi Baja

a. Berdasarkan kandungan karbon:

- Baja karbon rendah ($< 0,3\%$) – lunak, mudah dibentuk, digunakan untuk bodi pesawat ringan.
 - Baja karbon sedang ($0,3-0,6\%$) – lebih kuat, cocok untuk komponen struktural.
 - Baja karbon tinggi ($> 0,6\%$) – sangat kuat tetapi rapuh, digunakan pada alat potong dan pegas.
- b. Berdasarkan elemen paduan:
- Baja paduan (alloy steel): mengandung unsur seperti krom (Cr), nikel (Ni), molibdenum (Mo) untuk meningkatkan kekuatan, ketahanan korosi, dan keuletan.

4.4 Struktur Mikro Baja

Struktur mikro baja dipengaruhi oleh kandungan karbon dan proses pendinginan. Struktur mikro utama:

- *Ferrite* – lunak dan *ductile*
- *Pearlite* – campuran *ferrite* dan *cementite*
- *Martensite* – keras dan rapuh, dihasilkan dari pendinginan cepat
- *Austenite* – hanya stabil pada suhu tinggi

Struktur mikro ini dapat dimodifikasi melalui proses perlakuan panas.

4.5 Perlakuan Panas pada Baja

Perlakuan panas (heat treatment) adalah proses termal untuk mengubah struktur mikro dan sifat mekanik baja.

Jenis perlakuan panas utama:

- *Annealing* – pelunakan logam dan penghilangan tegangan sisa
- *Normalizing* – meningkatkan kekuatan dan ketangguhan
- *Quenching* – pendinginan cepat untuk meningkatkan kekerasan
- *Tempering* – pemanasan ulang setelah quenching untuk mengurangi kerapuhan

Kombinasi perlakuan ini menghasilkan keseimbangan antara kekerasan dan keuletan pada komponen pesawat.

4.6 Elemen Paduan dalam Baja

Beberapa elemen paduan penting:

- *Krom (Cr)*: meningkatkan kekerasan dan ketahanan korosi
- *Nikel (Ni)*: meningkatkan keuletan dan ketahanan terhadap suhu rendah
- *Molibdenum (Mo)*: meningkatkan kekuatan suhu tinggi

- *Vanadium (V)*: meningkatkan kekuatan dan ketahanan aus
- *Mangan (Mn)*: membantu deoksidasi dan kekuatan tarik

4.7 Tes Identifikasi Besi dan Baja

Untuk memastikan jenis baja yang digunakan, dilakukan uji identifikasi:

- Uji percikan (spark test): mengamati pola percikan saat digerinda
- Uji magnetik: membedakan baja ferromagnetik dan non-magnetik
- Uji kimia: menggunakan reagen untuk mengetahui kandungan paduan
- Spektrometri: metode modern untuk mengetahui komposisi secara akurat

B. Rangkuman

- Material ferrous terdiri dari besi dan baja, dengan kandungan karbon dan paduan yang berbeda.
- Proses pembuatan dan perlakuan panas memengaruhi sifat dan kekuatan baja.
- Struktur mikro seperti ferrite, pearlite, martensite sangat penting dalam analisis kegunaan logam.

- Uji identifikasi diperlukan untuk memastikan spesifikasi material dalam perawatan pesawat.

C. Latihan Soal

1. Sebutkan tiga jenis baja berdasarkan kandungan karbonnya dan masing-masing kegunaannya!
2. Jelaskan perbedaan antara annealing dan quenching!
3. Apa fungsi dari unsur krom dan nikel dalam baja paduan?
4. Mengapa martensite bersifat keras tetapi rapuh?

BAB 4

LOGAM MURNI DAN ALUMINIUM

Sub-CPMK	- Mahasiswa mampu menjelaskan karakteristik material non-ferrous logam murni dan campuran logam aluminium, standar penamaan IADS dan BS, serta berbagai treatment pada campuran logam.
Indikator	- Ketepatan menjelaskan berbagai jenis logam murni, properti mekanik campuran logam aluminium, dan standar penamaan campuran logam aluminium (IADS). - Ketepatan menjelaskan standar penamaan (BS), berbagai treatment pada campuran logam aluminium hingga age hardening.

A. PENYAJIAN MATERI

Logam murni dan paduan aluminium merupakan material yang banyak digunakan dalam struktur pesawat karena memiliki rasio kekuatan terhadap berat (strength-to-weight ratio) yang tinggi, tahan korosi, serta mudah dibentuk. Pada bab ini akan dibahas karakteristik logam murni serta berbagai jenis paduan aluminium yang umum digunakan dalam industri penerbangan, termasuk sistem penamaan dan perlakuannya.

5.2 Logam Murni

Logam murni adalah logam yang hampir tidak mengandung unsur paduan. Dalam dunia teknik, logam murni jarang digunakan secara langsung karena sifat mekaniknya yang cenderung rendah. Namun, logam murni penting sebagai dasar pengembangan paduan logam.

Contoh logam murni yang relevan:

- Aluminium murni (99% Al): ringan, konduktif, tahan korosi, tetapi lunak
- Tembaga murni (Cu): sangat konduktif, digunakan pada sistem kelistrikan
- Magnesium murni (Mg): sangat ringan, tetapi kurang stabil jika tidak dipadu
- Titanium murni (Ti): tahan korosi dan kuat, digunakan pada suhu tinggi

5.3 Aluminium dan Paduannya

a. Karakteristik Aluminium:

- Ringan (densitas $\pm 2,7 \text{ g/cm}^3$)
- Konduktivitas listrik dan termal tinggi
- Ketahanan korosi alami karena pembentukan lapisan oksida
- Non-magnetik dan dapat didaur ulang

b. Kekurangan Aluminium Murni:

- Kekuatan mekanik rendah
- Tidak tahan terhadap suhu sangat tinggi
→ Oleh karena itu, aluminium umumnya digunakan dalam bentuk **paduan (alloy)**

5.4 Paduan Aluminium

Paduan aluminium dibagi menjadi dua kategori utama:

1. Paduan tempa (wrought alloys):
 - Digunakan dalam bentuk pelat, batang, dan profil ekstrusi
 - Contoh: 2024 (Al-Cu), 6061 (Al-Mg-Si), 7075 (Al-Zn)
2. Paduan cor (casting alloys):
 - Dicetak menjadi bentuk akhir
 - Contoh: A356 (Al-Si-Mg), 319 (Al-Si-Cu)

Sistem Penamaan Paduan Aluminium (berdasarkan

IADS & BS):

- Seri 1xxx: aluminium murni ($\geq 99\%$ Al)
- Seri 2xxx: paduan aluminium-tembaga (tinggi kekuatan)
- Seri 3xxx: aluminium-mangan (daya tahan korosi tinggi)
- Seri 5xxx: aluminium-magnesium (tahan korosi laut)

- **Seri 6xxx:** aluminium-magnesium-silikon (serbaguna, mudah dibentuk)
- **Seri 7xxx:** aluminium-seng (sangat kuat, untuk struktur pesawat)

5.5 Perlakuan pada Paduan Aluminium

Heat treatment dilakukan untuk meningkatkan kekuatan dan kekerasan aluminium alloy. Proses ini meliputi:

- *Solution heat treatment:* memanaskan hingga larut
- *Quenching:* pendinginan cepat untuk mempertahankan struktur larutan padat
- *Aging (natural/artificial):* memperkuat logam melalui pembentukan presipitat halus
- *Artificial aging* → dilakukan pada suhu tertentu (age hardening)

Contoh:

Paduan 7075-T6 → menunjukkan bahwa logam ini telah mengalami treatment dan artificial aging hingga mencapai kekuatan optimal.

5.6 Aplikasi Aluminium dan Paduannya di Pesawat

- 2024: digunakan untuk sayap dan skin karena kekuatan tinggi

- 6061: digunakan pada struktur internal dan sambungan
- 7075: digunakan untuk bagian yang memerlukan kekuatan tinggi seperti rangka utama dan landing gear

B. Rangkuman

- Logam murni seperti aluminium, magnesium, dan titanium memiliki sifat khusus yang bermanfaat dalam aplikasi teknik.
- Paduan aluminium digunakan untuk meningkatkan kekuatan dan daya tahan logam murni.
- Sistem penamaan paduan aluminium membantu dalam identifikasi komposisi dan perlakuan.
- Perlakuan panas seperti solution heat treatment dan aging sangat memengaruhi performa paduan aluminium dalam dunia penerbangan.

C. Latihan Soal

1. Sebutkan tiga logam murni dan kegunaannya dalam industri pesawat!
2. Apa keuntungan dan kelemahan utama dari aluminium murni?

3. Jelaskan perbedaan antara paduan tempa dan paduan cor pada aluminium!
4. Apa arti dari kode paduan aluminium “7075-T6”?

