



**Samnur**, lahir tanggal 2 Mei 1974 di Polman, Sulawesi Barat. Lulus sarjana Teknik Mesin di Universitas Hasanuddin tahun 1997, meraih gelar Magister Teknik di universitas yang sama pada tahun 2005, dan gelar Doktor diraih pada tahun 2017 di Universitas Negeri Malang. Kegiatan yang ditekuni saat ini adalah sebagai dosen tetap pada Jurusan Teknik Mesin Universitas Negeri Makassar sejak tahun 1998 sampai sekarang. Mata kuliah yang diajarkan antara lain: Pengujian dan Pemeriksaan Bahan, Pengetahuan Bahan Teknik, Mesin Perkakas NC - CNC, serta Mekanika Teknik.



**Badaruddin Anwar**, lahir tanggal 15 Agustus 1975 di Takalar, Sulawesi Selatan. Lulus sarjana Pendidikan Teknik Mesin di Universitas Negeri Makassar tahun 2000, gelar Magister Pendidikan di universitas yang sama pada tahun 2005, dan gelar Insinyur diperoleh di UMI Makassar pada tahun 2017. Kegiatan yang ditekuni saat ini adalah sebagai dosen tetap pada Jurusan Teknik Mesin Universitas Negeri Makassar sejak tahun 2003 sampai sekarang. Mata kuliah yang diajarkan antara lain: Pengujian dan Pemeriksaan Bahan, Pengetahuan Bahan Teknik, Kerja Mesin Produksi, serta Pengujian Las.

Penerbit Deepublish (CV BUDI UTAMA)  
 Jl. Kalurang Km 9.3 Yogyakarta 55581  
 Telp/Fax : (0274) 4533427  
 Anggota IKAPI (078/DIR/2012)  
 © 2020 Deepublish Co. Id  
 • Penerbit Deepublish  
 • @penerbitdeepublish  
 • www.penerbitdeepublish.com



Pengujian Bahan Teknik

Samnur | Badaruddin Anwar

Samnur | Badaruddin Anwar

# Pengujian Bahan Teknik



**PENGUJIAN  
BAHAN TEKNIK**

# PENGUJIAN BAHAN TEKNIK

## UU No 28 tahun 2014 tentang Hak Cipta

### Fungsi dan sifat hak cipta Pasal 4

Hak Cipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 3 huruf a merupakan hak eksklusif yang terdiri atas hak moral dan hak ekonomi.

### Pembatasan Pelindungan Pasal 26

Ketentuan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 23, Pasal 24, dan Pasal 25 tidak berlaku terhadap:

- i. Penggunaan kutipan singkat Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait untuk pelaporan peristiwa aktual yang ditujukan hanya untuk keperluan penyediaan informasi aktual;
- ii. Penggandaan Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait hanya untuk kepentingan penelitian ilmu pengetahuan;
- iii. Penggandaan Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait hanya untuk keperluan pengajaran, kecuali pertunjukan dan Fonogram yang telah dilakukan Pengumuman sebagai bahan ajar; dan
- iv. Penggunaan untuk kepentingan pendidikan dan pengembangan ilmu pengetahuan yang memungkinkan suatu Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait dapat digunakan tanpa izin Pelaku Pertunjukan, Produser Fonogram, atau Lembaga Penyiaran.

### Sanksi Pelanggaran Pasal 113

1. Setiap Orang yang dengan tanpa hak melakukan pelanggaran hak ekonomi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf i untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 1 (satu) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp100.000.000 (seratus juta rupiah).
2. Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf c, huruf d, huruf f, dan/atau huruf h untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 3 (tiga) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).

Samnur  
Badaruddin Anwar

## PENGUJIAN BAHAN TEKNIK

Samnur & Badaruddin Anwar

Desain Cover :  
Ali Hasan Zein

Sumber :  
www.shutterstock.com

Tata Letak :  
Titis Yuliyanti

Proofreader :  
Meysa Lanjarwati

Ukuran :  
xiv, 130 hlm, Ukl: 15.5x23 cm

ISBN :  
978-623-02-5174-0

Cetakan Pertama :  
Agustus 2022

Hak Cipta 2022, Pada Penulis

---

Isi diluar tanggung jawab percetakan

---

Copyright © 2022 by Deepublish Publisher  
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.

**PENERBIT DEEPUBLISH**  
(Grup Penerbitan CV BUDI UTAMA)  
Anggota IKAPI (076/DIY/2012)

Jl. Rajawali, G. Elang 6, No 3, Dromo, Sardonoharjo, Ngaglik, Sleman  
Jl. Kalurang Km.9,3 - Yogyakarta 55581  
Telp/Faks: (0274) 4533427  
Website: www.deepublish.co.id  
www.penerbitdeepublish.com  
E-mail: cs@deepublish.co.id

## KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah Swt., karena dengan rahmat dan petunjuk-Nya maka buku ajar *Pengujian Bahan Teknik* ini akhirnya dapat dirampungkan.

Buku ajar *Pengujian Bahan Teknik* ini terdiri atas tiga pokok ajar yang memuat dasar-dasar pengujian dan pemeriksaan bahan teknik terutama teknik mesin, dilengkapi dengan contoh-contoh soal untuk membantu dalam memahami persoalan-persoalan pengujian dan pemeriksaan bahan teknik mesin.

Tidak lupa penulis mengucapkan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada pihak yang turut membantu dalam proses pembuatan buku ajar ini. Penulis juga menyadari buku ajar ini masih jauh dari kesempurnaan, sehingga segala kritik dan saran akan sangat membantu dalam penyempurnaan buku ajar ini di masa yang akan datang.

Makassar, 20 April 2022

Penulis

# DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR .....	v
DAFTAR ISI .....	vi
DAFTAR GAMBAR .....	viii
DAFTAR TABEL .....	xiii
<b>BAB 1 PENGUJIAN DESTRUKTIF BAHAN TEKNIK .....</b>	<b>1</b>
A. PENDAHULUAN .....	1
B. TUJUAN INSTRUKSIONAL .....	3
C. PRASYARAT .....	4
D. PENGUJIAN DESTRUKTIF .....	4
1. Pengujian Tarik ( <i>Tensile Test</i> ) .....	4
2. Pengujian Kekerasan ( <i>Hardness Test</i> ) .....	16
3. Pengujian Impak ( <i>Impact Test</i> ) .....	23
4. Pengujian Mulur ( <i>Creep Test</i> ) .....	28
5. Pengujian Lelah ( <i>Fatigue Test</i> ) .....	32
6. Pengujian Puntir ( <i>Torsion Test</i> ) .....	41
7. Pengujian Kekakuan ( <i>Toughness Test</i> ) .....	43
E. RANGKUMAN .....	48
<b>BAB 2 PENGUJIAN NON DESTRUKTIF BAHAN TEKNIK .....</b>	<b>53</b>
A. PENDAHULUAN .....	53
B. TUJUAN INSTRUKSIONAL .....	54
C. PRASYARAT .....	55
D. PENGUJIAN .....	55
1. Pengujian Penetran ( <i>Dye Penetrant Testing</i> ) .....	55
2. Pengujian Ultrasonik ( <i>Ultrasonic Testing</i> ) .....	56
3. Pengujian Partikel Magnetik ( <i>Magnetic Particle Testing</i> ) .....	59

4. Pengujian Radiografi ( <i>Radiography Testing</i> ) .....	61
E. RANGKUMAN .....	70
<b>BAB 3 ANALISIS STRUKTUR MIKRO BAHAN TEKNIK .....</b>	<b>76</b>
A. PENDAHULUAN .....	76
B. TUJUAN INSTRUKSIONAL .....	76
C. PRASYARAT .....	76
D. PENGUJIAN .....	76
1. Pengujian Perlakuan Panas Proses Anil .....	76
2. Pengujian Jomini .....	85
3. Pengujian Metalografi .....	88
E. RANGKUMAN .....	101

DAFTAR PUSTAKA .....	103
LAMPIRAN .....	104

# DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Bentuk spesimen standar ASTM (Callister, 2010).....	4
Gambar 1.2	Gambar skematik mesin uji tarik (Callister, 2010).....	5
Gambar 1.3	Ilustrasi skematik proses penarikan yang menimbulkan pertambahan panjang dan regangan linear positif (callister, 2010).....	5
Gambar 1.4	Diagram skematik tegangan-regangan dengan deformasi elastis linear (Callister, 2010).....	7
Gambar 1.5	(a) Bentuk tipikal tegangan-regangan tarik untuk logam dari elastis ke plastis yang memperlihatkan batas proporsional $P$ , dan tegangan <i>yield</i> $\sigma_y$ dihitung dengan <i>offset</i> regangan 0.002. (b) Gambaran tegangan-regangan tarik pada beberapa logam dengan <i>yield point</i> yang jelas (Callister, 2010).....	9
Gambar 1.6	Bentuk tipikal tegangan regangan tarik. Tegangan tarik ditunjukkan dengan titik $M$ pada grafik. Lingkaran menunjukkan perubahan geometri spesimen akibat deformasi pada saat penarikan (Callister, 2010).....	11
Gambar 1.7	Representasi skematik tegangan-regangan tarik untuk material rapuh dan ulet yang mengalami pembebanan.....	12
Gambar 1.8	Representasi skematik <i>modulus resilience</i> (ditandai dengan area yang gelap) ditentukan dari kurva tegangan-regangan suatu material (Callister, 2010).....	14
Gambar 1.9	Perbandingan tegangan-regangan teknik dengan tegangan-regangan sebenarnya. <i>Necking</i> yang dimulai pada titik $M$ pada kurva tegangan-	

	regangan teknik, sama dengan titik $M'$ pada kurva sebenarnya (Callister, 2010).....	15
Gambar 1.10	Hubungan antara tegangan tarik dan kekerasan untuk baja, kuningan dan besi cor (Callister, 2010).....	22
Gambar 1.11	Perbandingan angka kekerasan untuk beberapa jenis skala (Callister, 2010).....	23
Gambar 1.12	(a) Spesimen yang digunakan untuk cara Charpy dan cara Izod. (b) Alat Uji Impak. (Callister, 2010).....	25
Gambar 1.13	Pengaruh temperatur terhadap Energi Impak CVN (kurva A) dan persentase kerusakan geseran (kurva B) untuk material baja A283 (Callister, 2010).....	27
Gambar 1.14	Pengaruh kandungan karbon pada besarnya energi CVN terhadap temperatur transisi baja (Callister, 2010).....	28
Gambar 1.15	Tipikal kurva regangan mulur terhadap waktu dengan tegangan dan temperatur konstan (Callister, 2010).....	29
Gambar 1.16	Mesin uji mulur 50 kN (Sree Karuviyiyal, 2020).....	30
Gambar 1.17	Variasi tegangan terhadap waktu yang menyebabkan terjadinya patah lelah (Callister, 2010).....	35
Gambar 1.18	Gambar skematik alat uji lelah (Caslister, 2010).....	36
Gambar 1.19	Amplitudo tegangan ( $S$ ) versus logaritma putaran ( $N$ ) untuk (a) material yang menunjukkan batas lelah, dan (b) material tanpa batas lelah (Callister, 2010).....	38
Gambar 1.20	Petunjuk bagaimana mereduksi pengaruh konsentrasi tegangan. (a) Desain yang jelek: adanya ujung-ujung tajam, dan (b) Desain yang baik: adanya <i>fillet</i> pada daerah dengan perubahan diameter (Callister, 2010).....	39
Gambar 1.21	Batang yang mengalami puntiran.....	41

Gambar 1.22	Momen torsi vs sudut puntir.....	43
Gambar 1.23	Skema uji kekakuan (Callister, 2010).....	44
Gambar 1.24	diagram benda bebas spesimen uji lengkung Dari diagram benda bebas diperoleh:.....	46
Gambar 2.1	Dasar pengujian penetrasi (Harsono dan Okumura, 2000).....	55
Gambar 2.2	Skema dasar pengujian ultrasonik (Harsono dan Okumura, 2000).....	56
Gambar 2.3	Diagram rambatan pulsa dan penjelasan hasil (Harsono dan Okumura, 2000).....	57
Gambar 2.4	Jasa NDT PAUT (Phased Array Ultrasonic Testing) (Rieupassa, 2018).....	58
Gambar 2.5	Pengujian ultrasonik di lapangan untuk memantau korosi pipa (Khoeri, 2017).....	58
Gambar 2.6	Teknik Pembangkitan Medan Magnet (Simanjuntak, 1999).....	59
Gambar 2.7	Dasar pengujian dengan serbuk magnet (Harsono dan Okumura, 2000).....	60
Gambar 2.8	Dasar pengujian radiografi (Harsono dan Okumura, 2000).....	61
Gambar 2.9	Konstruksi tabung sinar X (Harsono dan Okumura, 2000).....	62
Gambar 2.10	Spektrum sinar X (a) dengan radiasi karakteristik (Mo, 35 kV) (b) spektrum radiasi putih (Target Wolfram) (Harsono dan Okumura, 2000).....	62
Gambar 2.11	Alat Uji Sinar X Portabel (Preville, 2020).....	63
Gambar 2.12	Alat uji sinar $\gamma$ (pengaturan jarak jauh).....	64
Gambar 2.13	Susunan dalam pengujian radiografi (Harsono dan Okumura, 2000).....	66
Gambar 2.14	Penetrameter untuk baja (JIS Z 3104 dan JIS G 0581) (Harsono dan Okumura, 2000).....	66
Gambar 2.15	Penetrameter untuk logam ringan (JIS Z 3104) (Harsono dan Okumura, 2000).....	67

Gambar 2.16	Penetrameter menurut AWS D1.1 (Harsono dan Okumura, 2000).....	67
Gambar 2.17	Kontrasmeter untuk baja (Harsono dan Okumura, 2000).....	68
Gambar 2.18	Kontrasmeter untuk aluminium (Harsono dan Okumura, 2000).....	68
Gambar 2.19	Diagram penyinaran (Harsono dan Okumura, 2000).....	69
Gambar 2.20	Pengamatan hasil pemotretan radiografi (Harsono dan Okumura, 2000).....	69
Gambar 2.21	Hasil pemotretan radiografi dari cacat las (Harsono dan Okumura, 2000).....	70
Gambar 2.22	Diagram pengujian ultrasonik dan radiografi berdasarkan bentuk cacat pada pengelasan (Harsono dan Okumura, 2000).....	74
Gambar 3.1	Diagram fasa besi-besi karbon pada daerah eutektoid, menunjukkan <i>range</i> temperatur pemanasan untuk baja karbon (Callister, 2010).....	78
Gambar 3.2	Hipotesis diagram fasa untuk paduan dengan komposisi $C_0$ yang dapat dikeraskan presipitasi (Callister, 2010).....	80
Gambar 3.3	Skematik temperatur terhadap waktu untuk proses <i>solution heat treating</i> dan <i>precipitation heat treating</i> (Callister, 2010).....	81
Gambar 3.4	Diagram skematik kekuatan dan kekerasan sebagai fungsi dari logaritma waktu <i>aging</i> pada temperatur konstan selama perlakuan panas presipitasi (Callister, 2010).....	82
Gambar 3.5	Laju pendinginan sebagai fungsi dari diameter dengan media pendingin (a) air (b) oli (Callister, 2010).....	84
Gambar 3.6	Profil kekerasan bahan dalam arah radial untuk (a) material baja 1040 dan 4140 berdiameter 50 mm dan (b) spesimen baja 4140 yang dilap	

	dalam air berdiameter 50 mm dan 100 mm (Callister, 2010).....	85
Gambar 3.7	Gambar skematik untuk spesimen pengujian Jomini (a) proses pendinginan pada ujung bawah, dan (b) setelah pengujian kekerasan. (Callister, 2010).....	86
Gambar 3.8	Kurva kemampukerasan berdasarkan angka kekerasan Rockwell C terhadap jarak dari ujung pendinginan (Callister, 2010).....	87
Gambar 3.9	Kurva kemampukerasan untuk lima jenis baja paduan yang berbeda, semuanya mengandung karbon dengan % berat yang sama 0.4% (Callister, 2010).....	87
Gambar 3.10	Partikel abrasif untuk pemolesan kasar (Simanjuntak, 1999).....	91
Gambar 3.11	Penghilangan bagian yang terdeformasi dengan pemolesan kasar (Simanjuntak, 1999).....	92
Gambar 3.12	Struktur spesimen pada pemolesan halus (Simanjuntak, 1999).....	95
Gambar 3.13	Arah pemolesan halus untuk menghilangkan ekor komet pada permukaan yang dipoles (Simanjuntak, 1999).....	96
Gambar 3.14	Proses etsa untuk mendapatkan konfigurasi batas butir (Callister, 2010).....	97

## DAFTAR TABEL

Tabel 1.1	Modulus Elastisitas pada Beberapa Logam.....	7
Tabel 1.2	Sifat mekanis untuk beberapa logam dan paduan dalam keadaan di anil.....	13
Tabel 1.3	Tabulasi nilai $n$ dan $K$ untuk beberapa paduan.....	16
Tabel 1.4	Teknik pengujian kekerasan.....	21
Tabel 1.5	Harga momen lentur, pusat sumbu, momen inersia dan tegangan lentur untuk penampang bulat dan persegi empat.....	45
Tabel 1.6	Perbandingan harga tegangan lentur dan tegangan tarik pada besi cor.....	45
Tabel 2.1	Klasifikasi film sinar X.....	64
Tabel 2.2	Kriteria pemilihan film.....	65
Tabel 2.3	Tempat cacat dan cara pengujian.....	71
Tabel 2.4	Bentuk cacat dan cara pengujian.....	71
Tabel 2.5	Jenis dan bentuk cacat.....	71
Tabel 2.6	Perbandingan antara uji ultrasonik dan uji radiografi.....	72
Tabel 2.7	Jenis cacat dan cara pengujian.....	73



# BAB 1

## PENGUJIAN DESTRUKTIF BAHAN TEKNIK

### A. PENDAHULUAN

Material dalam penggunaannya biasanya di bawah pengaruh gaya atau pembebanan; sebagai contoh paduan aluminium yang merupakan bahan konstruksi sayap pesawat terbang dan baja dalam penggunaannya sebagai poros pada kendaraan. Dalam situasi seperti ini sangat perlu untuk mengetahui karakteristik dari material untuk mendesain komponen-komponen dari bahan tersebut sehingga tidak akan terjadi deformasi dan kerusakan pada material tidak akan terjadi. Sifat mekanis dari material menggambarkan hubungan antara respons atau deformasi bahan terhadap beban atau gaya yang bekerja. Sifat-sifat mekanis yang penting adalah: kekuatan (*strength*), kekerasan (*hardness*), keuletan (*ductility*) dan ketangguhan (*stiffness*).

Sifat mekanis material diperoleh dengan membuat suatu pengujian material di laboratorium yang menggambarkan sedekat mungkin dengan kondisi aplikasi yang sebenarnya. Faktor-faktor yang perlu diperhatikan termasuk di dalamnya kondisi pembebanan yang sebenarnya serta lamanya pembebanan yang harus sama dengan kondisi lingkungan. Jenis pembebanannya bisa berupa tarikan, tekanan, atau geseran dan besarnya bisa konstan atau berfluktuasi secara kontinu terhadap waktu. Lama pembebanan bisa hanya beberapa menit atau bisa juga selama beberapa tahun. Temperatur pengujian bisa juga merupakan faktor yang penting dalam pengujian.

Sifat mekanis merupakan pusat perhatian oleh beberapa institusi (antara lain produsen dan konsumen material, kelompok peneliti, biro pemerintah) dengan kepentingan yang berbeda-beda. Konsekuensinya, harus ada kesamaan dalam cara pelaksanaan pengujian, dan dalam menginterpretasikan hasil pengujian. Kesamaan ini dilakukan dengan membuat teknik pengujian yang standar. Pembentukan dan pengumuman standar ini biasanya dikoordinasikan oleh asosiasi profesional. Di Amerika Serikat, organisasi yang paling

aktif adalah *American Society for Testing and Materials (ASTM)*. Dalam buku tahunan standar ASTM mencakup sejumlah volume pengujian, yang diterbitkan dan diperbaharui setiap tahunnya; yang berhubungan dengan banyak standar teknik pengujian mekanik. Peranan ahli konstruksi/struktur adalah menghitung distribusi tegangan dan regangan dari setiap komponen yang mengalami pembebanan. Hasil ini dapat dilengkapi dengan menggunakan teknik pengujian eksperimen atau analisis tegangan secara teoritis dan matematis.

Dalam industri pemesinan/pembentukan senantiasa berhubungan dengan aspek pemeriksaan mulai dari:

1. Pemeriksaan bahan baku
2. Pemeriksaan proses
3. Pemeriksaan kualitas dimensi
4. Pemeriksaan performansi

Pemeriksaan-pemeriksaan ini dilakukan berdasarkan spesifikasi dan prosedur pemeriksaan yang baku (standar).

Dari hal-hal tersebut di atas terlihat bahwa pengujian (tes) merupakan salah satu metode pemeriksaan.

Jenis pengujian secara umum ada 2, yaitu:

1. Pengujian merusak (*destructive test*)
2. Pengujian tanpa merusak (*non destructive test*)

Berdasarkan karakter pengujian mekanik yang mana material uji harus sampai rusak, maka dapat disimpulkan bahwa spesimen memang harus khusus dibuat untuk spesimen uji (standar). Oleh karena itu, jenis pengujian ini sangat banyak diterapkan misalkan dalam memeriksa karakteristik bahan baku dan juga memeriksa kebenaran spesifikasi material dalam analisis kegagalan.

Pengujian mekanik dilakukan untuk mendapatkan sifat-sifat mekanik suatu bahan, yaitu kelakuan atau respons bahan terhadap pembebanan mekanik (baik statis maupun dinamis). Yang dimaksud dengan sifat mekanik bahan meliputi:

1. Kekuatan tarik (*tensile strength*).
2. Kekuatan luluh/batas luluh (*yield point*)
3. Keuletan (*ductility*)
4. Modulus elastisitas (*modulus of elasticity*)
5. Kekerasan (*hardness*)

6. Ketahanan terhadap pembebanan impact (*impact*)
7. Ketahanan mulur (*creep strength*)
8. Ketahanan aus (*wear resistance*)

Untuk mengamati hal-hal di atas, maka pengujian mekanik yang akan dibahas meliputi:

1. Pengujian Tarik (*Tensile Test*)
2. Pengujian Kekerasan (*Hardness Test*)
3. Pengujian Impact (*Impact Test*)
4. Pengujian Mulur (*Creep Test*)
5. Pengujian Lelah (*Fatigue Test*)
6. Pengujian Puntir (*Torsion Test*)
7. Pengujian Kekakuan (*Toughness Test*)

Dalam pelaksanaannya pengujian-pengujian dapat dilakukan pada seluruh sampel atau dapat juga dilakukan metode "*sampling*" (diambil beberapa per-*batch*).

Seperti yang disebut di atas, pemeriksaan atau pengujian dilaksanakan juga pada proses analisis kegagalan (*failure analysis*) untuk mencari penyebab kegagalan dan cara-cara mengatasinya. Jadi pada hakikatnya pengujian merusak hanya dilaksanakan untuk hal-hal di atas.

Jenis pemeriksaan ini dapat meliputi:

1. Pemeriksaan karakteristik mekanik.
2. Pemeriksaan komposisi kimia.
3. Pemeriksaan sifat-sifat lain yang ditentukan berdasarkan keperluan perencanaan.

## B. TUJUAN INSTRUKSIONAL

Setelah mempelajari topik ini diharapkan mahasiswa dapat:

1. Mampu menghitung tegangan dan regangan tarik suatu bahan dan menggambarkan hubungan tersebut dalam bentuk grafik
2. Mampu menghitung kekerasan bahan dengan cara Brinell, Vickers dan Rockwell
3. Mampu menghitung kekuatan bahan akibat *impact* (tumbukan secara tiba-tiba) dan menentukan daerah transisi kekuatan bahan berdasarkan temperatur kerja
4. Mampu mengetahui batas mulur suatu bahan terutama yang bekerja pada temperatur tinggi

5. Mampu menghitung umur pemakaian suatu bahan dalam hubungannya dengan pembebanan dinamis dan siklus tegangan yang berubah-ubah
6. Mampu menghitung tegangan puntir dan sudut puntir maksimum yang kemudian dibuat dalam bentuk grafik
7. Mampu menghitung lendutan dan tegangan lentur akibat beban pada batang uji

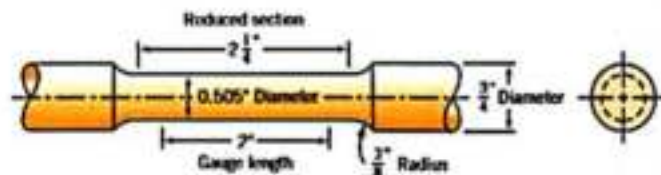
### C. PRASYARAT

Mahasiswa memahami pengetahuan bahan teknik

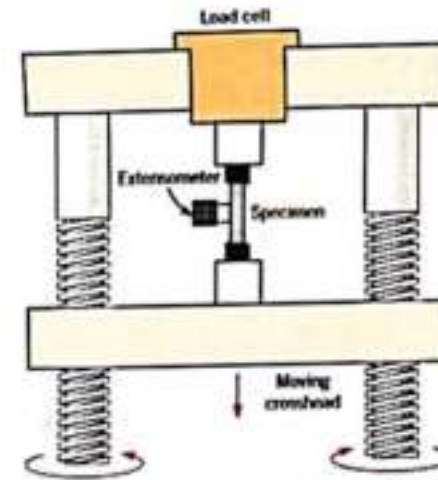
### D. PENGUJIAN DESTRUKTIF

#### 1. Pengujian Tarik (*Tensile Test*)

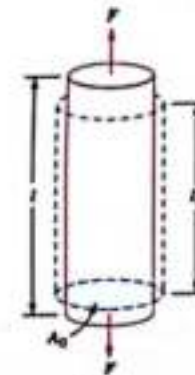
Pengujian tarik merupakan pengujian yang paling sering digunakan dibandingkan jenis pengujian merusak yang lain. Uji tarik dapat digunakan untuk mendapatkan beberapa sifat mekanis bahan yang penting dalam desain antara lain kekuatan (*tensile strength*), kekuatan luluh (*yield strength*), ketangguhan (*toughness*) dan keuletan (*ductility*). Spesimen ditarik sampai putus, dengan penambahan beban tarik secara perlahan pada spesimen. Spesimen uji tarik standar diperlihatkan pada gambar 1.1. Pada umumnya spesimen uji tarik berpenampang bulat pejal, namun biasa juga digunakan batang uji berpenampang persegi. Selama proses pengujian, deformasi terjadi pada seksi uji dengan panjang sekitar 50.8 mm (2.0 in.). Diameter standar seksi uji sekitar 12.8 mm (0.5 in.), panjang seksi yang direduksi paling tidak empat kali diameter atau sekitar 60 mm (2¼ in.). Kedua ujung spesimen uji ini dipasang pada pemegang dari alat uji (gambar 1.2).