PRIME IDENTITY HOUSE

BAB 5 TREATMENT LOGAM CAMPURAN

Sub-CPMK	<ul style="list-style-type: none"> - Mahasiswa mampu menjelaskan berbagai treatment campuran logam aluminium serta karakteristik berbagai logam campuran lainnya.
Indikator	<ul style="list-style-type: none"> - Ketepatan menjelaskan berbagai treatment pada campuran logam aluminium, yaitu terkait precaution, annealing serta aluminium alloy sheets dan cast. - Ketepatan menjelaskan karakteristik logam campuran magnesium dan tembaga. - Ketepatan menjelaskan karakteristik logam campuran nikel, timbal, titanium, serta uji identifikasi dan rangkuman properti material

A. PENYAJIAN MATERI

Logam campuran (alloy) merupakan hasil kombinasi antara logam dasar dengan satu atau lebih unsur paduan, yang bertujuan untuk meningkatkan sifat-sifat mekanik, kimia, maupun fisik. Dalam dunia penerbangan, logam campuran seperti aluminium alloy, magnesium alloy, dan titanium alloy banyak digunakan karena mampu

memberikan kekuatan tinggi dengan berat yang relatif ringan.

Agar logam campuran memiliki sifat optimal sesuai kebutuhan aplikasi, perlu dilakukan berbagai perlakuan khusus atau *treatment*. Bab ini akan membahas jenis-jenis *treatment* yang umum dilakukan pada logam campuran serta karakteristik beberapa jenis logam alloy penting.

6.2 Tujuan Perlakuan Logam Campuran

Perlakuan dilakukan untuk:

- Meningkatkan kekuatan dan kekerasan
- Meningkatkan keuletan dan ketangguhan
- Menghilangkan tegangan sisa akibat proses manufaktur
- Meningkatkan ketahanan korosi dan keausan
- Mengatur struktur mikro untuk mencapai sifat tertentu

6.3 Jenis Treatment Logam Campuran

a. Annealing

- Pemanasan hingga suhu tertentu, kemudian didinginkan perlahan.
- Tujuan: melembutkan logam, memperbaiki keuletan, menghilangkan tegangan sisa.
- Umum digunakan setelah pembentukan dingin.

Annealing adalah proses perlakuan panas (*heat treatment*) di mana suatu logam dipanaskan hingga suhu tertentu, ditahan dalam waktu tertentu, lalu didinginkan secara lambat (biasanya di dalam tungku).

Tujuan utama annealing adalah untuk:

- Mengurangi kekerasan logam
- Menghilangkan tegangan sisa (residual stress)
- Meningkatkan keuletan (ductility)
- Memperbaiki struktur mikro
- Mengembalikan sifat mekanik akibat deformasi dingin (cold working)

Tahapan Proses Annealing:

1. Pemanasan

Logam dipanaskan hingga suhu rekristalisasi (biasanya $\frac{1}{3}$ – $\frac{1}{2}$ titik lelehnya dalam Kelvin).

Contoh: Aluminium dipanaskan hingga 300–400 °C

2. Penahanan (Soaking Time)

Logam ditahan pada suhu tersebut dalam jangka waktu tertentu agar proses rekristalisasi berlangsung sempurna.

3. Pendinginan Lambat

Biasanya dilakukan di dalam tungku secara perlahan agar struktur mikro yang dihasilkan stabil dan bebas tegangan.

Apa yang Terjadi di Tingkat Mikroskopis?

- Butir-butir baru (grain) terbentuk dan menggantikan struktur yang terdistorsi akibat deformasi dingin.
- Dislokasi berkurang → logam menjadi lebih lunak dan lebih ulet.
- Struktur yang sebelumnya penuh tegangan internal berubah menjadi lebih stabil secara termodinamika.
- **Jenis-jenis Annealing:**

Jenis Annealing	Tujuan	Aplikasi Umum
Full Annealing	Melunakkan sepenuhnya	Baja karbon menengah & tinggi
Process Annealing	Menghilangkan sebagian tegangan	Baja rendah karbon
Recrystallization Annealing	Mengembalikan keuletan setelah cold work	Aluminium & tembaga
Stress-relief Annealing	Mengurangi tegangan sisa tanpa ubah struktur	Komponen besar, lasan

Peran Annealing pada Material Pesawat:

1. Peningkatan Formabilitas

Lembaran aluminium yang digunakan untuk struktur sayap atau badan pesawat biasanya mengalami *cold working* dan memerlukan annealing untuk mengembalikan keuletannya.

2. Menghilangkan Tegangan Sisa

Komponen pesawat hasil las atau fabrikasi bisa menyimpan tegangan internal yang membahayakan. Proses *stress-relief annealing* diperlukan untuk mencegah retak atau deformasi saat beroperasi.

3. Kontrol Sifat Mekanik

Dengan annealing, sifat seperti kekerasan, keuletan, dan kekuatan tarik dapat disesuaikan sesuai kebutuhan desain aeronautika.

Contoh Pengaruh Annealing pada Aluminium:

Perlakuan	Kekuatan Tarik (MPa)	Keuletan (%)	Kekerasan (HB)
Cold-worked	300 – 400	5 – 10	Tinggi
Setelah Annealing	150 – 250	20 – 30	Lebih lunak

Catatan Penting:

- Proses annealing harus dikontrol ketat agar tidak terlalu panas, karena bisa menurunkan kekuatan material secara drastis.
- Waktu penahanan dan laju pendinginan harus disesuaikan dengan jenis logam dan ketebalan benda kerja.

b. Solution Heat Treatment

Solution Heat Treatment adalah proses perlakuan panas di mana logam paduan dipanaskan ke suhu tinggi, hingga fasa pelarut dan fasa terlarut membentuk larutan padat homogen, lalu didinginkan cepat (quenching) untuk mengunci struktur tersebut.

Proses ini umum digunakan pada:

- Aluminium paduan seri 2xxx (Al-Cu), 6xxx (Al-Mg-Si), dan 7xxx (Al-Zn-Mg)
- Komponen pesawat yang memerlukan kombinasi kekuatan tinggi dan bobot ringan

Tujuan Solution Heat Treatment

- Melarutkan fase kedua (seperti CuAl_2 , Mg_2Si , Zn_2Mg) ke dalam matriks aluminium.

- Menciptakan struktur homogen pada suhu tinggi.
- Menyiapkan struktur untuk penguatan melalui proses aging (*precipitation hardening*).
- Meningkatkan kekuatan tarik dan kekerasan logam setelah dilanjutkan dengan proses aging.

Tahapan Proses SHT:

1. Pemanasan ke Suhu Pelarutan

- o Aluminium dipanaskan ke suhu sekitar 480°C – 550°C, tergantung jenis paduan.
- o Tujuan: melarutkan fase kedua dalam matriks aluminium (larutan padat tunggal).

2. Penahanan (Soaking Time)

- o Suhu dipertahankan dalam waktu tertentu (30 menit – beberapa jam).
- o Waktu tergantung ketebalan dan jenis paduan.
- o Harus cukup untuk mencapai pelarutan maksimal tanpa menyebabkan overburning (*penghancuran struktur kristal*).

3. Pendinginan Cepat (Quenching)

- o Didinginkan dengan cepat (biasanya air dingin) untuk mencegah presipitasi kembali.
- o Struktur metastabil (*supersaturated solid solution*) “terkunci” pada suhu ruang.

- o Setelah quenching, logam menjadi keras namun rapuh, dan siap untuk di-aging.

4. (Opsional) Artificial Aging atau Natural Aging

- o Proses pengendapan presipitat kecil (seperti Mg_2Si atau Al_2Cu) dilakukan untuk menguatkan logam.
- o Disebut juga T6 treatment bila aging dilakukan secara artifisial pada suhu sekitar 160–190°C.

Contoh Aplikasi dalam Industri Pesawat:

Komponen Pesawat	Material Paduan	Perlakuan SHT
Struktur sayap dan fuselage	Aluminium 2024	SHT + Quench + Aging
Rangka kokpit dan panel dalam	Aluminium 7075	SHT + Aging T6
Skin pesawat	Aluminium 6061	SHT + Aging T6

Perubahan Sifat Mekanik:

Perlakuan	Kekuatan Tarik (MPa)	Kekerasan (HB)	Keuletan (%)
Aluminium tanpa SHT	150 – 250	50 – 70	Tinggi
Setelah SHT + Aging	400 – 550	120 – 160	Sedang

Pentingnya Kontrol Proses:

- Jika suhu terlalu rendah: presipitat tidak sepenuhnya larut → kekuatan rendah.
- Jika suhu terlalu tinggi: dapat menyebabkan overheating atau melting lokal → logam cacat.
- Pendinginan lambat: akan memungkinkan presipitat terbentuk selama pendinginan → mengurangi efek penguatan.

c. Aging (Presipitasi Keras / Age Hardening)

Pengertian Aging

Aging adalah proses perlakuan panas (*heat treatment*) lanjutan setelah solution heat treatment (SHT) dan quenching, di mana logam dipanaskan kembali pada suhu lebih rendah untuk mengendapkan partikel-partikel kecil

(presipitat) dari larutan padat supersaturasi ke dalam matriks logam.

Proses ini bertujuan untuk:

- Meningkatkan kekuatan dan kekerasan logam
- Mengontrol sifat mekanik melalui pengendapan presipitat yang menghambat gerakan dislokasi dalam kristal

Proses Aging Umumnya Dilakukan pada Paduan Aluminium:

- Seri 2xxx (Al-Cu)
- Seri 6xxx (Al-Mg-Si)
- Seri 7xxx (Al-Zn-Mg)

Aging memperkuat logam melalui mekanisme precipitation hardening atau age hardening.

Jenis-jenis Aging

1. Natural Aging (T4)

- Dilakukan pada suhu kamar ($\sim 20-25^{\circ}\text{C}$)
- Terjadi secara spontan setelah quenching
- Memerlukan waktu hari hingga minggu
- Umum pada paduan aluminium seri 6xxx

2. Artificial Aging (T6, T7, dst.)

- Dilakukan pada suhu tertentu (biasanya $120-200^{\circ}\text{C}$)
- Waktu bervariasi (2–24 jam tergantung paduan)

- Menghasilkan presipitat halus dan terdistribusi merata
- Menyebabkan peningkatan kekuatan dan kekerasan maksimum

Mekanisme Aging – Apa yang Terjadi di Mikrostruktur?

1. Setelah quenching, terbentuk supersaturated solid solution (SSS).
2. Pada aging, atom-atom seperti Cu, Mg, Zn, atau Si mengendap dalam bentuk presipitat halus:
 - o Contoh: CuAl_2 pada Al-Cu
3. Presipitat ini menghambat pergerakan dislokasi, sehingga material menjadi lebih kuat (*strain hardening*).
4. Jika aging terlalu lama → presipitat membesar → kekuatan mulai menurun (*overaging*).

Perbandingan Sifat Mekanik Sebelum & Sesudah Aging:

Kondisi	Kekuatan Tarik (MPa)	Kekerasan (HB)	Keuletan (%)
Setelah SHT + Quench	150 – 250	Rendah	Tinggi

Setelah Aging (T6)	400 – 550	120 – 160	Sedang
Overaged (T7)	< 400	Turun	Lebih getas

Penerapan Aging dalam Industri Pesawat:

Komponen	Material Paduan	Aging	Keterangan
Struktur fuselage	Aluminium 2024-T6	Artificial	Kombinasi kekuatan & keuletan
Skin sayap	Aluminium 7075-T6	Artificial	Sangat kuat & ringan
Interior kabin	Aluminium 6061-T4	Natural	Cukup kuat, lebih mudah dibentuk

Catatan Penting

- Waktu dan suhu aging harus dikontrol ketat.
- Overaging dapat menurunkan kekuatan karena presipitat tumbuh terlalu besar → tidak efektif menghambat dislokasi.
- Pengujian kekerasan (misalnya Brinell atau Rockwell) sering digunakan untuk mengevaluasi hasil aging.

d. Stress Relieving

Stress relieving adalah proses perlakuan panas (*heat treatment*) yang bertujuan untuk mengurangi atau menghilangkan tegangan sisa (*residual stress*) yang terbentuk selama proses pembentukan, pengelasan, pengerjaan dingin (*cold working*), atau pendinginan tidak merata.

Tegangan sisa adalah tegangan internal yang tertinggal dalam logam meskipun tidak ada beban luar. Tegangan ini bisa menyebabkan deformasi, retak, bahkan kegagalan saat komponen digunakan.

Tujuan Stress Relieving

- Mengurangi kemungkinan distorsi atau retak selama penggunaan.
- Meningkatkan dimensional stability (stabilitas ukuran).
- Mempersiapkan komponen untuk mesin akhir (*final machining*).
- Meningkatkan daya tahan kelelahan (*fatigue resistance*).
- Menstabilkan logam sebelum *heat treatment* lanjutan.

Proses Stress Relieving

1. Pemanasan Bertahap

- Logam dipanaskan perlahan hingga suhu **lebih rendah dari suhu rekristalisasi.**
- Contoh untuk aluminium: 300–400°C
Untuk baja karbon: 500–650°C

2. Penahanan (Soaking Time)

- Suhu dipertahankan selama 1–2 jam, tergantung ukuran dan ketebalan komponen.
- Tujuan: memungkinkan difusi atom dan redistribusi tegangan internal.

3. Pendinginan Lambat

- Dilakukan di dalam tungku (furnace cooling) untuk menghindari pembentukan tegangan baru.
- Pendinginan cepat seperti quenching tidak digunakan.

apa yang Terjadi pada Mikrostruktur?

Stress relieving tidak mengubah fase logam secara signifikan. Proses ini:

- Tidak menyebabkan pertumbuhan butir (grain growth)
- Tidak mengubah kekuatan tarik atau kekerasan secara drastis
- Merelaksasi dislokasi dan strain kristal secara difusional → menurunkan tegangan sisa

Contoh Penerapan Stress Relieving dalam Dunia

Industri:

Komponen	Bahan	Proses Stress Relieving	Tujuan
Rangka pesawat (frame)	Aluminium 7075	300–350°C selama 1 jam	Menghilangkan tegangan akibat pengelasan
Panel fuselage	Aluminium 2024	320°C, furnace cooling	Stabilitas ukuran sebelum pemasangan
Komponen presisi mesin	Baja karbon	600°C selama 2 jam	Mencegah distorsi saat machining
Struktur sayap	Al-Mg-Si paduan	Stress relieve sebelum aging	Menstabilkan bentuk sebelum aging

Kapan Stress Relieving Diperlukan?

- Setelah proses pengelasan (welding), terutama untuk logam tebal
- Setelah deformasi dingin besar

- Sebelum dan sesudah mesin presisi (precision machining)
- Untuk komponen struktural besar yang akan menahan beban dinamis
- **Pengaruh Terhadap Sifat Mekanik**

Sifat Mekanik	Sebelum Stress Relieving	Sesudah Stress Relieving
Tegangan Sisa	Tinggi	Rendah
Kekerasan	Stabil	Sedikit menurun (minor)
Dimensional Stability	Kurang stabil	Stabil
Fatigue Resistance	Bisa rendah	Lebih tinggi

6.4 Precaution (Kehati-hatian dalam Perlakuan)

Tidak semua logam alloy bisa diperlakukan sama. Kesalahan dalam pemanasan atau pendinginan dapat menyebabkan:

- Retak mikro
- Distorsi dimensi
- Penurunan sifat mekanik

Oleh karena itu, penting mengikuti spesifikasi

manual teknik (misalnya Aircraft Maintenance Manual - AMM).

6.5 Contoh Logam Campuran dan Karakteristiknya

Logam Campuran	Unsur Paduan Utama	Sifat Utama	Aplikasi
Aluminium Alloy 7075	Zn, Mg, Cu	Sangat kuat, ringan	Struktur utama pesawat
Magnesium Alloy AZ31	Al, Zn	Ringan, mudah dibentuk	Panel dan casing ringan
Titanium Alloy Ti-6Al-4V	Al, V	Kuat, tahan korosi dan panas	Blade turbin, frame mesin
Copper Alloy (Brass/Bronze)	Zn atau Sn	Konduktif, tahan aus	Kelistrikan, sambungan
Nickel Alloy (Inconel)	Cr, Fe, Mo	Tahan suhu tinggi	Mesin jet, knalpot pesawat

6.6 Uji Identifikasi dan Evaluasi Logam Campuran

Untuk mengetahui jenis dan kondisi logam campuran dilakukan uji seperti:

- **Hardness Test:** melihat tingkat kekerasan sebelum dan sesudah treatment
- **Spektrometri:** identifikasi komposisi kimia secara akurat
- **Microstructure Test:** melihat perubahan butir logam di bawah mikroskop
- **Visual dan NDT:** mengevaluasi retak, distorsi, atau cacat permukaan

B. Rangkuman

- Logam campuran memerlukan perlakuan khusus untuk mencapai sifat optimal.
- Jenis treatment seperti annealing, solution heat treatment, dan aging umum digunakan pada aluminium alloy.
- Precaution penting dilakukan untuk menghindari kegagalan material.
- Setiap jenis logam alloy memiliki karakteristik dan aplikasi yang berbeda.
- Evaluasi hasil treatment dilakukan dengan pengujian mekanik dan mikroskopik.

C. LATIHAN SOAL

1. Jelaskan perbedaan antara annealing dan aging pada logam campuran!
2. Mengapa aluminium alloy perlu melalui proses quenching dan aging?
3. Apa fungsi dari stress relieving dalam perlakuan logam?
4. Sebutkan dua logam campuran yang tahan suhu tinggi dan aplikasinya!
5. Apa risiko jika perlakuan panas dilakukan tanpa mengikuti prosedur teknis yang benar?