Gambar 1.1 Bentuk spesimen standar ASTM (Callister, 2010)



Gambar 1.2 Gambar skematik mesin uji tarik (Callister, 2010)



Gambar 1.3 Ilustrasi skematik proses penarikan yang menimbulkan pertambahan panjang dan regangan linear positif (callister, 2010).

Mesin uji tarik didesain untuk menarik spesimen dengan laju penarikan yang konstan, dan secara kontinu dan simultan mengukur beban penarikan dengan menggunakan *load cell* dan perpanjangan spesimen dengan menggunakan ekstensometer. Pengujian tarik biasanya berlangsung selama beberapa menit sampai spesimen putus, sehingga spesimen terdeformasi permanen dan biasanya sampai

putus. Perpanjangan yang dialami bahan akibat penarikan dapat dilihat pada gambar 1.3

Output dari pengujian ini ditampilkan dalam bentuk grafik beban versus perpanjangan. Karakteristik pembebanan dan deformasi tergantung pada ukuran spesimen (geometri spesimen). Untuk meminimalisasi faktor geometri ini, beban dan perpanjangan dinormalisasi dengan menggunakan parameter tegangan teknik dan regangan teknik. Tegangan teknik  $\sigma$  didefinisikan melalui hubungan:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (1.1)$$

$F$  adalah beban yang bekerja tegak lurus pada penampang spesimen, dalam satuan newton (N) atau pound gaya (lb<sub>f</sub>), dan  $A_0$  adalah luas penampang mula-mula sebelum beban diberikan (m<sup>2</sup> atau in.<sup>2</sup>). Satuan tegangan teknik (biasa hanya disebut tegangan) adalah megapascal, MPa (SI) (1 MPa = 106 N/m<sup>2</sup>), dan pound per inci kuadrat, psi (1 MPa = 145 psi).

Regangan teknik atau biasa hanya disebut regangan didefinisikan melalui hubungan:

$$\epsilon = \frac{l_t - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (1.2)$$

$l_0$  adalah panjang mula-mula sebelum beban diberikan, dan  $l_t$  adalah perpanjangan seketika saat beban diberikan. Regangan ini tidak bersatuan sehingga regangan tidak tergantung pada sistem satuan. Biasa juga regangan dibuat dalam satuan persen dengan mengalikan nilai regangan dengan 100%.

### Deformasi Elastis

Deformasi atau regangan suatu struktur tergantung pada besarnya tegangan yang bekerja. Untuk beberapa logam yang diberi tegangan tarik yang relatif kecil, tegangan dan regangannya proporsional satu sama lain melalui hubungan:

$$\sigma = E\epsilon \quad (1.3)$$

Hubungan ini dikenal dengan nama Hukum Hooke, dan konstanta proporsional  $E$  (Gpa atau psi) disebut Modulus Elastisitas

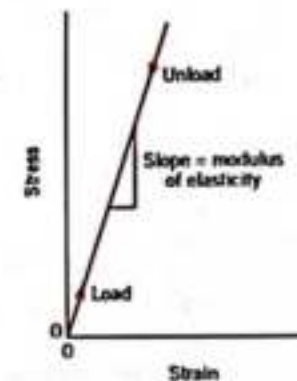
atau Modulus Young. Nilai modulus elastisitas untuk beberapa logam dapat dilihat pada tabel 1.1

Deformasi di mana tegangan dan regangan saling proporsional disebut deformasi elastis; grafik tegangan (ordinat) versus regangan (absis) berbentuk garis lurus seperti terlihat pada gambar 1.4. Kemiringan dari kurva linear ini menunjukkan besarnya modulus elastisitas.

Tabel 1.1 Modulus Elastisitas pada Beberapa Logam

Logam	Modulus Elastisitas		Modulus Geser		Rasio Poisson
	GPa	106 psi	GPa	106 psi	
Aluminium	69	10.0	25	3.6	0.33
Kuningan	97	14.0	27	5.4	0.34
Tembaga	110	16.0	46	6.7	0.34
Magnesium	45	6.5	17	2.5	0.29
Nikel	207	30.0	76	11.0	0.31
Baja	207	30.0	83	12.0	0.30
Titanium	107	15.5	45	6.5	0.34
Tungsten	407	59.0	160	23.2	0.28

Sumber: Callister, 2010



Gambar 1.4 Diagram skematik tegangan-regangan dengan deformasi elastis linear (Callister, 2010).

Modulus ini juga biasa disebut kekakuan, atau ketahanan material terhadap deformasi elastis. Semakin besar modulus elastis,

semakin kaku material tersebut atau regangan elastis yang dihasilkan lebih kecil akibat pemberian tegangan. Modulus ini merupakan parameter penting dalam desain yang digunakan untuk menghitung defleksi elastis.

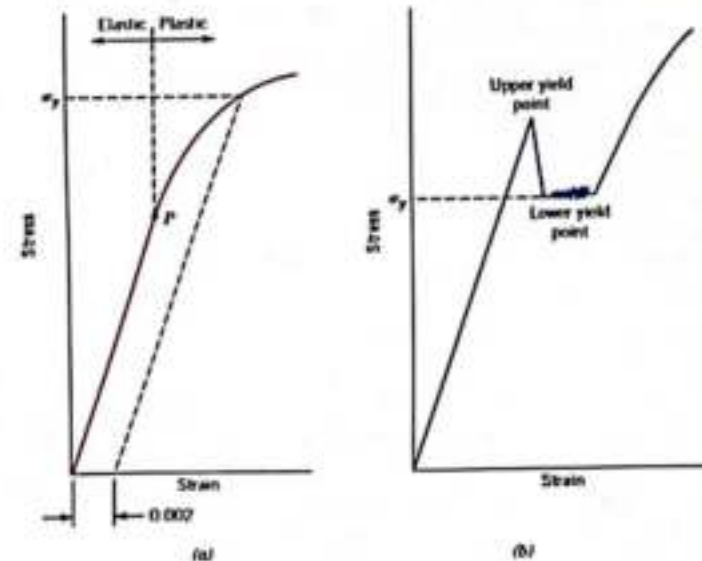
Deformasi elastis ini bersifat tidak permanen, yang berarti bahwa jika beban yang bekerja dilepaskan, material akan kembali ke bentuk semula. Sebagaimana terlihat pada gambar 1.4, pemberian beban terlihat dengan arah panah yang bergerak dari titik nol ke atas sepanjang garis lurus. Sebaliknya saat beban dilepaskan, terlihat dengan arah panah yang sebaliknya bergerak dari atas ke bawah sepanjang garis lurus kembali ke titik nol.

### Deformasi Plastis

Material logam pada umumnya memiliki deformasi elastis hanya sampai pada regangan sekitar 0.005. Setelah material terdeformasi di atas regangan ini, tegangan yang terjadi tidak proporsional lagi terhadap regangan, dan bersifat permanen, tidak dapat kembali lagi, atau terjadi deformasi plastis. Gambar 1.5 memperlihatkan secara skematik tegangan-regangan tarik pada kondisi plastis untuk logam. Transisi dari elastis ke plastis terjadi secara gradual untuk logam tertentu; dan beberapa di antaranya mengalami transisi yang jelas terlihat dari fluktuasi tegangan dan regangan yang terjadi secara cepat (daerah luluh atau *yield point*).

### Sifat Mekanis dalam Uji Tarik

**Yielding dan Tegangan Yield.** Banyak struktur yang didesain dengan asumsi bahwa hanya akan terjadi deformasi elastis saat beban bekerja. Sehingga perlu diketahui besar tegangan saat deformasi plastis mulai terjadi, atau ketika fenomena *yield* mulai timbul. Untuk logam yang mengalami transisi elastis-plastis yang gradual, titik *yield* ditandai dengan awal perubahan dari garis linear kurva tegangan-regangan, ini biasa juga disebut **titik proporsional**, yang ditunjukkan dengan titik *p* pada gambar 1.5a. Dalam beberapa kasus, titik ini tidak bisa ditentukan dengan tepat. Sehingga untuk mengetahui titik *yield* dilakukan *offset* tegangan dengan menarik garis yang sejajar dengan garis lurus pada kurva tegangan-regangan pada jarak regangan 0,002. Perpotongan antara garis lurus ini dengan kurva tegangan-regangan tarik ditentukan sebagai nilai **tegangan yield ( $\sigma_y$ )**.



Gambar 1.5 (a) Bentuk tipikal tegangan-regangan tarik untuk logam dari elastis ke plastis yang memperlihatkan batas proporsional *P*, dan tegangan *yield*  $\sigma_y$  dihitung dengan *offset* regangan 0.002. (b) Gambaran tegangan-regangan tarik pada beberapa logam dengan *yield point* yang jelas (Callister, 2010).

Untuk material yang tidak memperlihatkan kurva tegangan-regangan yang linear pada kondisi elastis, secara praktis diambil pendekatan bahwa tegangan *yield* terjadi pada saat kondisi pembebanan menimbulkan besarnya regangan sebesar 0,005.

Beberapa baja dan material lain memperlihatkan kurva tegangan-regangan seperti terlihat pada gambar 1.5b. Transisi dari elastis ke plastis diperlihatkan dengan sangat jelas (fenomena *yield* yang jelas). Pada titik *yield* tertinggi, deformasi plastis ditandai dengan penurunan tegangan secara aktual.

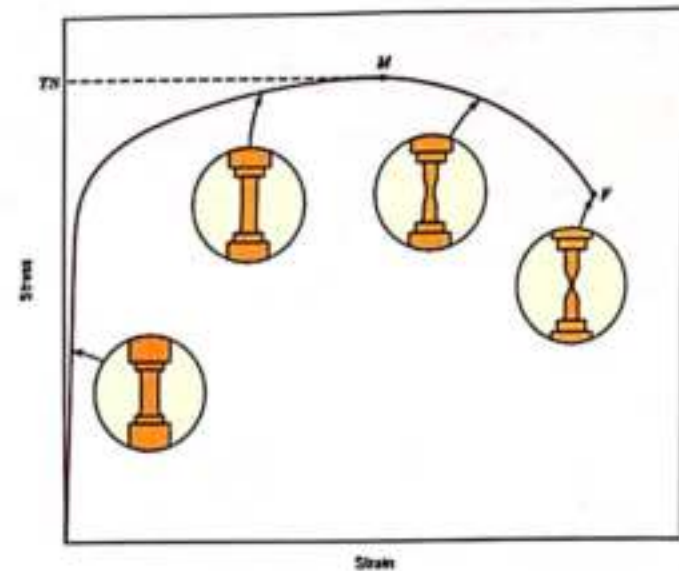
Deformasi selanjutnya agak berfluktuasi pada suatu tingkat tegangan, yang dikenal dengan titik *yield* rendah. Untuk logam yang memperlihatkan fenomena ini, tegangan *yield* diambil dari harga rata-rata tegangan pada titik *yield* rendah, sehingga tidak perlu dilakukan *offset* regangan.

Tegangan *yield* adalah besaran yang menunjukkan ketahanan logam terhadap deformasi plastis. Tegangan *yield* bervariasi dari 35 MPa (5000 psi) untuk aluminium tegangan rendah sampai 1400 MPa (200.000 psi) untuk baja tegangan tinggi. Pada dasarnya, untuk kebutuhan desain yang digunakan adalah tegangan *yield*. Hal ini ditetapkan untuk menghindari terjadinya deformasi plastis yang terlalu besar.

**Tegangan Tarik.** Setelah *yielding*, tegangan terus berlanjut menjadi deformasi plastis pada logam yang meningkat sampai mencapai titik maksimum, titik *M* pada gambar 1.6, dan selanjutnya menurun sampai material putus, titik *F*.

Tegangan tarik (MPa atau Psi) adalah besarnya tegangan pada titik maksimum dari kurva tegangan regangan gambar 1.6. Ini menunjukkan besarnya tegangan yang dapat ditahan oleh material dalam struktur yang mengalami tarikan, jika tegangan ini terjadi dan berlangsung terus menerus maka akan terjadi kerusakan. Semua deformasi yang terjadi di atas titik ini adalah seragam pada semua titik spesimen tarik. Namun pada tegangan maksimum ini mulai terjadi fenomena *necking* (pengecilan penampang) pada satu titik dan konsentrasi tegangan mulai timbul pada *necking* tersebut, sebagaimana terlihat pada gambar 1.6. Putus pada spesimen kemudian terjadi pada titik *necking* tersebut.

Tegangan tarik bervariasi dari 50 MPa (7000 Psi) untuk aluminium sampai 3000 MPa (450000Psi) untuk baja tegangan tinggi. Pada dasarnya tegangan yang digunakan untuk keperluan desain adalah tegangan *yield*. Ini disebabkan oleh karena ketika struktur mengalami tegangan tarik maka terjadi banyak deformasi plastis.



Gambar 1.6 Bentuk tipikal tegangan regangan tarik. Tegangan tarik ditunjukkan dengan titik *M* pada grafik. Lingkaran menunjukkan perubahan geometri spesimen akibat deformasi pada saat penarikan (Callister, 2010)

**Ductility (Keuletan)** adalah salah satu sifat mekanis yang penting. Ini diukur dengan melihat besarnya deformasi plastis yang terjadi sampai spesimen uji putus. Material yang memiliki sangat sedikit atau bahkan tidak ada deformasi plastis sampai putus disebut material rapuh (*brittle*). Tegangan-regangan tarik untuk material rapuh dan ulet dapat dilihat pada gambar 1.7.

Keuletan dapat digambarkan secara kualitatif dalam bentuk persentase perpanjangan maupun persentase reduksi penampang. Persentase perpanjangan% *EL* adalah persentase regangan plastis pada saat spesimen uji putus, atau

$$\%EL = \left( \frac{l_f - l_0}{l_0} \right) \times 100\% \quad (1.4)$$

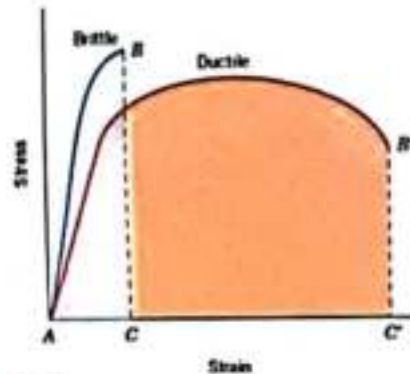
$l_f$  adalah panjang spesimen saat putus dan  $l_0$  adalah panjang spesimen mula-mula.

Persentase reduksi penampang didefinisikan sebagai

$$\%AR = \left( \frac{A_0 - A_f}{A_0} \right) \times 100\% \quad (1.5)$$

$A_0$  adalah luas penampang spesimen mula-mula dan  $A_f$  adalah luas penampang spesimen saat putus.

Dari pengujian tarik (tegangan-regangan tarik), diperoleh beberapa sifat mekanis yang penting untuk bahan sebagaimana terlihat dalam tabel 1.2



Sumber: Callister, 2010

Gambar 1.7 Representasi skematik tegangan-regangan tarik untuk material rapuh dan ulet yang mengalami pembebanan.

**Resilience** adalah kapasitas material untuk menyerap energi ketika terdeformasi elastis, kemudian pada saat beban dihilangkan, terjadi pemulihan energi (*energy recovered*). Sifat yang berhubungan dengan hal ini disebut *Modulus of Resilience*,  $U_r$ , yaitu energi regangan persatuan volume yang dibutuhkan untuk tegangan material dari keadaan tanpa beban sampai ke titik *yielding*.

Tabel 1.2 Sifat mekanis untuk beberapa logam dan paduan dalam keadaan di anil

Logam paduan	Tegangan Yield MPa (ksi)	Tegangan Tarik MPa (ksi)	Keuletan,%EL Tarik [dalam 50 mm (2 in.)]
Aluminium	35 (5)	90 (13)	40
Tembaga	69 (10)	200 (29)	45
Kuningan (70Cu-30Zn)	75 (11)	300 (44)	68
Besi	130 (19)	262 (38)	45
Nikel	138 (20)	480 (70)	40
Baja (1020)	180 (26)	380 (55)	25
Titanium	450 (65)	520 (75)	25
Molibdenum	565 (82)	655 (95)	35

Sumber: Callister, 2010

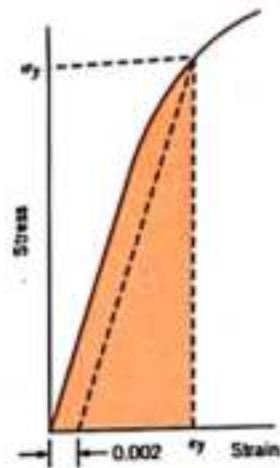
Secara komputasi, *modulus resilience* untuk spesimen tergantung pada uji tarik untuk daerah di bawah kurva tegangan-regangan sampai pada titik *yielding* (gambar 1.7), atau

$$U_r = \int_0^{\epsilon_y} \sigma d\epsilon \quad (1.6)$$

Asumsikan bahwa daerah elastis berupa garis linear, maka

$$U_r = \frac{1}{2} \sigma_y \epsilon_y = \frac{\sigma_y^2}{2E} \quad (1.7)$$

$\epsilon_y$  adalah regangan pada saat *yielding*. Satuan untuk *resilience* untuk SI adalah joule per meter kubik ( $J/m^3$ , setara dengan Pa) dan untuk British adalah inci-pound gaya per inci kubik ( $in-lb_f/in.^3$ , setara dengan psi). Dari persamaan di atas terlihat bahwa, *resilient* material yang memiliki tegangan *yield* yang tinggi dan modulus elastis yang rendah; maka material tersebut cocok untuk digunakan sebagai bahan pegas.



Gambar 1.8 Representasi skematik *modulus resilience* (ditandai dengan area yang gelap) ditentukan dari kurva tegangan-regangan suatu material (Callister, 2010).

**Tegangan regangan sebenarnya.** Kadang-kadang lebih benar jika digunakan grafik tegangan-regangan sebenarnya.

Tegangan sebenarnya didefinisikan sebagai beban  $F$  dibagi dengan luas penampang sesaat  $A_i$  selama proses deformasi berlangsung (yaitu pengecilan penampang *neck* setelah tegangan maksimum), atau

$$\sigma_r = \frac{F}{A_i} \quad (1.8)$$

Selanjutnya untuk regangan sebenarnya juga dapat dituliskan sebagai

$$\epsilon_r = \ln \frac{l_i}{l_0} \quad (1.9)$$

Jika tidak terjadi perubahan volume selama deformasi berlangsung, atau jika

$$A_i l_i = A_0 l_0 \quad (1.10)$$

Maka hubungan antara tegangan-regangan teknik dengan tegangan-regangan sebenarnya adalah

$$\sigma_r = \sigma(1 + \epsilon) \quad (1.11)$$

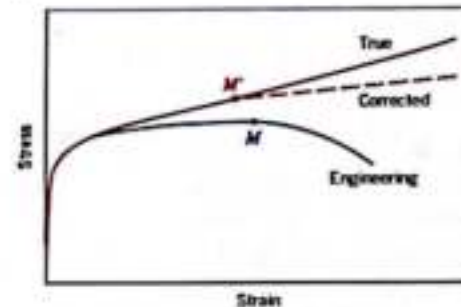
$$\epsilon_r = \ln(1 + \epsilon) \quad (1.12)$$

Kedua persamaan di atas hanya berlaku untuk daerah setelah terjadi *necking*; setelah titik ini, tegangan dan regangan sebenarnya harus dihitung dari beban aktual, luas penampang, dan panjang daerah pengukuran.

Perbandingan skematik antara tegangan-regangan teknik dan tegangan-regangan sebenarnya diperlihatkan pada gambar 1.9

Untuk beberapa logam dan paduan, daerah untuk kurva tegangan-regangan sebenarnya pada deformasi plastis di titik *necking* mulai terjadi dapat didekati dengan persamaan

$$\sigma_r = K \epsilon_r^n \quad (1.13)$$



Gambar 1.9 Perbandingan tegangan-regangan teknik dengan tegangan-regangan sebenarnya. *Necking* yang dimulai pada titik  $M$  pada kurva tegangan-regangan teknik, sama dengan titik  $M'$  pada kurva sebenarnya (Callister, 2010).

Dalam persamaan ini,  $K$  dan  $n$  adalah konstanta, dengan nilai yang bervariasi untuk setiap paduan, dan kondisi material (yakni ketika material telah melalui proses deformasi plastis sebelumnya, perlakuan panas dan sebagainya). Parameter  $n$  biasa disebut eksponen pengerasan regangan *strain hardening exponent* dan biasanya kurang dari satu. Nilai  $n$  dan  $K$  untuk beberapa paduan diperlihatkan dalam tabel 1.3



Tabel 1.3 Tabulasi nilai  $n$  dan  $K$  untuk beberapa paduan

Material	n	K	
		MPa	psi
Baja karbon rendah (dianil)	0.26	530	77,000
Baja paduan (Type 4340, dianil)	0.15	640	93,000
Stainless steel (Type 304, dianil)	0.45	1275	185,000
Aluminium (dianil)	0.20	180	26,000
Paduan aluminium (Type 2024, diperlakukan panas)	0.16	690	100,000
Tembaga (dianil)	0.54	315	46,000
Kuningan (70Cu-30Zn, dianil)	0.49	895	130,000

Sumber: Callister, 2010

## 2. Pengujian Kekerasan (*Hardness Test*)

Salah satu sifat mekanis yang lain yang cukup penting adalah kekerasan bahan, yaitu pengukuran ketahanan material terhadap deformasi plastis lokal (setempat) berupa bekas penekanan yang kecil atau goresan. Pada awalnya pengujian kekerasan berdasarkan pada mineral alami dengan skala yang disusun berdasarkan kemampuan material untuk menggores material lain yang lebih lunak. Angka kualitatif dan indeks kekerasan tertentu kemudian ditemukan dan disebut skala *Mohs*, dengan *range* dari 1 untuk material paling lunak yaitu talk sampai angka 10 untuk material paling keras yaitu intan. Teknik pengujian kuantitatif mulai dikembangkan pada tahun-tahun selanjutnya dengan menggunakan *indentor*/penekan kecil yang ditekankan ke dalam permukaan material yang diuji, di bawah pengaruh beban yang terkontrol dan lama penekanan tertentu. Kedalaman atau ukuran bekas penekanan kemudian diukur, yang kemudian dihubungkan sebagai angka kekerasan material; semakin lunak material, semakin besar dan semakin dalam bekas penekanan, dan semakin kecil angka kekerasannya. Pengukuran kekerasan pada dasarnya bersifat relatif, dan perlu cara khusus, ketika membandingkan angka kekerasan dengan teknik pengujian yang berbeda.

Pengujian kekerasan lebih sering dilakukan dibandingkan dengan pengujian mekanis yang lain dengan beberapa alasan:

- Cara pengujiannya sederhana dan murah-pada dasarnya tidak perlu persiapan spesimen, dan peralatan ujinya relatif murah.
- Pengujiannya bersifat nondestruktif-kerusakan yang terjadi tidak memberikan dampak deformasi yang besar; indentor yang digunakan hanya indentor kecil dan bekas penekanan hanya berupa deformasi kecil yang terjadi.
- Sifat mekanis yang lain untuk material dapat didekati/dikonversi dari data uji kekerasan, misalnya tegangan tarik.

### Uji Kekerasan Rockwell

Uji kekerasan Rockwell merupakan metode yang paling sering digunakan dalam uji kekerasan bahan karena mudah dilakukan dan tidak memerlukan keahlian khusus. Beberapa jenis skala bisa digunakan untuk berbagai jenis kombinasi pembebanan dan indentor yang digunakan, untuk setiap jenis logam dan paduannya, dari yang keras sampai yang lunak. Indentornya berbentuk bola baja yang dikeraskan dengan diameter 1/16, 1/8, 1/4 dan 1/2 in. (1.588, 3.175, 6.350 dan 12.70 mm) dan kerucut intan yang digunakan untuk logam keras.

Pengukuran kekerasan logam dengan sistem ini dihitung dengan melihat perbedaan kedalaman penekanan yang dihasilkan dari pembebanan minor yang dilanjutkan dengan pemberian beban mayor yang lebih besar; penggunaan beban minor ini meningkatkan keakuratan pengujian. Berdasarkan besarnya beban mayor dan beban minor, jenis pengujian dibagi atas dua yaitu *Rockwell* dan *Superficial Rockwell*. Untuk *Rockwell* beban minornya 10 kg, beban mayornya 60, 100 dan 150 kg. Setiap skala ditandai dengan huruf alfabet; beberapa di antaranya diberikan dalam tabel... sesuai dengan jenis indentor dan pembebanan. *Superficial test* menggunakan beban minor 3 kg, beban mayornya 15, 30 dan 45 kg. Skalanya ditandai dengan 15, 30 atau 45 (sesuai beban), diikuti dengan N, T, W, X atau Y, tergantung pada jenis indentor. *Superficial test* biasanya digunakan untuk spesimen yang tipis.

Dalam mengukur kekerasan bahan baik cara Rockwell maupun *superficial*, harga kekerasan dan simbol skalanya harus dituliskan. Skalanya disimbolkan dengan HR diikuti dengan identifikasi skala yang sesuai. Misalnya 80 HRB menunjukkan angka kekerasan Rockwell 80 pada skala B, dan 60 HR30W menandakan kekerasan *superficial* 60 pada skala 30W.

Pada setiap skala, *range* angka kekerasan bisa sampai 130; namun untuk angka kekerasan yang meningkat di atas 100 atau turun di bawah 20 pada setiap skala biasanya menjadi kurang akurat; dan karena skala-skala ini saling *overlap*, pada beberapa kondisi lebih baik untuk menggunakan skala lain yang lebih keras atau lebih lunak.

Hasil yang tidak akurat juga diperoleh jika ketebalan spesimen sangat tipis, penekanan dilakukan dekat dengan tepi material, atau dua titik penekanan yang terlalu rapat satu sama lain. Ketebalan spesimen harus paling sedikit 10 kali kedalaman penekanan, jarak antara pinggir spesimen maupun setiap titik penekanan paling sedikit 3 kali diameter penekan. Keakuratan juga tergantung pada kehalusan dan rataannya permukaan yang diberi penekanan.

Peralatan uji kekerasan Rockwell yang modern beroperasi secara otomatis dan sangat mudah dioperasikan, angka kekerasan langsung terbaca, dan setiap pengukuran membutuhkan waktu hanya beberapa detik. Peralatan modern juga memungkinkan variasi waktu dalam pemberian beban. Variabel-variabel ini harus diperhatikan dalam mendapatkan data kekerasan material.

### Uji Kekerasan Brinell

Uji kekerasan Brinell, sebagaimana pada uji kekerasan Rockwell, juga menggunakan bola baja yang dikeraskan yang ditekankan ke dalam permukaan material yang diuji. Diameter bola baja penekan yang dikeraskan (atau karbida tungsten) adalah 10.00 mm (0.394 in.). Standar beban bervariasi dari 500 sampai 3000 kg dengan kenaikan beban 500 kg. Selama pengujian, beban dijaga konstan untuk beberapa saat (antara 10 dan 30 detik). Material yang lebih keras membutuhkan penggunaan beban yang lebih besar. Angka kekerasan Brinell, HB, adalah fungsi dari besar beban dan diameter bekas penekanan yang dihasilkan (lihat tabel 1.4). Diameter bekas penekanan ini diukur dengan mikroskop tegangan rendah, dengan

melihat skala yang terdapat pada lubang pengamatan di mikroskop. Hasil pengukuran diameter tersebut kemudian dikonversi ke harga HB yang sesuai dengan menggunakan grafik; hanya satu skala yang menggunakan teknik ini, sementara yang lain dihitung dengan menggunakan persamaan pada tabel 1.4.

Tebal spesimen minimum dan posisi penekanan relatif terhadap tepi material dan jarak antara penekanan sama dengan uji kekerasan Rockwell. Selanjutnya, untuk mendapatkan hasil penekanan yang baik, permukaan material harus cukup halus dan rata.

Pada uji Brinell kemungkinan terjadi *flatening/gepeng* pada indenter jika material uji cukup keras dan pada material uji yang lunak kemungkinan bisa terjadi *flow of material*, sehingga dalam pengujian harus hati-hati.

### Uji Knoop dan Vickers Microhardness









Dua teknik pengujian kekerasan yang lain adalah Knoop (dibaca *nuup*) dan Vickers (biasa juga disebut piramida intan). Pada setiap pengujian, indenter piramida intan yang sangat kecil ditekankan pada permukaan spesimen. Beban yang digunakan harus lebih kecil dari Rockwell dan Brinell, bervariasi antara 1 sampai 1000 gram. Bekas penekanan kemudian dilihat di bawah mikroskop dan diukur. Hasil pengukuran kemudian dikonversi menjadi angka kekerasan (Tabel 1.4). Untuk pengujian ini, persiapan spesimen harus hati-hati (dengan digerinda dan dipolis) untuk mendapatkan permukaan yang halus dan rata sehingga hasil pengujian akurat. Kekerasan Knoop dan Vickers biasanya disimbolkan dengan HK dan HV, dan skala kekerasan keduanya hampir sama. Knoop dan Vickers disebut sebagai metode pengujian kekerasan mikro karena beban dan ukuran indenter yang kecil. Keduanya cocok untuk mengukur kekerasan spesimen yang kecil, pada titik tertentu. Selain itu Knoop juga digunakan untuk mengukur kekerasan material yang rapuh seperti keramik.

Selain ketiga metode pengujian kekerasan di atas, ada juga cara yang lain, namun tidak dibahas di sini antara lain: *ultrasonic microhardness*, *dynamic (scleroscope)*, durometer (untuk material plastik dan elastomer), dan pengujian kekerasan gores.

### Konversi Kekerasan

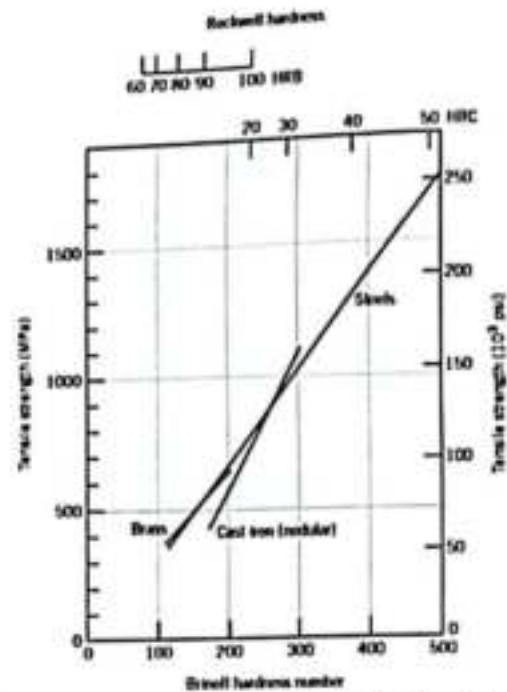
Angka kekerasan untuk setiap metode dapat dikonversi ke angka kekerasan yang lain. Konversi data kekerasan diperoleh dari eksperimen untuk beberapa tipe dan karakteristik material. Konversi data kekerasan untuk baja, beberapa di antaranya diperlihatkan pada gambar 1.11 untuk Knoop, Brinell dan dua skala Rockwell, skala Mohs. Tabel konversi yang lebih detail untuk logam dan paduan yang lain dapat dilihat pada ASTM Standard E 140 "Standard Hardness Conversion Tables for Metals".

Tabel 1.4 Teknik pengujian kekerasan

Test	Indenter	Shape of Indentation		Load	Formula for Hardness Number*
		Side View	Top View		
Brinell	10-mm sphere of steel or tungsten carbide			P	$HB = \frac{2P}{\pi D^2 \left( D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)}$
Vickers microhardness	Diamond pyramid			P	$HV = 1.854P/d^2$
Knoop microhardness	Diamond pyramid			P	$HK = 14.2P/d^2$
Rockwell and superficial Rockwell	Diamond cone: 1/8-1/16 in. diameter steel spheres			60 kg } Rockwell 100 kg } 150 kg } 15 kg } Superficial Rockwell 30 kg } 45 kg }	

\*For the hardness formulas given, P (the applied load) is in kg, whereas D, d,  $d_1$ , and  $d_2$  are all in mm.

Source: Adapted from H. W. Haydn, W. G. Moffatt, and J. Wulf, *The Structure and Properties of Materials*, Vol. III, Mechanical Behavior. Copyright © 1965 by John Wiley & Sons, New York. Reprinted by permission of John Wiley & Sons, Inc.



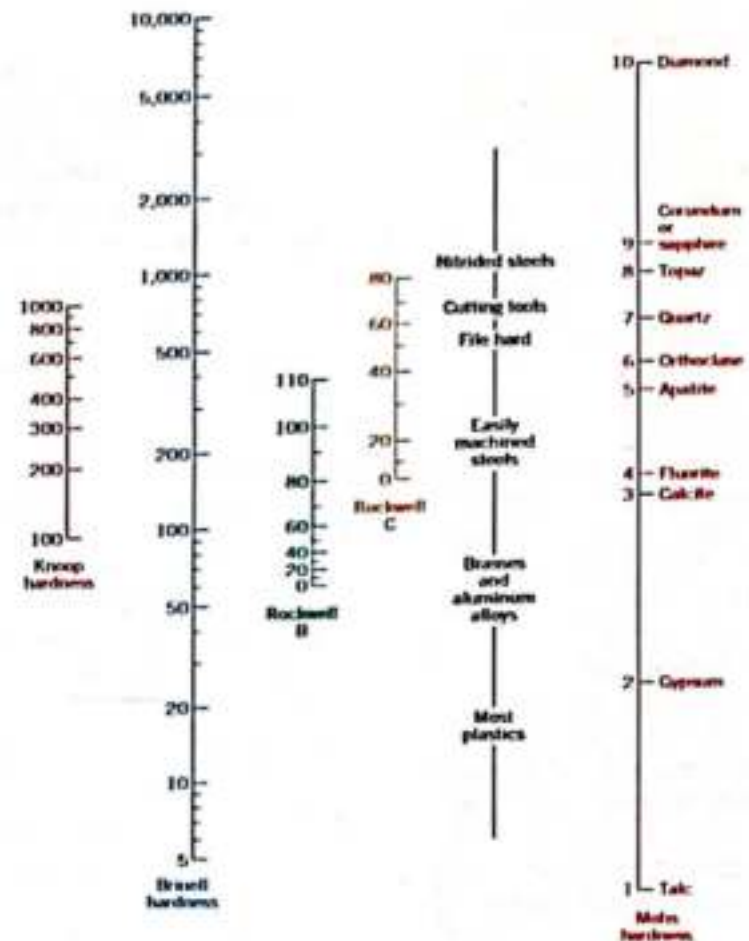
Gambar 1.10 Hubungan antara tegangan tarik dan kekerasan untuk baja, kuningan dan besi cor (Callister, 2010).

### Hubungan Antara Kekerasan dan Tegangan Tarik

Tegangan tarik dan kekerasan material, keduanya merupakan indikator ketahanan logam terhadap deformasi plastis. Sehingga keduanya pada dasarnya sebanding, seperti terlihat pada gambar 1.10 untuk tegangan tarik sebagai fungsi dari HB untuk besi cor, baja dan kuningan. Hubungan proporsional ini tidak sama untuk setiap logam. Hubungan tegangan tarik dengan HB untuk beberapa baja adalah

$$TS \text{ (MPa)} = 3.45 \times HB \quad (1.14)$$

$$TS \text{ (psi)} = 500 \times HB \quad (1.15)$$



Gambar 1.11 Perbandingan angka kekerasan untuk beberapa jenis skala (Callister, 2010)

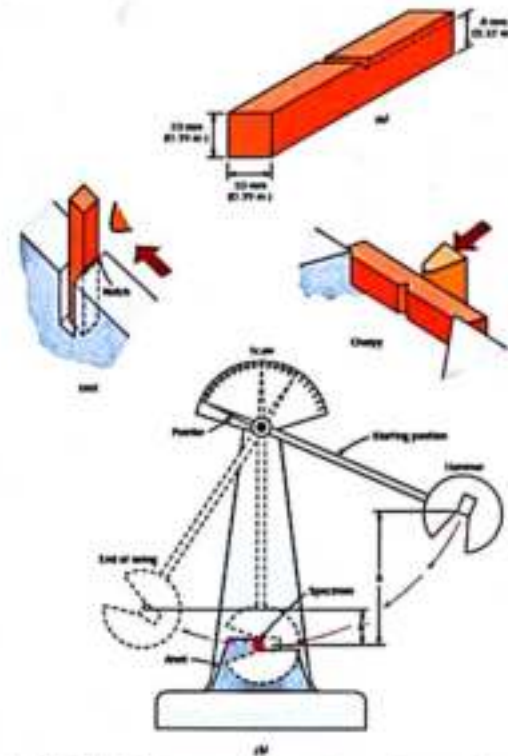
### 3. Pengujian Impak (Impact Test)

Kerusakan suatu material juga merupakan salah satu disiplin ilmu mekanik. Salah satu di antaranya adalah Pengujian Impak yang bertujuan untuk mengetahui karakteristik dalam analisis kerusakan material. Hal ini didasari pada kenyataan bahwa hasil pengujian tarik di laboratorium tidak dapat digunakan untuk menganalisis penyebab

kerusakan material; sebagai contoh, kerusakan logam yang ulet secara tiba-tiba pada pembebanan normal dengan deformasi plastis yang sangat kecil. Teknik Pengujian Impak dipilih untuk menggambarkan jenis-jenis kerusakan material yang berpotensi paling sering terjadi, antara lain: (1) deformasi pada temperatur yang relatif rendah, (2) laju regangan yang tinggi (yakni laju deformasi), dan (3) Keadaan tegangan triaksial (yang ditandai dengan adanya bentuk takikan pada permukaan).

#### Teknik Pengujian Impak

Ada dua jenis standar pengujian impak yang didesain dan masih digunakan sampai sekarang untuk mengukur energi impak, yang juga biasa disebut dengan ketangguhan akibat takikan (*notch toughness*) yakni cara Charpy dan cara Izod. Cara Charpy V-notch (CVN) paling sering digunakan di Amerika Serikat. Untuk kedua metode Charpy dan Izod, spesimen dibuat dalam bentuk batang berpenampang kubus persegi dengan membuat dengan mesin takikan berbentuk V pada pertengahan spesimen (gambar 1.12a). Peralatan untuk Uji Impak terlihat pada gambar 1.12b. Bebannya berupa gaya impak yang ditimbulkan oleh ayunan bandul yang dilepaskan dari ketinggian tertentu  $h$ . Spesimen ditempatkan pada bagian bawah alat uji. Setelah bandul dilepaskan, bagian tajam dari bandul akan menghantam spesimen dan mematahkan spesimen pada bagian yang ditakik, yang berfungsi sebagai pusat konsentrasi tegangan akibat aliran gaya impak yang sangat tinggi ini. Setelah menumbuk spesimen, bandul masih terus berayun ke belakang, sampai pada ketinggian tertentu  $h'$  yang lebih rendah dari  $h$ .



Gambar 1.12 (a) Spesimen yang digunakan untuk cara Charpy dan cara Izod. (b) Alat Uji Impak. (Callister, 2010)

Besarnya energi yang diserap, dihitung dari besarnya perbedaan ketinggian  $h$  dan  $h'$ , yang diukur sebagai energi impak. Perbedaan yang mendasar antara cara Charpy dan cara Izod adalah dalam teknik pemasangan spesimen, seperti terlihat pada gambar 1.12b. variabel-

variabel yang berpengaruh terhadap hasil pengujian adalah ukuran dan bentuk spesimen begitu juga dengan konfigurasi/bentuk dan kedalaman takikan.

$$E = m \cdot g (h - h') \quad (1.16)$$

$$CVN = \frac{E}{A} \quad (1.17)$$

Di mana:

E = Energi Impak

m = massa bandul (kg)

g = percepatan gravitasi bumi (m/s<sup>2</sup>) h = tinggi bandul mula-mula (m)

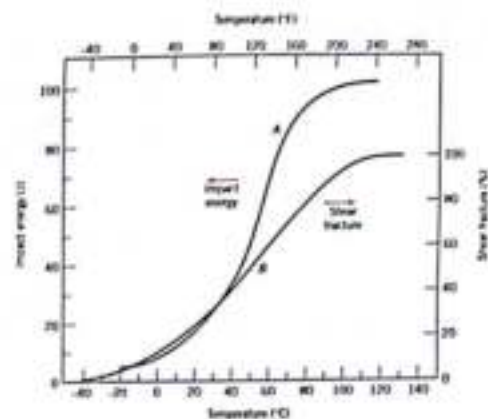
h' = tinggi bandul setelah tumbukan (m) CVN = harga Impak bahan

A = luas penampang yang ditakik (mm<sup>2</sup>)

Pengujian impak sendiri menunjukkan sifat-sifat akibat kerusakan material. Hasil pengujian impak, merupakan hasil yang kualitatif dan sedikit dipergunakan dalam keperluan desain. Energi impak lebih berfokus sebagai bahan perbandingan dengan ketangguhan akibat kerusakan pada bidang regangan.

#### Transisi dari Ulet ke Getas

Fungsi utama dari pengujian impak cara Charpy dan cara Izod adalah untuk mengetahui apakah material, mengalami transisi dari ulet ke getas atau tidak, oleh adanya penurunan temperatur. Jika terjadi, maka pada range temperatur berapa hal tersebut terjadi. Transisi dari ulet ke getas adalah berhubungan dengan temperatur tertentu dari pengukuran redaman energi impak. Transisi ini diperlihatkan dalam bentuk kurva A untuk baja pada gambar 1.13. Pada temperatur yang lebih tinggi, harga CVN cenderung lebih besar, yang ditunjukkan dengan bentuk kerusakan permukaan yang ulet. Pada temperatur yang lebih rendah, energi impak menurun dengan sangat drastis, pada kondisi ini, energinya cenderung konstan dan rendah; sehingga juga dikenal dengan bentuk kerusakan permukaan yang getas.

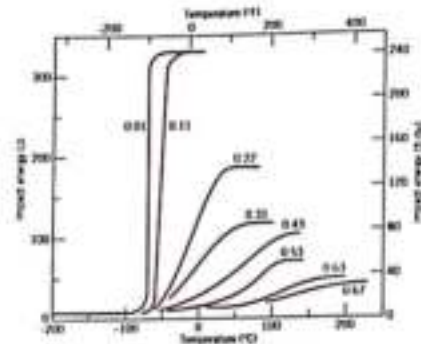


Gambar 1.13 Pengaruh temperatur terhadap Energi Impak CVN (kurva A) dan persentase kerusakan geseran (kurva B) untuk material baja A203 (Callister, 2010).

Pada beberapa paduan, terdapat range temperatur di mana terjadi transisi dari ulet ke getas (seperti terlihat pada gambar 1.13 di atas. Struktur/konstruksi yang dirancang menggunakan paduan ini harus bekerja pada daerah dengan temperatur di atas temperatur transisi tersebut, untuk menghindari kerusakan akibat getas. Contoh klasik adalah sejumlah kapal perang pada Perang Dunia II yang patah menjadi dua bagian pada sambungan pengelasannya. Setiap kerusakan bermula dari titik tertentu yang menjadi konsentrasi tegangan, biasanya pada sudut-sudut yang tajam, yang kemudian merambat pada badan kapal.

Tidak semua logam menunjukkan kondisi transisi dari ulet ke getas. Material ini memiliki struktur kristal FCC (termasuk paduan berbasis aluminium dan tembaga) tetap ulet meskipun pada temperatur yang sangat rendah. Namun paduan dengan struktur kristal BCC dan HCP mengalami transisi ini. Untuk material-material ini, temperatur transisinya sangat sensitif terhadap komposisi paduan dan mikrostrukturnya. Sebagai contoh, menurunnya ukuran rata-rata

butir logam pada temperatur transisi yang rendah. Namun dengan memperbaiki ukuran butir akan meningkatkan kekuatan dan ketangguhan baja. Sebaliknya, meningkatnya kandungan karbon, akan meningkatkan kekuatan tarik baja, juga meningkatkan transisi CVN dari baja, seperti terlihat pada gambar 1.14



Gambar 1.14 Pengaruh kandungan karbon pada besarnya energi CVN terhadap temperatur transisi baja (Callister, 2010).

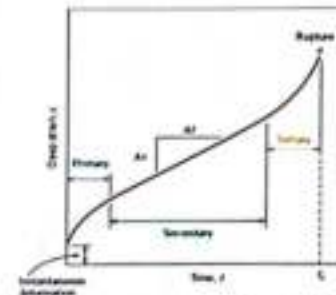
#### 4. Pengujian Mulur (Creep Test)

Material biasanya digunakan sebagai komponen mesin yang bekerja pada temperatur tinggi dan mengalami tegangan mekanis statis (misalnya rotor turbin pada mesin jet dan turbin uap yang mengalami tegangan sentrifugal, dan aliran uap bertekanan tinggi). Deformasi yang terjadi pada kondisi seperti ini disebut mulur. Mulur didefinisikan sebagai ketergantungan terhadap waktu dan deformasi permanen pada material ketika mengalami pembebanan atau tegangan yang konstan. Mulur adalah fenomena normal dan tak terduga serta dapat menurunkan umur pemakaian suatu komponen permesinan. Mulur telah diteliti untuk semua jenis material; dan untuk logam, menjadi penting jika material bekerja pada temperatur di atas  $0,4 T_m$  ( $T_m$  adalah temperatur leleh absolut). Material polimer, termasuk plastik dan karet sangat sensitif terhadap deformasi mulur.

#### Fenomena Mulur Secara Umum

Bentuk pengujian mulur terdiri atas spesimen yang diberi beban atau tegangan konstan, sementara temperatur juga dijaga konstan; deformasi yang terjadi kemudian diukur kemudian dibuat dalam bentuk grafik sebagai fungsi dari waktu. Kebanyakan pengujian dilakukan dengan beban konstan untuk mendapatkan pemahaman yang lebih baik tentang mekanisme mulur yang sebenarnya.

Gambar 1.15 memperlihatkan gambaran skematik dari fenomena mulur bahan akibat pembebanan yang konstan. Selama proses pembebanan berlangsung, terjadi deformasi seketika sebagaimana terlihat pada gambar, yang menunjukkan kondisi elastis. Kurva mulur pada dasarnya terdiri atas tiga daerah mulur, dan setiap daerah mulur tersebut memiliki karakteristik tersendiri.



Gambar 1.15 Tipikal kurva regangan mulur terhadap waktu dengan tegangan dan temperatur konstan (Callister, 2010).

Mulur primer atau mulur transien terjadi pertama kali, yang ditandai dengan adanya perlambatan mulur; yang terlihat dengan adanya penurunan kemiringan kurva terhadap waktu. Ini menunjukkan bahwa material mengalami peningkatan ketahanan mulur atau pengerasan regangan (*strain hardening*). Deformasi menjadi sulit terjadi karena adanya pengerasan regangan. Pada mulur sekunder, biasa juga disebut mulur *steady state creep*, laju mulur konstan; sehingga kurva menjadi linear. Pada daerah inilah proses mulur memakan waktu yang paling lama. Mulur yang konstan

ini dapat dijelaskan sebagai adanya keseimbangan proses antara pengerasan regangan dan pemulihan regangan. *Recovery* adalah proses di mana material menjadi lebih lunak dan menurunnya kemampuan material terhadap deformasi yang terjadi. Terakhir yang terjadi adalah mulur tersier, di mana terjadi percepatan mulur sampai akhirnya material putus. Kerusakan ini biasanya disebabkan oleh perubahan mikrostruktur atau kerusakan secara metalurgi: sebagai contoh, pemisahan batas butir, dan terjadinya retakan internal, kavitasi dan celah. Juga oleh karena beban tarikan, menyebabkan terjadinya pengecilan penampang (*necking*) di daerah tertentu pada batang uji yang terdeformasi. Kesemuanya ini menyebabkan terjadinya penurunan luas penampang dan meningkatkan laju regangan.

Untuk material logam, umumnya pengujian mulur dilakukan dengan menggunakan peralatan dan ukuran spesimen yang sama dengan uji tarik, hanya saja pada pengujian mulur ini, beban yang diberikan konstan dan ditambahkan tungku (*furnace*) untuk memanaskan spesimen pada temperatur tertentu yang dijaga konstan. Seperti terlihat pada gambar 1.16



Gambar 1.16 Mesin uji mulur 50 kN (Sree Karuviyiyal, 2020).

Parameter yang penting dalam pengujian mulur adalah kemiringan kurva pada daerah mulur sekunder ( $d\epsilon/dt$  pada gambar 1.14); slope ini biasa disebut laju mulur *steady minimum* (*steady-state creep rate*  $\epsilon_s$ ). Inilah yang dijadikan sebagai parameter dalam desain keteknikan untuk menentukan umur/lama pemakaian suatu komponen, seperti komponen pembangkit tenaga nuklir, yang dijadwalkan untuk beroperasi selama beberapa dekade. Sebaliknya untuk komponen dengan umur mulur yang relatif rendah (misalnya sudu-sudu turbin pada pesawat tempur dan nozzle pada motor roket), yang dijadikan sebagai umur desain adalah umur sampai spesimen putus ( $t_f$ ) yang juga terlihat pada gambar 1.14. Namun pada dasarnya pengujian mulur harus dilakukan sampai spesimen uji putus, sehingga diperoleh pengetahuan yang lengkap tentang karakteristik mulur dari suatu material yang menjadi parameter dalam mendesain komponen permesinan sesuai dengan kondisi spesifik yang diinginkan.

#### Pengaruh Tegangan dan Temperatur

Tingginya temperatur dan besar tegangan yang bekerja mempengaruhi karakteristik mulur yang terjadi pada material (gambar 1.15). Pada temperatur yang lebih rendah dari 0,4  $T_m$ , dan setelah deformasi awal akibat beban, regangan yang terjadi pada umumnya tidak tergantung pada waktu. Sementara jika terjadi peningkatan tegangan dan temperatur, maka akan terjadi: (1) regangan seketika akibat beban akan meningkat, (2) laju regangan *steady* akan meningkat, dan (3) Umur spesimen sampai putus akan pendek.

Hubungan secara empirik laju mulur *steady* sebagai fungsi dari tegangan dan temperatur dapat diperoleh dari kurva yang diperoleh dari pengujian. Jika hanya tergantung pada tegangan, maka dapat dituliskan

$$\epsilon_s = K_1 \sigma^n \quad (1.18)$$

Dan jika pengaruh temperatur diperhitungkan,

$$\epsilon_s = K_2 \sigma^n \exp\left(-\frac{Q_c}{RT}\right) \quad (1.19)$$



Di mana  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $n$  dan  $Q$ , adalah konstanta;  $Q$ , adalah energi aktivasi mulur.

#### **Paduan untuk Penggunaan pada Temperatur Tinggi**

Ada beberapa faktor yang mempengaruhi karakteristik mulur logam, antara lain temperatur leleh, modulus elastisitas dan ukuran butir. Secara umum, semakin tinggi temperatur leleh, semakin besar modulus elastis dan semakin besar ukuran butir, sehingga ketahanan material semakin baik terhadap proses mulur. Relatif terhadap ukuran butir, butir yang kecil menyebabkan pergeseran pada batas butir, yang menyebabkan tingginya laju mulur.

*Stainless steel*, logam-logam *refractory* dan paduan-paduan super merupakan material yang sangat tahan terhadap mulur sehingga biasa digunakan sebagai bahan komponen bertemperatur tinggi. Ketahanan mulur paduan super kobalt dan nikel ditingkatkan dengan paduan larutan padat, juga dengan penambahan dispersi fasa yang larut secara virtual dalam matriks. Selanjutnya, teknik pengolahan yang lebih maju telah digunakan; salah satunya solidifikasi, yang menghasilkan ukuran butir yang sangat besar atau komponen dengan kristal tunggal. Cara lain adalah dengan mengendalikan proses solidifikasi dari paduan dengan komposisi desain khusus sehingga dihasilkan material komposit 2 fasa.

#### **5. Pengujian Lelah (Fatigue Test)**

Kelelahan (*Fatigue*) adalah bentuk kerusakan yang terjadi pada struktur yang disebabkan oleh tegangan dinamis dan berfluktuasi. (misalnya jembatan, pesawat terbang dan komponen permesinan). Pada kondisi ini, kerusakan material mungkin terjadi meskipun besarnya beban yang bekerja jauh di bawah tegangan tarik atau tegangan yield bahan untuk pembebanan statik. Istilah lelah (*fatigue*) diambil karena jenis kerusakan material ini umumnya terjadi setelah terjadinya siklus tegangan atau regangan yang berulang untuk waktu yang cukup lama. Fatik menjadi penting karena merupakan penyebab kerusakan komponen logam terbesar sekitar 90% dari total kerusakan komponen. Kerusakan tersebut bisa terjadi kapan saja tanpa bisa diprediksi dan terjadi secara tiba-tiba tanpa peringatan terlebih dahulu.

Patah leleh pada dasarnya seperti patah rapuh meskipun logamnya lunak, sehingga sangat sedikit dan bahkan biasanya tidak ada deformasi plastis yang terjadi dalam patah leleh. Prosesnya dimulai dengan adanya retakan awal yang kemudian terjadi perambatan retak, dan pada umumnya patahan permukaannya tegak lurus terhadap arah tegangan tarik/beban yang bekerja

#### **Siklus Tegangan**

Jenis tegangan yang bekerja bisa berupa tegangan aksial (tarik-tekan), lentur (lengkung), atau torsi (puntir). Secara umum, ada tiga jenis fluktuasi tegangan yang berbeda. Yang pertama digambarkan secara skematik sebagai beban reguler dan sinusoidal terhadap waktu (gambar 1.17a), di mana amplitudonya simetris pada tegangan rata-rata pada level tegangan nol, di mana besarnya tegangan tarik maksimum ( $\sigma_{max}$ ) sama dengan besarnya tegangan tekan minimum ( $\sigma_{min}$ ); biasa juga disebut silus tegangan bolak-balik. Jenis tegangan yang lain disebut siklus tegangan berulang, seperti terlihat pada gambar 1.17b; tegangan maksimum dan minimum tidak simetris terhadap level tegangan nol. Dan yang terakhir, level tegangan bisa bervariasi secara acak dalam amplitudo maupun frekuensi, seperti terlihat pada gambar 1.17c.