BAB 6

PEMBENTUKAN LOGAM (METAL FORMING)

Sub-CPMK	<ul style="list-style-type: none"> - Mahasiswa mampu menjelaskan proses dan karakteristik berbagai metode pembentukan logam non-ferrous.
Indikator	<ul style="list-style-type: none"> - Ketepatan proses dan karakteristik berbagai metode pembentukan logam casting, forging, rolling, dan drawing. - Ketepatan menjelaskan proses dan karakteristik berbagai metode pembentukan logam pressing, stretch forming, rubber-pad forming, extruding, sintering, spinning, chemical milling, electro-chemical milling, dan electro discharge machining (EDM) - Ketepatan menjelaskan proses conventional machining, diffusion bonding dan superplastic forming The Second Law of Thermodynamics

A. PENYAJIAN MATERI

Pembentukan logam merupakan proses penting dalam industri manufaktur, termasuk dalam pembuatan komponen pesawat terbang. Melalui proses ini, material logam diubah bentuknya menjadi produk atau bagian dengan dimensi, kekuatan, dan bentuk tertentu tanpa menghilangkan material secara signifikan. Proses pembentukan dilakukan dengan cara memberikan gaya mekanis atau panas untuk memodifikasi bentuk dan sifat logam.

Pemahaman tentang jenis-jenis proses pembentukan sangat penting bagi teknisi pesawat, terutama dalam konteks perbaikan atau rekondisi komponen struktural.

7.2 Tujuan Proses Pembentukan Logam

- Membentuk material menjadi komponen yang diinginkan
- Meningkatkan kekuatan melalui pengerasan kerja (strain hardening)
- Mengurangi limbah material
- Meningkatkan efisiensi produksi dan presisi bentuk

7.3 Jenis-Jenis Proses Pembentukan Logam

a. Proses Konvensional

1. Casting

- Proses pencairan logam dan menuangkannya ke dalam cetakan
- Contoh: pembuatan casing mesin, baling-baling, fitting

2. Forging

- Pembentukan logam dengan tekanan tinggi dalam keadaan panas atau dingin
- Menghasilkan struktur butir padat → sangat kuat
- Contoh: gear, poros, sambungan rangka

3. Rolling

- Logam dilewatkan antara dua rol untuk menghasilkan ketebalan tertentu
- Digunakan untuk membuat pelat, lembaran, dan profil

4. Drawing

- Proses menarik logam melalui cetakan (die) untuk membuat kawat atau pipa
- Umum pada industri komponen kelistrikan pesawat

b. Proses Pembentukan Non-Konvensional

1. Pressing dan Stretch Forming

- Digunakan untuk membentuk pelat logam menjadi kontur kompleks
- Banyak digunakan dalam pembuatan skin pesawat

2. Rubber-Pad Forming

- Menggunakan bantalan karet untuk membentuk logam terhadap cetakan
- Cocok untuk produksi volume kecil dan bentuk rumit

3. Extruding

- Menekan logam melalui cetakan untuk menghasilkan bentuk batang panjang dengan profil tertentu
- Contoh: rel struktur kabin, rangka jendela pesawat

4. Sintering

- Pemanasan bubuk logam hingga mendekati titik leleh untuk membentuk benda padat
- Umum digunakan untuk komponen kecil dan presisi tinggi

5. Spinning

- Pembentukan logam berbentuk silinder dengan cara diputar dan ditekan
- Digunakan untuk membuat nose cone atau bagian berbentuk simetris

7.4 Proses Modern dan Khusus

1. Chemical Milling

- Menggunakan larutan kimia untuk mengikis bagian permukaan logam secara selektif
- Sangat cocok untuk membuat kontur ringan dan presisi tinggi
- Umum pada pengurangan berat panel aluminium

2. Electrochemical Milling (ECM)

- Menggunakan arus listrik dan elektrolit untuk membentuk logam
- Tidak menghasilkan tegangan atau panas berlebih
- Sangat akurat untuk komponen kompleks

3. Electro Discharge Machining (EDM)

- Pembentukan logam menggunakan percikan listrik (discharge)

- Digunakan untuk logam keras atau bagian dengan detail halus

4. Diffusion Bonding

- Menggabungkan dua permukaan logam dengan tekanan dan suhu tinggi tanpa melelehkan logam
- Hasil ikatan sangat kuat dan bebas pori
- Digunakan dalam fabrikasi struktur sandwich atau honeycomb

5. Superplastic Forming

- Menggunakan sifat superplastis (mudah berubah bentuk) dari paduan aluminium pada suhu tertentu
- Dapat membentuk geometri sangat kompleks dengan ketebalan seragam

7.5 Faktor yang Mempengaruhi Hasil Forming

- Jenis material dan struktur mikro
- Suhu proses
- Kecepatan pembentukan
- Desain cetakan dan alat forming
- Pelumasan dan pendinginan
- Orientasi butir logam (grain direction)

7.6 Aplikasi Forming dalam Industri Pesawat

- Pembuatan rangka utama pesawat
- Komponen sayap dan skin
- Panel interior kabin
- Casing mesin dan fairing
- Struktur sambungan antar panel

B. RANGKUMAN

- Proses pembentukan logam memungkinkan pembentukan bentuk kompleks tanpa membuang banyak material
- Proses forming dibagi menjadi konvensional, non-konvensional, dan modern
- Pemilihan proses forming disesuaikan dengan jenis material, bentuk akhir, dan toleransi produk
- Proses seperti chemical milling, EDM, dan superplastic forming umum digunakan dalam industri pesawat karena akurasi dan efisiensinya

C. LATIHAN SOAL

1. Jelaskan perbedaan antara forging dan rolling!
2. Apa kelebihan proses rubber-pad forming dalam manufaktur pesawat?
3. Berikan tiga contoh penerapan chemical milling dalam pembuatan struktur pesawat!
4. Mengapa superplastic forming cocok untuk membuat bentuk kompleks?
5. Sebutkan minimal dua proses forming modern dan keunggulannya!

BAB 7

KOROSI PADA MATERIAL PESAWAT

Sub-CPMK	- Mahasiswa mampu menjelaskan berbagai jenis korosi.
Indikator	- Ketepatan menjelaskan tipe dan struktur komposit. Berbagai jenis korosi.

A. PENYAJIAN MATERI

Korosi adalah proses degradasi logam akibat reaksi kimia atau elektrokimia dengan lingkungan. Dalam industri penerbangan, korosi merupakan ancaman serius terhadap kekuatan struktural, keandalan sistem, dan keselamatan penerbangan. Oleh karena itu, pemahaman mengenai jenis-jenis korosi, mekanisme, serta metode pencegahan sangat penting bagi teknisi pemeliharaan pesawat.

8.2 Pengertian Korosi

Korosi adalah kerusakan atau penurunan kualitas logam akibat reaksi dengan oksigen, air, kelembaban, bahan kimia, atau polutan lain dari lingkungan.

Reaksi umum:



Proses ini menyebabkan logam kehilangan massa, kekuatan, dan integritas struktural.

8.3 Faktor yang Memengaruhi Korosi

- Lingkungan: kelembaban, salinitas, temperatur
- Jenis logam: logam reaktif seperti magnesium lebih mudah korosi
- Kontak antara logam berbeda (galvanik)
- Desain struktural: celah, retakan, atau sambungan sempit mempercepat korosi
- Kebersihan permukaan: kotoran, cairan, atau cat yang terkelupas dapat mempercepat reaksi korosif

8.4 Jenis-Jenis Korosi

1. Uniform Corrosion

Uniform corrosion atau korosi seragam adalah jenis korosi di mana material terdegradasi secara merata di seluruh permukaan logam yang terpapar lingkungan korosif.

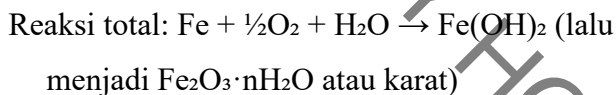
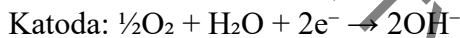
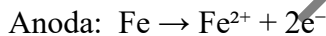
Ini adalah bentuk korosi paling umum, dan relatif mudah diprediksi serta dikontrol dibanding bentuk korosi lokal lainnya (seperti pitting atau galvanic). Galvanic Corrosion

Karakteristik Uniform Corrosion

- Penipisan logam terjadi secara konstan di seluruh permukaan yang terekspos.
- Tidak menyebabkan konsentrasi tegangan atau kerusakan lokal mendalam.
- Cepat terdeteksi secara visual karena perubahan warna, permukaan kusam, atau lapisan oksida.
- Umumnya menghasilkan produk korosi seperti karat (Fe_2O_3 pada besi) atau aluminium oksida (Al_2O_3).