Gambar 1.17b juga menunjukkan beberapa parameter yang digunakan sebagai karakteristik siklus tegangan berfluktuasi. Amplitudo tegangan disebut tegangan rata-rata  $\sigma_m$ , yang didefinisikan sebagai rata-rata dari tegangan maksimum dan minimum dalam siklus, atau

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (1.20)$$

Selanjutnya, range tegangan adalah perbedaan antara  $\sigma_{max}$  dan  $\sigma_{min}$ , atau

$$\sigma_r = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad (1.21)$$

Amplitudo tegangan  $\sigma_a$  adalah setengah dari range terangan, atau

$$\sigma_a = \frac{\sigma_r}{2} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (1.22)$$

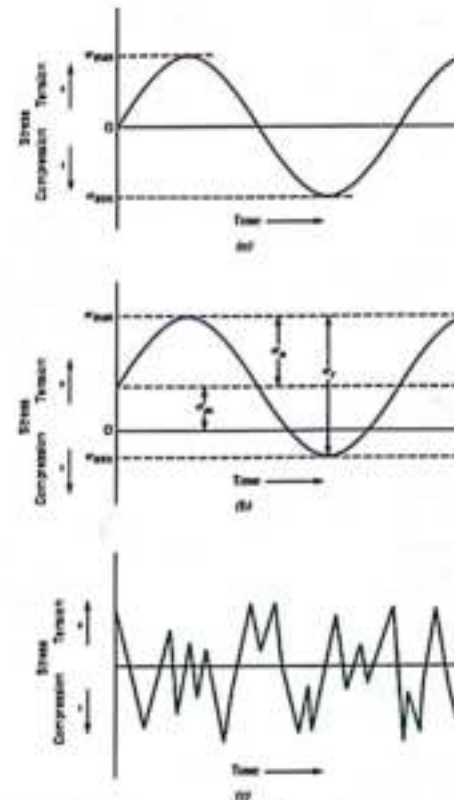
Yang terakhir adalah rasio tegangan  $R$  yakni rasio antara amplitudo tegangan maksimum dan minimum, atau

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (1.23)$$

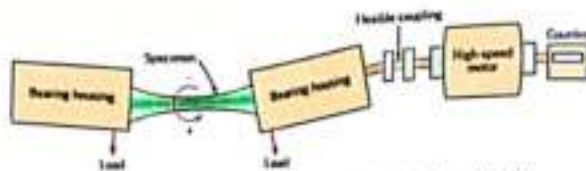
Biasanya tegangan tarik diberi tanda positif dan tegangan tekan dengan tanda negatif. Sebagai contoh untuk siklus tegangan bolak-balik maka  $R = -1$

#### **Kurva S-N**

Seperti karakteristik mekanis yang lain, sifat lelah material dapat diperoleh dari pengujian laboratorium. Alat uji harus didesain sehingga mendekati dengan kondisi yang sebenarnya di lapangan (tingkat tegangan, waktu, frekuensi, pola tegangan dll). Diagram skematik untuk alat uji lengkung-putar yang umumnya digunakan untuk uji lelah diperlihatkan pada gambar 1.18. Tegangan tarik dan tekan diberikan pada spesimen dengan terus diputar dan dilengkungkan.



Gambar 1.17 Variasi tegangan terhadap waktu yang menyebabkan terjadinya patah lelah (Callister, 2010)



Gambar 1.18 Gambar skematik alat uji lelah (Caslister, 2010).

Sejumlah pengujian dilakukan pada spesimen dengan amplitudo siklus tegangan yang relatif besar ( $\sigma_{max}$ ), biasanya sekitar 2/3 dari tegangan tarik statik; lalu dicatat jumlah putaran saat spesimen putus. Prosedur yang sama diulang untuk spesimen lain dengan menurunkan amplitudo tegangannya secara bertahap. Data kemudian dibuat dalam bentuk grafik dengan memplot antara amplitudo tegangan ( $S$ ) dengan logaritma jumlah putaran untuk setiap spesimen saat putus ( $N$ ). Harga ( $S$ ) adalah dari harga  $\sigma_s$  (pers. 1.22).

Dua bentuk grafik  $S - N$  dapat diperoleh dari pengujian seperti terlihat pada gambar 1.19. Pada grafik terlihat bahwa semakin besar amplitudo tegangan, semakin kecil jumlah putaran sampai spesimen uji putus. Untuk beberapa logam ferro dan paduan titanium, kurva  $S - N$  (gambar 1.19a) menjadi horizontal pada nilai  $N$  yang cukup besar; atau dengan kata lain ada batas tegangan, yang biasa disebut dengan **batas lelah** (*fatigue limit* biasa juga disebut *endurance limit*), di bawah batas ini, kerusakan material akibat lelah tidak akan terjadi. Batas lelah ini menunjukkan nilai terbesar fluktuasi tegangan yang tidak akan menyebabkan kerusakan pada material untuk jumlah putaran yang tidak terhingga. Untuk beberapa baja, batas lelah biasanya antara 35%-60% dari tegangan tarik.

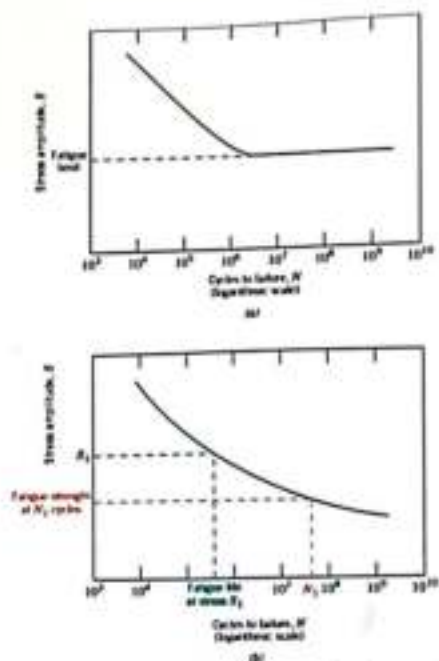
Logam-logam nonferro (misalnya aluminium, tembaga, magnesium) tidak memiliki batas lelah, dalam kurva  $S - N$  kecenderungan garisnya terus menurun dengan bertambah besarnya putaran  $N$  (gambar 1.19b). Sehingga patah lelah akan terjadi pada setiap level tegangan. Untuk material seperti ini yang dilihat adalah tegangan lelahnya (*fatigue strength*), yang didefinisikan sebagai level tegangan yang menyebabkan patah lelah pada putaran tertentu. Parameter lain yang juga penting adalah umur lelah (*fatigue life  $N_f$* ), yaitu jumlah putaran sampai spesimen putus pada level tegangan tertentu.

Sifat lelah bahan yang diperlihatkan pada gambar 1.19 dapat diklasifikasikan dalam dua kelompok. Kelompok pertama adalah pada pembebanan yang besar yang menimbulkan dua jenis regangan yakni regangan elastis dan plastis selama pengujian berlangsung. Konsekuensinya, umur lelah relatif pendek; kelompok ini disebut umur lelah putaran rendah (*low-cycle fatigue*) dan terjadi pada putaran yang kurang dari 104 sampai 105 putaran. Untuk level tegangan yang lebih rendah di mana deformasi yang terjadi adalah deformasi elastis saja, umur lelahnya lebih panjang. Ini disebut umur lelah putaran tinggi (*high-cycle fatigue*) yang menunjukkan jumlah putaran yang cukup besar yang menyebabkan spesimen patah. Umur lelah putaran tinggi ini yakni umur lelah dengan jumlah siklus putaran yang lebih besar dari 104 sampai 105 putaran.

#### Faktor yang Mempengaruhi Umur Leleh

Umur lelah suatu material teknik dipengaruhi oleh sejumlah faktor yang sangat sensitif. Beberapa faktor tersebut di antaranya level tegangan rata-rata, geometri desain, efek permukaan, variabel metalurgi, begitu juga dengan lingkungan. Faktor-faktor ini harus diperhatikan sehingga dapat meningkatkan umur lelah komponen.

**Tegangan Rata-Rata.** Ketergantungan umur lelah pada amplitudo tegangan diperlihatkan pada kurva  $S - N$ . Beberapa data diambil untuk tegangan rata-rata yang konstan  $\sigma_m$ , dan biasanya untuk siklus tegangan bolak balik ( $\sigma_m = 0$ ). Tegangan rata-rata ini mempengaruhi umur lelah; dengan meningkatkan tegangan rata-rata dapat menurunkan umur lelah.



Gambar 1.19 Amplitudo tegangan ( $S$ ) versus logaritma putaran ( $N$ ) untuk (a) material yang menunjukkan batas lelah, dan (b) material tanpa batas lelah (Callister, 2010).

**Efek Permukaan.** Untuk beberapa situasi pembebanan, tegangan maksimum di dalam komponen atau struktur terjadi pada daerah permukaan. Konsekuensinya, banyak retakan yang menjadi penyebab patah lelah yang timbul mulai dari permukaan komponen, terutama pada titik tegangan bekerja.

Sehingga perlu diperhatikan bahwa umur lelah sangat sensitif dipengaruhi oleh kondisi dan konfigurasi permukaan komponen. Sejumlah faktor yang mempengaruhi ketahanan lelah, dengan penanganan yang baik akan meningkatkan umur lelah. Faktor ini

mencakup kriteria desain serta variasi perlakuan permukaan. **Faktor Desain.** desain komponen dapat berpengaruh secara signifikan pada karakteristik lelah. Bentuk-bentuk takikan atau geometri yang tidak kontinu dapat menjadi tempat terjadinya peningkatan tegangan dan sebagai awal terjadinya retakan; kondisi desain ini meliputi celah, lubang, alur dll. Bentuk diskontinu yang tajam (misalnya radius yang kecil), dapat menjadi tempat konsentrasi tegangan. Kemungkinan patah lelah dapat direduksi dengan menghindari (jika mungkin) ketidakteraturan permukaan, atau dengan membuat modifikasi pada desain dengan menghindari perubahan pendadak pada kontor permukaan misalnya dengan menghindari ujung-ujung yang tajam dengan membuat *fillet* dengan radius kelengkungan yang cukup besar pada titik yang mengalami perubahan diameter pada poros (gambar 1.20).



Gambar 1.20 Petunjuk bagaimana mereduksi pengaruh konsentrasi tegangan. (a) Desain yang jelek: adanya ujung-ujung tajam, dan (b) Desain yang baik: adanya *fillet* pada daerah dengan perubahan diameter (Callister, 2010).

**Perlakuan Permukaan.** selama proses pemesinan berlangsung, goresan-goresan dan alur-alur kecil terjadi pada permukaan komponen akibat pemotongan oleh pahat potong. Hal ini dapat menurunkan umur lelah. Penelitian telah membuktikan bahwa dengan meningkatkan kualitas pengerjaan akhir misalnya dengan proses polis pada permukaan dapat meningkatkan umur lelah komponen dengan signifikan.

Satu metode yang cukup efektif untuk meningkatkan umur lelah adalah dengan memberikan tegangan tekan residual pada permukaan luar. Sehingga tegangan tarik permukaan akan direduksi oleh adanya tegangan tekan residual. Pengaruhnya adalah dapat menghindari formasi retak sehingga patah lelah dapat direduksi

Tegangan tekan residual diberikan pada logam yang rapuh secara mekanis dengan memberikan deformasi plastis lokal pada daerah permukaan. Secara komersial, biasanya dikenal dengan proses yang disebut *shot peening*. Partikel yang kecil dan keras dengan diameter antara 0,1 sampai 1 mm ditembakkan dengan kecepatan tinggi pada permukaan yang diberi perlakuan. Deformasi yang dihasilkan adalah induksi tegangan tekan dengan kedalaman antara 1/4 sampai 1 1/2 diameter partikel.

Pengerasan permukaan (*case hardening*) adalah teknik dengan peningkatan kekerasan permukaan dan umur lelah untuk baja paduan. Ini dilakukan melalui proses karburising atau nitriding di mana komponen ditempatkan dalam wadah yang banyak mengandung karbon atau nitrogen pada temperatur tertentu. Lapisan karbon atau nitrogen yang cukup kaya pada permukaan terbentuk melalui difusi atomik dari fasa gas yang terbentuk dalam proses tersebut. Ketebalan lapisan tersebut biasanya sekitar 1 mm dan sifatnya lebih keras dibanding bagian dalam komponen. Peningkatan umur lelah diperoleh dari peningkatan kekerasan material pada permukaan melalui proses karburising atau nitriding yang sama dengan tegangan tekan residual.

**Pengaruh Lingkungan.** Faktor lingkungan juga dapat berpengaruh pada umur lelah komponen. Ada dua jenis faktor lingkungan yang berpengaruh pada umur lelah komponen yang dikenal dengan istilah lelah termal (*thermal fatigue*) dan lelah korosi (*corrosion fatigue*).

Lelah termal biasanya terjadi pada temperatur tinggi yang timbul akibat fluktuasi tegangan termal; meskipun tidak ada tegangan mekanis lain dari luar. Bentuk dasar dari tegangan termal ini adalah adanya ekspansi dan atau kontraksi dimensi yang biasanya terjadi pada struktur dengan temperatur yang bervariasi. Besarnya tegangan termal ini tergantung pada besarnya perubahan temperatur  $\Delta T$ , koefisien ekspansi termal  $\alpha_1$  dan modulus elastis bahan  $E$  sesuai persamaan

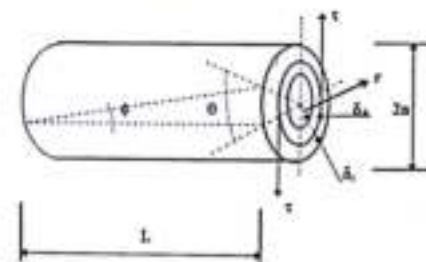
$$\sigma = \alpha_1 E \Delta T \quad (1.24)$$

Kerusakan yang terjadi akibat pengaruh simultan dari siklus tegangan dan pengaruh kimiawi disebut lelah korosi. Lingkungan yang korosif dapat menurunkan umur lelah komponen. Temperatur

lingkungan yang normal juga dapat mempengaruhi umur lelah untuk beberapa material. Lubang kecil pada permukaan bisa dihasilkan dari reaksi kimia antara material dan lingkungan, yang bisa menjadi titik konsentrasi tegangan, yang kemudian akan menjadi awal terjadinya perambatan retak. Beberapa cara dilakukan untuk mengurangi pengaruh korosi lingkungan misalnya dengan memberikan lapisan pada permukaan, memilih material yang lebih tahan korosi, dan mereduksi sifat korosif dari lingkungan.

### 6. Pengujian Puntir (Torsion Test)

Puntir atau torsi merupakan salah satu variasi dari geseran murni, di mana komponen dipuntir seperti terlihat pada gambar 1.21; di mana gaya puntir menghasilkan pergerakan rotasional pada sepanjang sumbu longitudinal dari ujung komponen yang satu relatif terhadap ujung komponen yang lain. Contoh puntiran ini dapat ditemui pada poros mesin dan poros transmisi, serta pada mata bor. Uji puntir biasanya dilakukan dengan menggunakan batang bulat pejal atau pipa. Tegangan geser  $\tau$  adalah fungsi dari torsi yang diberikan  $M_t$ , sementara Yberhubungan dengan besarnya sudut puntir  $\phi$



Sumber: Sitanjuntak, 1999

Gambar 1.21 Batang yang mengalami puntiran

Cakupan pemakaian tidak terlalu luas, meskipun demikian pengujian ini sangat baik dilakukan untuk melihat fenomena-fenomena sifat material seperti modulus elastisitas di bawah pengaruh tegangan geser, tegangan luluh torsi dan modulus patahan.

Pada pengujian ini salah satu ujung dibuat bebas secara aksial (searah sumbu) dengan maksud agar memberi kebebasan pada spesimen terhadap kemungkinan adanya perubahan panjang.

Dibandingkan dengan uji tarik, maka pengujian ini kurang populer karena pengujian tarik sudah banyak terpakai secara standarisasi. Meskipun demikian halnya, keunikan dari pengujian ini adalah tidak ditemukannya fenomena *necking* atau pengecilan penampang setempat sehingga deformasi yang dicapai dapat lebih besar. Pada gambar 1.19 terlihat bahwa besarnya tegangan geser bervariasi dari harga nol pada pusat spesimen hingga mencapai harga maksimum pada permukaan spesimen.

Data yang dicatat dalam pengujian ini adalah harga momen torsi (dalam newton meter) dan besarnya sudut puntir  $\theta$  yang dibaca pada triptometer (dalam radian) dan hubungannya dapat dituliskan dalam bentuk persamaan berikut:

$$\tau = \frac{M_t r}{I_p} = \frac{16M_t}{\pi D^3} \quad (1.25)$$

$$\gamma = r\phi = \frac{\theta r}{L} \quad (1.26)$$

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \quad (1.27)$$

Keterangan:

- $\tau$  = tegangan geser (kg/mm<sup>2</sup>)
- $\gamma$  = regangan geser
- $\phi$  = sudut geser (radian)
- $\theta$  = sudut puntir (radian)
- $M_t$  = momen torsi (N.m)
- $D$  = diameter spesimen =  $2r$  (mm)
- $I_p$  = momen inersia polar =  $\frac{\pi D^4}{32}$  (mm<sup>4</sup>)
- $G$  = modulus geser (kg/mm<sup>2</sup>).

Seperti halnya pada uji tarik, analisis regangan geser juga dilakukan pada daerah elastis dan daerah plastis secara terpisah. Pada

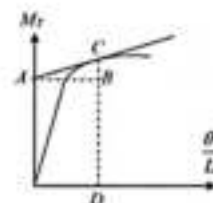
daerah elastis, besarnya tegangan geser sebanding dengan regangan geser, yang artinya sebanding juga dengan radius elemen yang ditinjau.

Pada daerah plastis, tegangan geser tidak lagi sebanding dengan regangan geser. Konsekuensi dari ketidakseimbangan ini adalah perubahan tegangan geser tidak lagi linear terhadap perubahan radius elemen.

Oleh *Nadai*, fenomena pada bagian plastis digunakan untuk mencari besarnya tegangan geser pada permukaan spesimen, dimana  $\tau = f(\gamma)$  dibantu grafik pada gambar 1.22 diperoleh :

$$\tau = \frac{1}{2\pi r^3} (BC + 3CD) \quad (1.28)$$

Dari diagram gambar 1.22 kemudian disusun diagram aliran tegangan (*flow stress*) dengan menggunakan kriteria Von Mises ataupun Tresca.



Sumber: Simanjuntak, 1999

Gambar 1.22 Momen torsi vs sudut puntir

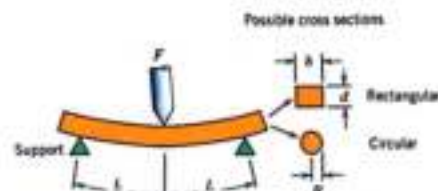
### 7. Pengujian Kekakuan (*Toughness Test*)

Tujuan utama pengujian ini adalah melihat sifat kaku dari spesimen terhadap pembebanan yang diberikan. Dalam kasus ini beban diberikan pada penampang melintang bahan kemudian yang dilihat adalah besarnya kelengkungan/defleksi yang dialami material.

Pengujian ini dapat dilakukan baik pada daerah elastis maupun sampai bahan uji patah. Alat yang digunakan dalam pengujian ini adalah sama dengan alat uji tarik (*Universal Testing Machine*) pada seksi uji bending.

Pengujian kekakuan dapat dilakukan untuk material getas maupun material ulet. Untuk material getas lebih cocok digunakan uji kekakuan karena material getas sangat susah untuk diuji tarik, karena hanya dengan deformasi yang sedikit saja, material sudah mengalami putus. Sementara untuk bahan ulet, pengujian ini cenderung dilakukan untuk melihat adanya retakan-retakan/cacat pada permukaan bahan.

Pada pengujian ini bahan uji bisa berbentuk batang persegi empat pejal maupun batang bulat pejal yang diberikan beban penekan tepat pada pertengahan batang dan pada kedua ujungnya diberi tumpuan, sehingga biasa juga dikenal dengan istilah teknik pembebanan tiga titik (*three-point loading technique*). Pada titik pembebanan di tengah batang, permukaan luar spesimen bagian atas akan mengalami tegangan tekan (ada perpendekan dimensi), sementara pada permukaan luar spesimen bagian bawah akan mengalami tegangan tarik (ada perpanjangan dimensi) dan pada pertengahan spesimen (bagian sumbu spesimen) tetap normal. Besarnya tegangan dihitung berdasarkan ketebalan spesimen, momen lentur, dan momen inersia penampang bahan uji; parameter-parameter ini diperlihatkan pada gambar 1.23 baik untuk penampang bahan persegi empat maupun penampang bulat. Tegangan tarik maksimum terjadi pada permukaan terluar spesimen bagian bawah sejajar dengan sumbu beban penekan.



Gambar 1.23 Skema uji kekakuan (Callister, 2010).

Besarnya tegangan lentur yang terjadi pada spesimen secara umum dapat dihitung dengan persamaan:

$$\sigma = \frac{Mx}{I} \quad (1.29)$$

Keterangan:

- $M$  = momen lentur maksimum
- $c$  = jarak ke sumbu spesimen
- $I$  = momen inersia penampang
- $\sigma$  = Tegangan lentur
- $b$  = lebar spesimen uji
- $d$  = tebal spesimen uji
- $R$  = jari-jari spesimen

Harga momen lentur, pusat sumbu, momen inersia dan tegangan lentur untuk kedua jenis bentuk penampang dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 1.5 Harga momen lentur, pusat sumbu, momen inersia dan tegangan lentur untuk penampang bulat dan persegi empat.

Penampang	$M$	$c$	$I$	$\sigma$
Persegi empat	$\frac{FL}{4}$	$\frac{d}{2}$	$\frac{bd^3}{12}$	$\frac{3FL}{2bd^2}$
Bulat	$\frac{FL}{4}$	$R$	$\frac{\pi R^4}{4}$	$\frac{FL}{\pi R^3}$

Sumber: Callister, 2010

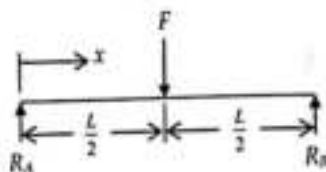
Pada material yang getas seperti besi cor, perbandingan antara tegangan tarik dan tegangan lengkungnya menunjukkan bahwa harga tegangan lengkung sekitar dua kali lebih besar dari harga tegangan tariknya

Tabel 1.6 Perbandingan harga tegangan lentur dan tegangan tarik pada besi cor

Besi Cor	Tegangan Lentur (MPa)	Tegangan Tarik (MPa)	Rasio Tegangan
1	568	279	2.04
2	782	340	1.87
3	594	308	1.93
4	626	322	1.94

Sumber: Simanjuntak, 1999

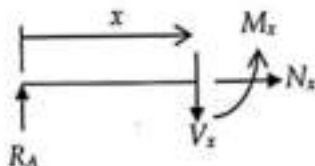
Besarnya defleksi ( $\delta$ ) yang terjadi pada uji lengkung tergantung pada jenis bahan, dimensi, posisi dan besar beban yang bekerja. Defleksi yang terjadi dapat diukur dengan alat ukur (ekstensometer) dan dari hasil yang diperoleh dapat dihitung modulus elastisitas bahan ( $E$ ). Dengan metode *double integration*, dapat diperoleh hubungan antara defleksi dan modulus elastisitas sebagai berikut:



Gambar 1.24 diagram benda bebas spesimen uji lengkung. Dari diagram benda bebas diperoleh:

$$R_A = R_B = F/2 \quad (1.30)$$

Untuk:  $0 < x < L/2$



Besar momen lentur yang terjadi pada sejauh titik  $x$  dari  $R_A$  adalah:

$$M_x = \frac{F}{2} \cdot x \quad (1.31)$$

Dengan metode *double integration*, diperoleh:

$$EJ \frac{d^2 \delta}{dx^2} = -M_x = -\frac{F}{2} \cdot x \quad (1.32)$$

Pengintegrasian pertama menghasilkan:

$$EJ \frac{d\delta}{dx} = -\frac{F}{4} x^2 + C_1 \quad (1.33)$$

Pengintegrasian kedua menghasilkan:

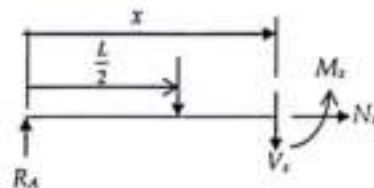
$$EJ \delta = -\frac{F}{12} x^3 + C_1 x + C_2 \quad (1.34)$$

Bila  $x = 0$ , defleksi  $\delta = 0$  sehingga  $C_2 = 0$  (pers. 1.34)

Bila  $x = L/2$ , diperoleh (pers. 1.34)

$$EJ \delta = -\frac{F \cdot L^3}{96} + \frac{C_1 L}{2} \quad (1.35)$$

Untuk  $L/2 < x < L$



Besar momen lentur yang terjadi pada sejauh titik  $x$  dari  $R_A$  adalah:

$$M_x = \frac{F}{2} \cdot x - F \left( x - \frac{L}{2} \right) \quad (1.36)$$

Dengan metode *double integration*, diperoleh:

$$EJ \frac{d^2 \delta}{dx^2} = -M_x = -\frac{F}{2} \cdot x + F \left( x - \frac{L}{2} \right) \quad (1.37)$$

Pengintegrasian pertama menghasilkan:

$$EJ \frac{d\delta}{dx} = -\frac{F}{4} x^2 + \frac{F}{2} \left( x - \frac{L}{2} \right)^2 + C_1 \quad (1.38)$$



Pengintegrasian kedua menghasilkan:

$$EJ\delta = -\frac{F}{12}x^3 + \frac{F}{6}\left(x - \frac{L}{2}\right)^3 + C_3x + C_4 \quad (1.39)$$

Tinjauan kemiringan/slope batang uji:

Karena defleksi yang terjadi adalah kontinu, maka kemiringan kurva dari persamaan (1.33) dan (1.38) adalah sama pada  $x = L/2$  sehingga diperoleh harga  $C_3 = C_3$ .

Tinjauan defleksi:

Defleksi yang terjadi pada  $x = L/2$  dari persamaan (1.35) dan (1.39) adalah sama sehingga diperoleh  $C_4 = 0$ .

Dari persamaan (1.39) untuk  $x = L$ , maka  $\delta = 0$  sehingga diperoleh harga untuk konstanta  $C_3$ :

$$C_3 = \frac{3FL^2}{48} \quad (1.40)$$

Harga  $C_3 = C_3$  kemudian dimasukkan ke persamaan (1.35) untuk defleksi maksimum pada harga  $x = L/2$  diperoleh:

$$EJ\delta = -\frac{FL^3}{96} + \frac{3FL^2}{48}\left(\frac{L}{2}\right) \quad (1.41)$$

Dari pers (1.41) kemudian diperoleh hubungan antara  $\delta$  dengan  $E$ :

$$E = \frac{FL^3}{48I\delta} \quad (1.42)$$

#### E. RANGKUMAN

Pengujian tarik merupakan metode pengujian destruktif yang paling populer karena paling banyak memberikan informasi sifat-sifat mekanis bahan uji. Dari jenis-jenis pengujian dapat diperoleh faktor konversi untuk mendapatkan hubungan antara pengujian yang satu dengan yang lainnya, sehingga hanya dengan melakukan satu pengujian dapat diperoleh sifat mekanis yang lain. Misalnya hubungan

antara tegangan tarik dengan angka kekerasan Brinell yaitu:

$$TS \text{ (Mpa)} = 3.45 \times HB$$

atau

$$TS \text{ (psi)} = 500 \times HB$$

### Soal-Soal

1. Sebuah spesimen uji dari *stainless steel* berdiameter 0.505 in (12.8 mm) dan panjang uji 2.000 in (50.800 mm) diuji tarik. Hasil pengujian diberikan dalam tabel data berikut:

Beban Tarik (Newton)	Panjang Spesimen (mm)
12700	50.825
25400	50.851
38100	50.876
50800	50.902
76200	50.952
89100	51.003
92700	51.054
102500	51.181
107800	51.308
119400	51.562
128300	51.816
149700	52.832
159000	53.848
160400	54.356
159500	54.864
151500	55.880
124700	56.642

- Buatlah grafik tegangan teknik vs regangan teknik
- Hitunglah modulus elastisitas paduan
- Tentukanlah tegangan *yield* dengan menggunakan *offset* regangan 0.002
- Tentukanlah tegangan tarik paduan
- Hitunglah *modulus resilience*
- Hitunglah keuletan bahan dengan menggunakan persentase pertambahan panjang.

2. Tabel data berikut ini merupakan hasil pengujian Impak dengan metode Charpy untuk paduan 4140 yang telah ditemper

Temperatur (°C)	Energi Impak (Joule)
100	89.3
75	88.6
50	87.6
25	85.4
0	82.9
-25	78.9
-50	73.1
-65	66.0
-75	59.3
-85	47.9
-100	34.3
-125	29.3
-150	27.1
-175	25.0

- Buatlah grafik energi impak vs temperatur.
- Tentukanlah daerah transisi dari ulet ke getas yang berdasarkan rata-rata energi impak maksimum dan minimum.
- Tentukanlah temperatur transisi ulet-getas pada energi impak 70 Joule.

3. Data pengujian kelelahan untuk paduan aluminium diberikan pada tabel berikut:

Amplitudo Tegangan (MPa)	Putaran Sampai Putus (rpm)
310	$2 \times 10^5$
223	$1 \times 10^6$
191	$3 \times 10^6$
168	$1 \times 10^7$
153	$3 \times 10^7$
143	$1 \times 10^8$
134	$3 \times 10^8$
127	$1 \times 10^9$

- Buatlah grafik *S-N* (amplitudo tegangan vs logaritmik putaran sampai putus) dengan menggunakan data di atas.
- Tentukanlah amplitudo tegangan pada putaran  $5 \times 10^5$ .
- Tentukanlah umur lelah untuk amplitudo tegangan 200 MPa.

## BAB 2

### PENGUJIAN NON DESTRUKTIF BAHAN TEKNIK

#### A. PENDAHULUAN

Dalam industri pemesinan/pembentukan senantiasa berhubungan dengan aspek pemeriksaan mulai dari:

- Pemeriksaan bahan baku
- Pemeriksaan proses
- Pemeriksaan kualitas dimensi
- Pemeriksaan performansi

Pemeriksaan-pemeriksaan ini dilakukan berdasarkan spesifikasi dan prosedur pemeriksaan yang baku (standar).

Dari hal-hal tersebut di atas terlihat bahwa pengujian (tes) merupakan salah satu metode pemeriksaan.

Jenis pengujian secara umum ada 2, yaitu:

- Pengujian merusak (*destructive test*)
- Pengujian tanpa merusak (*non destructive test*)

Dalam kasus pengujian tanpa merusak, pengujian ini sering dipakai pada saat inspeksi penerimaan produk (*receiving inspection*), yaitu memeriksa produk ketika tiba di gudang penyimpanan. Pemakaian lain adalah memeriksa cacat pada proses pengerjaan (contohnya cacat pengelasan).

Pengujian tanpa merusak dapat diterapkan dalam kondisi *off-stream* maupun *on-stream*, yaitu kondisi peralatan tidak bekerja ataupun sedang bekerja. Dengan demikian proses bisa manual ataupun diotomatiskan.

Pada dasarnya pemeriksaan yang paling sederhana adalah pemeriksaan visual yaitu untuk melihat (misalnya) kebenaran bentuk

(geometri), ada atau tidaknya distorsi, atau untuk melihat cacat di permukaan seperti retak (*crack*).

Pemeriksaan seperti ini dapat dilakukan terhadap satu satuan mewakili satu kelompok produk atau dapat diterapkan menyeluruh. Pengujian tanpa merusak yang akan dibahas adalah:

1. Pengujian Penetran (*Dye Penetrant*)
2. Pengujian Ultrasonik (*Ultrasonic Testing*)
3. Pengujian Partikel Magnetik (*Magnetic Particle Testing*)
4. Pengujian Radiografi (*Radiography Testing*)

Hal-hal yang perlu dipahami untuk memperoleh pengertian yang lebih mendalam tentang pengujian adalah:

1. Pengujian tanpa merusak sangat jarang dilakukan dalam analisis kegagalan kecuali bila sumber-sumber kerusakan tidak muncul di permukaan.
2. Setiap pengujian dilakukan berdasarkan pada prosedur pengujian yang baku (*standar*) dengan tujuan agar dapat membandingkan satu dengan yang lainnya.
3. Jenis-jenis pengujian merupakan komplemen dari satu dengan yang lainnya. Tetapi dalam praktik, jenis pengujian yang dilakukan harus dibatasi mengingat aspek waktu dan biaya.

Untuk itu jenis pengujian yang dipilih berdasarkan pada:

1. Kebutuhan (*design requirement*), dan
2. Yang paling banyak memberikan informasi sifat mekanis yang dibutuhkan.

#### B. TUJUAN INSTRUKSIONAL

Setelah mempelajari topik ini diharapkan mahasiswa dapat:

1. Menentukan cacat bahan dengan metode Dye Penetrant
2. Menentukan cacat bahan dengan metode Ultrasonik
3. Menentukan cacat bahan dengan metode Partikel Magnetik
4. Menentukan cacat bahan dengan metode Radiografi

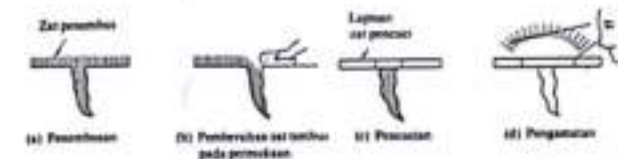
#### C. PRASYARAT

Mahasiswa memahami pengetahuan bahan teknik

#### D. PENGUJIAN

##### 1. Pengujian Penetran (*Dye Penetrant Testing*)

Pengujian ini adalah cara yang paling peka untuk menentukan adanya cacat halus pada permukaan, seperti retak, lubang halus atau kebocoran. Cara ini pada dasarnya adalah menggunakan cairan berwarna yang dapat menembus cacat. Setelah cairan yang ada di permukaan dibersihkan, maka cacat yang berupa celah yang agak lebar akan kelihatan dengan jelas seperti terlihat pada gambar 2.1. Namun untuk cacat yang lebih halus susah terlihat sehingga masih perlu diberikan bubuk pengembang (*absorbent*) sebelum dilakukan pengamatan. Dengan pemberian bubuk pengembang tersebut, maka cairan yang masuk ke dalam celah halus akan terlihat jelas dan membentuk pola cacat pada permukaan.



Gambar 2.1 Dasar pengujian penetran (Harsono dan Okumura, 2000)

Cara ini adalah cara yang mudah dan murah serta cepat. Penggunaan yang paling tepat adalah untuk menguji logam-logam bukan magnet di mana penggunaan pengujian dengan partikel magnetik tidak mungkin dilakukan.

Selain cairan berwarna juga dapat digunakan cairan yang mengandung zat fluoreschence dengan prosedur pengujian yang sama. Hanya saja pada saat pengamatan cacat, prosesnya dilakukan di bawah sinar ultraviolet. Hal yang perlu diperhatikan dengan seksama

adalah bahwa sinar ultraviolet cukup berbahaya bagi operator uji sehingga diperlukan kehati-hatian dalam pengujian.

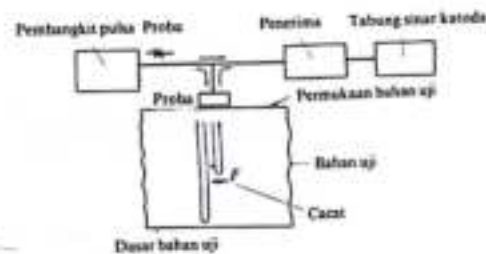
Cara yang lain juga adalah dengan menggunakan cairan panas. Dengan cairan panas ini, maka rongga/celah akan semakin besar sehingga cairan yang masuk semakin banyak. Di samping itu juga akan menurunkan viskositas cairan sehingga *flow ability* cairan meningkat.

## 2. Pengujian Ultrasonik (*Ultrasonic Testing*)

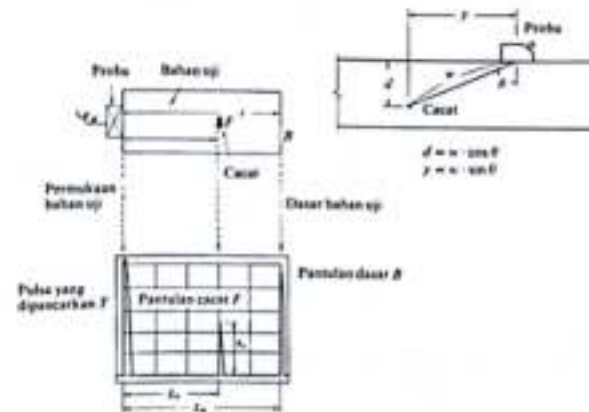
Dalam pengujian ini, suatu gelombang suara dengan frekuensi tinggi dirambatkan ke dalam logam yang diuji dengan menggunakan alat yang dapat mengirim dan menerima gelombang suara yang dinamakan proba. Gelombang ultrasonik dihasilkan dengan memberikan sinyal-sinyal elektrik pada kristal Piezoelektrik. Dengan menggunakan pulsa elektrik durasi pendek, akan diperoleh pulsa durasi pendek gelombang ultrasonik.

Berdasarkan probanya, maka pengujian ultrasonik dapat dibagi dua yaitu:

- Proba terpisah, yaitu proba pengirim dan penerima gelombang ultrasonik dipasang terpisah.
- Proba tunggal, yaitu proba pengirim dan penerima gelombang ultrasonik berada dalam satu proba dan dapat dipancarkan lurus maupun miring.



Gambar 2.2 Skema dasar pengujian ultrasonik (Harsono dan Okumura, 2000).



Gambar 2.3 Diagram rambatan pulsa dan penjelasan hasil (Harsono dan Okumura, 2000)

Sinyal yang dibangkitkan dirambatkan di dalam bahan uji, sinyal gelombang akan terpantul apabila mengenai *interface* maupun cacat yang ada pada logam yang diuji. Penerimaan sinyal oleh proba ini kemudian diteruskan ke tabung sinar katoda atau monitor osiloskop untuk pembacaan cacat. Selain itu bisa juga dengan menggunakan kertas pencatat seperti terlihat pada gambar 2.4. Dengan kata lain, pengujian ini memiliki prinsip yang serupa dengan pengukuran gema yang terjadi apabila mengenai *interface*. Selanjutnya diukur waktu yang diperlukan antara gelombang pergi dengan gelombang pantul. Dengan hal ini, maka keberadaan retakan, void ataupun cacat lain dapat diprediksi.



Gambar 2.4 Jasa NDT PAUT (Phased Array Ultrasonic Testing) (Rieopassa, 2018)

Kristal-kristal yang sering digunakan adalah kristal kuarsa dan barium titanat. Hal yang perlu dicatat adalah antara kristal yang digunakan dengan benda uji tidak boleh terdapat celah udara, karena jika ada, maka sebagian besar energi akan dipantulkan pada permukaan batas antara benda uji dan udara. Untuk menghindari hal ini, maka penggunaan minyak sebagai lapisan pembatas kristal dan permukaan benda sangat dianjurkan.



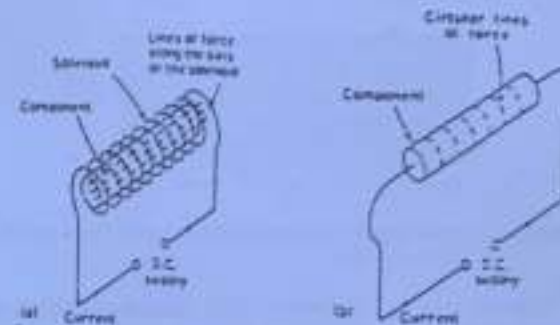
Gambar 2.5 Pengujian ultrasonik di lapangan untuk memantau korosi pipa (Khoeri, 2017).

Keuntungan uji ultrasonik:

- Dapat mendeteksi cacat logam pada bagian dalam benda uji.
- Dapat mengukur tebal benda uji
- dapat melokalisasi/menentukan posisi cacat di dalam benda uji
- Banyak dipakai dalam mencari cacat pada proses las
- Sinyal dapat dipancarkan miring.

### 3. Pengujian Partikel Magnetik (*Magnetic Particle Testing*)

Prinsip dari pengujian ini adalah memosisikan material yang akan diuji di dalam medan magnet ataupun diletakkan pada koi kawat (misalnya solenoid), medan magnet akan dibangkitkan apabila arus listrik dialirkan pada koi tersebut. Adapun teknik pembangkitan medan magnet dapat dilihat pada gambar 2.6



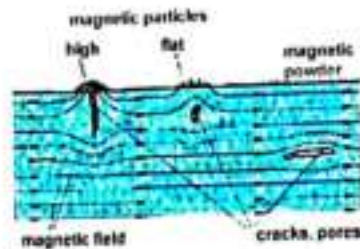
Gambar 2.6 Teknik Pembangkitan Medan Magnet (Simanjuntak, 1999).

Pengujian ini memiliki dua jenis metode, yaitu metode kering dan metode basah. Pada metode kering partikel magnetik berupa serbuk besi ditaburkan pada permukaan.

Metode yang pertama dilakukan dengan melilitkan benda uji dengan konduktor kawat (atau meletakkannya dalam solenoid)

kemudian arus dialirkan pada solenoid tersebut. Metode ini digunakan untuk benda uji yang relatif kecil. Metode yang kedua adalah dengan langsung menghubungkan konduktor dengan komponen yang akan diuji kemudian arus dialirkan. Cara yang kedua ini digunakan untuk benda uji yang cukup besar. Untuk membedakan kedua cara ini dalam mendeteksi cacat adalah dengan melihat arah garis gaya magnet yang dihangkitkan (lihat gambar 2.6).

Apabila ada cacat/retak, maka bubuk akan terpolo di sekitar retakan akibat adanya garis gaya magnet yang terputus dan membentuk dua kutub pada daerah yang terputus tersebut (gambar 2.7)



Gambar 2.7 Dasar pengujian dengan serbuk magnet (Harsono dan Okumura, 2000).

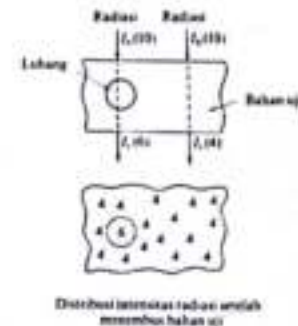
Pada metode basah, partikel yang digunakan berbentuk suspensi dalam light oil. Selanjutnya suspensi disemprotkan pada permukaan yang akan diuji.

Pengujian ini sangat baik dilakukan untuk melihat retak maupun cacat di dekat permukaan yang tegak lurus terhadap garis gaya magnet. Untuk cacat yang sejajar dengan garis gaya magnet, diperlukan pemeriksaan dari sisi yang lain. Kekurangan penggunaan pengujian ini adalah keterbatasan hanya pada material feromagnetik. Kepekaan pengujian akan menurun bila posisi cacat terlalu dalam di bawah permukaan. Hal terakhir yang disarankan adalah kondisi

permukaan harus halus dan bersih untuk meningkatkan kepekaan pengujian.

#### 4. Pengujian Radiografi (*Radiography Testing*)

Pengujian radiografi pada dasarnya adalah penyinaran bahan uji dengan sinar berdaya tembus tinggi seperti sinar X dan sinar  $\gamma$  yang dapat menembus logam. Skema dari pengujian ini dapat dilihat dalam Gambar 2.8.



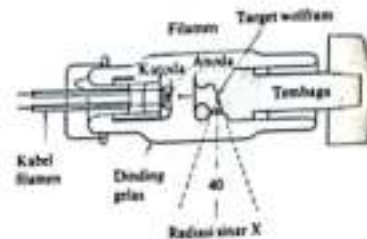
Gambar 2.8 Dasar pengujian radiografi (Harsono dan Okumura, 2000)

#### Cara Menghasilkan Sinar X

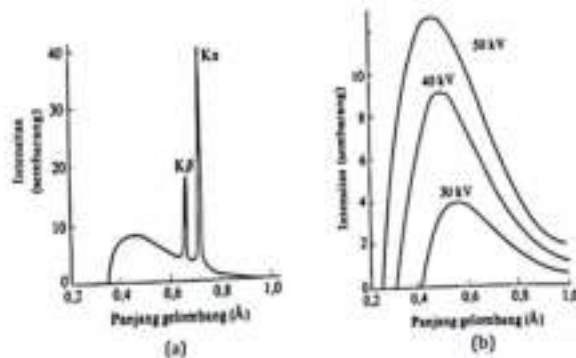
Sinar X dapat dihasilkan dengan menumbukkan elektron yang dilepaskan oleh katoda pada anoda di dalam suatu tabung hampa udara, seperti terlihat pada gambar 2.9. sifat-sifat sinar X yang dihasilkan sangat tergantung pada tegangan dan arus dari tabung, makin tinggi tegangannya makin besar daya tembus sinar X yang dihasilkan. Sedangkan arus tabung yang besar akan mempertinggi intensitas sinar X.

Spektrum sinar X yang dihasilkan akan mampu mempunyai intensitas seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.10a di mana

spektra dengan intensitas yang melonjak yang diberi tanda K dan  $K_{\beta}$  dinamakan radiasi monokromatik atau radiasi karakteristik. Sinar X yang dihasilkan dengan tegangan rendah biasanya tidak mempunyai radiasi karakteristik dan disebut radiasi putih. Dalam gambar 2.10b ditunjukkan radiasi putih dari sinar X dengan anoda wolfram.



Gambar 2.9 Konstruksi tabung sinar X (Harsono dan Okumura, 2000).



Gambar 2.10 Spektrum sinar X (a) dengan radiasi karakteristik (Mo, 35 kV) (b) spektrum radiasi putih (Target Wolfram) (Harsono dan Okumura, 2000).

Alat-alat penghasil sinar X ditunjukkan pada gambar 2.11a, yaitu alat dengan menggunakan transformator tegangan tinggi dan dalam gambar 2.11b dengan dasar akselerasi. Dari kedua jenis alat tersebut, yang banyak digunakan dalam pengujian adalah alat yang pertama.



Gambar 2.11 Alat Uji Sinar X Portabel (Previle, 2020).

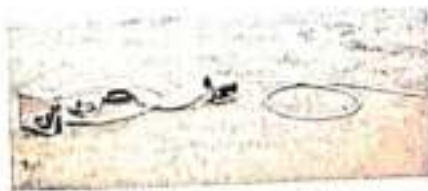
#### Sumber Sinar $\gamma$

Unsur-unsur radioaktif yang tidak stabil yang juga disebut radioisotop dalam menuju proses kestabilannya akan memancarkan gelombang elektromagnet yang dinamakan sinar  $\gamma$ . Karena pemancarannya ini maka radioisotop makin lama makin lemah. Waktu yang dijalani hingga kekuatan penyinarannya menjadi setengahnya disebut waktu paruh (waktu setengah umur). Untuk keperluan pengujian tak merusak dengan sendirinya harus menggunakan radioisotop yang mempunyai waktu paruh beberapa hari. Dalam hal ini biasanya digunakan isotop-isotop Sesium ( $Cs$ ), Iridium ( $Ir$ ) atau Tulium ( $Tm$ ). Karena radioisotop selalu memancarkan sinar  $\gamma$  maka apabila tidak dipakai harus disimpan dalam tabung pelindung yang terbuat dari timbal dan paduan wolfram.

Pancaran sinar  $\gamma$  dapat dilakukan dengan tiga cara yaitu pemancaran satu arah yang dilakukan dengan membuka tutup tabung pelindung, pemancaran silinder yang dilakukan dengan membuka



pelindung dinding tabung dan pancaran ke segala arah dengan meletakkan radio isotop pada tempat yang telah dipilih tanpa memakai tabung pelindung. Dalam hal penggunaan yang terakhir harus dilakukan dengan pengaturan jarak jauh seperti pada gambar 2.12



Sumber: Harsono dan Okumura, 2000

Gambar 2.12 Alat uji sinar  $\gamma$  (pengaturan jarak jauh)

#### Alat dan Bahan yang Digunakan

Pertama-tama yang terpenting adalah film yang digunakan untuk membuat gambar dari bagian yang diuji. Untuk ini dalam tabel 2.1 dapat dilihat pembagian dari film sinar X yang banyak digunakan dan dalam tabel 2.2 ditunjukkan pengelompokan penggunaannya.

Tabel 2.1 Klasifikasi film sinar X

Klasifikasi	Sifat	Lapisan Penguat intensitas	Perbedaan perlihatkan		Merek dan Kode		
			Kepakan	Mutu Gambar	Fuji	Sekura	Kodak
I	Batu-bata lunak tinggi	Langsung	↓	Makin Baik	50	RP	DR
					80	R	M
II	Batu-bata lunak tinggi	Langsung	↓		100	RR	T
					150		AA
III	Kepakan tinggi	Langsung	↓		200	N	D
IV	Kawat, esok	Fluorocen Langsung	↓	Makin Baik	400	S	RP

Sumber: Harsono dan Okumura, 2000

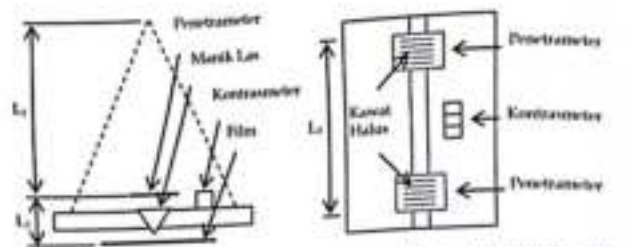
Tabel 2.2 Kriteria pemilihan film

Jenis	Tebal (mm)	Kebanyakan (K & T)										New T					
		50 atau kurang	50-80	80-120	120-150	150-200	200-300	300-400	400-500	500-600	600-800	800-1000	1000-1500	1500-2000	2000-3000		
Lapisan tipis	0.4	0	1	1													
	0.15	0.03	0	1	1												
	0.125	0.03	0	0	1												
	0.1		0.03	0	0	1											
	0.075		0.03	0.03	0	0											
	0.05			0	0.03	0											
Jenis tebal	0.4		0	0	0	1	1										
	0.15		TV	0	0	0	1	1									
	0.125			TV	0	0	0	1	1								
	0.1				0	0	0	1	1								
	0.075				TV	0.03	0	1	1								
	0.05						TV	0.03	1	1							

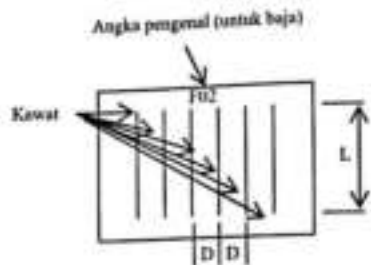
Catatan: I, II, III dan IV lihat tabel 2.1

Sumber: Harsono dan Okumura, 2000.

Alat yang lain yang sangat penting untuk penilaian hasil penyinaran adalah penetrometer, alat ukur penembusan sinar dan kontrasometer, alat ukur perbedaan ketajaman sinar. Penggunaan kedua alat ini dapat dilihat pada gambar 2.13. Menurut BS penetrometer dibuat dari kawat-kawat seperti terlihat pada gambar 2.14 dan gambar 2.15, sedangkan menurut ASME, ASTM dan AWS, penetrometer dibuat dari pelat dengan lubang-lubang tertentu seperti pada gambar 2.16. Kontrasometer dibuat dari pelat dengan tebal berbeda seperti terlihat dalam gambar 2.17 dan 2.18.



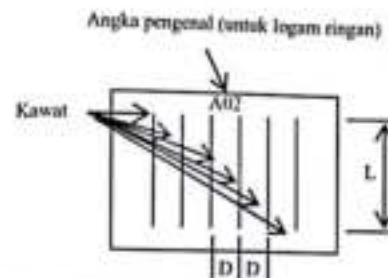
Gambar 2.13 Susunan dalam pengujian radiografi (Harsono dan Okumura, 2000)



Klasifikasi	Tebal pelat Yang dapat dipap (mm)		Jumlah Sumbu Kawat D (mm)	Panjang Kawat L (mm)
	Kelas Atas	Kelas Bawah		
302	27 atau kurang	36 atau kurang	3	40
304	10 - 20	17 - 40	4	40
308	22 - 40	30 - 120	6	40
316	40 - 140	60 - 200	10	40
321	40 - 120	100 - 200	15	40
Tebalness ukuran		+ 1% atau Mut (ISI-G 712)	+ 1%	+ 1 mm

Sumber: Harsono dan Okumura, 2000

Gambar 2.14 Penetratometer untuk baja (JIS Z 3104 dan JIS G 0581) (Harsono dan Okumura, 2000)

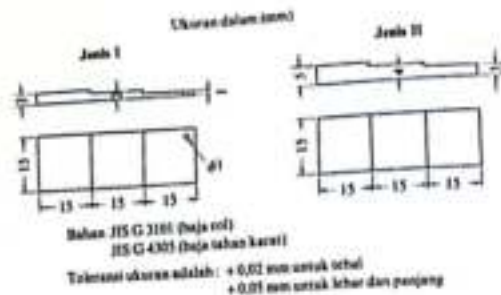


Klasifikasi	Tebal pelat Yang dapat dipap (mm)	Ukuran diameter kawat (mm)	Jumlah Sumbu Kawat D (mm)	Panjang Kawat L (mm)
API	27 - 40	0.15 0.12 0.10 0.08 0.07 0.06 0.05	3	40
API	20 - 40	0.20 0.21 0.12 0.10 0.08 0.06 0.05	4	40
API	20 - 40	0.40 0.30 0.24 0.20 0.15 0.12 0.10	6	40
Tebalness ukuran		+ 1% atau Mut (ISI-G 712)	+ 1%	+ 1 mm

Gambar 2.15 Penetratometer untuk logam ringan (JIS Z 3104) (Harsono dan Okumura, 2000)



Gambar 2.16 Penetratometer menurut AWS D1.1 (Harsono dan Okumura, 2000)



Gambar 2.17 Kontrasmeter untuk baja (Harsono dan Okumura, 2000).