Proses Mekanisme Korosi Seragam

- Korosi seragam terjadi melalui reaksi elektrokimia yang terjadi secara merata di seluruh permukaan:
- Contoh pada logam besi:



Pada aluminium:

- Aluminium cepat membentuk lapisan Al_2O_3 yang padat dan melindungi permukaan → namun dalam lingkungan tertentu (misalnya pH rendah atau tinggi), lapisan ini bisa larut → menyebabkan korosi seragam

Faktor yang Memicu Uniform Corrosion

Faktor	Dampak
pH ekstrem (asam atau basa)	Melarutkan lapisan pasivasi
Kehadiran air dan oksigen	Mempercepat reaksi elektrokimia
Suhu tinggi	Meningkatkan laju korosi
Larutan garam (seperti NaCl)	Merusak lapisan pasif logam
Lingkungan lembab terus-menerus	Meningkatkan elektrolit pada permukaan

Contoh Uniform Corrosion pada Industri Pesawat

Komponen	Material	Lingkungan	Dampak
Panel kulit fuselage	Aluminium 2024 tanpa pelapis	Udara lembap dan garam laut	Penipisan permukaan merata
Bracket interior	Baja karbon	Lingkungan hangar tanpa kontrol kelembaban	Karat seragam

Tangki bahan bakar	Aluminium	Paparan bahan bakar & air	Korosi seragam ringan
--------------------	-----------	---------------------------	-----------------------

Ciri-ciri dan Gejala Visual

- Permukaan logam berubah warna (coklat, putih kusam, keabu-abuan)
 - Terlihat lapisan serbuk korosi yang merata
 - Permukaan menjadi kasar atau mengelupas
 - Penurunan ketebalan bisa diukur dengan mikrometer atau ultrasonik thickness gauge

Metode Pencegahan Uniform Corrosion

Metode	Penjelasan
Pelapisan (Coating)	Cat primer, anodizing, atau pelapis konversi pada aluminium
Pemilihan material tahan korosi	Gunakan aluminium paduan dengan ketahanan korosi tinggi seperti 6061 atau 5052
Perlindungan katodik	Diterapkan pada logam aktif dalam sistem galvanik
Lingkungan terkendali	Menjaga kelembaban dan suhu di hangar penyimpanan

Inspeksi berkala	Deteksi awal terhadap korosi merata sebelum menyebabkan kegagalan struktural
------------------	--

Kelemahan Uniform Corrosion

- Meskipun seragam, jika tidak terdeteksi, korosi ini bisa menyebabkan pengurangan kekuatan struktural secara menyeluruh.
- Tidak menimbulkan retakan awal → tetapi berbahaya dalam jangka panjang karena penipisan menyeluruh.

2. Pitting Corrosion

Pitting corrosion adalah bentuk korosi lokal yang sangat merusak, di mana terjadi lubang kecil (pit) yang dalam dan sempit pada permukaan logam. Meski luas area yang terkena tampak kecil, kedalaman pit dapat menyebabkan kegagalan material secara cepat dan tiba-tiba.

Karakteristik Pitting Corrosion

- Terjadi pada permukaan pasif, seperti aluminium, baja tahan karat, dan titanium.
- Sulit terdeteksi secara visual pada awalnya.
- Pit tumbuh ke dalam, bukan menyebar ke permukaan.

- Dapat terjadi meski permukaan tampak utuh atau dilapisi.
- Salah satu penyebab kerusakan pesawat yang paling berbahaya secara tersembunyi.

Mekanisme Pitting Corrosion

Korosi sumuran biasanya dimulai dari **kerusakan lapisan pasif** akibat goresan, inklusi, atau lingkungan agresif.

Langkah-langkahnya:

1. **Gangguan pada lapisan pasif (Al_2O_3 atau Cr_2O_3)**
→ Bisa akibat goresan, ion Cl^- , atau tegangan.
2. **Pembentukan sel galvanik lokal**
Area rusak → **anoda** (terkorosi)
Area utuh → **katoda**
3. **Peningkatan ion Cl^- dalam pit**
Ion klorida tertarik ke pit → menurunkan pH → mempercepat korosi.
4. **Pit tumbuh ke dalam secara progresif**
Produk korosi menutupi lubang, menyembunyikan kerusakan di bawahnya.

Faktor yang Mempercepat Pitting Corrosion

Faktor	Penjelasan
Kehadiran ion klorida (Cl ⁻)	Sangat agresif terhadap lapisan pasif
Kelembaban tinggi	Mempercepat elektrolit terbentuk di permukaan
Suhu tinggi	Mempercepat laju reaksi korosi
pH rendah (lingkungan asam)	Melarutkan lapisan pelindung logam
Tegangan sisa	Retakan mikro bisa jadi titik awal pit

Contoh Kasus di Dunia Pesawat

Komponen	Material	Lingkungan	Dampak Korosi Sumuran
Panel fuselage	Aluminium 2024	Udara laut, goresan dari peralatan	Pit kecil berkembang jadi retakan
Fastener dan rivet	Stainless steel	Kondensasi air + garam	Pit di sekitar kepala rivet

Sayap (wing skin)	Alclad aluminium	Lingkungan tropis lembab	Pit tersembunyi menyebabkan retak
Tangki bahan bakar	Aluminium	Paparan air dan bahan bakar	Penetrasi pit hingga kebocoran

Ciri-ciri Visual dan Deteksi

- Titik-titik kecil kecoklatan/putih di permukaan.
- Permukaan luar terlihat hanya sedikit cacat, namun dalamnya lubang bisa dalam.
- Sering terdeteksi dengan:
 - Inspeksi penetran cair (PT)
 - X-ray atau ultrasonik
 - Endoskopi internal (borescope)

Pencegahan Pitting Corrosion

Strategi Pencegahan	Penjelasan
Pelapisan permukaan	Cat epoxy, anodizing, Alclad (pada aluminium)
Hindari lingkungan klorida	Jauhkan dari garam, keringat, atau cairan agresif

Gunakan paduan tahan korosi	Misalnya: Aluminium 6061 lebih tahan dibanding 2024
Desain dengan drainase yang baik	Hindari air menggenang di sudut atau celah
Perawatan rutin dan inspeksi	Deteksi dini melalui pemeriksaan berkala

Perbandingan Uniform vs. Pitting Corrosion

Aspek	Uniform Corrosion	Pitting Corrosion
Sebaran kerusakan	Merata di seluruh permukaan	Lokal dan terfokus
Deteksi	Mudah	Sulit, sering tersembunyi
Kecepatan kerusakan	Lambat	Bisa sangat cepat secara lokal
Bahaya struktural	Bertahap	Tiba-tiba dan kritis

3. Crevice Corrosion

Crevice corrosion adalah jenis korosi lokal yang terjadi di dalam celah sempit, seperti antara dua logam yang bersentuhan, di bawah gasket, seal, washer, rivet, atau di dalam tumpukan sambungan logam yang tidak dilapisi.

Celah ini menghalangi sirkulasi oksigen, menciptakan lingkungan elektrolit stagnan yang sangat korosif dan menyebabkan kerusakan intensif di dalam celah.

Karakteristik Crevice Corrosion

- Lokal dan tersembunyi, mirip dengan pitting.
- Terjadi di area tertutup atau sulit dijangkau udara/oksigen.
 - Dapat terjadi meskipun permukaan logam memiliki pelapis pelindung.
 - Sangat berbahaya karena kerusakan tidak terlihat secara visual di permukaan luar.
 - Umum terjadi pada komponen pesawat yang memiliki sambungan atau penyekat.

Mekanisme Terjadinya Korosi Celah

Crevice corrosion terjadi karena perbedaan **konsentrasi oksigen** antara bagian dalam celah dan bagian luarnya. Prosesnya:

1. Permukaan logam dalam celah kekurangan oksigen
→ tidak bisa mempertahankan lapisan pasif (misalnya Al_2O_3 atau Cr_2O_3).
2. Terbentuk sel elektrokimia:

- Bagian dalam celah menjadi anoda (terkorosi),
- Bagian luar menjadi katoda.

3. Reaksi elektrokimia menyebabkan:

- Penumpukan ion H^+ dan Cl^- dalam celah,
- pH turun \rightarrow mempercepat pelarutan logam.

4. Kerusakan parah terjadi di area tersembunyi, sementara permukaan luar tampak baik-baik saja.

Faktor-Faktor yang Memicu Korosi Celah

Faktor	Pengaruh
Desain struktur logam	Celah sempit mempercepat penumpukan ion
Air laut atau ion Cl^-	Merusak lapisan pasif
Kelembaban tinggi	Memicu terbentuknya elektrolit dalam celah
Kekurangan ventilasi	Menurunkan oksigen dalam celah
Material dengan lapisan pasif	Mudah terkorosi saat pasivasi terganggu

Contoh Crevice Corrosion dalam Industri Pesawat

Komponen	Area Celah	Dampak Korosi
Sambungan rivet pada skin pesawat	Celah antara rivet dan panel aluminium	Terbentuk pit tersembunyi → retakan
Washer dan baut	Di bawah kepala baut	Korosi lokal menyebabkan pelonggaran
Gasket tangki bahan bakar	Celah antara gasket dan casing logam	Kebocoran akibat perforasi logam
Sambungan lapisan pelat	Lapisan saling tindih tanpa segel	Korosi memanjang di area sambungan

Identifikasi dan Pemeriksaan

- Sulit dideteksi secara visual karena terjadi di dalam celah tertutup.
- Gejala luar: gelembung, perubahan warna, atau deformasi struktural.
- Metode pemeriksaan:
 - Dye penetrant test (PT)
 - Ultrasonic testing
 - Radiografi atau endoskopi (borescope)
 - Inspeksi pembongkaran sambungan