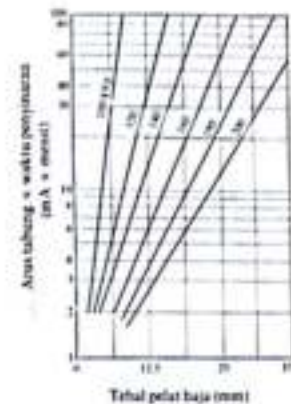


Gambar 2.18 Kontrasmeter untuk aluminium (Harsono dan Okumura, 2000).

#### Cara-Cara Penilaian Hasil Pemotretan

Hasil pemotretan akan sangat tergantung dari kekuatan sinar X dan lamanya waktu penyinaran. Untuk menentukan waktu penyinaran yang tepat dapat digunakan harga-harga dalam diagram dari gambar 2.17. Untuk mengadakan penilaian dari hasil, maka film yang telah

diproses dipelajari dengan menggunakan alat penyinaran seperti terlihat pada gambar 2.18. Ketentuan-ketentuan terhadap penilaian hasil biasanya sudah distandarkan. Dalam gambar 2.19 ditunjukkan beberapa hasil radiografi dari cacat las



Gambar 2.19 Diagram penyinaran (Harsono dan Okumura, 2000).



Gambar 2.20 Pengamatan hasil pemotretan radiografi (Harsono dan Okumura, 2000).



Gambar 2.21 Hasil pemotretan radiografi dari cacat las (Harsono dan Okumura, 2000).

#### E. RANGKUMAN

Pengujian *non destructive test* pada dasarnya untuk melihat cacat, kerusakan pada bahan baik pada bagian dalam maupun bagian luar bahan. Keempat metode pengujian masing-masing memiliki keunggulan dan kekurangan berdasarkan pada jenis, posisi dan bentuk cacatnya. Keempat metode pengujian *non destruktif* tersebut dapat dijelaskan dalam tabel-tabel berikut:

Tabel 2.3 Tempat cacat dan cara pengujian

Cara pengujian	Tempat cacat		
	Cacat terbuka sampai ke permukaan	Cacat dekat pada permukaan	Cacat di dalam
Uji radiografi	○	○	○
Uji ultrasonik	○ atau △	○ atau △	○
Uji serbuk magnet	○	○ atau △	x
Uji zat pewarna berwana	○	x	x
Uji elektromagnet	○	○	x

Catatan : ○ ... Baik sekali, ○ ... Baik, △ ... Buruk, x ... Tidak mungkin

Tabel 2.4 Bentuk cacat dan cara pengujian

Cara pengujian	Bentuk cacat					
	Datar	Bela	Silinder	Garis pada permukaan	Lubang pada permukaan	
Uji radiografi	○ atau △	○	○			
Uji ultrasonik	○	○ atau △	○			
Uji serbuk magnet				○	○	
Uji zat pewarna berwana				○ atau △	○	
Uji elektromagnet				○	○	

Catatan : ○ ... Baik sekali, ○ ... Baik, △ ... Buruk, x ... Tidak mungkin

Sumber: Harsono dan Okumura, 2000

Tabel 2.5 Jenis dan bentuk cacat

Bentuk	Jenis
Cacat datar	Retak, peleburan tidak sempurna, penetrasi tidak sempurna.
Cacat silinder	Pencampuran terak
Cacat bela	Lubang atau rongga halus
Cacat melingkar pada permukaan	Seraman
Cacat garis pada permukaan	Retak

Sumber: Harsono dan Okumura, 2000

Tabel 2.6 Perbandingan antara uji ultrasonik dan uji radiografi

Hal-hal yang perlu diketahui	Uji radiografi		Uji ultrasonik	
	A	B	A	B
Pembelahan jenis cacat	○	○	△	○
Ketelitian pengukuran panjang cacat	○	○	○	○
Ketelitian pengukuran tinggi cacat	*	*	△	○
Pembelahan jarak cacat ke arah tetel	△	○	○	○
Kemampuan menentukan posisi dan kedalaman sempurnaan perletakan	△	○	○	○
Penggunaan teknik tambahan T	△	○	○	○
Kemungkinan pengujian dan satu permukaan saja	*	*	○	○
Batas ketelitian maksimum bahan uji	○ atau △	○	○	○
Batas ketelitian minimum bahan uji	○	○	○ atau △	○
Ukuran dan bentuk alat penguji	△	○	○	○
Kemampuan pengujian	* atau △	○	○	○
Kemampuan mendeteksi hasil pengujian	○	○	○ atau △	○
Biaya penggunaan bahan baku	* atau △	○	○	○
Biaya pemeliharaan	* atau △	○	○	○
Kemudahan pengawasan keselamatan	*	○	○	○
Kemudahan teknik	○	○	○	○
Setidaknya syarat pengetahuan dan pengalaman bagi pengujian	○	○	△	○
Setidaknya pengaruh terhadap proses pemeliharaan	△	○	○	○

Catatan: ○ ... Baik sekali, ○ ... Baik,  
△ ... Tidak terlalu baik, \* ... Sekar atau tidak baik

Sumber: Harsono dan Okumura, 2000

Tabel 2.7 Jenis cacat dan cara pengujian

Jenis cacat		Cara pengujian		Uji radiografi		Uji ultrasonik	
		A	B	A	B		
Perampasan las	Lapisan las perong	○	○	○	○		
	Lapisan las penuh	○	○	○	○		
	Teras pasang tercampur dalam logam las	○	○	○	○		
	Teras penuh tercampur dalam logam las	○	○	○	○		
	Batas akalis dan antara las	-	-	*	* atau △		
Lubang las	Rongga halus terdapat	△	○	*	○		
	Rongga kasar terdapat	○	○	○	○		
	Rongga halus berakumulasi	○	○	○	○		
	Rongga halus terkumpul	○	○	○	○		
	Rongga halus terkumpul	○	○	○	○		
	Lubang panjang	○	○	○	○		
Retak	Retak lurus tegak	○	○	○	○		
	Retak bengkok tegak	△	○	○	○		
	Retak miring	*	△	○	○		
Lubang tidak sempurna	Letakan tidak sempurna rapat	*	△	○	○		
	Letakan tidak sempurna berongga	○	○	○	○		
Perataan tidak sempurna	Perataan tidak sempurna dalam alur	○	○	○	○		
	Perataan tidak sempurna pada akar	○	○	○	○		
Tali las		○	○	○	○		
Suturan		○	○	△	△		

Uji radiografi A, JIS Z 3104 kelas biasa  
Uji radiografi B, JIS Z 3104 kelas khusus  
Uji ultrasonik A, NDE 2404-73, dengan sudut bias 75°  
Uji ultrasonik B, kemampuan kedalaman kira-kira 4 kali uji ultrasonik A

Catatan: ○ ... Baik sekali, ○ ... Baik, △ ... Sekar, \* ... Tidak mungkin

Sumber: Harsono dan Okumura, 2000



Gambar 2.22 Diagram pengujian ultrasonik dan radiografi berdasarkan bentuk cacat pada pengelasan (Harsono dan Okumura, 2000)

#### Soal-Soal

1. Jelaskan proses pengujian penetrasi
2. Jelaskan proses pengujian partikel magnetik
3. Jelaskan proses pengujian ultrasonik
4. Jelaskan proses pengujian radiografi
5. Jelaskan perbedaan dari keempat pengujian di atas berdasarkan posisi, bentuk dan jenis cacat pada bahan

## BAB 3

### ANALISIS STRUKTUR MIKRO BAHAN TEKNIK

#### A. PENDAHULUAN

Ahli material dan metalurgi pada sisi yang lain lebih berfokus pada bagaimana memproduksi dan memfabrikasi material untuk memenuhi kebutuhan pelayanan dengan menggunakan pendekatan analisis tegangan tersebut. Sehingga sangat penting untuk mengetahui hubungan antara struktur mikro dengan sifat-sifat mekanis material.

Material biasanya dipilih untuk aplikasi pemesinan/pembentukan karena adanya kombinasi dari beberapa karakteristik material.

#### B. TUJUAN INSTRUKSIONAL

Setelah mempelajari topik ini diharapkan mahasiswa dapat:

1. Mengetahui sifat-sifat dan struktur mikro bahan akibat perlakuan panas
2. Mampu menentukan batas suatu bahan dapat dikeraskan
3. Mengamati struktur mikro bahan dan membuatnya dalam bentuk foto

#### C. PRASYARAT

Mahasiswa memahami pengetahuan bahan teknik

#### D. PENGUJIAN

##### 1. Pengujian Perlakuan Panas Proses Anil

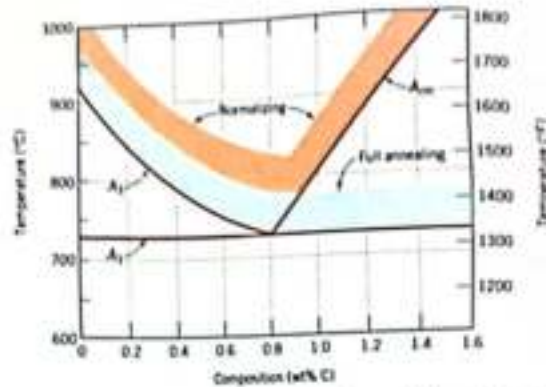
Anil adalah proses perlakuan panas di mana material dipanaskan sampai temperatur tertentu untuk waktu tertentu kemudian didinginkan secara perlahan-lahan. Proses anil dilakukan

dengan tujuan antara lain (1) menghilangkan tegangan sisa (2) melunakkan bahan, meningkatkan keuletan dan ketangguhan bahan; dan atau (3) menghasilkan struktur mikro tertentu yang spesifik.

Proses anil terdiri atas tiga tahapan: (1) memanaskan bahan sampai temperatur tertentu, (2) menahan pemanasan pada temperatur tersebut untuk beberapa lama, dan (3) mendinginkan bahan, biasanya sampai pada temperatur kamar. Waktu merupakan parameter yang penting dalam proses ini. Selama pemanasan dan pendinginan, besarnya gradien temperatur antara permukaan dan bagian dalam spesimen sangat tergantung pada ukuran dan geometri spesimen. Waktu dalam proses anil harus cukup untuk terjadinya reaksi transformasi. Temperatur anil juga sangat penting diperhatikan. Proses anil dapat dipercepat dengan meningkatkan temperatur, selama proses difusi juga diperhatikan.

Tegangan sisa dapat terjadi pada bahan karena: (1) deformasi plastis karena proses pemesinan dan penggerindaan (2) pendinginan yang tidak seragam dari bahan yang difabrikasi pada temperatur tinggi misalnya pengecoran dan pengelasan; dan (3) transformasi fasa selama proses pendinginan di mana terbentuk beberapa fasa dengan densitas yang berbeda. Tegangan sisa ini dihilangkan dengan pemanasan pada temperatur yang direkomendasikan dengan waktu tertentu kemudian didinginkan di udara pada temperatur kamar.

Ada beberapa proses anil untuk meningkatkan sifat-sifat baja paduan, antara lain: *Normalizing*, *Full Anneal*, dan *Spheroidizing*. Gambar 3.1 memperlihatkan diagram fasa besi-besi karbon pada daerah eutektoid. Garis horizontal pada temperatur eutektoid diberi simbol  $A_1$ , disebut **temperatur kritis bawah**, di bawah garis ini adalah kondisi yang seimbang, semua austenit akan bertransformasi menjadi fasa sementit dan ferit. Batas-batas fasa yang diberi simbol  $A_3$  dan  $A_{cm}$  menunjukkan **temperatur kritis atas**, untuk baja hypoeutektoid dan hypereutektoid. Komposisi dan temperatur di atas garis ini, yang ada hanya fasa austenit.



Gambar 3.1 Diagram fase besi-besi karbon pada daerah eutektoid, menunjukkan runge temperatur pemanasan untuk baja karbon (Callister, 2010).

**Normalizing.** Baja yang telah terdeformasi plastis misalnya melalui proses pengerolan yang terdiri atas fasa perlit, yang berbentuk tidak seragam dan relatif besar dan ukurannya bervariasi. Proses anil yang dilakukan disebut *normalizing* untuk memperbaiki ukuran butir dengan distribusi yang seragam. Proses ini dilakukan dengan memanaskan spesimen sekitar 550C sampai 850C di atas temperatur kritis. Setelah beberapa saat sehingga transformasi austenit untuk menghasilkan *Austenizing* selesai, pemanasan dihentikan dan kemudian didinginkan di udara.

**Full Anneal.** Full anneal dilakukan untuk baja karbon rendah dan sedang yang akan dimesin atau akan mengalami deformasi plastis selama proses pembentukan. Paduan diaustenisasi dengan memanaskan sekitar 150C sampai 400C di atas garis  $A_2$  atau  $A_1$  sampai kondisi seimbang. Paduan kemudian didinginkan di dalam tungku pemanas sampai temperatur kamar; dengan jalan mematikan tungku pemanas. Setelah beberapa jam akan dihasilkan struktur mikro berupa perlit koarse yang relatif lunak dan ulet. Proses ini memakan waktu yang cukup lama, namun struktur mikro yang

dihasilkan memiliki ukuran butir yang kecil dan struktur butirnya seragam, mengandung perlit koarse yang lunak, namun masih

cukup keras untuk dimesin atau dideformasi plastis. Untuk itu perlu di anil untuk mendapatkan struktur *spheroidite* yang cukup lunak dan ulet untuk dimesin atau dideformasi. *Anil spheroidizing* adalah perlakuan panas dengan temperatur 700°C atau di bawah eutektoid (garis  $A_1$ ) pada daerah  $\alpha$ -Fe<sub>3</sub>C dari diagram fasa gambar 3.1. Jika bahan sebelumnya banyak mengandung fasa perlit, waktu untuk proses spheroidizing bisa memakan waktu sekitar 15 sampai 25 jam. Selama proses anil ini terjadi penggabungan dari Fe<sub>3</sub>C membentuk partikel spheroid.

### Pengerasan Presipitasi (*Precipitation Hardening*)

Kekuatan dan kekerasan material dapat ditingkatkan dengan memasukkan partikel yang cukup kecil sebagai fasa kedua dalam fasa matrix dasarnya; proses ini dapat dilakukan dengan melalui perlakuan panas. Proses ini dikenal dengan *pengerasan presipitasi* karena adanya partikel kecil sebagai fasa baru yang disebut *precipitates*. *Age Hardening* juga digunakan untuk menamakan proses ini karena prosesnya memakan waktu. Contoh paduan yang dikeraskan dengan cara presipitasi ini adalah aluminium-tembaga, tembaga-berilium, tembaga-timah, dan magnesium-aluminium dll.

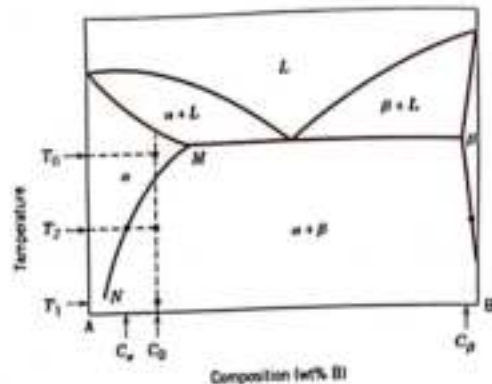
Pengerasan presipitasi dilakukan melalui dua tahapan yaitu perlakuan panas paduan (*solution heat treating*) dan perlakuan panas presipitasi (*precipitation heat treating*).

**Solution Heat Treating.** Pada tahapan ini semua atom bercampur membentuk suatu larutan pada berfasa tunggal. Misalnya sebuah paduan dengan komposisi  $C_0$  pada gambar 3.2.

Perlakuan panas diberikan pada paduan sampai pada fasa  $\alpha$  misalnya pada temperatur  $T_0$  dan ditahan sampai semua fasa  $\beta$  yang ada terlarut. Pada kondisi ini, yang ada hanya fasa  $\alpha$  saja dari komposisi  $C_0$ . Proses ini selanjutnya diikuti dengan pendinginan yang cepat atau *quenching* sampai temperatur kamar  $T_1$ , sehingga tidak terbentuk fasa  $\beta$ . Sehingga diperoleh kondisi yang tidak seimbang

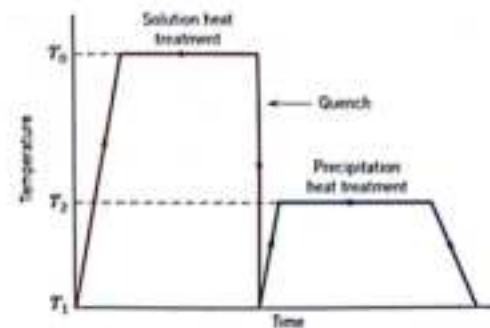


dimana fasa yang ada hanya fasa  $\alpha$  berupa larutan padat saja. Pada keadaan ini paduan yang dihasilkan relatif lunak. Untuk beberapa paduan, laju difusi pada temperatur  $T_1$  relatif lambat, sehingga fasa tunggal ini bertahan untuk waktu yang cukup lama.



Gambar 3.2 Hipotesis diagram fasa untuk paduan dengan komposisi  $C_\beta$  yang dapat dikeraskan presipitasi (Callister, 2010).

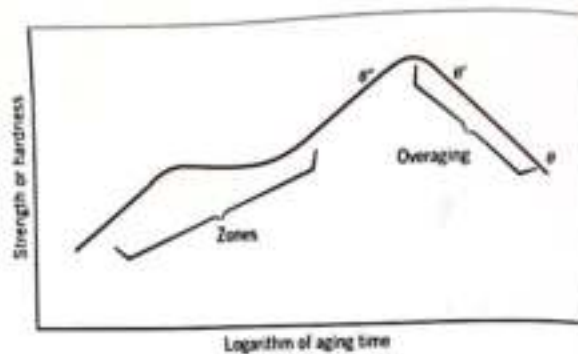
**Precipitation Heat Treating.** Pada tahapan ini larutan padat berfasa  $\alpha$  dipanaskan pada temperatur tertentu  $T_2$  pada gambar 3.2 pada daerah dua fasa  $\alpha + \beta$ , dimana laju temperatur difusi memungkinkan terjadi. Fasa presipitasi  $\beta$  mulai terbentuk dengan komposisi partikel  $C_\beta$ , di mana proses ini biasa disebut *aging*. Setelah waktu tertentu, paduan kemudian didinginkan kembali pada temperatur kamar. Kedua tahapan proses ini diperlihatkan pada gambar 3.3.



Gambar 3.3 Skematik temperatur terhadap waktu untuk proses *solution heat treating* dan *precipitation heat treating* (Callister, 2010).

Sifat-sifat dari pengerasan presipitasi untuk paduan ini diperlihatkan pada gambar 3.4. Dengan bertambahnya waktu, tegangan atau kekerasan juga meningkat, sampai maksimum dan akhirnya turun kembali. Penurunan tegangan dan kekerasan setelah waktu yang cukup lama disebut *overaging*.

Efek penguatan dan pengerasan yang diperlihatkan pada gambar 3.4 dihasilkan dari sejumlah partikel yang masuk ke dalam fasa transisi dan metastabil. Sebagaimana terlihat pada gambar, tegangan maksimum dicapai dengan adanya formasi fasa  $\theta'$ , yang diperoleh melalui pendinginan paduan sampai temperatur kamar. *Overaging* dihasilkan dari adanya pertumbuhan partikel yang berlanjut dan membentuk fasa  $\theta$  dan  $\beta$ .



Gambar 3.4 Diagram skematik kekuatan dan kekerasan sebagai fungsi dari logaritma waktu aging pada temperatur konstan selama perlakuan panas presipitasi (Callister, 2010)

#### Perlakuan Panas pada Baja

Prosedur perlakuan panas konvensional untuk baja pada dasarnya terdiri atas pemanasan dan pendinginan kontinu dan cepat untuk spesimen austenit dalam beberapa media pendingin, seperti air, oli atau udara. Sifat optimum dari baja yang telah di quench dan kemudian ditemper dapat dicapai hanya jika, selama proses pencelupan (*quenching heat treatment*), spesimen telah membentuk kandungan martensit yang cukup banyak, terbentuknya perlit atau bainit juga akan menghasilkan kombinasi yang lebih baik terhadap sifat-sifat mekanis. Selama proses pencelupan, tidak mungkin untuk mendinginkan spesimen secara seragam antara bagian luar dan bagian dalam spesimen, di mana bagian luar akan lebih cepat dingin. Sehingga austenit akan bertransformasi dengan variasi temperatur, sehingga memungkinkan terbentuk sejumlah mikrostruktur dan sifat yang bervariasi terhadap posisi dalam spesimen. Keberhasilan perlakuan panas pada baja untuk menghasilkan struktur mikro martensit yang dominan pada penampang tergantung pada tiga faktor utama: (1) komposisi paduan, (2) jenis dan karakter media pendingin,

dan (3) ukuran dan bentuk spesimen. Untuk poin yang pertama akan dijelaskan terpisah pada pengujian jomini.

#### *Pengaruh Media Pendingin, Ukuran dan Bentuk Spesimen.*

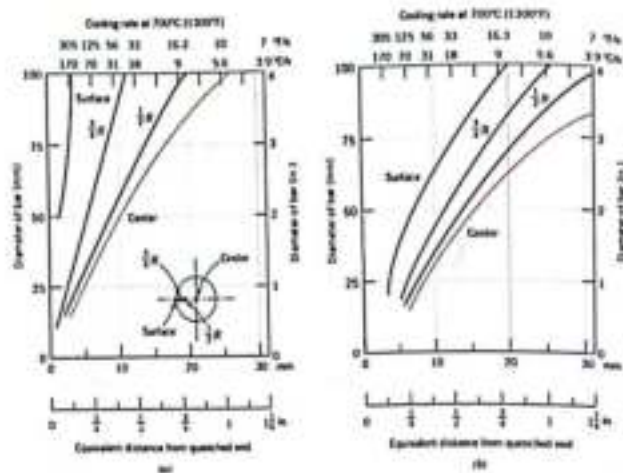
Laju pendinginan spesimen tergantung pada laju ekstraksi energi, yang merupakan fungsi karakteristik dari media pendingin yang bersentuhan dengan permukaan spesimen, begitu juga dengan ukuran dan bentuk spesimen.

Keefektifan pendinginan diindikasikan dengan laju pendinginan; semakin cepat pendinginannya semakin efektif. Dari ketiga media pendingin (air, oli dan udara), air merupakan media pendingin yang paling cepat, disusul oli dan udara. Derajat agitasi dari media pendingin mempengaruhi cepatnya panas dipindahkan. Dengan meningkatkan kecepatan media pendingin yang melewati permukaan spesimen, maka media pendingin semakin efektif. Untuk baja karbon tinggi, media pendingin air terlalu cepat sehingga tidak terlalu bagus karena bisa menyebabkan retakan. Pendinginan dengan udara untuk baja karbon biasa bisa mengakibatkan terbentuknya struktur perlit secara keseluruhan.

Selama proses pendinginan spesimen baja, energi panas ditransfer ke permukaan sebelum dilepaskan ke media pendingin. Konsekuensinya, laju pendinginan bagian dalam dan luar spesimen bervariasi terhadap jarak dan tergantung pada ukuran dan bentuk spesimen. Gambar 3.5a dan 3.5b memperlihatkan laju pendinginan pada 7000C sebagai fungsi dari diameter untuk batang bulat pejal pada empat titik pengukuran (permukaan,  $\frac{1}{4}$  radius,  $\frac{1}{2}$  radius dan titik pusat). Media pendingin berupa air yang dialirkan untuk gambar 3.5a dan oli untuk gambar 3.5b.

Salah satu penggunaan dari diagram ini adalah dengan memperkirakan kekerasan bahan di sepanjang penampang spesimen. Sebagai contoh gambar 3.6a memperlihatkan perbandingan distribusi kekerasan dalam arah radial untuk spesimen batang bulat pejal dari baja karbon biasa (1040) dan baja paduan (4140). Keduanya berdiameter 50 mm dan dicelup dengan media pendingin air. Perbedaan kekerasannya terlihat pada grafik. Diameter spesimen juga

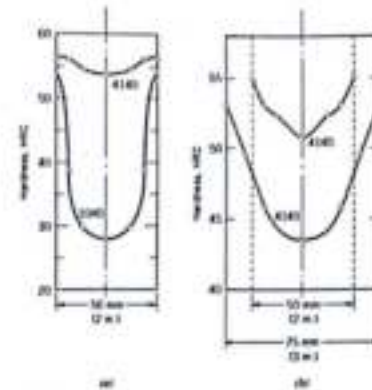
berpengaruh pada distribusi kekerasan bahan seperti terlihat pada gambar 3.6b yang memperlihatkan profil kekerasan dari material 4140 berdiameter 50 mm dan 100 mm.



Gambar 3.5 Laju pendinginan sebagai fungsi dari diameter dengan media pendingin (a) air (b) oli (Callister, 2010)

Bentuk spesimen juga berpengaruh terhadap disipasi energi pada permukaan spesimen ke media pendingin, laju pendinginan untuk beberapa media pendingin tertentu tergantung pada rasio luas permukaan terhadap massa spesimen. Semakin besar rasio ini, semakin cepat laju pendinginan, sehingga efek kekerasan semakin dalam.

Kurva kemampukerasan (*hardenability*) pada gambar 3.5 untuk media pendingin yang bervariasi, dapat digunakan untuk keperluan pemilihan material baja paduan khusus untuk keperluan spesifik. Untuk komponen yang digunakan untuk aplikasi tegangan tinggi, maka fasa martensit yang harus dihasilkan dalam proses perlakuan panas minimal 80%.



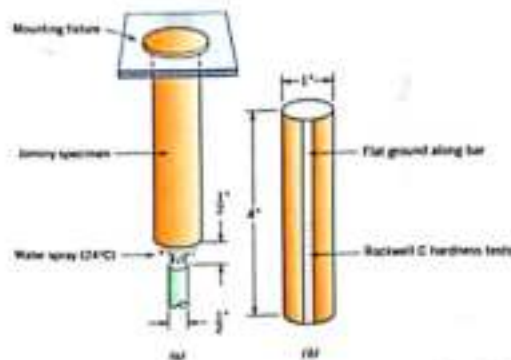
Gambar 3.6 Profil kekerasan bahan dalam arah radial untuk (a) material baja 1040 dan 4140 berdiameter 50 mm dan (b) spesimen baja 4140 yang dicelup dalam air berdiameter 50 mm dan 100 mm (Callister, 2010)

## 2. Pengujian Jomini

Pengaruh komposisi paduan pada kemampuan baja untuk bertransformasi membentuk fasa martensit dengan media pendingin tertentu berhubungan dengan parameter yang disebut kemampukerasan baja (*hardenability*). Kemampukerasan adalah istilah yang digunakan untuk menunjukkan kemampuan baja untuk dikeraskan melalui pembentukan fasa martensit yang diperoleh melalui perlakuan panas. Kemampukerasan ini diperoleh melalui pengukuran kualitatif laju penurunan kekerasan terhadap jarak dari permukaan ke bagian dalam spesimen yang diakibatkan oleh semakin berkurangnya kandungan fasa martensit pada bagian dalam spesimen.