Pencegahan Crevice Corrosion

Metode Pencegahan	Penjelasan
Desain bebas celah	Minimalkan sambungan sempit, longgar, atau tidak tersegel
Segel dan pelindung sambungan	Gunakan sealant, washer non-konduktif, dan sambungan kedap
Anodizing / pelapisan	Lindungi permukaan aluminium agar pasivasi tetap stabil
Gunakan bahan tahan korosi	Misalnya titanium atau stainless steel tinggi molibdenum
Ventilasi yang cukup	Hindari kelembaban dan penumpukan ion klorida
Pemeliharaan dan inspeksi rutin	Bersihkan dan periksa sambungan secara berkala

Perbandingan: Crevice vs. Pitting Corrosion

Aspek	Crevice Corrosion	Pitting Corrosion
Lokasi kerusakan	Dalam celah atau sambungan	Titik lokal acak di permukaan

Deteksi visual	Sulit tanpa pembongkaran	Bisa terlihat secara makroskopik
Penyebab utama	Perbedaan konsentrasi oksigen	Kerusakan lokal lapisan pasif
Bentuk kerusakan	Lubang memanjang dan dalam	Pit kecil, dalam, dan tajam

Risiko pada Pesawat

- **Tidak terlihat dari luar**, tetapi **mengurangi ketebalan struktural** secara signifikan.
- Bisa **menginisiasi fatigue crack** jika terjadi pada area bertegangan.
- Bila terjadi di sekitar tangki atau sistem bahan bakar → **risiko kebocoran atau kegagalan tekanan**.

4. Intergranular Corrosion

Intergranular corrosion (korosi antarbatas butir) adalah jenis korosi lokal yang terjadi di sepanjang

batas-batas butir kristal logam, sementara bagian dalam (inti) butir tetap relatif tidak terpengaruh.

Karakteristik Umum

- Terjadi di dalam struktur mikro logam, bukan hanya di permukaan.
- Bersifat selektif: hanya menyerang batas butir.
- Tidak selalu terlihat di permukaan sampai kerusakan parah terjadi.
- Sangat berbahaya pada struktur pesawat, karena dapat menyebabkan kegagalan mendadak tanpa tanda visual.
- Umum terjadi pada stainless steel dan paduan aluminium seri 2000 dan 7000.

Mekanisme Terjadinya

1. Sensitisasi batas butir:

Terjadi saat logam mengalami pemanasan pada suhu tertentu (misalnya selama pengelasan atau perlakuan panas), yang menyebabkan presipitasi partikel seperti Cr_3C_2 (karbida krom) atau CuAl_2 (pada aluminium) di batas butir.

2. Batas butir menjadi anodik

Karena kekurangan unsur paduan penting (seperti Cr atau Cu), batas butir menjadi lebih reaktif

dibandingkan inti butir → terbentuk sel galvanik mikro.

3. Korosi progresif menyebar sepanjang batas butir, menyebabkan:

- Retakan internal (intergranular cracking),
- Pelepasan butiran logam,
- Penurunan kekuatan mekanik drastis.

Penyebab Umum Intergranular Corrosion

Faktor	Penjelasan
Sensitisasi termal	Pemanasan di suhu 400–850°C (stainless steel), 200–300°C (aluminium)
Komposisi kimia logam	Kandungan karbon tinggi → mudah membentuk karbida
Pendinginan lambat saat annealing	Memberi waktu terbentuknya presipitasi di batas butir
Perlakuan panas tidak sesuai	Overaging atau kesalahan dalam solution heat treatment

Contoh Kasus di Industri Pesawat

Komponen	Material	Risiko Intergranular Corrosion
Panel fuselage (skin)	Aluminium 2024-T3	Sensitisasi akibat overaging
Sambungan struktural rivet	Stainless steel 304	Korosi antarbutir setelah pengelasan
Paduan aluminium 7075 di wing	Al-Zn-Mg-Cu	Korosi sepanjang batas butir akibat aging
Tangki bahan bakar internal	Aluminium seri 2xxx	Celah mikro intergranular menyebabkan kebocoran

Cara Deteksi dan Pemeriksaan

- Microscopy (mikroskop optik atau SEM) → melihat jalur korosi di batas butir
- Uji EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) → menganalisis kehilangan unsur paduan
- Uji elektrokimia seperti DL-EPR (Double Loop Electrochemical Potentiokinetic Reactivation)
- Uji destruktif dengan pemotongan spesimen dan etching

Pencegahan Intergranular Corrosion

Metode	Penjelasan
Gunakan material low-carbon	Misalnya stainless steel 304L atau 316L
Perlakuan panas yang tepat	Hindari overaging atau pendinginan lambat
Gunakan stabilizer paduan	Tambah titanium atau niobium (misalnya 321 SS) untuk menstabilkan karbon
Solusi heat treatment + quenching	Melarutkan presipitasi dan mencegah pembentukannya saat pendinginan cepat
Hindari proses las berlebihan	Gunakan teknik welding kontrol suhu

Dampak Intergranular Corrosion

- Kekuatan material **turun drastis**, meskipun dimensi luar tampak utuh.
- **Retakan intergranular** dapat meluas ke seluruh struktur dan menyebabkan **kegagalan mendadak**.
- Sangat berbahaya pada **pesawat terbang**, di mana integritas struktural adalah segalanya.

Perbandingan: Intergranular vs. Pitting vs. Crevice

Aspek	Intergranular	Pitting	Crevice

Lokasi	Batas butir internal	Titik lokal permukaan	Dalam celah tertutup
Mekanisme	Perbedaan kimia di batas butir	Kerusakan lapisan pasif lokal	Konsentrasi ion & pH dalam celah
Deteksi visual	Sulit (internal)	Kadang bisa terlihat	Sering tersembunyi
Bahaya struktural	Sangat tinggi	Tinggi bila pit dalam	Tinggi bila dekat area penting

5. Exfoliation Corrosion

- Exfoliation corrosion adalah bentuk lanjutan dari intergranular corrosion, di mana produk korosi yang terbentuk di antara batas butir logam mendorong butiran logam ke luar, menyebabkan permukaan logam mengelupas seperti sisik atau terangkat berlapis-lapis.
- Jenis korosi ini terutama menyerang paduan aluminium hasil proses ekstrusi atau penempaan, di mana orientasi butir cenderung memanjang (elongated grains).

Karakteristik Utama

- Umumnya terjadi pada paduan aluminium seri 2xxx, 5xxx, 7xxx, terutama yang telah teranodisasi atau overaged.
- Terjadi di bawah permukaan logam, membuatnya tidak langsung terlihat sampai kerusakan cukup parah.
- Permukaan tampak berlapis-lapis dan terangkat, seperti mengelupas (exfoliate).
- Sering terjadi pada panel pesawat, sayap, stringer, frame, atau fitting struktural.

Mekanisme Terjadinya

- Korosi intergranular dimulai di antara batas butir logam hasil deformasi plastis (biasanya ekstrusi atau forging).
- Produk korosi (oksida, hidroksida) terbentuk di dalam batas butir.
- Produk ini memiliki volume yang lebih besar dari logam asal → menyebabkan tekanan internal.
- Tekanan ini mendorong butir logam keluar → permukaan menggelembung dan terkelupas.

Faktor Penyebab Exfoliation Corrosion

Faktor	Penjelasan
Struktur butir memanjang	Hasil dari proses hot-rolling, forging, extrusion
Perlakuan panas yang tidak tepat	Overaging → memperbesar presipitasi di batas butir
Paparan lingkungan lembap atau asin	Khususnya di atmosfer laut atau area tropis
Keberadaan klorida atau elektrolit	Meningkatkan agresivitas lingkungan korosif
Kekurangan perlindungan permukaan	Lapisan anodisasi terkelupas atau tidak menyeluruh

Contoh di Industri Pesawat

Komponen Pesawat	Material Umum	Risiko Exfoliation Corrosion
Stringer pesawat	Aluminium 7075-T6	Struktur utama melemah, deformasi sayap

Fuselage panel	Aluminium 2024-T3	Pengelupasan menyebabkan retakan struktural
Fitting struktur pesawat	Aluminium forged 6061	Retakan dan delaminasi akibat pengelupasan
Komponen ekor (tail boom)	Al-Zn-Mg extruded	Korosi lapisan permukaan & struktur internal

Identifikasi dan Pemeriksaan

- **Inspeksi visual:** permukaan tampak bergelombang, terangkat seperti sisik
- **Uji nondestruktif:**
 - Ultrasonic testing (UT)
 - Eddy current testing (ET)
 - Radiografi untuk melihat lapisan terdorong ke atas
- **Metallographic cross-section:** menunjukkan delaminasi sepanjang batas butir
- Sering **ditemukan terlambat**, karena tidak terlihat di permukaan awalnya

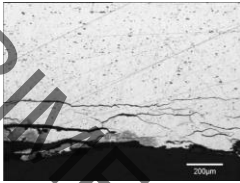
Pencegahan Exfoliation Corrosion

Strategi Pencegahan	Penjelasan
Gunakan paduan tahan korosi	Misalnya 7075-T73 lebih tahan dibanding T6
Perlakuan panas sesuai prosedur	Hindari overaging, lakukan quenching cepat saat solution heat treatment
Lapisan pelindung permukaan	Anodizing, painting, atau sealant
Desain bebas kelembaban/air menggenang	Hindari geometri yang menahan cairan
Inspeksi dan perawatan berkala	Bersihkan area kotor, cek bagian tersembunyi

Ciri Visual Exfoliation Corrosion

- Terlihat pengelupasan berlapis seperti lembaran logam yang mengembang ke luar dari permukaan.
- Tampak seperti daun yang mengelupas atau lembaran yang terangkat secara bertingkat dari permukaan material.
- Umumnya terjadi di sepanjang batas butir (grain boundaries) logam.