Pengujian jomini merupakan salah satu pengujian standar untuk mengetahui kemampukerasan baja. Yang divariasikan adalah komposisi paduan sementara media pendingin, ukuran dan bentuk spesimen dibuat konstan. Spesimen berbentuk batang bulat pejal dengan diameter 25.4 mm (1 in.) dan panjang 100 mm dipanaskan pada daerah austenit untuk temperatur dan waktu tertentu. Setelah

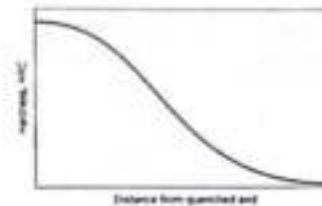
dikeluarkan dari tungku pemanas kemudian didinginkan dengan menggunakan air pada salah satu ujungnya dengan media pendingin air dengan kecepatan tertentu seperti terlihat pada gambar 3.7a. Sehingga laju pendinginan jadi maksimum pada bagian bawah dan semakin berkurang di sepanjang spesimen ke atas. Setelah spesimen dingin permukaan sepanjang spesimen diratakan dengan membuang setebal 0.4 mm kemudian diukur angka kekerasan Rockwell-nya pada daerah pengukuran 50 mm dari permukaan bawah spesimen. Untuk panjang pengukuran 12.8 mm pertama pengukuran kekerasan dilakukan dengan interval 1.6 mm, dan untuk 38.4mm selanjutnya diambil angka kekerasannya dengan interval 3.2 mm (lihat gambar 3.7b). Kurva kemampukerasan dibuat sebagai fungsi dari angka kekerasan terhadap posisi pengukuran dari ujung bawah proses pendinginan.



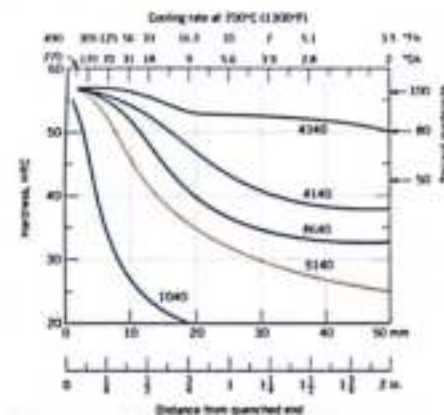
Gambar 3.7 Gambar skematik untuk spesimen pengujian jominy (a) proses pendinginan pada ujung bawah, dan (b) setelah pengujian kekerasan. (Callister, 2010)

Kurva kemampukerasan untuk lima jenis baja paduan dengan komposisi karbon 0.40% berat dan variasi unsur paduan yang lain juga diperlihatkan pada gambar 3.9. Salah satu spesimen adalah baja

karbon biasa (1040); empat spesimen yang lain (4140, 4340, 5140 dan 8640) adalah baja paduan. Komposisi (dalam% berat) dari masing-masing paduan sebagai berikut: 4340-1.85 Ni, 0.80 Cr, dan 0.25 Mo; 4140-1.0 Cr dan 0.20 Mo; 8640-0.55 Ni, 0.50 Cr, dan 0.2 Mo; 5140-0.85 Cr



Gambar 3.8 Kurva kemampukerasan berdasarkan angka kekerasan Rockwell C terhadap jarak dari ujung pendinginan (Callister, 2010)



Gambar 3.9 Kurva kemampukerasan untuk lima jenis baja paduan yang berbeda, semuanya mengandung karbon dengan % berat yang sama 0.4% (Callister, 2010).

**Kurva Kemampukerasan.** Kurva kemampukerasan diperlihatkan pada gambar 3.B. Ujung yang didinginkan merupakan daerah yang paling cepat laju pendinginannya sehingga angka kekerasannya maksimum; biasanya pada daerah ini fase martensit yang terbentuk 100%. Laju pendinginan semakin menurun dengan bertambahnya jarak dari ujung pendinginan, sehingga kekerasan baja juga menurun, sebagaimana terlihat dalam grafik. Dengan menurunnya laju pendinginan, lebih banyak waktu bagi karbon untuk berdifusi dan bertransformasi dengan persi yang lebih besar membentuk perlit yang lunak, yang tercampur dengan martensit dan bainit. Setiap baja paduan memiliki kurva dengan karakteristik tersendiri.

### 3. Pengujian Metalografi

Cara-cara dan peralatan yang dibahas di sini adalah cara-cara dan peralatan metalografi yang menggunakan mikroskop optik. Pembahasan tentang cara-cara dan langkah-langkah penyiapan spesimen metalografi disusun sebagai berikut:

- a. Langkah-langkah pengamatan/analisis pendahuluan sebelum proses penyiapan spesimen.
- b. Penggerindaan.
- c. Memoles mekanik.
- d. Memoles elektrolit dan kimia.
- e. Teknik-teknik memoles yang khusus.
- f. Meng-etsa.
- g. Analisis struktur mikro.

Sedangkan peralatan yang dipergunakan dalam teknik metalografi adalah mikroskop optik yang khusus untuk pengamatan metalurgi.

#### Pengamatan dan Analisis Pendahuluan Sebelum Proses Penyiapan Spesimen

Penampilan suatu logam seperti bentuk, permukaan patah, ketidakhomogenan atau segregasi, orientasi, besarnya kristal-kristal

dll memberikan informasi yang tidak sedikit tentang asal usul dari logam tersebut. Misalnya: apakah logam tersebut di cor, dilol panas atau dingin. Apakah logam tersebut sudah mengalami perlakuan panas, apakah logam tersebut teroksidasi, terkoroasi dsb.

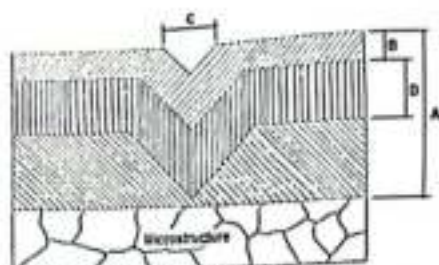
Seorang metalografer harus dapat memilih dengan baik bagian-bagian yang akan diambil untuk dijadikan spesimen. Begitu pula dengan jumlah dan penampang yang dipilihnya. Sebagai contoh, seandainya akan diamati suatu material yang baru saja mengalami proses pengerolan, apakah bagian-bagian yang dipilihnya itu adalah yang tegak lurus terhadap arah pengerolan atau yang sejajar dengan arah pengerolan. Demikian pula dengan bahan-bahan yang baru saja dicor, apakah bagian yang akan dipilihnya itu bagian atas atau bagian bawah atau kedua-duanya. Juga untuk bahan-bahan yang baru saja patah, apakah bagian-bagian yang akan diambilnya itu pada permukaan patah, dekat permukaan patah ataukah kedua-duanya.

Kadang-kadang sebelum diambil keputusan, suatu bahan sebelum dipotong-potong atau sebelum beberapa bagian diambil spesimen, harus dibuatkan fotonya secara utuh. Perlu diperhatikan pula bahwa dalam proses memotong, harus dicegah kemungkinan deformasi dan panas yang berlebihan. Untuk itu setiap proses pemotongan harus diberikan pendinginan yang memadai.

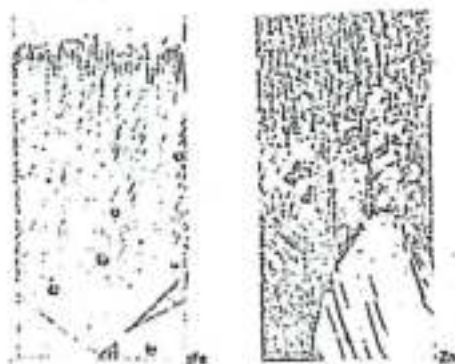
Penggergajian manual (untuk logam-logam dengan kekerasan yang lebih kecil dari 400 Brinell) hanya menimbulkan deformasi mekanik yang kecil yang dengan penggerindaan atau pemolesan mekanik atau elektrolit bagian yang terdeformasi tersebut dapat dihilangkan. Biasanya suatu kerusakan yang relatif kecil diperoleh sebagai akibat panas yang terjadi karena gesekan. Pelumas (oli atau oli yang dilarutkan dalam air) harus digunakan sebagai fluida pendingin selama proses penggergajian berlangsung, untuk mencegah keausan prematur dan menurunkan panas yang timbul karena gesekan. Panas yang berlebihan dapat melunakkan gigi-gigi gergaji dan mengubah struktur mikro dari spesimen yang terdapat di bawah permukaan potong.

Jika spesimen terlalu kecil atau kurang nyaman pada saat dicekam (antara lain karena bentuknya yang tidak beraturan), maka





- A: kedalaman larai dari lapisan yang terdeformasi  
 B: lapisan yang terdeformasi banyak  
 C: pengikisan oleh partikel abrasif  
 D: lapisan yang terdeformasi sedikit



Gambar 3.11 Penghilangan bagian yang terdeformasi dengan pemolesan kasar (Simanjuntak, 1999)

Arah pengampelasan dari suatu ampelas ke ampelas lain harus diubah-ubah. Dalam goresan B dan kedalaman dari logam yang terdeformasi A (yang terletak di bagian dalam dari goresan B) akan menurun dengan menurunnya ukuran grit dari kertas-kertas ampelas. Kedalaman dari logam yang terdeformasi bisa mencapai 10 sampai 50 kali dalamnya penetrasi partikel-partikel grit (lihat gambar 3.11).

Setiap langkah pengampelasan diharapkan dapat menghilangkan sama sekali bagian-bagian yang terdeformasi yang diperoleh dari langkah pengampelasan sebelumnya. Karena itu, sebaiknya langkah pengampelasan dilakukan dua kali lebih lama dari waktu yang diperlukan untuk menghilangkan goresan-goresan yang timbul dari langkah sebelumnya.

Suatu pengampelasan yang lama dan penuh kecermatan sangat dianjurkan agar waktu pemolesan dapat dipersingkat. Tangan maupun spesimen harus senantiasa dibersihkan (dicuci) setiap satu langkah pengampelasan diselesaikan. Dalam hal pengampelasan bahan-bahan yang sangat lunak (misalnya timah hitam), permukaan yang diampelas kadang-kadang ditempel/dipenuhi oleh partikel grit yang terlepas. Hal yang demikian dapat diatasi dengan memberi/memolesi lilin (parafin) ke atas kertas ampelas.

#### Pemolesan Mekanik

**Pemolesan Kasar.** Pada pemolesan kasar digunakan ukuran partikel sekitar 2  $\mu\text{m}$  untuk abamina dan 7  $\mu\text{m}$  untuk diaman pasta dan dilakukan dengan tangan. Arah pemolesan tegak lurus terhadap arah pengampelasan terakhir. Di samping itu selama pemolesan dianjurkan agar spesimen digerakkan ke depan dan ke belakang (di antara titik pusat dan sisi piringan pemoles), dengan maksud agar partikel-partikel yang abrasif dapat terdistribusi dengan merata di atas piringan pemoles.

Di samping itu, spesimen juga harus diputar-putar untuk mencegah terjadinya "ekor komet" (lihat gambar 4).

Selama pemolesan, besar penekanan yang diberikan hendaknya jangan terlalu berangsur-angsur dikurangi. Setiap satu langkah pemolesan berakhir, spesimen harus senantiasa dicuci dan dibersihkan, kemudian dicuci dengan alkohol lalu dikeringkan dengan menggunakan udara hangat (jangan dikeringkan dengan menggunakan kertas tisu, kain dan sejenisnya).

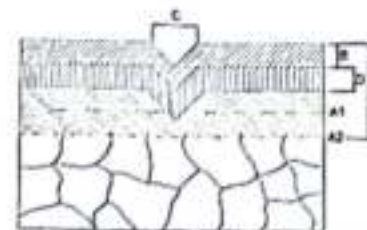
Partikel abrasif yang baik untuk pemolesan kasar adalah sejenis pasta diaman (7  $\mu\text{m}$ ) yang dilarutkan dalam oli pelumas. Harga W

(lihat gambar 3.10) persatuan waktu dan banyaknya bahan yang terkikis dari permukaan spesimen yang dipoles dengan diaman (kurva III) dibandingkan dengan banyaknya bahan yang terkikis oleh alumina (kurva II). Hubungan tersebut dinyatakan sebagai fungsi ukuran partikel abrasif. Dari diagram tersebut terlihat bahwa kurva II dan kurva III "menyimpang" dari kurva ideal. Penyimpangan sangat menyolok, khususnya untuk diaman, terutama bilamana ukuran partikel abrasifnya makin kecil.

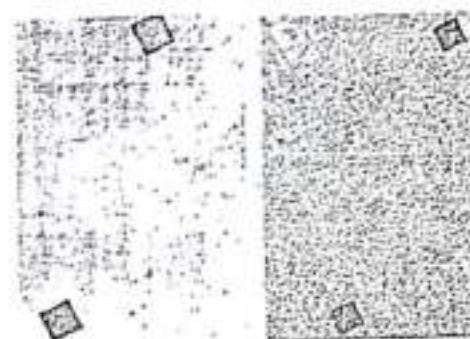
Pemolesan kasar harus dapat menghilangkan bagian yang terdeformasi (lapisan A dalam gambar 3.11), yang timbul sebagai hasil dari langkah-langkah sebelumnya. Karena itu pemolesan ini harus dilakukan dengan penuh kecermatan dan untuk suatu jangka waktu yang cukup lama. Beberapa logam (seperti timah hitam) dapat langsung dilakukan pemolesan halus setelah langkah yang terakhir pada proses pengampelasan selesai.

**Pemolesan Halus.** Pemolesan halus dapat dilakukan dengan tangan atau dengan menggunakan pemoles otomatis. Selama proses pemolesan, spesimen harus digerakkan secara kontinu dan diputar-putar untuk mencegah timbulnya "ekor komet" (lihat gambar 3.13). Cara membersihkannya dilakukan persis sama seperti pada langkah pemolesan kasar.

Partikel abrasif yang digunakan adalah diaman pasta ukuran 2, 1 dan  $\frac{1}{4}$   $\mu\text{m}$  atau alumina ukuran 1,  $\frac{1}{2}$  dan  $1/10$   $\mu\text{m}$ . Kualitas penyiapan yang terbaik untuk suatu spesimen metalografi kebanyakan diperoleh dengan jalan dipoles otomatis. Di samping itu penyiapan dapat dilakukan untuk beberapa spesimen sekaligus. Spesimen yang telah dipoles halus kemudian diperiksa di bawah mikroskop untuk melihat apakah masih ada goresan-goresan, kesalahan memoles (seperti timbulnya ekor komet), inklusi-inklusi non logam, porositas, pit, retakan, grafit dsb.



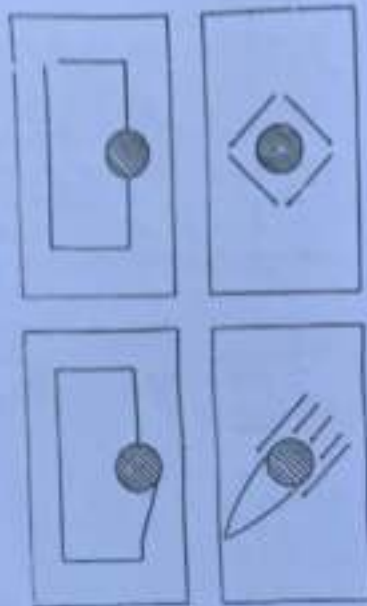
A1 : lapisan logam terlanjut yang telah terhapus  
berhubung pada waktu etang  
A2 : struktur etang



Gambar 3.12 Struktur spesimen pada pemolesan halus (Simanjuntak, 1999)

Struktur dari spesimen (garis A pada gambar 3.12) harus dapat dilihat setelah pemolesan halus berakhir. Tetapi kadang-kadang terjadi bahwa spesimen yang sudah dipoles halus, permukaan terlihat baik (tidak ada goresan-goresan). Ternyata setelah di etsa justru muncul goresan-goresan (lihat gambar 3.12). Bila hal seperti ini terjadi, maka spesimen harus dipoles ulang.

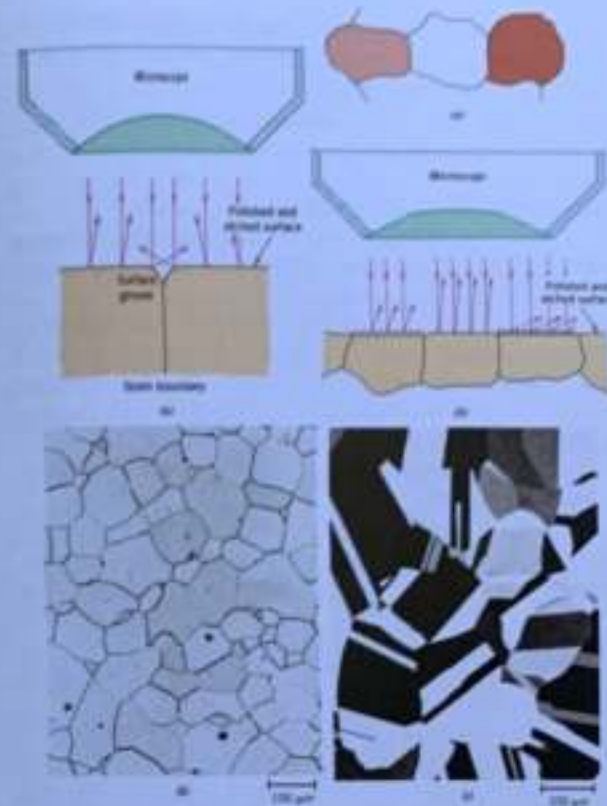




Gambar 3.13 Arah pemolesan halus untuk menghilangkan skor komet pada permukaan yang dipoles (Simanjuntak, 1999)

#### Pemolesan Kimia

Pemolesan kimia adalah pemolesan yang dilakukan dengan mencelupkan spesimen ke dalam larutan kimia yang sesuai. Hasilnya bervariasi, mulai dari suatu permukaan yang terotasi, yang secara makro halus, tetapi tidak mengkilap sampai dengan suatu permukaan spesimen yang mengkilap tetapi secara makro tidak halus.



Gambar 3.14 Proses etsa untuk mendapatkan konfigurasi batas butir (Callister, 2010)

Kadang-kadang timbul suatu lapisan sebagai hasil reaksi antara larutan kimia dengan permukaan spesimen. Kadang-kadang yang timbul adalah pitting (saraman) yang dihasilkan karena timbulnya gelembung-gelembung udara selama reaksi berlangsung.

Untuk mencegah hal tersebut, sebaiknya sebelum dicelupkan ke dalam larutan kimia, permukaan spesimen diratakan (dihaluskan) dengan menggunakan pemoles mekanis. Hasil yang terbaik akan diperoleh dengan cara ini, bila memproses logam-logam yang murni dan paduan-paduan yang berfasa tunggal.

#### **Teknik-Teknik Pemolesan yang Halus**

Yang dimaksud dengan pemolesan yang khusus sebenarnya adalah modifikasi dan kombinasi dari cara-cara pemolesan seperti yang telah diuraikan di atas, antara lain:

**Pemolesan Kimia dan Mekanis.** Yaitu suatu kombinasi antara pengetsaan kimia dan pemolesan mekanis yang dilakukan serentak di atas piringan pemolesan halus. Dalam hal ini partikel pemoles abrasif dicampur dengan larutan etsa yang umum digunakan untuk mengetsa. Hasilnya adalah suatu permukaan yang dietsa dan bebas dari suatu lapisan yang mengganggu (sebagai hasil reaksi dari larutan etsa dengan permukaan spesimen).

**Pemolesan Elektro Mekanis.** Yaitu proses kombinasi antara pemolesan elektrolitis dan mekanis pada piringan pemoles terakhir. Dalam hal ini, piringan pemoles bertindak sebagai katoda yang dilapisi dengan suatu kain sejenis panel yang dilembapkan dengan suatu elektrolit. Sedangkan spesimen bertindak sebagai anoda. Metode ini kadang juga disebut metode Reinacher dan sangat baik untuk memoles logam mulia, tembaga, kuningan dan perunggu.

Metode ini kemudian dimodifikasi untuk menyiapkan spesimen dari logam yang keras seperti wolfram, molybden dan paduan rhennium, yaitu dengan jalan menggunakan arus bolak balik yang berfrekuensi rendah dan menambahkan partikel-partikel abrasif ke dalam larutan elektrolit.

#### **Etsa Kimia**

Pengetsaan kimia dilakukan dengan cara mencelupkan spesimen ke dalam larutan etsa (dengan menggunakan penjepit/tang, nikel atau baja tahan karat). Permukaan spesimen yang akan dietsa diletakkan menghadap ke wajah kita.

Selama proses pengetsaan akan terlibat suatu perubahan "suasana larutan" di sekitar spesimen. Karena itu selama proses dianjurkan untuk menggerak-gerakkan spesimen agar larutan yang menyentuh spesimen senantiasa larutan yang "segar". Hal sama akan terjadi pula bila digunakan larutan yang mendidih (dalam hal ini akan banyak terjadi gelembung-gelembung udara).

Kontainer dari logam tidak dapat digunakan sebagai tempat untuk menyimpan larutan etsa bila timbul gradien potensial antara spesimen dan kontainer, karena hal tersebut akan menimbulkan suatu etsa yang berlebihan (*over etch*) pada beberapa bagian permukaan yang di etsa.

Kontainer gelas dapat digunakan untuk semua jenis larutan kecuali larutan asam HF. Untuk asam HF diperlukan suatu kontainer yang terbuat dari polythelene atau polystyren.

Dalam praktik, seorang metalografer harus dapat menentukan kapan proses pengetsaan harus diakhiri, yaitu dengan cara melihat derajat "keburaman" dari permukaan yang dietsa. Jika proses pengetsaan sudah diakhiri, sesegera mungkin spesimen tersebut dicuci dengan menggunakan air yang bergerak kemudian dibersihkan dengan alkohol dan dikeringkan dengan menggunakan udara panas.

Suatu pengetsaan yang agak kurang adalah lebih baik dari pada pengetsaan yang berlebihan. Pengetsaan yang kurang dapat diatasi dengan mengulang pengetsaan, sementara jika pengetsaan berlebihan hanya dapat diperbaiki dengan pemolesan ulang, bahkan jika terlalu berlebihan harus kembali diampelas. Dalam menyiapkan spesimen metalografi dari bahan besi cor kelabu, kadang-kadang diperlukan suatu proses etsa-poles etsa-poles yang berulang-ulang. Hal ini dimaksudkan untuk menghilangkan serbuk-serbuk logam yang menyusup ke dalam grafit. Beberapa logam lain (misalnya baja feritis) memberikan gambaran struktur yang lebih baik bila dilakukan proses seperti di atas (etsa - poles halus - etsa dst).

Mengetsa harus dilakukan di bawah suatu "hood" (penyedot udara) terutama bila selama proses pengetsaan terjadi penguapan, atau bila larutan etsanya suatu larutan yang sangat kuat (seperti

amoniak). Asam hydrofluor dapat merusakkan lensa, karena itu spesimen yang dietsa dengan larutan HF harus direndam di dalam larutan asam borak (50g  $\text{HBO}_3$ /l atau 100g  $\text{NH}_4\text{B}_5\text{O}_{10} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ /l) selama satu jam, kemudian dicuci dengan air dan dikeringkan.

Jika proses pengetsan harus dilakukan pada suatu suhu yang lebih tinggi, maka sebaiknya larutan etsa dipanaskan dalam suatu kontainer gelas atau piringan porselen di atas api yang kecil. Setiap kontainer sebaiknya dilengkapi dengan penutup untuk mencegah penguapan yang berlebihan dari larutan etsa, terutama larutan yang beralkohol.

**Mengets untuk Memperoleh Struktur Makro.** Teknik ini digunakan untuk melihat gambaran struktur solidifikasi (pembekuan), garis-garis alir, segregasi, perubahan struktur karena proses las, distribusi dan ukuran inklusi, porositas, cacat pada ingot dan cacat-cacat fabrikasi pada pembesaran yang rendah. Tetapi dalam hal ini perlu diperhatikan bahwa etsa makro dapat memperbesar cacat-cacat dan memperbesar ukuran ketidakhomogenan. Untuk maksud-maksud makro etsa, pengampelasan halus sudah cukup memadai.

**Mengets untuk Memperoleh Struktur Mikro.** Larutan etsa yang digunakan kerap kali "dilute" terlebih dahulu dengan alkohol atau air. Hal ini dimaksudkan untuk memperlambat kecepatan reaksi antara permukaan spesimen yang dipoles dengan larutan tersebut. Selama proses pengetsan (dengan jalan mencelupkan spesimen dalam suatu larutan campuran organik dan anorganik), ion-ion  $\text{H}^+$ ,  $\text{OH}^-$ ,  $\text{Cl}^-$  dsb akan menuju tempat-tempat yang anodik dan katodik pada permukaan yang dipoles. Dengan demikian, proses etsa dapat digunakan untuk memperoleh gambaran/konfigurasi batas butir (batas butir adalah tempat-tempat yang berenergi lebih tinggi) atau memperoleh gambaran/konfigurasi permukaan butir (seperti orientasi dsb), lihat gambar 3.14.

Suatu lapisan reaksi (oksida) yang agak tebal (tergantung pada orientasi kristal) dapat diperoleh dengan menggunakan beberapa larutan etsa sehingga diperoleh suatu warna interferensi yang berbeda.

Beberapa cara mengets khusus:

- Mengolesi permukaan spesimen dengan sejenis kain panel yang sudah dibasahi larutan etsa.
- Memberikan lapisan oksida dengan jalan meniupkan udara panas pada permukaan spesimen.
- Mengets elektrolitik.
- Pemolesan relief: diperoleh dengan jalan memoles untuk waktu yang cukup lama pada suatu piringan pemoles yang empok. Fasa yang keras akan tetap sedangkan fasa yang lunak akan terkikis, sehingga pada akhir proses pemolesan diperoleh relief.
- Potentiostatic etching.
- Mengets dengan jalan memberikan lapisan interferensi pada permukaan logam.