- Permukaan terlihat kasar, menggelembung, dan retak-retak.
- Sering terlihat pada komponen eks-trusi paduan aluminium, terutama yang mengalami lingkungan lembap atau laut.



Ciri Visual Exfoliation Corrosion

- Lapisan menyerupai lembaran (sheets) yang terangkat atau mengelupas dari permukaan, menyerupai “book-like” atau lembaran yang terpisah
- Umumnya menyerang di batas butir (grain boundaries), menyebabkan pengelupasan lapisan yang tipis dan berlembu
- Terlihat seperti permukaan retak, menggelembung, bahkan mengelupas, terutama pada material dengan butiran memanjang (hasil ekstrusi atau rolling) .
- Gambar mikro (mikroskop optik) menunjukkan perlapisan korosi dalam pada aluminium 2024-T3, di mana lapisan atas sudah terangkat

Perbandingan: Exfoliation vs. Intergranular

Aspek	Exfoliation Corrosion	Intergranular Corrosion
Lokasi korosi	Batas butir + tekanan permukaan	Sepanjang batas butir internal
Ciri visual	Permukaan mengelupas	Tidak terlihat dari luar
Tingkat kerusakan	Sangat destruktif	Menyebabkan retak internal
Kebutuhan bentuk butir	Terjadi pada butir memanjang	Tidak tergantung orientasi
Umum terjadi pada	Komponen hasil ekstrusi	Hasil forging dan las

6. Filiform Corrosion

Pengertian

Filiform corrosion adalah jenis korosi di mana serangan korosif menyebar dalam bentuk garis-garis halus menyerupai benang atau filamen di bawah lapisan pelindung seperti cat atau pelapis logam. Korosi ini tidak merusak struktur logam secara signifikan, tetapi

mengganggu estetika dan dapat menjadi titik awal korosi yang lebih serius jika tidak ditangani.

Ciri-Ciri Visual

- Tampak seperti jejak cacing halus atau benang-benang tipis yang menyebar dari titik awal.
- Menyebar tidak merata di bawah permukaan cat, membentuk pola acak bercabang.
- Warna jejak bisa coklat, hijau, atau abu-abu, tergantung logam dasar dan jenis korosinya.
- Cat atau pelapis tampak menggelembung atau terangkat di sepanjang jalur filamen.
- Muncul terutama pada pinggiran, goresan, atau cacat coating.

Mekanisme Terjadinya

Filiform corrosion memerlukan:

1. **Kelembapan tinggi (di atas 60% RH).**
2. **Permukaan logam dengan cat atau pelapis yang tidak sempurna** (misalnya tergores atau ada pori).
3. Adanya **oksigen dan kontaminan** seperti ion klorida.

Prosesnya:

- Air dan oksigen masuk melalui **cacat kecil pada pelapis.**

- Reaksi elektrokimia dimulai di titik masuk, menghasilkan ion logam dan membentuk **garis-garis korosi** yang menyebar secara radial seperti benang.
- **Ujung filamen aktif** secara elektrokimia, sedangkan ekornya pasif.

Faktor yang Mempengaruhi

- **Jenis pelapis:** pelapis berpori atau tipis meningkatkan risiko.
- **Kebersihan permukaan** sebelum pengecatan.
- **Jenis logam dasar:** lebih sering pada aluminium, magnesium, dan baja galvanis.
- **Kondisi lingkungan:** udara laut, kelembapan tinggi, ruang tertutup tanpa ventilasi baik.

Pencegahan

- Gunakan **coating yang kedap air dan tahan korosi**.
- **Persiapan permukaan yang baik** sebelum pelapisan, termasuk penghilangan minyak, debu, dan oksida.
- Hindari penggunaan material di **lingkungan lembap tanpa pelindung tambahan**.
- **Kontrol kelembapan** selama penyimpanan dan pengoperasian.

4. Filiform corrosion umum terjadi pada aluminium dan baja berlapis, terutama dalam lingkungan dengan kelembapan tinggi.
5. **Stress Corrosion Cracking (SCC)**

1. Kombinasi tegangan tarik dan lingkungan korosif
2. Menyebabkan retakan kecil yang berkembang cepat tanpa deformasi plastis

8.5 Dampak Korosi pada Pesawat

- Penurunan kekuatan dan umur struktur pesawat
- Potensi kegagalan struktural mendadak
- Penurunan performa dan efisiensi sistem
- Biaya perawatan meningkat
- Risiko keselamatan bagi awak dan penumpang

Pencegahan dan Perlindungan terhadap Korosi

a. Desain yang Baik

- Hindari celah sempit dan area retensi air
- Gunakan material kompatibel untuk mencegah korosi galvanik

b. Pelapisan Permukaan

- Cat anti-korosi, anodizing, plating (seng, krom, nikel)
- Sealant untuk mencegah kelembaban masuk

c. Penggunaan Inhibitor

- Bahan kimia yang memperlambat laju korosi, terutama pada sistem bahan bakar atau hidrolik

d. Inspeksi dan Perawatan Berkala

- Pemeriksaan visual, NDT, dan pembersihan rutin
- Penggantian bagian yang terkorosi sebelum kerusakan menyebar

e. Kontrol Lingkungan

- Penyimpanan pesawat dalam hanggar tertutup
- Penggunaan dehumidifier dan pelindung anti-kondensasi

Deteksi Korosi

Metode yang digunakan dalam inspeksi:

- Inspeksi visual langsung
- *Magnifying glass* atau boroscope untuk area sulit
- *Dye penetrant* untuk mendeteksi retak dan pit
- Ultrasonic atau radiografi untuk bagian dalam

B. RANGKUMAN

1. Uniform Corrosion (*Korosi Seragam*)

Definisi:

Korosi yang menyerang seluruh permukaan logam secara merata sehingga terjadi penipisan ketebalan logam.

Penyebab:

Paparan udara lembap, air, atau zat kimia tanpa pelindung permukaan.

Ciri Visual:

- Permukaan kusam, kasar.
- Warna berubah menjadi abu-abu atau coklat kehitaman.
- Merata di seluruh area logam.

Metode Deteksi:

- Inspeksi visual langsung.
- Pengukuran ketebalan menggunakan ultrasonic thickness gauge.
- Timbangan massa logam sebelum dan sesudah.

Kegagalan:

Penipisan menyebabkan struktur menjadi lemah dan akhirnya patah atau bocor.

2. Pitting Corrosion (Korosi Lubang-lubang)**Definisi:**

Korosi lokal yang menyebabkan terbentuknya lubang kecil namun dalam pada permukaan logam.

Penyebab:

Kerusakan lokal pada pelindung permukaan akibat ion klorida atau lingkungan laut.

Ciri Visual:

- Titik-titik kecil yang tampak seperti lubang.
- Sulit terlihat dari jauh, kadang tertutup oleh kerak.

Metode Deteksi:

- Dye penetrant test (DPT).
- Eddy current testing.
- CT scan atau radiografi industri.
- Pencungkil permukaan korosi.

Kegagalan:

Kebocoran fluida, retak, pecah tanpa tanda-tanda awal.

3. Crevice Corrosion (Korosi Celah)

Definisi:

Korosi yang terjadi di dalam celah sempit, seperti pada sambungan paku keling atau gasket.

Penyebab:

Terperangkapnya larutan korosif yang stagnan di dalam celah.

Ciri Visual:

- Permukaan luar tampak normal, tapi di balik celah terdapat korosi aktif.
- Gelembung atau noda coklat bisa muncul di sekitar sambungan.

Metode Deteksi:

- Visual inspection setelah pembongkaran.
- Ultrasonic atau endoscope.

- Potong bagian sambungan untuk investigasi.

Kegagalan:

Pelepasan sambungan struktural, retakan tersembunyi, kebocoran.

4. Intergranular Corrosion (Korosi Antar Batas Butir)

Definisi:

Korosi yang terjadi di sepanjang batas butir logam, terutama setelah proses perlakuan panas yang buruk.

Penyebab:

Presipitasi senyawa (misalnya Cr-carbide) di batas butir karena pemanasan yang tidak sesuai.

Ciri Visual:

- Permukaan tampak baik, tapi getas saat dibebani.
- Kadang muncul retakan halus.

Metode Deteksi:

- Mikroskop metalografi.
- SEM (Scanning Electron Microscope).
- Uji lentur (bend test).

Kegagalan:

Retakan mikro yang menyebar, menyebabkan struktur patah

5. Exfoliation Corrosion (Korosi Pengelupasan)

Definisi:

Korosi tipe lanjutan dari intergranular corrosion di mana logam mengelupas seperti sisik atau lapisan.

Penyebab:

Paduan logam hasil rolling/extrusion yang memiliki batas butir memanjang.

Ciri Visual:

- Lapisan logam mengangkat seperti kulit mengelupas.
- Umumnya pada permukaan lembaran tipis.

Metode Deteksi:

- Inspeksi visual.
- Tap test (bunyi nyaring → kosong).
- Ultrasonic C-scan.

Kegagalan:

Delaminasi, kerusakan struktural pada kulit pesawat atau plat sambungan.

6. Galvanic Corrosion (*Korosi Galvanik*)**Definisi:**

Korosi akibat dua logam berbeda yang bersentuhan dalam larutan elektrolit.

Penyebab:

Potensial elektroda berbeda antar logam (misalnya: aluminium dan baja).

Ciri Visual:

- Logam aktif (lebih lemah) akan terkikis.
- Perbedaan warna dan struktur antara kedua logam.

Metode Deteksi:

- Visual inspection.
- Pengukuran beda potensial elektroda.
- Multimeter atau elektroda referensi.

Kegagalan:

Kehancuran logam anodik, sambungan longgar, kerusakan sambungan kritis.

Gambar:

7. Filiform Corrosion (*Korosi Benang*)

Definisi:

Korosi yang menyebar di bawah cat pelindung dalam bentuk seperti benang.

Penyebab:

Adanya air di bawah permukaan cat, biasanya pada lingkungan lembap.

Ciri Visual:

- Tampak seperti garis-garis panjang seperti cacing.
- Timbul dari cacat kecil pada cat.

Metode Deteksi:

- Kupas cat dan lihat arah rambatan filamen.
- Visual dengan pencahayaan miring.
- Deteksi dini dari cat menggelembung.

Kegagalan:

Cat terkelupas, logam bawah terkikis, penurunan kekuatan dan estetika.

C. LATIHAN SOAL

1. Apa yang dimaksud dengan galvanic corrosion dan bagaimana cara mencegahnya?
2. Jelaskan perbedaan antara pitting dan crevice corrosion!
3. Sebutkan tiga faktor utama yang memengaruhi terjadinya korosi pada pesawat!
4. Apa bahaya utama dari intergranular corrosion jika tidak terdeteksi?
5. Berikan contoh tindakan preventif terhadap korosi pada struktur sayap pesawat!

BAB 8

STUDI KASUS KERUSAKAN KOROSI PADA PESAWAT

A. KASUS KOROSI PADA SAYAP ALUMINIUM

Latar Belakang:

Pesawat angkut ringan dengan struktur sayap berbahan paduan aluminium 2024-T3 menunjukkan penurunan kekuatan struktural setelah 10 tahun beroperasi di lingkungan lembap tropis.

Jenis Korosi:

Exfoliation corrosion dan *pitting corrosion*

Gejala Awal:

- Permukaan cat menggelembung
- Terdapat garis-garis halus seperti serpihan di bawah permukaan sayap

Metode Deteksi:

- Visual inspection setelah pembersihan
- Tap test (area terdengar hampa)
- C-scan ultrasonic test menunjukkan area delaminasi

Tindakan:

- Penggantian panel sayap
- Anodizing ulang dan aplikasi sealant anti-korosi

Kesimpulan:

Pentingnya inspeksi berkala dan pelapisan ulang secara rutin untuk mencegah exfoliation.

9.2 Kasus Exfoliation di Skin Panel Pesawat Komersial

Latar Belakang:

Panel kulit pesawat Boeing 737 menunjukkan gejala delaminasi di area bawah jendela penumpang setelah 15 tahun layanan.

Jenis Korosi:

Exfoliation corrosion

Gejala Awal:

- Tampak seperti retakan kecil di sepanjang panel
- Permukaan seperti terangkat / terkelupas

Metode Deteksi:

- Pemeriksaan menggunakan borescope
- Visual inspection dengan pelepasan panel interior
- Pemeriksaan metalografi untuk memverifikasi kerusakan batas butir

Tindakan:

- Panel diganti dan semua area sekitar diberi anodizing ulang
- Dilakukan redesign pada sistem drainase

Kesimpulan:

Drainase buruk menyebabkan akumulasi kelembapan.

Exfoliation dapat menyerang dari dalam dan tidak langsung terlihat.

9.3 Kasus Galvanic Corrosion pada Sambungan Aluminium dan Stainless Steel**Latar Belakang:**

Pada pesawat latih militer, ditemukan korosi pada sambungan antara struktur aluminium dan fitting stainless steel pada bagian ekor.

Jenis Korosi:

Galvanic corrosion

Gejala Awal:

- Korosi lokal pada logam aluminium
- Timbul serbuk putih (oksida aluminium) di area sambungan

Metode Deteksi:

- Visual inspection
- Pengukuran potensial elektroda
- Pemeriksaan setelah pembongkaran rivet

Tindakan:

- Isolasi galvanik (menggunakan washer non-logam)

- Penggantian rivet baja tahan karat dengan bahan sejenis aluminium
- Aplikasi sealant pada interface sambungan

Kesimpulan:

Perbedaan potensial logam harus diperhatikan sejak tahap desain untuk mencegah galvanic corrosion.

9.4 Interpretasi Foto Mikrograf Korosi

Kasus Mikrograf Intergranular:

- Tampak batas butir terkorosi
- Digunakan SEM untuk menunjukkan adanya Cr-carbide
- Menandakan korosi akibat over-aging pada paduan 7xxx

Kasus Mikrograf Pitting:

- Lubang lokal berbentuk oval
- Dalam beberapa kasus menembus ketebalan < 1 mm

Manfaat:

Interpretasi mikrograf membantu verifikasi jenis korosi dan perbaikan prosedur perlakuan panas.

9.5 Tindakan Perbaikan dan Preventif

Langkah Perbaikan:

- Identifikasi area kerusakan

- Bersihkan korosi
- Ganti bagian yang terpengaruh
- Aplikasi ulang coating, sealant, atau anodizing

Langkah Pencegahan:

- Inspeksi berkala (NDT dan visual)
- Proteksi katodik jika diperlukan
- Desain sambungan yang meminimalkan celah dan kontak beda logam
- Penggunaan material kompatibel

B. RANGKUMAN

Korosi merupakan salah satu penyebab utama degradasi struktural pesawat, terutama pada material aluminium.

Pencegahan dilakukan melalui:

- Pemilihan material yang tepat
- Perlindungan permukaan (cat, anodizing)
- Inspeksi berkala dengan metode NDT
- Lingkungan penyimpanan dan operasi yang terkontrol

C. LATIHAN SOAL

1. Jelaskan mengapa paduan aluminium seri 7000 rentan terhadap *exfoliation corrosion*!

2. Sebutkan minimal 3 metode deteksi korosi pada pesawat yang termasuk dalam kategori non-destruktif!
3. Mengapa *crevice corrosion* sulit terdeteksi dengan inspeksi visual biasa?
4. Bagaimana cara pencegahan korosi filiform pada permukaan pesawat terbang?
5. Berdasarkan studi kasus, jelaskan dampak jika korosi intergranular tidak segera diatasi pada badan pesawat!

PRIME IDENTITY HOUSE

DAFTAR PUSTAKA

- Budinski, K. G., & Budinski, M. K. (2009). *Engineering Materials: Properties and Selection* (9th ed.). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2007). *Materials Science and Engineering: An Introduction* (7th ed.). New York: John Wiley & Sons.
- Chandler, H. (Ed.). (1998). *Metallurgy for the Non-Metallurgist*. Materials Park, OH: ASM International.
- Davis, J. R. (Ed.). (1999). *Metals Handbook: Volume 2 – Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials* (10th ed.). Materials Park, OH: ASM International.
- Davis, J. R. (Ed.). (2000). *Aluminum and Aluminum Alloys*. Materials Park, OH: ASM International.
- Dieter, G. E. (1986). *Mechanical Metallurgy* (3rd ed.). New York: McGraw-Hill.
- Fontana, M. G. (1987). *Corrosion Engineering* (3rd ed.). New York: McGraw-Hill.
- Polmear, I. J. (2006). *Light Alloys: Metallurgy of the Light Metals* (4th ed.). Oxford: Butterworth-Heinemann.

Swift, K. G., & Booker, J. D. (2003). *Process Selection: From Design to Manufacture* (2nd ed.). Oxford: Butterworth-Heinemann.

Totten, G. E. (Ed.). (2002). *Handbook of Aluminum: Vol. 1. Physical Metallurgy and Processes*. New York: Marcel Dekker.

PRIME IDENTITY HOUSE



PRIME IDENTITY HOUSE



Dukuh Dresi, Wagirkidul, Pulung, Ponorogo
Website: www.publisher.primeidentityhouse.com
Email: primeidentitypublisher@gmail.com
Telp: 085157033918



IKAPI
INDONESIAN ASSOCIATION OF PUBLISHERS
NO. 086272004