#### E. RANGKUMAN

Sifat-sifat mekanis suatu bahan dapat diperbaiki secara spesifik sesuai kebutuhan dalam desain dengan memberikan perlakuan panas pada bahan. Pemanasan logam pada temperatur tertentu kemudian didinginkan secara perlahan dikenal dengan proses anil. Pemanasan logam diikuti dengan pendinginan yang cepat utamanya untuk baja ditujukan untuk meningkatkan tegangan dan kekerasan baja dan logam paduan pada umumnya yang dikenal dengan pengerasan presipitasi. Struktur mikro merupakan komponen yang berpengaruh dalam sifat-sifat mekanis bahan. Dengan pengaturan struktur mikro pada bahan akan diperoleh sifat-sifat tertentu sesuai kebutuhan dalam desain.

#### Soal-Soal

1. Jelaskan pengertian dari:
  - a. Anneal
  - b. Normalizing
  - c. Full Anneal
  - d. Spheroidizing
  - e. Hardenability
  - f. Precipitation Hardening
2. Proses pengerasan presipitasi ditempuh melalui dua tahapan, jelaskan kedua tahapan tersebut.
3. Jelaskan proses pengujian jomini dan manfaat apa yang diperoleh dari pengujian tersebut.
4. Jelaskan proses pengujian metalografi dan sebutkan tujuan pengujian metalografi.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Callister, W.D., 1997, Material Science and Engineering, USA: John Wiley & Sons, Inc.
2. Harsono, W. dan T. Okumura, 2000, Teknologi Pengelasan Logam, Jakarta: Pradnya Paramita.
3. Khoeri, H. (2017). *Ultrasonic Testing - Pengujian Ultrasonik*. Jakarta: PT. Hesa Laras Cemerlang.
4. Preville, R. (2020). *Portable X-Ray Inspection Systems*. Wilmington USA: Kwipped.
5. Rieupassa, F. (2018). *Jasa NDT PAUT (Phased Array Ultrasonic Testing)*. Jakarta: Darto Industrial Service
6. Simanjuntak, E., 1999(a), *Pengujian Mekanik dan Pengujian Tanpa Merusak*, Bandung: Polban.
7. 1999(b), *Pengujian Mekanik dan Analisis Struktur Mikro*, Bandung: Polban.
8. Sree Karuvityyal, *Creep Testing Machine HTCS04A 50kN*, India: Chennai, Tamil Nadu. [pdf.indiamart.com](http://pdf.indiamart.com) (diakses: 15 April 2020)
9. Vlack, L.V., 1992, *Ilmu dan Teknologi Bahan*, Jakarta: Erlangga

## LAMPIRAN

### PANDUAN PENGGUNAAN MESIN PENGUJIAN BAHAN TEKNIK

#### A. Testometric M500 Z5CT: Uji Tarik (Tensile)

1. Ukur "Diameter" spesimen uji lalu pasang pada pencakam atas sejajar sumbu pencakam
2. Masuk ke software Testometric dengan mengklik ikon



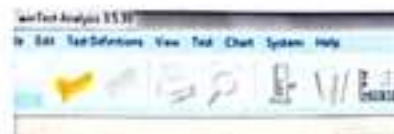
3. Geser benda kerja ke pencakam bawah sampai posisi yang sesuai dengan mengklik panah bawah kemudian menghentikan dengan mengklik tombol merah bulat setelah spesimen uji di posisi tepat



4. Setelah benda kerja terpasang, klik ikon untuk masuk ke menu opsi pengujian



5. Selanjutnya muncul menu




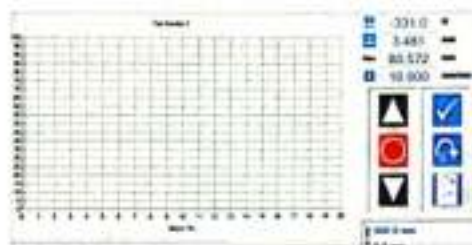
6. Klik "Test Defenitions" pilih "Create", muncul menu:







7. Isikan nama file pengujian yang akan dilakukan, misal "tarik test", lalu OK dan akan muncul dialog box

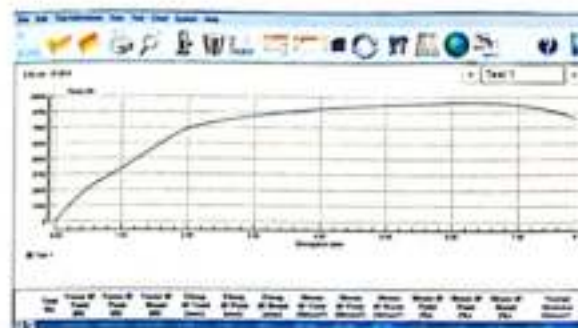




8. Pada "Test Parameters" tentukan test type "Tensile" untuk uji tarik. Sampel Type "circular" untuk sampel bulat dan "Rectangular" untuk sampel persegi. Selanjutnya masukkan panjang sampel di "Sampel Length" dan "diameter"
9. Pada "Calculations" pilih secara berturut-turut untuk setiap kolom:
  - a. Kolom 1 "Force Yield"; h. Kolom 8 "Stress Peak";
  - b. Kolom 2 "Force Peak"; i. Kolom 9 "Stress Break";
  - c. Kolom 3 "Force Break"; j. Kolom 10 "Strain Yield";
  - d. Kolom 4 "Elongation Yield"; k. Kolom 11 "Strain Peak";
  - e. Kolom 5 "Elongation Peak"; l. Kolom 12 "Strain Break";
  - f. Kolom 6 "Elongation Break"; m. Kolom 13 "Young Modulus"
  - g. Kolom 7 "Stress Yield";
10. Pada "Tester Setup"
  - a. Pilih load cell untuk 2500kgf (pada default masih tertulis 500kgf)
  - b. Menu "test speed" default tertulis 100 mm/mnt diganti jadi 10 mm/mnt
11. Setelah semua selesai baru klik "OK" lalu klik ikon "New"  lalu pilih file pengujian lalu "OK" selanjutnya akan muncul dialog box untuk memulai pengujian, klik tombol "start test" selanjutnya akan muncul dialog box berikut:




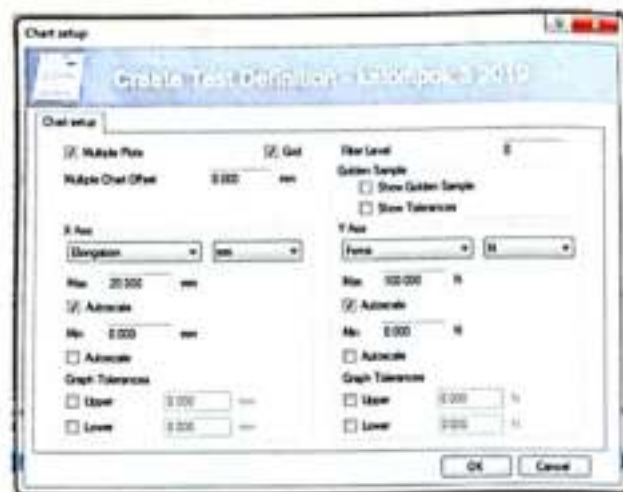
Klik kedua ikon  untuk mereset nilai beban dan perpanjangan kembali ke angka "0"



12. Selanjutnya klik ikon  untuk memulai pengujian tarik. Alat akan berhenti secara otomatis pada saat spesimen uji tarik sudah putus.
13. Klik ikon  yang menunjukkan bahwa pengujian selesai, kemudian klik ikon  untuk masuk menu preview grafik, sehingga muncul dialog box:



Klik ikon print preview  pada menu grafik sehingga muncul dialog box PDF lalu klik ikon  untuk menyimpan grafik "Gaya vs Perpanjangan" dalam menu PDF (diberi nama file sesuai selera).

14. Klik ikon  untuk mengubah setting grafik dari "X Axis": "Elongation (Perpanjangan)" menjadi "Strain (Regangan)" dan Y Axis dari Force (Gaya) menjadi Stress (Tegangan)



Klik ikon print preview  pada menu grafik sehingga muncul dialog box PDF lalu klik ikon  untuk menyimpan grafik "Tegangan vs Regangan" dalam menu PDF (diberi nama file sesuai selera).

## ii. Testometric M500.25CT: Uji Tekan (Compression)

1. Ukur "diameter" dan "tinggi" spesimen uji lalu pasang di titik tengah kedua piringan penekan
2. Masuk ke software Testometric dengan mengklik ikon



3. Geser piringan penekan atas ke bawah sampai posisi benda kerja terjepit di antara kedua piringan penekan dengan mengklik panah bawah kemudian menghentikan dengan mengklik tombol merah bulat setelah spesimen uji di posisi tepat



4. Setelah benda kerja terpasang, klik ikon untuk masuk ke menu opsi pengujian



5. Selanjutnya muncul menu



6. Klik "Test Definitions" pilih "Create", muncul menu:



7. Isikan nama file pengujian yang akan dilakukan, misal "tehan test" lalu OK dan akan muncul dialog box

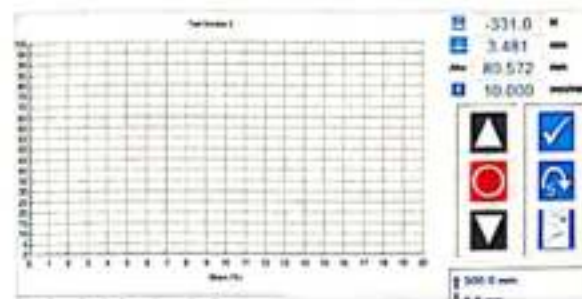



8. Pada "Test Parameters" tentukan test type "Compression" untuk uji tekan. Sampel Type "circular" untuk sampel bulat. Selanjutnya masukkan tinggi sampel di "Sample Height" dan "diameter"

9. Pada "Calculations" pilih secara berturut-turut untuk setiap kolom:
- Kolom 1 "Force Yield"; h. Kolom 11 "Stress Peak";
  - Kolom 2 "Force Peak"; i. Kolom 9 "Stress Break";
  - Kolom 3 "Force Break"; j. Kolom 10 "Strain Yield";
  - Kolom 4 "Deflection Yield"; k. Kolom 11 "Strain Peak";
  - Kolom 5 "Deflection Peak"; l. Kolom 11 "Strain Peak";
  - Kolom 6 "Deflection Break" m. Kolom 13 "Young Modulus"
  - Kolom 7 "Stress Yield";

10. Pada "Tester Setup"
- Pilih load cell untuk 2500kgf (pada default masih tertulis 500kgf)
  - Menu "test speed" default tertulis 100 mm/mnt diganti jadi 2 mm/mnt



11. Setelah semua selesai baru klik "OK" lalu klik ikon "New" lalu pilih file pengujian lalu "OK" selanjutnya akan muncul dialog box untuk memulai pengujian, klik tombol "start test" selanjutnya akan muncul dialog box berikut:

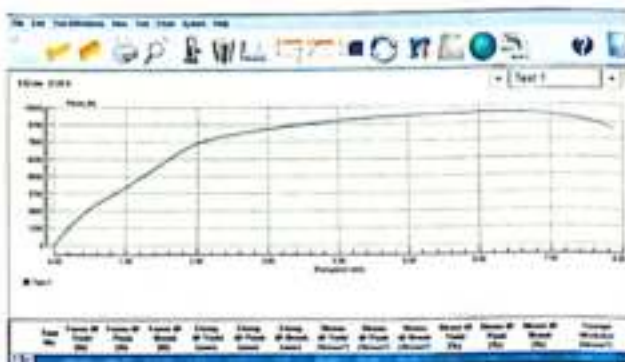




Klik kedua ikon  untuk mereset nilai beban dan perpanjangan kembali ke angka "0"




12. Selanjutnya klik ikon  untuk memulai pengujian tekan. Alat dihentikan dengan menekan ikon  pada saat spesimen uji sudah mengalami perpendekan setengah dari tinggi semula.



13. Klik ikon  yang menunjukkan bahwa pengujian selesai, kemudian klik ikon  untuk masuk menu preview grafik, sehingga muncul dialog box:



Klik ikon print preview  pada menu grafik sehingga muncul dialog box PDF lalu klik ikon  untuk menyimpan grafik "Gaya vs Perpendekan" dalam menu PDF (diberi nama file sesuai selera).

14. Klik ikon  untuk mengubah setting grafik dari "X Axis": "Deflection (Perpendekan)" menjadi "Strain (Regangan)" dan Y Axis dari Force (Gaya) menjadi Stress (Tegangan)



Klik kembali ikon print preview  pada menu grafik sehingga muncul dialog box PDF lalu klik ikon  untuk menyimpan grafik "Tegangan vs Regangan" dalam menu PDF (diberi nama file sesuai selera).

C. **Testometric M500.25CT: Uji Bending (3 Point Flexural)**

1. Ukur "lebar" dan "tebal" spesimen uji lalu pasang di tengah, di antara kedua dukungan spesimen
2. Masuk ke software Testometric dengan mengklik ikon



3. Geser batang penekan atas ke bawah sampai posisi benda kerja terjepit di antara kedua batang penekan dengan mengklik panah bawah kemudian menghentikan dengan mengklik tombol merah bulat setelah spesimen uji di posisi tepat



4. Setelah benda kerja terpasang, klik ikon untuk masuk ke menu opsi pengujian



5. Selanjutnya muncul menu




6. Klik "Test Definitions" pilih "Create", muncul menu:

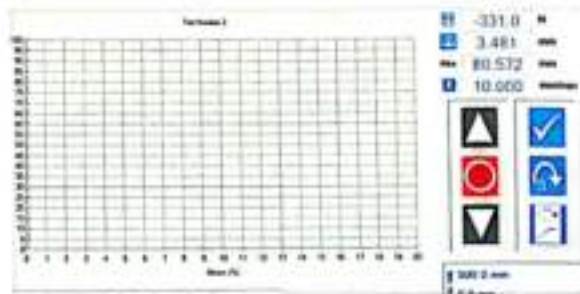



7. Isikan nama file pengujian yang akan dilakukan, misal "bending test" lalu OK dan akan muncul dialog box






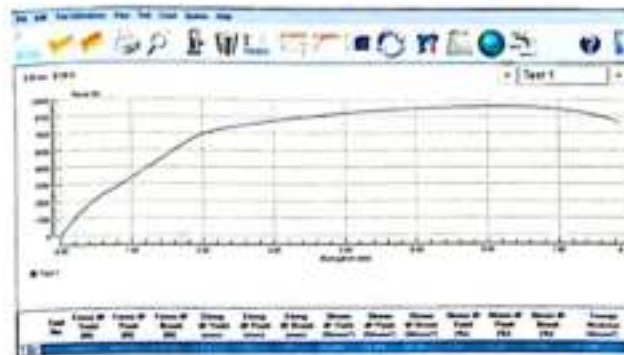
8. Pada "Test Parameters" tentukan test type "3 Point Flexural" untuk uji bending. Sampel Type "rectangular" untuk sampel plat persegi. Selanjutnya masukkan panjang sampel di "Span = 90 mm, Lebar spesimen di "Width" dan tebal spesimen "thick"



9. Pada "Calculations" pilih secara berturut-turut untuk setiap kolom:
  - a. Kolom 1 "Force Yield"; g. Kolom 7 "Stress Yield";
  - b. Kolom 2 "Force Peak"; h. Kolom 8 "Stress Peak";
  - c. Kolom 3 "Force Break"; i. Kolom 9 "Stress Break";
  - d. Kolom 4 "Deflection Yield"; j. Kolom 10 "Strain Yield";
  - e. Kolom 5 "Deflection Peak"; k. Kolom 11 "Strain Peak";
  - f. Kolom 6 "Deflection Break"; l. Kolom 12 "Strain Break";
10. Pada "Tester Setup"
  - a. Pilih load cell untuk 2500kgf (pada default masih tertulis 500kgf)
  - b. Menu "test speed" default tertulis 100 mm/mnt diganti jadi 5 mm/mnt
11. Setelah semua selesai baru klik "OK" lalu klik ikon "New"  lalu pilih file pengujian lalu "OK" selanjutnya akan muncul dialog box untuk memulai pengujian, klik tombol "start test" selanjutnya akan muncul dialog box berikut:




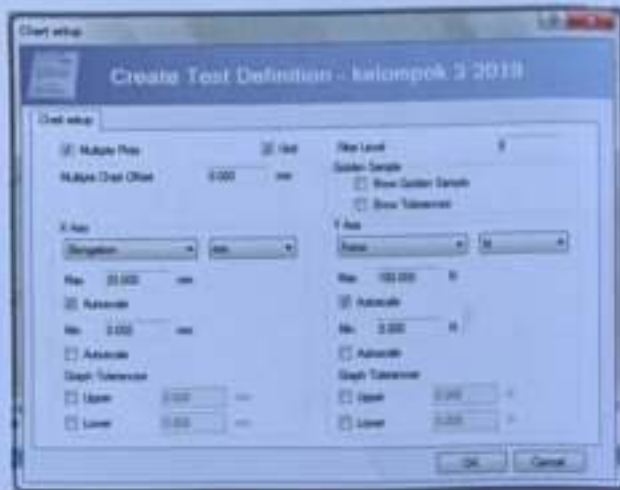
Klik kedua ikon  untuk mereset nilai bahan dan perpanjangan kembali ke angka "0"



12. Selanjutnya klik ikon  untuk memulai pengujian bending. Alat akan berhenti secara otomatis pada saat spesimen uji sudah putus.
13. Klik ikon  yang menunjukkan bahwa pengujian selesai, kemudian klik ikon  untuk masuk menu preview grafik, sehingga muncul dialog box:



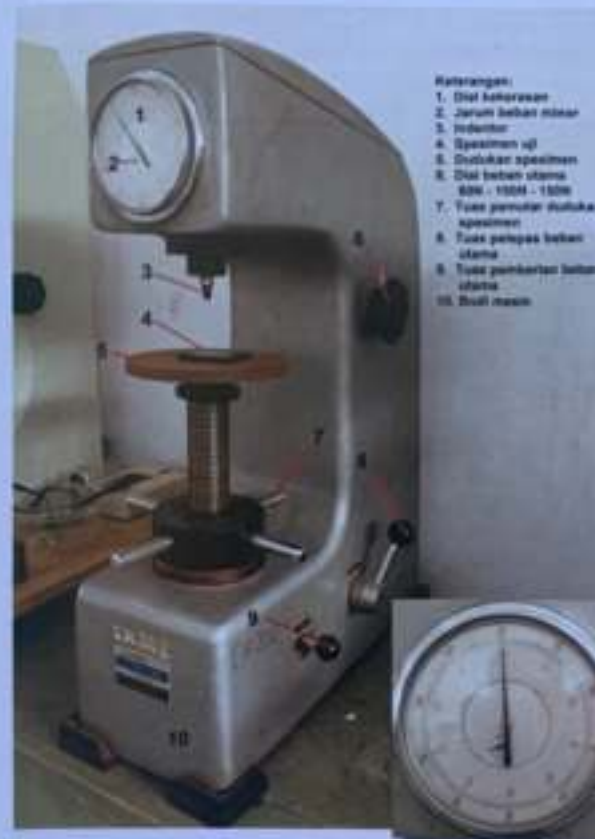
Klik ikon print preview  pada menu grafik sehingga muncul box PDF lalu klik ikon  untuk menyimpan grafik "Gaya vs Perpendekan" dalam menu PDF (diberi nama file sesuai selera).

14. Klik ikon  untuk mengubah setting grafik dari "X Axis": "Deflection (Perpendahan)" menjadi "Strain (Regangan)" dan Y Axis dari Force (Gaya) menjadi Stress (Tegangan)



Klik kembali ikon print preview  pada menu grafik sehingga muncul dialog box PDF lalu klik ikon  untuk menyimpan grafik "Tegangan vs Regangan" dalam menu PDF (diberi nama file sesuai selera).

- p. 200 HRS-150/HR 150A Uji Kekerasan Rockwell



#### PROSEDUR PENGUJIAN KEKERASAN ROCKWELL

1. Siapkan mesin uji dengan menentukan indektor dan bahan utama sesuai bahan yang akan diuji (indektor bola baja dengan beban utama 100N (HRB: Skala lingkaran dalam berwarna merah) untuk baja biasa dan indektor kerucut intan dengan beban utama 150N untuk baja yang telah diberi perlakuan panas (HRC: Skala lingkaran luar berwarna hitam). Pada gambar, indektor [3] dan pemilihan beban utama dilakukan dengan memutar dial [6].
2. Letakkan spesimen uji [4] yang telah diratakan dan dibersihkan permukaannya pada dudukan spesimen [5].
3. Sentuhkan permukaan spesimen uji ke ujung indektor sampai selesai pembebanan minor [2] yang ditunjukkan dengan putaran jarum pada dial kekerasan sebanyak 3 putaran dan jarum penunjuk berada pada titik merah, dengan cara memutar tuas dudukan spesimen [7] ke kanan.
4. Putar dial kekerasan [1] sampai posisi jarum utama menunjukkan angka (0) nol.
5. Berikan beban utama dengan menarik tuas pembebanan [9] ke depan sesuai arah panah pada mesin uji. Tuas [8] akan berputar ke depan sampai berhenti dan tahan sekitar 15 detik agar deformasi akibat penekanan indektor pada spesimen uji sudah permanen.
6. Putar kembali tuas [8] ke belakang untuk melepaskan beban utama kemudian baca nilai kekerasan bahan yang ditunjukkan oleh jarum panjang pada dial [1].
7. Lepaskan spesimen uji [4] dari indektor [3] dengan memutar tuas beban [7] ke kiri.
8. Ulangi langkah 3 sampai 7 dengan menggeser spesimen minimal 2 mm dari titik penekanan sebelumnya untuk mengukur nilai kekerasan yang lain.

#### E. Digital Microhardness Tester: Uji Kekerasan Microvickers

1. Nyalakan mesin uji Microvickers dengan menekan **switch** pada body bagian belakang
2. Pasang spesimen uji pada landasan dengan posisi lensa mikroskop pengamatan seperti pada gambar 1



Gambar 1.

Gambar 2.

Gambar 3.

3. Amati gambar pada lensa pengamatan sambil memutar roda pada body mesin (gambar 2) sampai diperoleh gambar yang fokus
4. Setelah gambar fokus, putar pemegang lensa mikroskop "ke kanan" sampai terdengar bunyi "klik" sehingga indektor intan berada di atas benda kerja, seperti terlihat pada gambar 3
5. Tekan tombol "Start" untuk memulai pengujian, lampu indikator akan menyala berkedip secara bergantian mulai dari LOADING - DWELL - UNLOADING, dan akan terdengar bunyi alarm setelah pembebanan selesai



Gambar 4.

6. Putar kembali indenter intan "ke kiri" sampai terdengar bunyi "klik" sehingga pemegang lensa mikroskop berada di atas benda kerja, seperti tampak pada gambar 5
7. Lakukan pengukuran diameter bekas penekanan indenter piramida intan (**Diameter Vertikal dan Diameter Horizontal**) dengan mengamati lensa pada gambar 6 dan mengikuti prosedur pengukuran seperti pada gambar



Gambar 5.



Gambar 7.



Gambar bekas penekanan

- B. Untuk merekam hasil pengukuran diameter bekas penekanan indenter piramida intan baik vertikal maupun horizontal, tekan tombol yang ditunjukkan panah berwarna biru pada gambar 7



Gambar 7.

9. Cara mengukur diameter bekas penekanan indenter intan baik pada posisi vertikal maupun horizontal dijelaskan pada gambar 8. Pengamatan posisi vertikal dan horizontal dilakukan dengan memutar posisi lensa pengamatan pada gambar 7 pada posisi vertikal maupun horizontal
  - a. Pengukuran diameter bekas penekanan indenter intan pada posisi horizontal



- b. Pengukuran diameter bekas penekanan indenter intan pada posisi vertikal



**F. Uji Impak Metode Charpy**

1. Pasang spesimen uji dengan cara meletakkannya pada landasan uji impak dengan posisi takikan membelakangi bandul pemukul (Gambar 1).



Gambar 1.

2. Angkat bandul pemukul sampai pada posisi maksimal dan terdengar bunyi "klik" yang menandakan bandul pemukul telah tertunci pada posisinya (Gambar 2).



Gambar 2.



Gambar 3.



Gambar 4.

3. Putar jarum penunjuk harga impak pada posisi harga impak maksimal, yakni pada posisi jarum penunjuk sebelah kanan skala pembaca harga impak (Gambar 3).

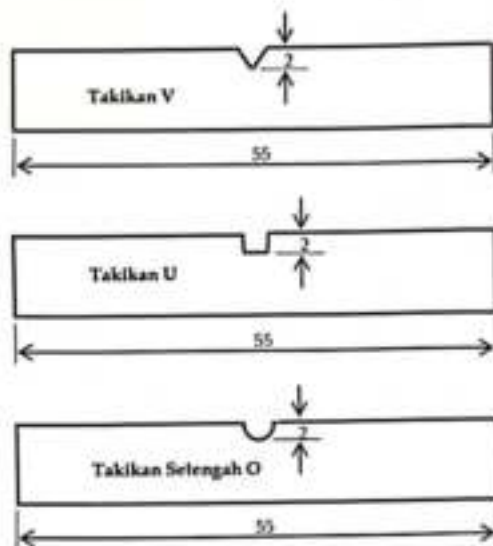


Gambar 5.

4. Lepaskan bandul pemukul dari penguncinya dengan cara mengungkit tuas pengunci dengan menekan batang pengungkit ke bawah, sehingga bandul terayun ke bawah dan menambuk spesimen uji (Gambar 4).

5. Baca nilai Harga Impact spesimen uji pada skala pembaca harga impact sesuai jenis bandul yang digunakan. Skala 0 J - 250 J untuk **BANDUL KECIL** dan Skala 0 J - 500 J untuk **BANDUL BESAR**)

**SPECIMEN UJI IMPACT METODE CHAPPY**



**G. Axio Vision Release 4.8.2: Uji Mikrostruktur.**

1. Letakkan spesimen yang akan diamati struktur mikroanya pada mikroskop dan berikan pencahayaan secukupnya. Amati gambar pada mikroskop dengan mengatur posisi ketinggian lensa pengamatan sampai diperoleh gambar permukaan spesimen yang jelas.
2. Nyalakan PC untuk pengamatan mikrostruktur kemudian jalankan aplikasi Axio Vision rel. 4.8 dengan mengklik ikon pada monitor PC, sampai muncul tampilan aplikasi pada monitor PC.





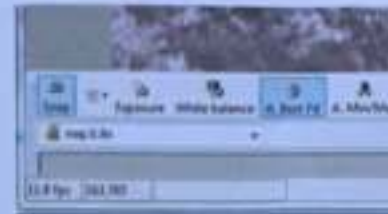
3. Selanjutnya akan muncul tampilan seperti pada gambar.



4. Klik ikon "live" untuk menampilkan gambar permukaan.



5. Klik ikon snap pada sudut kiri bawah menu "live" untuk menyimpan gambar permukaan specimen.



6. Tampilan pada permukaan specimen selanjutnya dapat dilakukan pengukuran diameter butir struktur mikronya dengan mengklik ikon "length".



7. Untuk mengukur luasan permukaan butir struktur mikro dapat dilakukan dengan mengklik ikon "outline".



8. Sudut kristal butir struktur mikro dapat ditentukan dengan mengklik ikon "angle".

